



Considerazioni tecniche ed economiche sullo stato della tecnologia del minieolico e sul suo sviluppo in Italia

C. Casale, S. Viani, G.A. Zanetta

Contratto	Accordo di programma 2009÷2011 con il Ministero dello Sviluppo Economico per le attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale. Piano Annuale di realizzazione 2011.
Titolo	Considerazioni tecniche ed economiche sullo stato della tecnologia del minieolico e sul suo sviluppo in Italia
Progetto	Studi sui potenziali sviluppi delle energie rinnovabili.
Linea di Ricerca	Aspetti tecnologici ed ambientali della fonte eolica.
Deliverable	10
Sintesi	Il rapporto effettua considerazioni sulla tecnologia minieolica con valutazioni sull'energia producibile da un impianto minieolico, fornisce indicazioni sulla penetrazione del minieolico in Italia, riferisce su un impianto da 3 kW installato presso RSE, riporta risultati di monitoraggi condotti su alcuni sistemi minieolici di diversa potenza e tecnologia, fornisce indicazioni sui costi degli impianti eolici e ne effettua stime di redditività.

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta di RSE.

N. pagine	91	N. pagine fuori testo	0
Data	31/03/2012		
Elaborato	Casale Claudio Andrea (SSG), Viani Silvano (SSG), Zanetta Gian Antonio (SSG) <small>12000406 436439 AUT 12000406 436722 AUT 12000406 436732 AUT</small>		
Verificato	Bossi Claudio Luciano (SSG) <small>12000406 436437 VER</small>		
Approvato	Mazzocchi Luigi (SSG), Negri Antonio Nicola (ASV) <small>12000406 436596 APP 12000406 436621 APP</small>		

Ricerca sul Sistema Energetico – RSE S.p.A.

Società con unico socio soggetta alla direzione ed al coordinamento di GSE S.p.A.
Sede Legale - 20134 Milano - Via R. Rubattino, 54
Tel. +39 023992.1 - Fax +39 023992.5370 - PEC rse@legalmail.it
Reg. Imprese di Milano, P.IVA e C.F. 05058230961
R.E.A. di Milano n. 1793295
Cap. Soc. € 1.100.000 i.v.



Indice

SOMMARIO	3
SUMMARY	4
RIASSUNTO ESTESO	5
1 INTRODUZIONE	9
2 CONSIDERAZIONI SULLA TECNOLOGIA MINIEOLICA	11
2.1 Componenti principali di un impianto minieolico.....	11
2.2 Principali tipi di miniaerogeneratori.....	12
2.2.1 Miniaerogeneratori ad asse orizzontale.....	12
2.2.2 Miniaerogeneratori ad asse verticale.....	14
2.3 Strutture di sostegno dei miniaerogeneratori.....	16
2.4 Potenza producibile da un impianto minieolico.....	18
2.5 Valutazione delle caratteristiche del vento.....	22
2.6 Energia elettrica producibile da un impianto minieolico.....	25
3 PANORAMICA SULLA PENETRAZIONE DEL MINIEOLICO IN ITALIA	30
3.1 Evoluzione della potenza installata in Italia.....	30
3.2 L'offerta di sistemi minieolici sul mercato italiano.....	34
4 IMPIANTO MINIEOLICO DA 3 kW INSTALLATO NELLA SEDE RSE DI MILANO	39
4.1 Generalità.....	39
4.2 Caratteristiche dell'impianto.....	40
4.3 Modalità di realizzazione dell'impianto.....	42
5 IMPIANTI MINIEOLICI MONITORATI	45
5.1 Sistemi di monitoraggio per impianti minieolici.....	45
5.2 Impianto da 2 kW a Cesenatico (FC).....	48
5.2.1 Descrizione dell'impianto.....	48
5.2.2 Dati di esercizio dell'impianto.....	51
5.3 Impianto da 10 kW a Favara (AG).....	57
5.3.1 Descrizione dell'impianto.....	57
5.4 Impianto da 10 kW a Bresciadega, Comune di Novate Mezzola, Val Codera (SO).....	60
5.4.1 Descrizione dell'impianto.....	60
5.4.2 Dati di esercizio dell'impianto.....	67
5.5 Impianto da 55 kW a Castellina Marittima (PI).....	72
5.5.1 Descrizione dell'impianto.....	72
5.5.2 Dati di esercizio dell'impianto.....	75
6 CONSIDERAZIONI ECONOMICHE SUGLI IMPIANTI MINIEOLICI	80
7 CONCLUSIONI	87
RIFERIMENTI	89

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	31/03/2012	12000406	Prima emissione

SOMMARIO

Esistono in Italia delle forme interessanti di incentivazione per gli impianti minieolici con potenza tra 1 e 200 kW collegati in rete (tariffa onnicomprensiva di 300 €/MWh per tutta l'energia elettrica immessa in rete, possibilità di utilizzare la Procedura Abilitativa Semplificata per potenze installate inferiori a 60 kW estendibili a livello regionale fino a 1 MW), che ne dovrebbero favorire lo sviluppo.

Per fornire importanti elementi a eventuali investitori o Enti interessati, nel presente rapporto vengono riportate considerazioni tecniche ed economiche sullo stato della tecnologia del minieolico e sul suo sviluppo in Italia. A tale proposito viene innanzitutto effettuata una panoramica sugli impianti minieolici descrivendone i principali componenti, i tipi dei miniaerogeneratori (ad asse orizzontale, ad asse verticale), le tipologie dei pali (o torri) di sostegno, i più usuali sistemi di controllo della potenza. Vengono quindi effettuate valutazioni e considerazioni sulla potenza e sull'energia elettrica producibile da un impianto minieolico in funzione delle caratteristiche del vento, che vengono descritte e definite con dettaglio.

Sono poi forniti dati sui sistemi minieolici presenti e in progetto sul territorio italiano, reperiti da fonte GSE. Questi sistemi negli ultimi anni hanno avuto un incremento notevole (dalla metà del 2008 alla fine del 2010 la potenza installata è mediamente raddoppiata ogni anno), pur su entità globali ancora modeste. Vengono anche elencati i fornitori di miniaerogeneratori, sistemi o impianti minieolici chiavi in mano individuati in Italia.

Per fornire informazioni su come realizzare un impianto minieolico, viene descritto in particolare l'iter seguito per installare un sistema minieolico da 3 kW nell'area RSE a Milano adibita alla sperimentazione di sistemi a energia rinnovabile.

Un successivo capitolo riporta risultati di monitoraggi eseguiti su impianti minieolici di diversa potenza e tecnologia per valutarne le prestazioni e per raccogliere elementi sul loro funzionamento; si tratta d'informazioni di notevole interesse in quanto la tecnologia minieolica è in una fase di sviluppo sotto vari aspetti ancora iniziale e presenta prodotti alquanto diversificati. Per tale attività sono stati impiegati sistemi, definiti da RSE e di proprietà della stessa società, che sono composti prevalentemente da sensori per la misura del vento (installati su apposite torri anemometriche) e della potenza generata dall'impianto, oltre che da centraline per la memorizzazione e l'analisi preliminare dei dati e la successiva trasmissione via GSM alla sede RSE. Gli impianti monitorati sono:

- un impianto da 2 kW a Cesenatico (FC) con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 10 kW a Favara (AG) con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 10 kW a Bresciadega, Comune di Novate Mezzola, Val Codera (SO), ambiente montano con severe condizioni climatiche, con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 55 kW a Castellina Marittima (PI) con un aerogeneratore bipala.

Sono infine fornite indicazioni sui costi degli impianti minieolici e vengono effettuate stime di redditività di alcuni impianti specifici, descrivendo dettagliatamente le modalità applicate e riportando risultati ottenuti con diversi costi d'impianto, tipologie d'investitore e condizioni di ventosità.

SUMMARY

Some interesting provisions for promoting small, grid-connected wind plants between 1 kW and 200 kW capacity are currently in force in Italy (a comprehensive feed-in tariff of 300 €/MWh for the whole energy fed to the grid, along with the possibility to follow a simplified permitting procedure for installed plant capacities below 60 kW, a threshold that can be raised by the Region involved up to 1 MW), which should favour their development.

To provide possible investors or interested Agencies with the most important information, this report deals with technical and economic aspects of the state-of-the art and deployment of small wind plants in Italy. For this purpose, an overview is first presented of the characteristics of small wind plants, describing their main components, the typical configurations of small wind turbines (horizontal-axis, vertical-axis machines), the types of support tower, the power control systems that are most commonly implemented. Evaluations and considerations are then made on the electric power and energy that can be produced by a small wind plant as a function of the characteristics of wind, which are described and defined in detail as well.

Information is then provided on the small wind systems already on line or planned in Italy, drawing on data from GSE. These systems have had a noteworthy growth in the last few years (from mid-2008 to the end of 2010, their installed capacity has, on average, doubled every year), even though their overall capacity is still rather low. The turn-key suppliers of small wind turbines or systems that can be found in Italy are also listed.

To give advice on how to set up a small wind plant, a description is, in particular, reported of the procedure followed to install a 3-kW small wind system in an area at the RSE premises in Milan that is devoted to the testing of renewable energy systems.

Another chapter summarizes the results obtained from the monitoring of small wind plants of various capacities and technologies to assess their power performance and gather information on their functioning at large; all these results are of considerable interest, as small wind system technology is still, under various aspects, at an initial stage of development and features quite differing products. For this activity, systems devised by RSE itself, and belonging to the same company, have been employed, which are composed mostly of wind measuring sensors (fitted on top of suitable wind masts) and output power sensors, as well as units for recording, storing and preliminary processing of measured data and subsequent transmission of them via GSM to the RSE headquarters. The following plants have been monitored:

- a 2-kW plant at Cesenatico (FC) in Romagna, with a three-bladed wind turbine;
- a 10-kW plant at Favara (AG) in Sicily, with a three-bladed wind turbine;
- a 10-kW plant at Bresciadega, in the Commune of Novate Mezzola, Val Codera (SO), Lombardy, in a mountain environment under harsh climatic conditions, with a three-bladed wind turbine;
- a 55-kW plant at Castellina Marittima (PI) in Tuscany, with a two-bladed wind turbine.

Lastly, some indications are given on the costs of small wind systems, together with estimates of the profitability of some specific plants; in reporting on the latter, the methodology applied is described in detail, and the results obtained for different plant costs, investors and wind conditions are provided.

RIASSUNTO ESTESO

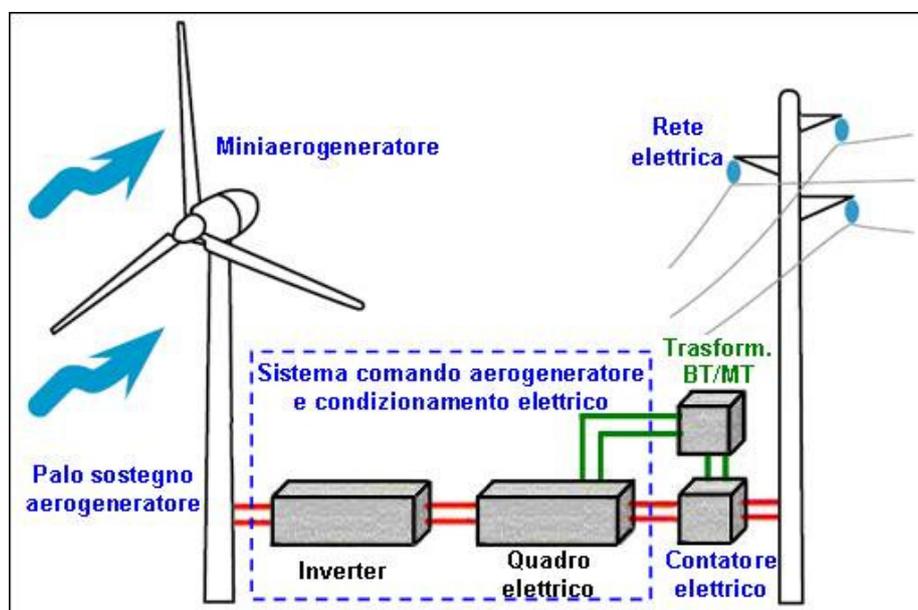
Le attività descritte in questo rapporto costituiscono la prosecuzione di quelle effettuate sul tema del minieolico negli anni precedenti, che sono state a suo tempo descritte nei seguenti rapporti:

- “Gli impianti minieolici in Italia: macchine, quadro normativo, valutazioni tecnico-economiche”, Rapporto ERSE 10000252, 28/02/2010;
- “Indagini sperimentali su sistemi minieolici”, Rapporto RSE 10000359, 31/03/2011.

In Italia sono previste incentivazioni specifiche per gli impianti eolici collegati alla rete elettrica con potenza nominale compresa tra 1 e 200 kW, comprendenti in particolare una tariffa onnicomprensiva di 300 €/MWh per tutta l'energia elettrica immessa in rete, e la possibilità di evitare il procedimento di autorizzazione unica presso la Regione competente utilizzando invece la Procedura Abilitativa Semplificata (PAS) per potenze inferiori a 60 kW (limite estendibile a livello regionale fino a 1 MW).

Di conseguenza solo queste taglie d'impianti vengono qui considerate come appartenenti al settore minieolico e trattate in questo rapporto. Nel campo indicato rientrano comunque sistemi dalle caratteristiche più diverse: si va da sistemi da pochi kilowatt con semplici componenti a sistemi da 100÷200 kW con caratteristiche tecniche ormai vicine a quelle degli aerogeneratori medi e grandi.

Un impianto minieolico connesso alla rete elettrica è fondamentalmente costituito da un miniaerogeneratore, che trasforma l'energia del vento in energia elettrica, dalla sua struttura di sostegno, da un sistema di comando e controllo, da un sistema di condizionamento dell'energia elettrica uscente dall'aerogeneratore, in modo che questa possa essere immessa in rete a frequenza e tensione appropriate (di norma comprendente un inverter) e, infine, da un contatore che misura l'energia ceduta alla rete. Per gli impianti di taglia maggiore, che vengono collegati alla media tensione, è necessario anche un trasformatore BT/MT.



Schema tipico di un impianto minieolico collegato alla rete.

Tra gli impianti minieolici di taglia più piccola, ne esistono alcuni che non vengono collegati alla rete elettrica; questi sono usualmente chiamati impianti a isola o “stand-alone” e sono destinati ad alimentare utenze non servite dalla rete. Alcuni costruttori di sistemi minieolici forniscono i loro prodotti sia nella versione da collegare alla rete che nella versione a isola. Gli impianti a isola non vengono però trattati in dettaglio in questo rapporto, in quanto rappresentano una minoranza delle applicazioni e non usufruiscono nemmeno delle tariffe incentivanti previste dalla legislazione vigente.

Nella prima parte del rapporto è fornita una panoramica sugli impianti minieolici, con descrizione dei loro principali componenti, i tipi di miniaerogeneratori (ad asse orizzontale, ad asse verticale), le tipologie dei pali (o torri) di sostegno, i più usuali sistemi di controllo. Vengono anche effettuate considerazioni sulla potenza e sull'energia elettrica producibile da un impianto minieolico in funzione delle caratteristiche del vento.

Riprendendo quanto già descritto con maggiore dettaglio nei rapporti precedenti, sono poi fornite informazioni aggiornate al 2011 sul mercato dei sistemi minieolici, in particolare sui produttori e i distributori di sistemi minieolici operanti in Italia. Si sono potuti censire complessivamente 90 diversi operatori. Tutte le classi di potenza delle turbine minieoliche sono coperte: anche per le macchine di maggior taglia (60÷200 kW) si sono contati 25÷30 modelli differenti. Si sono affacciati sul mercato anche alcuni costruttori italiani con progetti originali che si differenziano più o meno dall'offerta tradizionale per il disegno della turbina eolica o per i materiali utilizzati.

Per quanto riguarda le installazioni di impianti minieolici in Italia, gli impianti qualificati IAFR (condizione necessaria per fruire della tariffa onnicomprensiva o dei Certificati Verdi) sono passati da 23, per una potenza totale di 550 kW, a metà 2008, a 119, per una potenza installata di 3990 kW, a fine 2010, con un incremento percentualmente notevole, seppure a fronte di valori assoluti di potenza installata ancora modesti. Anche gli impianti IAFR in progetto a fine 2010 presentano una consistenza apprezzabile, essendo in numero di 146 per una potenza totale di 6458 kW.

Nel rapporto sono poi descritte esperienze dirette sulla realizzazione di un impianto minieolico, sulla base delle attività condotte da RSE per ottenere l'autorizzazione ed eseguire l'installazione di un sistema minieolico da 3 kW nell'area della sua sede di Milano. Presso questo impianto è stato naturalmente installato anche un sistema di monitoraggio per potere raccogliere, e riportare in prossimi rapporti, informazioni e dati su importanti aspetti delle installazioni minieoliche.



L'aerogeneratore Mistral con rotore tripala del diametro di 4 m facente parte dell'impianto minieolico da 3 kW installato da RSE presso la propria sede di Milano.

Un successivo capitolo riporta i primi risultati di monitoraggi avviati da RSE su altri impianti minieolici di diversa potenza e tecnologia, nell'ambito di collaborazioni con i rispettivi proprietari o costruttori. Si tratta d'informazioni di notevole interesse, in quanto la tecnologia minieolica è in una fase di sviluppo

sotto vari aspetti ancora iniziale e presenta prodotti alquanto diversificati. Per tale attività sono stati impiegati sistemi di monitoraggio definiti da RSE e comprendenti sensori per la misura del vento (installati su apposite torri anemometriche) e della potenza generata, oltre che centraline per la memorizzazione e l'analisi preliminare dei dati e la successiva trasmissione alla sede RSE. Gli impianti monitorati sono:

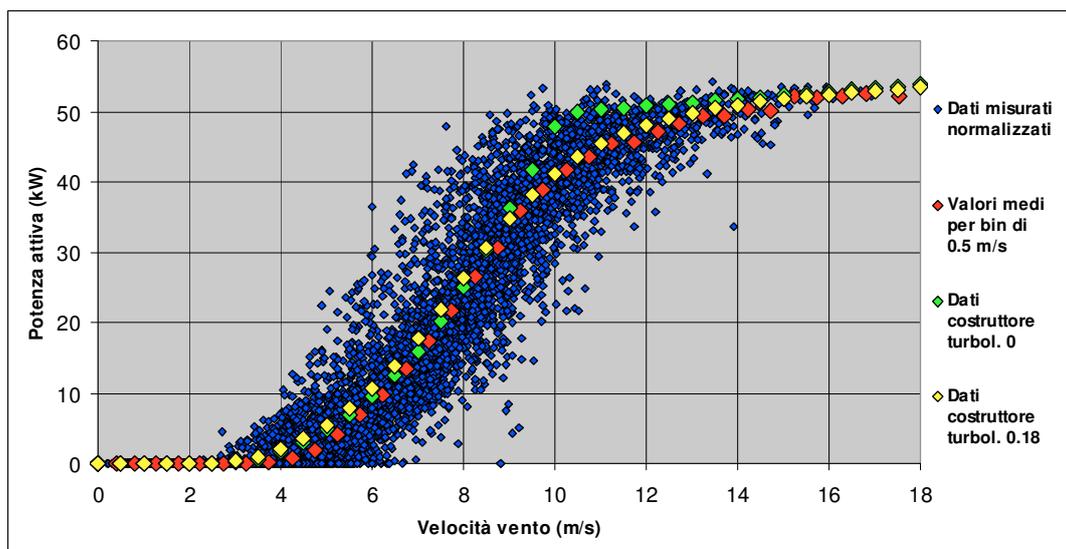
- un impianto da 2 kW a Cesenatico (FC) con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 10 kW a Favara (AG) con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 10 kW a Bresciadega, Comune di Novate Mezzola, Val Codera (SO), in un ambiente montano con severe condizioni climatiche, con un aerogeneratore tripala;
- un impianto da 55 kW a Castellina Marittima (PI) con un aerogeneratore bipala.

Il monitoraggio dell'impianto di Cesenatico ha evidenziato per ora prestazioni energetiche inferiori a quelle attese, fatto che si ipotizza possa essere imputato, perlomeno in parte, a un connubio non ottimale dell'aerogeneratore con l'inverter adottato. Per chiarire le cause, sarebbe comunque opportuno continuare il monitoraggio, acquisendo anche la potenza in uscita dal miniaerogeneratore (ossia quella in ingresso all'inverter) e sostituendo lo stesso inverter con un altro di caratteristiche diverse.

Sull'impianto installato a Favara è già stato installato il sistema di monitoraggio, ma al momento non sono stati ancora raccolti dati di funzionamento, essendo l'impianto rimasto fermo perché soggetto a interventi migliorativi dei dispositivi di sicurezza.

Il monitoraggio dell'impianto di Bresciadega, collegato a una piccola rete isolata in BT che alimenta un gruppetto di case insieme a un generatore fotovoltaico e a un gruppo elettrogeno con motore diesel, ha evidenziato prestazioni energetiche inferiori alle attese, anche a causa di danni subiti dall'inverter e probabilmente dovuti a sovratensioni prodotte da scariche elettriche atmosferiche. Per individuare tutte le cause delle ridotte prestazioni, è comunque necessario continuare il monitoraggio dell'impianto, acquisendo anche la potenza prodotta in uscita dal miniaerogeneratore.

Il monitoraggio dell'impianto di Castellina Marittima ha invece rilevato prestazioni energetiche in linea con quelle dichiarate dal costruttore e una disponibilità normalmente elevata. A parte un periodo con malfunzionamenti dei condensatori di rifasamento, anche la potenza reattiva ha avuto un andamento soddisfacente per un'ampia gamma di regimi di funzionamento.



Potenza attiva prodotta dall'impianto minieolico di Castellina Marittima in funzione della velocità del vento (curva di potenza). Sono rappresentati i singoli valori misurati, quelli medi su intervalli (bin) di 0,5 m/s calcolati dai dati di misura, e la curva di potenza indicata dal costruttore per due diverse intensità di turbolenza (0 e 0,18).

Nell'ultimo capitolo del rapporto sono state fornite indicazioni sui costi degli impianti minieolici e sul calcolo del costo unitario dell'energia elettrica da essi producibile. Sono stati effettuati, a titolo d'esempio, calcoli della redditività di alcuni investimenti nel minieolico, riportando risultati ottenuti con diversi costi d'impianto, tipologie d'investitore e condizioni di ventosità. In particolare, si è evidenziato che, per un privato (o un ente non commerciale), il costo medio dell'energia prodotta è, naturalmente in siti con sufficiente ventosità (almeno 5 m/s di velocità media annua), di norma inferiore ai valori della tariffa incentivante di 30 c€/kWh oggi disponibile in Italia. Per un'impresa, invece, l'effetto combinato delle tassazioni e degli oneri di restituzione del debito fa sì che il costo medio dell'energia possa risultare significativamente inferiore alla tariffa incentivante solo per costi d'impianto complessivi dell'ordine di 2700 €/kW e per un numero di ore/anno equivalenti di funzionamento a piena potenza non inferiore a 1800, ipotesi che si verificano soltanto qualora siano installati impianti minieolici delle taglie più grandi in siti con ventosità opportunamente elevata.

1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto è parte integrante della documentazione delle attività di Ricerca di Sistema previste dal “Piano Annuale di Realizzazione 2011” nell’ambito del progetto “Studi sui potenziali sviluppi delle energie rinnovabili” (Area “Aspetti tecnologici ed ambientali della fonte eolica”) e ne costituisce il Deliverable 10. In parallelo viene anche redatto il seguente Rapporto Aggiuntivo “Linee guida per la realizzazione d’impianti minieolici”, Rapporto RSE 12000820, 31/03/2011 [1].

Le attività descritte costituiscono la prosecuzione di quelle effettuate sul minieolico negli anni precedenti, riportate nei seguenti rapporti:

- “Gli impianti minieolici in Italia: macchine, quadro normativo, valutazioni tecnico-economiche”, Rapporto ERSE 10000252, 28/02/2010 [2];
- “Indagini sperimentali su sistemi minieolici”, Rapporto RSE 10000359, 31/03/2011 [3].

Nel mondo l’energia eolica si è sviluppata negli ultimi 20 anni ad un ritmo crescente, come documentano le statistiche delle agenzie internazionali o delle principali associazioni del settore (IEA, GWEC, EWEA, AWEA). I rilevanti incrementi di potenza installata sono stati accompagnati da un aumento della potenza nominale dei singoli aerogeneratori (da macchine con potenza di qualche centinaio di kilowatt si è passati a macchine con potenza fino a 5-6 MW) e da significativi progressi tecnologici, che hanno condotto a migliorare il rendimento complessivo degli impianti eolici.

L’energia eolica, che è una fonte pulita e inesauribile, può essere sfruttata anche da aerogeneratori di dimensioni e potenze assai più contenute, chiamati usualmente “miniaerogeneratori”, come sta già avvenendo con numeri di tutto rispetto in alcuni Paesi, come ad esempio Stati Uniti, Canada e Regno Unito. In Italia il settore “minieolico” sta registrando buoni tassi di crescita per quanto riguarda il numero degli impianti installati o in progetto; la potenza installata complessiva presenta tuttavia valori ancora modesti; vi è comunque un evidente incremento dei prodotti offerti e una significativa presenza di costruttori nazionali.

La Tab. 1.1 fornisce una classificazione di massima degli impianti minieolici in funzione della loro potenza nominale, delle loro caratteristiche geometriche e del tipo di applicazione. In Italia sono previste incentivazioni specifiche per gli impianti minieolici collegabili alla rete elettrica con potenza nominale compresa tra 1 e 200 kW; di conseguenza solo tali taglie d’impianti vengono trattate in questo rapporto. Nel campo indicato rientrano tuttavia sistemi dalle caratteristiche più diverse (si va da un sistema da pochi kilowatt con semplici componenti ad un sistema da 100÷200 kW con numerosi e complessi componenti, sofisticato quasi come un grande aerogeneratore), come descritto nel seguito.

Taglia	Potenza elettrica erogata a velocità nominale	Diametro rotore	Altezza palo	Applicazioni tipiche
XS	Qualche centinaio di watt	1 ÷ 2 m	2 ÷ 6 m	Imbarcazioni, camper, piccole utenze isolate
S	Da 1 kW a 6 kW	2 ÷ 5 m	6 ÷ 8 m	Abitazioni, strutture commerciali e PMI, installazioni a terra o su tetto anche in ambito urbano, utenze isolate o connesse alla rete elettrica
M	Oltre 6 kW fino a 60 kW	5 ÷ 18 m	8 ÷ 30 m	Agriturismi, camping, villaggi, strutture commerciali, aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e utenze connesse alla rete elettrica
L	Oltre 60 kW fino a 200 kW	18 ÷ 30 m	30 ÷ 60 m	Aziende Agricole e PMI, per installazioni a terra e utenze connesse alla rete elettrica

Tab. 1.1 - Classificazione di massima degli impianti minieolici in funzione della loro potenza nominale, delle loro caratteristiche geometriche e del tipo di applicazione ([4]).

Le incentivazioni specifiche per il minieolico in Italia sono state introdotte con la Legge 24 dicembre 2007, n. 244 (Finanziaria 2008) [5] e il successivo Decreto Ministeriale del 18 dicembre 2008 [6], che in particolare consentono ai titolari degli impianti eolici di potenza fra 1 kW e 200 kW di fruire di una interessante tariffa onnicomprensiva di 300 €/MWh per tutta l'energia immessa in rete. La stessa legge ha introdotto, inoltre, agevolazioni e semplificazioni nell'iter autorizzativo per gli impianti eolici con potenza inferiore a 60 kW (Denuncia di Inizio Attività, sostituita dalla legge n.122 del 30.7.2010 con la Segnalazione Certificata d'Inizio Attività). Il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011 [7] ha mantenuto tali agevolazioni e semplificazioni prevedendo una procedura analoga (Procedura Abilitativa Semplificata), che le Regioni e le Province Autonome possono estendere ad impianti eolici fino a 1 MW di potenza.

Informazioni sull'iter autorizzativo per gli impianti eolici sul territorio nazionale sono contenute nelle "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili", emesse con il Decreto Ministeriale del 10 settembre 2010" [8] e redatte "*considerato che la direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili individua vincolanti obiettivi nazionali generali per la quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia nel 2020 e l'obiettivo assegnato allo Stato italiano è pari al 17%*".

Per contribuire ad agevolare lo sviluppo del settore minieolico, nell'ambito delle attività previste per la Ricerca di Sistema nel triennio 2009÷2011, è stata prevista una ricerca finalizzata a fornire informazioni tecniche ed economiche sugli impianti minieolici che possano facilitare e guidare le scelte di possibili investitori in questo settore. In questo ambito si inseriscono le attività descritte nel presente rapporto e negli altri rapporti RSE innanzi citati.

In particolare, sono state condotte anche attività sperimentali di monitoraggio di alcuni impianti minieolici, operando con attrezzature di RSE attraverso un apposito gruppo di lavoro coordinato da Cataldo Rosito.

2 CONSIDERAZIONI SULLA TECNOLOGIA MINIEOLICA

2.1 Componenti principali di un impianto minieolico

Gli impianti minieolici, soprattutto quelli di taglia più grande, di norma sono collegati alla rete elettrica. Nel settore degli impianti minieolici più piccoli, ne esistono anche di non collegati alla rete elettrica, usualmente chiamati impianti a isola o “stand-alone”. Alcuni costruttori di sistemi minieolici piccoli li forniscono sia nella versione da collegare alla rete che nella versione a isola.

Gli impianti a isola (o stand-alone) non vengono trattati in dettaglio in questo rapporto, in quanto rappresentano applicazioni di ridotta importanza e non usufruiscono degli incentivi previsti dalla vigente legislazione. Possono costituire comunque un’interessante applicazione in zone rurali scarsamente servite dalla rete elettrica, in edifici in zone di montagna più o meno isolate, in piccole isole e in paesi in via di sviluppo. Per questo motivo spesso sono associati ad altre fonti energetiche (quali pannelli fotovoltaici e/o piccoli generatori con motori a combustione interna) oltre che a sistemi di accumulo a batteria.

Un impianto minieolico connesso alla rete elettrica, come rappresentato nella Fig. 2.1, è di solito fondamentalmente costituito da:

- un miniaerogeneratore - che può essere di vari tipi come descritto di seguito - che trasforma l’energia del vento in energia elettrica tramite la rotazione delle sue pale;
- una struttura di sostegno del miniaerogeneratore a una certa altezza rispetto al suolo (tipicamente un palo in ferro e la struttura in cemento armato di fondazione dello stesso) in modo da aumentarne la resa energetica e il livello di sicurezza;
- un sistema di comando e controllo del miniaerogeneratore e un sistema di condizionamento dell’energia elettrica da esso prodotta, in modo che questa possa essere immessa in rete;
- un contatore che misura l’energia elettrica immessa in rete.

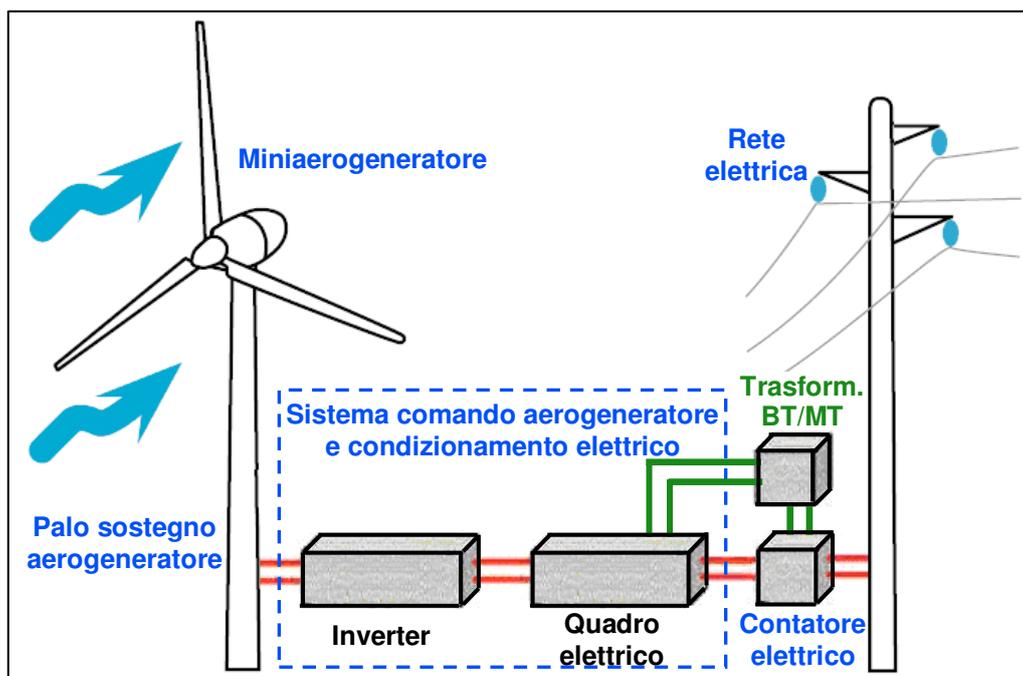


Fig. 2.1 – Schema tipico di un impianto minieolico collegato alla rete.

Quasi sempre, soprattutto nei miniaerogeneratori più piccoli, il generatore elettrico è direttamente collegato all'albero del rotore (tecnologia "direct drive"). Nei miniaerogeneratori più grandi a volte tra l'albero del rotore e il generatore elettrico è interposto un moltiplicatore ("gearbox").

In prossimità della base del palo di sostegno di un miniaerogeneratore è di solito disposto un quadro elettrico (o una cabina elettrica) che comanda e controlla il miniaerogeneratore e raccoglie la potenza elettrica prodotta dal sistema minieolico.

Gli impianti minieolici ad isola hanno miniaerogeneratori, e relativi sistemi di sostentamento, comando e regolazione, simili a quelli degli impianti collegati alle reti, ma ovviamente non presentano i dispositivi per il collegamento alla rete elettrica, che invece sono sostituiti da sistemi di accumulo a batteria, come già detto.

2.2 Principali tipi di miniaerogeneratori

Il componente principale di un impianto eolico è il miniaerogeneratore. I miniaerogeneratori vengono usualmente classificati, in base alla direzione dell'asse di rotazione delle loro pale, in:

- miniaerogeneratori ad asse orizzontale;
- miniaerogeneratori ad asse verticale.

L'insieme delle pale, del mozzo su cui queste sono fissate e dell'albero di trasmissione viene definito "rotore", indipendentemente dal fatto che l'aerogeneratore sia del tipo ad asse orizzontale o verticale.

I miniaerogeneratori ad asse orizzontale prevalgono di solito in applicazioni in ambito rurale, mentre quelli ad asse verticale vengono in genere preferiti per installazioni in aree urbane o sub-urbane (tetti, parchi, centri commerciali, ecc.).

2.2.1 Miniaerogeneratori ad asse orizzontale

Nella Fig. 2.2 vengono presentate, come esempio, alcune immagini di miniaerogeneratori ad asse orizzontale tratte prevalentemente da internet o da materiale pubblicitario. Questa tipologia di miniaerogeneratori è la più diffusa e presenta, nella grande maggioranza, un rotore costituito da tre pale, mentre è meno comune la tipologia con due pale; non mancano tuttavia modelli con più di tre pale. Sono presenti inoltre esempi con altre forme di rotore, come quelli rappresentati nella stessa Fig. 2.2.

Le pale sono solitamente realizzate in fibra di vetro. I componenti sono analoghi a quelli degli aerogeneratori di grande taglia, anche se i sistemi di controllo (avviamento, allineamento al vento, regolazione di potenza, disattivazione) in generale sono decisamente meno sofisticati, almeno negli aerogeneratori con potenza al di sotto dei 50 kW.

In base alla posizione del rotore rispetto al sostegno, i miniaerogeneratori ad asse orizzontale possono a loro volta essere ulteriormente suddivisi in:

- miniaerogeneratori ad asse orizzontale con rotore sopravento;
- miniaerogeneratori ad asse orizzontale con rotore sottovento.

I miniaerogeneratori con rotore sopravento più piccoli per allinearsi al vento di solito dispongono di un timone di coda. Nei miniaerogeneratori sopravento più grandi (con potenza in genere non inferiore a 10 kW) spesso l'allineamento avviene in modo attivo, con orientamento della navicella tramite motori che si impegnano su una ralla dentata disposta sulla sommità del palo che sostiene l'aerogeneratore.

I miniaerogeneratori con rotore sottovento quasi sempre si allineano spontaneamente al vento, ma hanno lo svantaggio che il vento impatta sul sostegno prima che sulle pale; ciò può in qualche misura ridurre il rendimento e, soprattutto, sollecitare maggiormente la pala a fatica e causare emissioni di rumore più fastidiose.

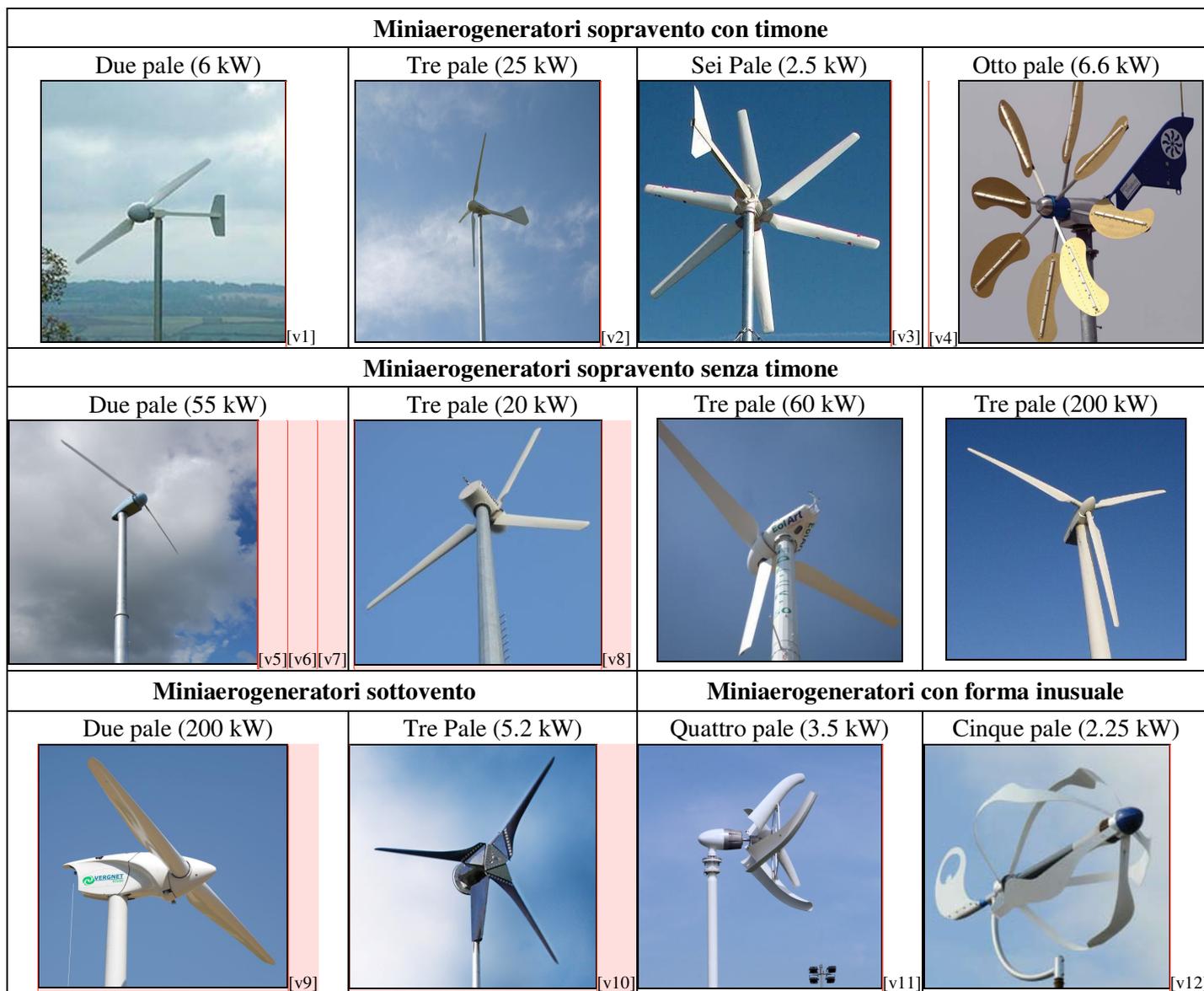


Fig. 2.2 – Esempi di miniaerogeneratori ad asse orizzontale.

Negli aerogeneratori vengono inseriti degli accorgimenti che controllano la potenza mantenendola entro un valore prefissato in sede progettuale anche ai venti più elevati, in modo da non produrre carichi eccessivi per gli stessi aerogeneratori o per il sistema di condizionamento dell'energia elettrica.

Nei miniaerogeneratori ad asse orizzontale il controllo della potenza ai venti più elevati può avvenire, come rappresentato schematicamente in parte anche nella Fig. 2.3, mediante:

- controllo del passo delle pale (“pitch control” in lingua inglese), mediante variazione dell'orientamento del profilo delle pale rispetto al piano di rotazione dal rotore, ottenuta con metodi sia passivi (molle e masse inerziali) sia attivi con servomeccanismi;
- disallineamento laterale (“furling”) dell'asse del rotore rispetto alla direzione del vento;
- disallineamento verticale (“tilting”) dell'asse del rotore rispetto alla direzione del vento;

- condizioni progressive di stallo aerodinamico indotte dal profilo delle pale all'aumentare del vento.

In alcuni sistemi minieolici, soprattutto delle taglie più piccole, vengono anche inserite delle resistenze elettriche, come visibile nella Fig. 2.3, a monte del sistema di condizionamento della potenza elettrica prodotta (spesso questo comprende un inverter), con la funzione di dissipare l'energia in uscita dall'aerogeneratore ai venti elevati quando questa eccede quella massima consentita in ingresso al sistema di condizionamento stesso.

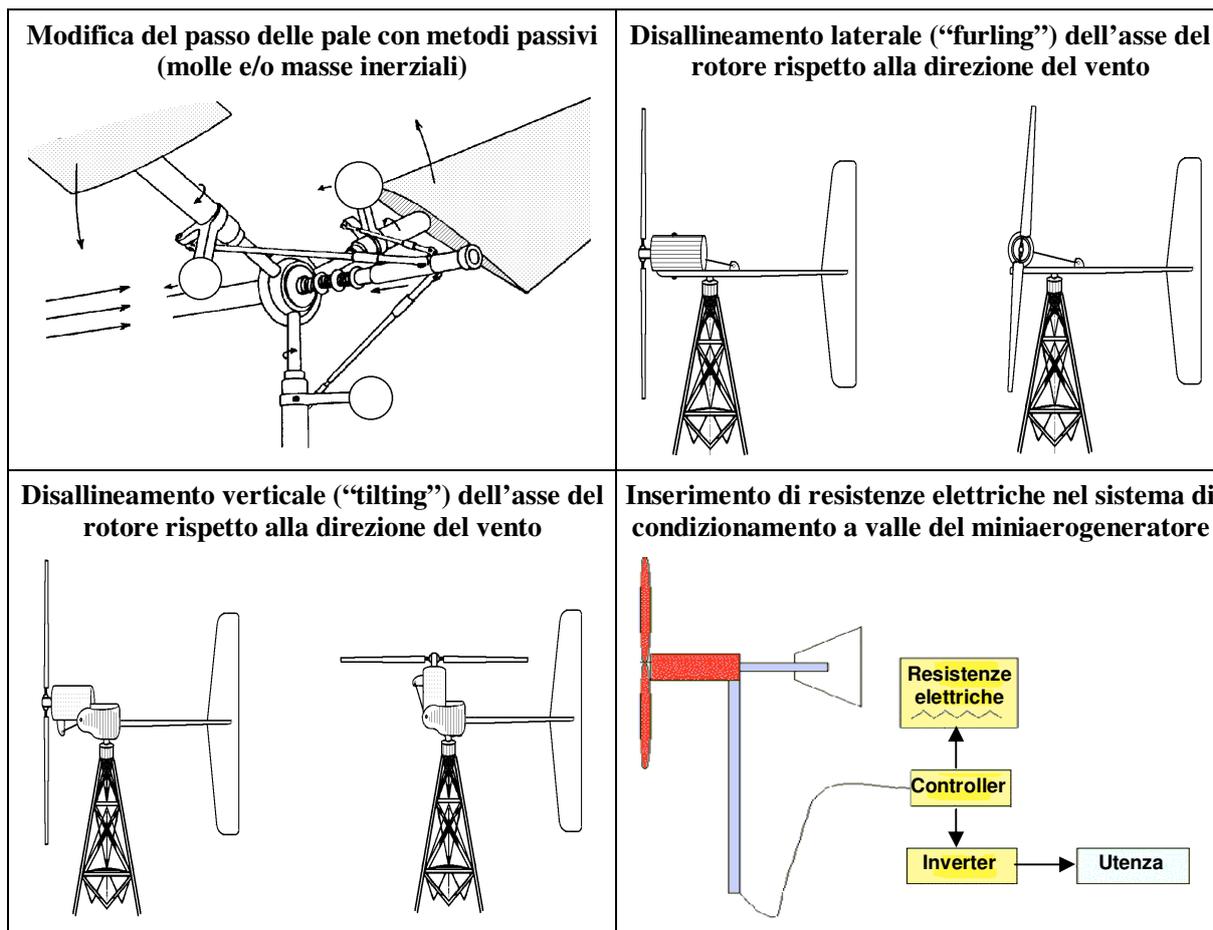


Fig. 2.3 – Accorgimenti per il controllo della potenza dei miniaerogeneratori ad asse orizzontale.

2.2.2 Miniaerogeneratori ad asse verticale

Nella Fig. 2.4 vengono presentate, come esempio, alcune immagini di miniaerogeneratori ad asse di rotazione orizzontale, tratte prevalentemente da internet o da materiale pubblicitario.

Questa tipologia di miniaerogeneratori è sempre stata, fino ad oggi, assai meno diffusa di quella ad asse orizzontale ed anche l'offerta sul mercato è ovviamente più ridotta.

La forma di questi miniaerogeneratori è alquanto diversificata, soprattutto per quanto riguarda le dimensioni e il numero, forma e disposizione delle pale. In particolare le pale sono di norma in numero compreso fra tre e cinque e possono essere rettilinee verticali, rettilinee inclinate, inclinate e curve, o anche di forme diverse dalle precedenti.

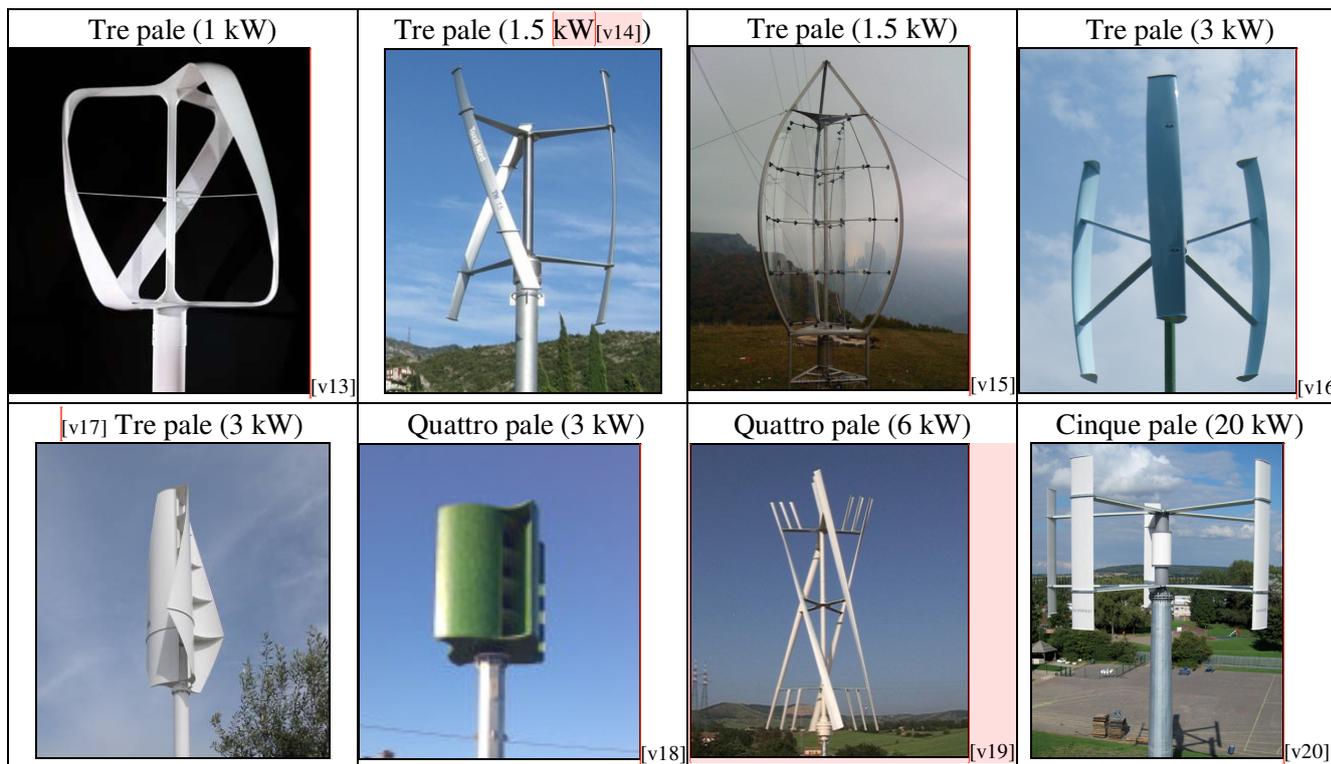


Fig. 2.4 – Esempi di miniaerogeneratori ad asse verticale.

I miniaerogeneratori ad asse verticale possono essere classificati, in funzione del principio che utilizzano per trasformare l'energia eolica in energia meccanica tramite la rotazione delle pale, in:

- miniaerogeneratori a resistenza (“drag”);
- miniaerogeneratori a portanza (“lift”).

I miniaerogeneratori indicati nell'anzidetta Fig. 2.4 sono in parte del tipo a resistenza ed in parte del tipo a portanza. Come indicato nella Fig. 2.5, i miniaerogeneratori a resistenza, come ad esempio le turbine eoliche Savonius dal nome di chi le ideò nel 1924, sono macchine ad asse verticale con pale che coprono l'intera area spazzata e sono conformate in modo tale da offrire alta resistenza (“drag”) sulla pala che si muove in direzione parallela e nello stesso verso del vento incidente, e resistenza ridotta sulla pala che si muove nel verso opposto.

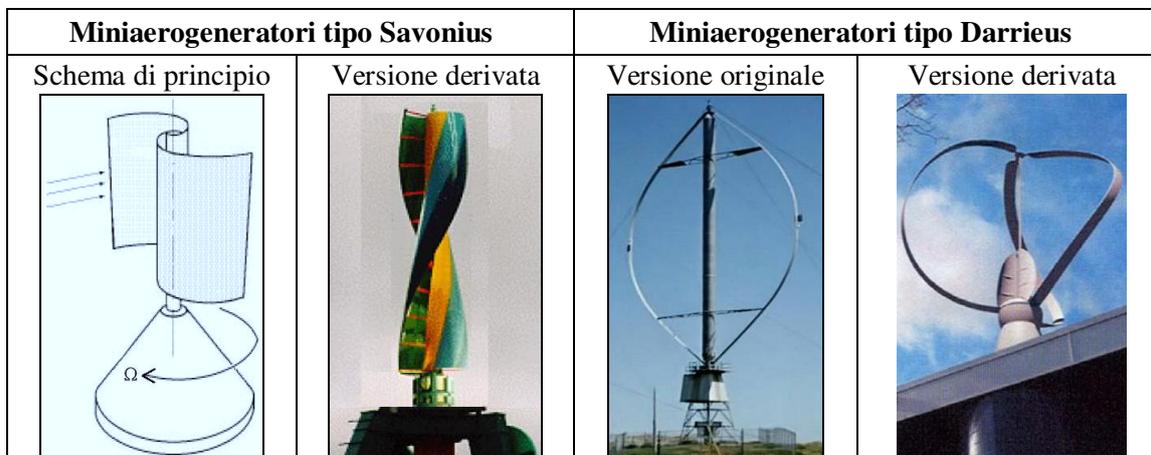


Fig. 2.5 – Miniaerogeneratori del tipo Savonius e del tipo Darrieus.

I miniaerogeneratori a portanza, come quelli del tipo Darrieus, hanno invece pale opportunamente sagomate a profilo aerodinamico che coprono solo una piccola percentuale dell'area spazzata, come avviene nelle macchine ad asse orizzontale e com'è rappresentato nell'anzidetta Fig. 2.5. In questi casi, le pale sono tenute in rotazione da una forza ("lift") normale al flusso del vento, di natura analoga a quella che sostiene l'ala di un aereo.

Nel progetto originale di Darrieus, il profilo della pala era costante su tutta la lunghezza, comportando riduzione di efficienza, maggior rumore e anche alte vibrazioni, a causa della differente distanza dall'asse di rotazione lungo l'altezza della pala, che generava velocità periferiche molto diverse e, quindi, angoli diversi di attacco del vento¹, con insorgenza di fenomeni di stallo in parti della pala. Nei nuovi progetti invece le pale sono realizzate con forme e profili diversi da quelli del progetto originale di Darrieus, in modo da superare gli handicap appena indicati.

In alcuni modelli di turbine a portanza l'avviamento del rotore da fermo non avviene spontaneamente, anche con vento utile a creare una coppia motrice, ma deve essere effettuato utilizzando una fonte di energia elettrica esterna, con il generatore che in questo caso funziona da motore.

Nei miniaerogeneratori ad asse verticale il controllo della potenza ai venti più elevati può avvenire, come rappresentato anche schematicamente in parte nella Fig. 2.6, mediante:

- condizioni progressive di stallo aerodinamico indotte dal profilo delle pale all'aumentare del vento;
- inserimento di resistenze elettriche a monte del sistema di condizionamento della potenza elettrica prodotta (che spesso comprende un inverter) per dissipare l'energia elettrica in eccesso prodotta dall'aerogeneratore con venti elevati;
- variazione del passo delle pale, oggi praticamente non usata, ma di qualche interesse in prospettiva.

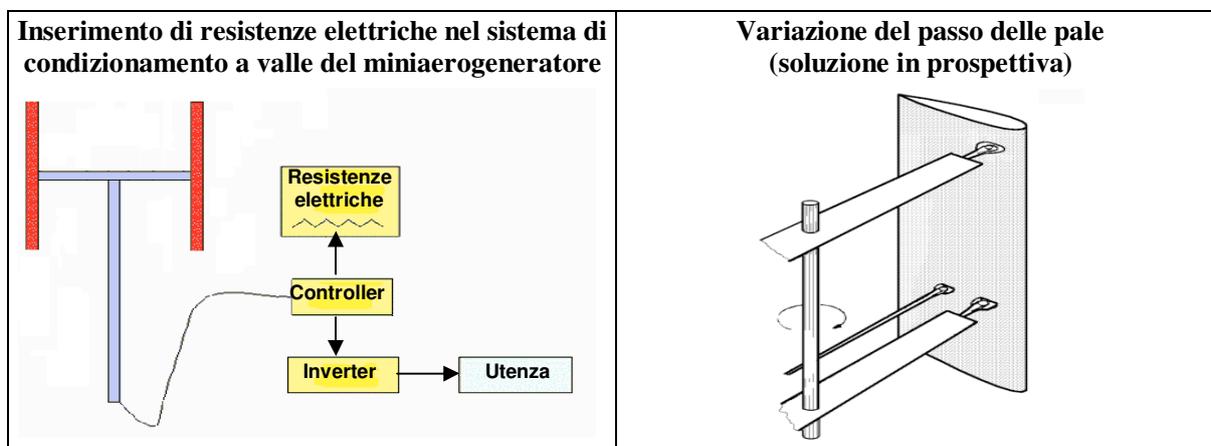


Fig. 2.6 – Accorgimenti per il controllo della potenza dei miniaerogeneratori ad asse verticale.

2.3 Strutture di sostegno dei miniaerogeneratori

Poiché la velocità del vento aumenta con la quota rispetto al terreno, ogni miniaerogeneratore viene installato su un palo di sostegno, che di norma è tanto più alto quanto maggiore è la taglia della macchina. La presenza del sostegno costituisce anche un elemento di sicurezza, in quanto pone le pale lontano dalle persone. In commercio esistono vari tipi di sostegno, spesso offerti in alternativa dal costruttore/distributore del sistema minieolico. Nella Fig. 2.7 sono rappresentate le tipologie di sostegni più significative, ricavate da materiale reperito da internet o da materiale pubblicitario.

¹ L'angolo di attacco del vento è definito come l'angolo formato dalla corda della pala con la direzione della velocità del vento relativa alla pala, ovvero con la velocità del vento vista da un osservatore solidale con la pala in rotazione.



Fig. 2.7 – Significative tipologie di pali di sostegno dei miniaerogeneratori.

Come rappresentato nella Fig. 2.7, le tipologie più significative dei pali di sostegno dei miniaerogeneratori sono:

- palo tubolare senza dispositivi per accedere alla navicella, assai diffuso con i miniaerogeneratori più piccoli;
- palo tubolare ribaltabile tramite un dispositivo idraulico, sovente fornito come optional per miniaerogeneratori piccoli o medio piccoli;
- palo tubolare con scala a pioli esterna per accedere alla navicella, utilizzato talvolta con miniaerogeneratori medio piccoli;

- palo tubolare con scala a pioli interna per accedere alla navicella, spesso impiegato con miniaerogeneratori grandi o medio grandi;
- palo tubolare strallato, spesso anche ribaltabile, non molto utilizzato in Italia;
- palo a traliccio con scala a pioli, poco usato in Italia e più diffuso all'estero.

È utile che la soluzione adottata per il palo di sostegno del miniaerogeneratore sia tale da consentire di effettuare la manutenzione dello stesso senza ricorrere all'impiego di piattaforme aeree, costose e non utilizzabili in presenza di condizioni atmosferiche avverse.

Per questo motivo appare particolarmente interessante la soluzione tubolare con scala a pioli interna, che però può essere impiegata solo con miniaerogeneratori grandi o medio grandi, dal momento che richiede diametri del palo almeno tali da consentire il passaggio di una persona.

2.4 Potenza producibile da un impianto minieolico

Analogamente a quanto avviene per gli aerogeneratori di tipo grande, i miniaerogeneratori trasformano l'energia cinetica del vento dapprima in energia meccanica disponibile su un albero mediante la rotazione delle loro pale. Da questa ottengono quindi energia elettrica tramite un generatore elettrico, azionato dall'albero del rotore direttamente o con l'interposizione di un moltiplicatore di giri.

In generale la potenza meccanica P_M prodotta all'albero del rotore di un aerogeneratore è esprimibile - supponendo in via semplificativa che il vento incida sullo stesso con velocità costante e uniforme - attraverso la seguente relazione:

$$P_M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2.1)$$

dove:

ρ densità dell'aria nel sito (1,225 kg/m³ al livello del mare con temperatura di 15 °C)

A area "spazzata" dal rotore

v velocità del vento incidente sulle pale dell'aerogeneratore

C_p coefficiente di potenza

In particolare, con riferimento alla Fig. 2.8, l'area A spazzata dal rotore vale:

$$A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \quad \text{per aerogeneratori con asse orizzontale: } \textit{monopala, bipala, tripala, multipala}$$

$$A = D \cdot h \quad \text{per aerogeneratori con asse verticale con pale rettilinee, come il tipo } \textit{Savonius}$$

$$A = \frac{2}{3} \cdot D \cdot h \quad \text{per aerogeneratori con asse verticale con profilo curvo come nel tipo } \textit{Darrieus}$$

dove D è il diametro del rotore e h è la lunghezza delle pale per i rotori ad asse verticale.

Il coefficiente di potenza C_p è un coefficiente adimensionale che dipende dalle caratteristiche costruttive dell'aerogeneratore, è funzione dei due parametri λ ed α , ed è inferiore a un limite teorico (legge di Betz) pari a 16/27, ossia:

$$C_p(\lambda, \alpha) \leq 0.5926 \quad (2.2)$$

Il primo parametro, chiamato *Tip Speed Ratio* e indicato con λ , rappresenta il rapporto tra la velocità periferica delle punte delle pale e la velocità del vento v , ossia:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v} \quad (2.3)$$

dove:

Ω velocità angolare del rotore

R raggio del rotore

Il secondo parametro è l'*angolo di calettamento o passo* delle pale, indicato solitamente col simbolo α ; esso è l'angolo tra la linea di corda del profilo in corrispondenza di una data sezione di riferimento di una pala e il piano perpendicolare all'asse di rotazione del rotore (piano rotorico). Per alcuni aerogeneratori, spesso delle taglie più piccole, questo angolo è fisso, mentre per altre macchine può essere variato in funzione della velocità del vento incidente, come descritto di seguito, per controllare la potenza prodotta.

Nella Fig. 2.8 sono rappresentati valori tipici del coefficiente di potenza C_p in funzione del tipo di aerogeneratore e dell'anzidetto parametro λ . Come si può osservare, gli aerogeneratori con rotore ad asse orizzontale (eccetto quelli multipala sul tipo della tradizionale aeropompa americana) presentano valori del coefficiente di potenza più elevati di quelli degli aerogeneratori con asse verticale, seppure in corrispondenza di maggiori valori del parametro λ e quindi, a pari vento, di valori più elevati della velocità periferica delle punte delle pale.

Il valore del coefficiente di potenza dipende anche dallo specifico profilo della pala e, come già detto sopra, anche dal passo α della stessa. Le informazioni riportate in questo grafico sono quindi da ritenersi orientative.

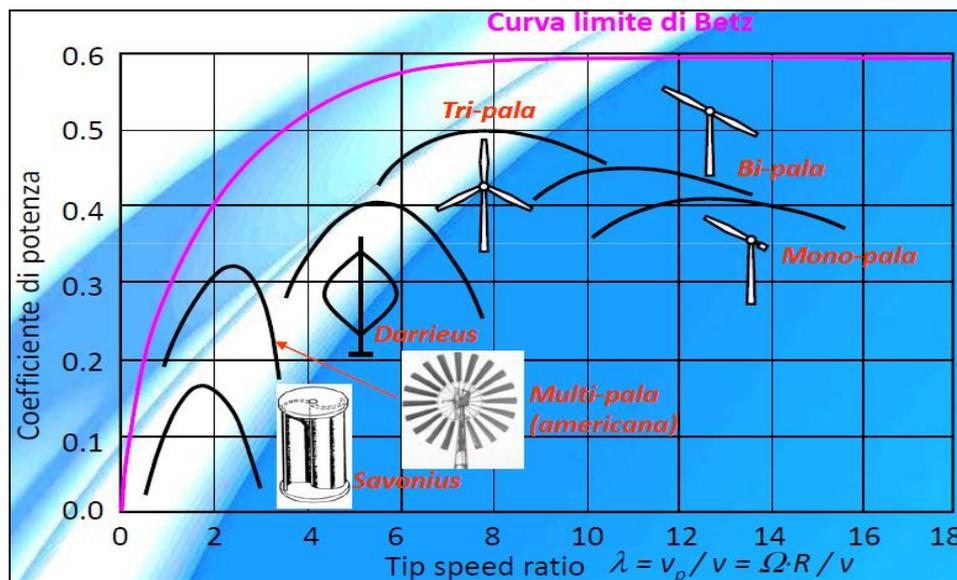


Fig. 2.8 – Coefficiente di potenza C_p in funzione del parametro λ (Tip Speed Ratio) per diversi tipi di aerogeneratore [9].

Nella Fig. 2.9 è riportato l'andamento tipico della curva della potenza meccanica di un aerogeneratore che, come si può osservare, presenta un tratto con potenza crescente, dove vale l'anzidetta relazione 2.1, e un tratto con potenza costante (assunta come potenza nominale della macchina), che viene imposto dal costruttore applicando accorgimenti tecnologici di vario tipo, come descritto in precedenza, in modo da non produrre carichi eccessivi per lo stesso aerogeneratore.

In generale un aerogeneratore inizia a produrre energia elettrica, anche se con valori estremamente ridotti come deducibile dalla relazione 2.1, a una velocità minima del vento, chiamata velocità di cut-in, pari a 3 m/s nel caso rappresentato e di norma compresa tra 2.5÷4 m/s. L'aerogeneratore termina di produrre energia elettrica quando la velocità del vento supera una velocità massima, chiamata velocità di cut-off, di norma attorno a 25 m/s. La minima velocità del vento alla quale l'aerogeneratore inizia a produrre con potenza costante (nominale) viene usualmente chiamata velocità nominale; essa è pari a

10,5 m/s nel caso rappresentato ed è in generale variabile, in funzione delle scelte costruttive adottate, da meno di 10 m/s fino a 15 m/s.

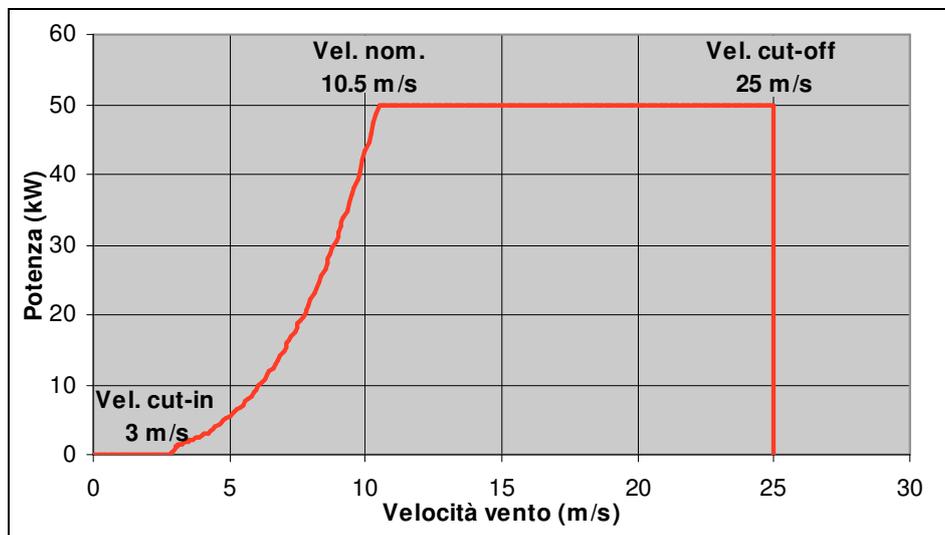


Fig. 2.9 – Andamento della curva della potenza meccanica di un aerogeneratore.

Utilizzando le anzidette relazioni 2.1 e 2.3 e i dati riportati nella Fig. 2.8 in corrispondenza dei valori massimi delle curve relative ai quattro tipi di aerogeneratore ad asse orizzontale (la tipologia più utilizzata), sono stati ricavati, a titolo d’esempio, i dati riportati nella Fig. 2.10, che forniscono indicazioni sul comportamento ottimale di tali tipi di aerogeneratore nella zona della curva di potenza con andamento crescente.

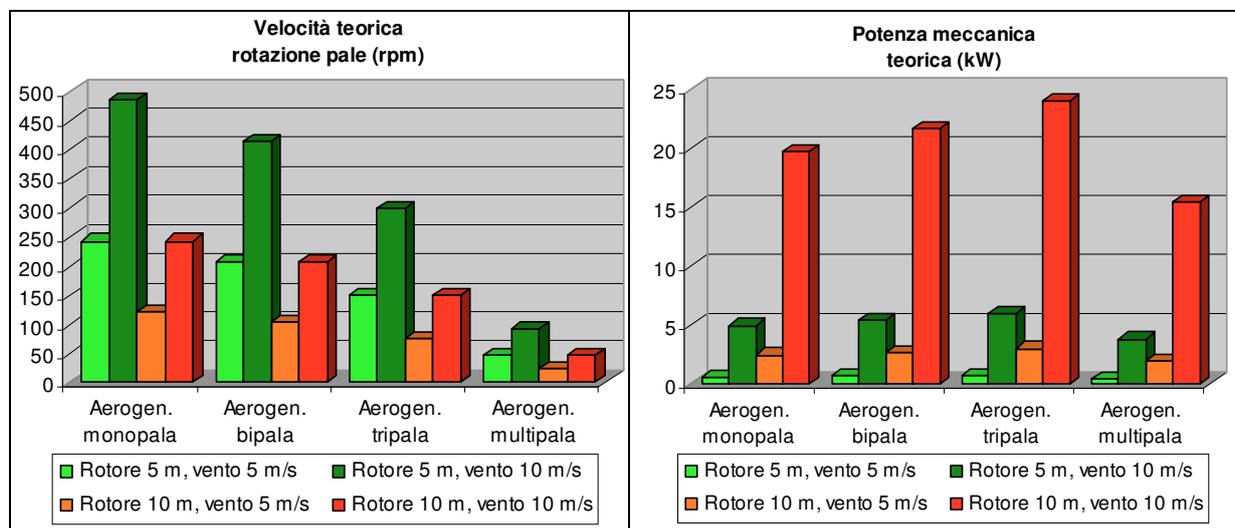


Fig. 2.10 – Comportamento ottimale di diversi tipi di aerogeneratore con asse di rotazione orizzontale.

Gli istogrammi della sopra citata figura indicano, in particolare, che nelle anzidette condizioni ottimali di funzionamento:

- la velocità angolare di rotazione della pale:
 - diminuisce all’aumentare del numero delle pale;
 - diminuisce all’aumentare del diametro del rotore;
 - cresce all’aumentare della velocità del vento.

- la potenza meccanica all'albero:
 - aumenta, anche se non in maniera notevole (come si potrebbe pensare), al passare da una a tre pale e poi diminuisce con numeri di pale più elevati;
 - varia in maniera proporzionale al quadrato al diametro del rotore;
 - varia in maniera proporzionale al cubo della velocità del vento.

Com'è deducibile dallo schema d'impianto minieolico rappresentato nella già citata Fig. 2.1, la potenza meccanica P_M prodotta da un miniaerogeneratore (come da qualsiasi aerogeneratore) deve poi essere convertita in elettrica dal generatore e quindi opportunamente condizionata in modo da avere tensione e frequenza appropriate per essere immessa in rete. Questi ulteriori passaggi ovviamente provocano una riduzione del rendimento complessivo della conversione da energia del vento ad energia elettrica utile, in altre parole, un abbassamento del valore del coefficiente di potenza C_P se riferito all'intero impianto. Il valore del C_P complessivo dipende sia dalle caratteristiche dell'aerogeneratore vero e proprio, sia dalle prestazioni del sistema interposto tra l'aerogeneratore e la rete elettrica.

In generale la curva della potenza elettrica P_R immessa in rete può essere espressa in funzione della velocità del vento v dalla seguente relazione:

$$P_R(v) = P_M(v) \cdot K_A(v) \cdot K_S(v) = P_M(v) \cdot K_G(v) = P_A(v) \cdot K_S(v) \quad (2.4)$$

dove:

$P_M(v)$ è la potenza meccanica prodotta dall'aerogeneratore

$P_A(v)$ è la potenza elettrica prodotta dall'aerogeneratore

$K_A(v) < 1$ è il fattore che rappresenta la perdita nel passaggio tra la potenza meccanica e la potenza elettrica prodotta dall'aerogeneratore

$K_S(v) < 1$ è il fattore che rappresenta la perdita di potenza tra l'aerogeneratore e la rete elettrica

$K_G(v) < 1$ è il fattore che rappresenta la perdita globale tra la potenza meccanica dell'aerogeneratore e la potenza elettrica immessa in rete

I valori degli anzidetti fattori dipendono da molti aspetti (tipo e taglia di aerogeneratore, sistema interposto tra l'aerogeneratore e la rete elettrica ecc.) e, per un determinato sistema, variano anche in funzione delle caratteristiche del vento incidente sull'aerogeneratore.

In definitiva, la curva che conta ai fini pratici è quella della potenza elettrica $P_R(v)$ immessa in rete, che influisce direttamente sul quantitativo, e quindi sulla remunerazione, dell'energia elettrica prodotta. Nella valutazione delle prestazioni di un sistema minieolico bisogna dunque verificare che dal suo fornitore sia messa a disposizione espressamente questa curva, che di norma viene determinata in condizioni standard a livello del mare.

Nel caso in cui venga fornita la curva della potenza meccanica $P_M(v)$, o quella della potenza elettrica prodotta dall'aerogeneratore $P_A(v)$, bisogna applicare i fattori riduttivi innanzi esposti. In particolare, la perdita nel passaggio tra la potenza meccanica e la potenza elettrica prodotta dall'aerogeneratore potrebbe essere a grandi linee dell'ordine del 10÷20% e quella nei dispositivi interposti tra l'aerogeneratore e la rete elettrica del 5÷10%.

Relativamente alla potenza fornita dall'impianto si fa anche osservare che i sistemi minieolici spesso presentano alcuni parametri di funzionamento da impostare in funzione delle caratteristiche del vento nel sito, operazione che deve essere effettuata con competenza in modo da ottimizzare le prestazioni dell'impianto e massimizzare quindi il quantitativo di energia elettrica immessa in rete.

Come indicato nella relazione 2.1, la potenza meccanica di un aerogeneratore (e quindi anche quella elettrica immessa in rete dall'impianto) dipende anche dalla densità dell'aria nel sito dove viene installato, che è funzione della pressione, temperatura e umidità dell'aria stessa. La Norma IEC 61400-12-1 [10] fornisce relazioni che indicano come tenere conto dell'influenza, sulla curva di potenza di un aerogeneratore, delle variazioni della pressione e della temperatura dell'aria rispetto a valori standard di

riferimento al livello del mare (1013,25 hPa e 15°C, corrispondenti a una densità dell'aria di 1,225 kg/m³).

Per ottenere una stima del valore medio annuo della densità dell'aria ρ (kg/m³) a una determinata quota h (m) sul livello del mare si possono utilizzare opportune formule empiriche, come la seguente²:

$$\rho = \rho_0 e^{-\left(\frac{h}{10262}\right)} \quad (2.5)$$

dove:

$$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3 \text{ in condizioni standard}$$

Un diverso approccio, valido per aria secca e variazioni di temperatura uniformi, è basato sulla stima della temperatura T , della pressione p e della densità ρ dell'aria tramite le seguenti relazioni:

$$T = T_0 - L * h \quad (2.6)$$

$$p = p_0 \left(1 - \frac{L * h}{T_0}\right)^{\frac{g * M}{R * L}} \quad (2.7)$$

$$\rho = \frac{p * M}{R * T} \quad (2.8)$$

dove:

$p_0 = 101325$ Pa è la pressione al livello del mare in condizioni standard

$T_0 = 288,15$ °K è la temperatura al livello del mare in condizioni standard

$g = 9,80665$ m/s è l'accelerazione di gravità

$L = 0,0065$ °K/m è il gradiente di temperatura con l'altezza

$R = 8,31447$ J/(mol*°K) è la costante universale dei gas

$M = 0,0289644$ kg/mol, è la massa molare dell'aria secca

La potenza prodotta dall'aerogeneratore varia apprezzabilmente con la quota d'installazione a causa della rarefazione dell'aria. Per esempio, a 1000 m di altitudine la densità dell'aria, calcolata con le relazioni 2.5 e 2.6÷2.8, risulta pari al 90,7% di quella in condizioni standard e, di conseguenza, la potenza prodotta dall'aerogeneratore diventa anch'essa pari al 90,7% di quella che sarebbe stata prodotta in condizioni standard.

2.5 Valutazione delle caratteristiche del vento

L'energia elettrica producibile da un impianto eolico dipende dalla ventosità presente nel sito d'installazione, che è opportuno venga determinata preventivamente tramite rilievi anemometrici in loco, soprattutto quando si prevede di installare impianti di taglia grande che comportano investimenti costosi. Per gli impianti minieolici, qualora il costo di una campagna di rilievi nel sito sia ritenuto eccessivo in rapporto all'entità dell'investimento, il regime ventoso può anche essere stimato a grandi linee basandosi su carte del vento generali, come ad esempio l'Atlante Eolico dell'Italia interattivo disponibile sul sito di RSE (<http://atlanteeolico.rse-web.it/viewer.htm>).

In questi casi di solito si fa riferimento alla distribuzione statistica delle velocità del vento durante l'anno definita con la funzione di densità di probabilità di Weibull:

$$f(v) = \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (2.9)$$

con

² Atmosfera standard ICAO (International Civil Aviation Organization)

$$C = \frac{V}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

dove:

v velocità del vento(m/s)

V velocità media annua del vento

C parametro di scala o velocità del vento caratteristica di Weibull

k parametro di forma di Weibull

Γ funzione Gamma di Eulero

Nel caso di impianti minieolici in Italia, la velocità media annua del vento V può essere ritenuta compresa tra 4 e 7 m/s, con i valori più probabili, per un sito scelto con sufficiente oculatezza, intorno ai 5 m/s, considerate le altezze dal suolo relativamente modeste cui sono posti i miniaerogeneratori. I valori tipici del parametro di forma k variano in funzione delle caratteristiche del sito e possono essere considerati compresi tra 1,4 e 2 per zone interne e con valori anche maggiori per zone costiere e piccole isole.

Nella Fig. 2.11 sono rappresentate, come esempio, una densità di probabilità della distribuzione del vento rilevata in un sito costiero, e la corrispondente curva teorica di Weibull che la rappresenta.

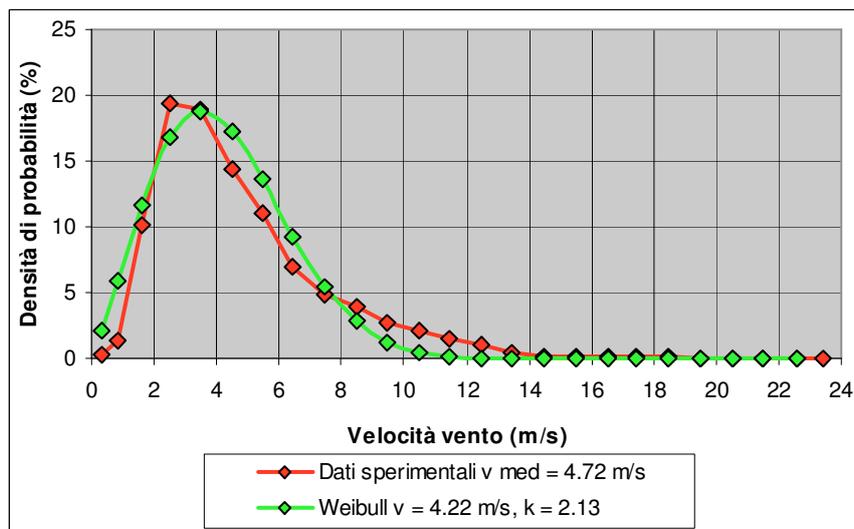


Fig. 2.11 – Curve della densità di probabilità della distribuzione delle velocità del vento durante l’anno in una zona costiera.

La velocità del vento deve essere valutata a un’altezza h dal suolo pari a quella del mozzo del rotore per gli aerogeneratori ad asse orizzontale, o a quella della mezzeria delle pale per gli aerogeneratori ad asse verticale. Nel caso in cui si disponga del valore della velocità del vento v_0 ad un’altezza h_0 diversa, si può calcolare la velocità del vento v attraverso relazioni che tengono conto della “rugosità” del terreno, come la seguente:

$$v_h = v_0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \tag{2.10}$$

dove α è un coefficiente dipendente dalla “rugosità” del terreno, che varia tipicamente da valori di 0,11÷0,12 per mare aperto o terreni pianeggianti e senza ostacoli, a valori di 0,22 per terreni accidentati, periferie urbane o zone boschive, fino a valori ancora più elevati per aree urbane con alti edifici

addossati gli uni agli altri. Un valore utilizzabile a grandi linee dove non siano meglio note le condizioni di installazione è pari a $0,143^3$.

Nella Fig. 2.12 sono illustrate, sempre come esempio, le curve delle densità di probabilità delle distribuzioni teoriche delle velocità del vento secondo il modello di Weibull determinate per quattro condizioni:

- velocità media annuale V pari a 4 m/s, parametro di forma k pari a 1,4.
- velocità media annuale V pari a 4 m/s, parametro di forma k pari a 2.
- velocità media annuale V pari a 6 m/s, parametro di forma k pari a 1,4.
- velocità media annuale V pari a 6 m/s, parametro di forma k pari a 2.

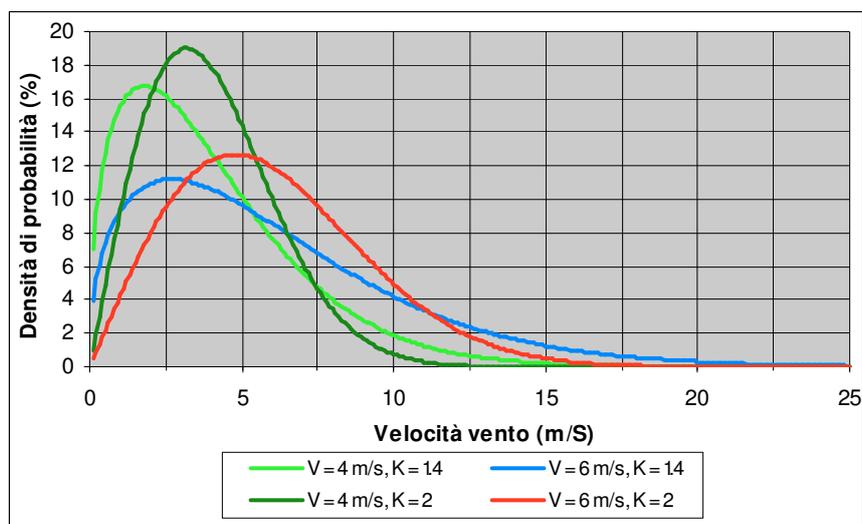


Fig. 2.12 –Curve delle densità di probabilità di quattro diverse distribuzioni delle velocità del vento durante l’anno secondo il modello di Weibull.

Le curve riportate nel precedente diagramma indicano che la distribuzione del vento dipende fortemente sia dalla sua velocità media V , sia dall’anzidetto parametro di forma k (il parametro di scala C viene determinato di conseguenza). In generale ogni curva presenta un andamento a campana dissimmetrico verso sinistra rispetto al valore medio. I valori di velocità corrispondenti ai massimi della densità di probabilità sono riportati nella Tab. 2.1.

Velocità media del vento	Parametro di forma k di Weibull	Dati in corrispondenza dei valori massimi delle curve di Weibull	
		Velocità del vento	Densità di probabilità
4 m/s	1,4	1,8 m/s	16,8 %
4 m/s	2,0	3,2 m/s	19,0 %
6 m/s	1,4	2,7 m/s	11,2 %
6 m/s	2,0	4,8 m/s	12,7 %

Tab. 2.1 - Valori in corrispondenza dei massimi delle curve di densità di probabilità di Weibull

³ Sito web: http://www.smallwindindustry.org/fileadmin/ewea_documents/documents/projects/swiis/technology/050406AEPTOOL.pdf

Osservando i dati riportati nelle precedenti Fig. 2.12 e Tab.2.1 si può notare che:

- le curve con le velocità medie del vento più basse presentano un andamento a campana più ristretto e raggiungono valori più elevati della densità di probabilità;
- la velocità del vento in corrispondenza del massimo di una curva, che è inferiore alla velocità media del vento, è tanto più bassa quanto minore è il parametro k di Weibull.

2.6 Energia elettrica producibile da un impianto minieolico

A partire dalle anzidette curve della distribuzione delle velocità del vento e, quindi, anche della potenza elettrica immessa in rete, si può calcolare l'energia elettrica $E_{P_{1m/s}}$ producibile annualmente dal sistema minieolico per velocità del vento comprese in un generico intervallo dell'ampiezza di 1 m/s attraverso la seguente relazione⁴:

$$E_{P_{1m/s}} = 8760 \cdot f(v_{1m/s}) \cdot P_R(v_{1m/s}) \cdot dis \quad (2.11)$$

dove:

8760 ore di un anno

$f(v_{1m/s})$ densità di probabilità della distribuzione del vento in un anno valutata in intervalli di 1 m/s

$P_R(v_{1m/s})$ curva della potenza elettrica immessa in rete valutata in intervalli di 1 m/s

dis disponibilità dell'impianto e della rete in cui si immette l'energia elettrica

Il valore della disponibilità dis è variabile, dipendendo dalla qualità dei componenti utilizzati e dal loro assemblaggio, dallo stato di manutenzione dell'impianto e dai tempi di intervento per riparare eventuali guasti, che potrebbero anche essere lunghi nel caso di sistemi minieolici con esigua struttura di manutenzione. Per identificare in breve tempo eventuali guasti, e quindi contribuire ad aumentare la disponibilità, è utile che l'impianto abbia un adeguato sistema di telecontrollo, soprattutto se è disposto lontano dall' esercente. Attualmente non si hanno dati di riferimento per gli impianti minieolici, ma, sulla base dei valori riportati in letteratura per gli impianti eolici con aerogeneratori più grandi e considerato che la tecnologia minieolica è in una fase meno matura, si ritiene ragionevole ipotizzare per tale parametro dis un valore di norma compreso tra 0,90 e 0,95 (90% e 95%).

Come esempio applicativo del procedimento esposto, sono stati effettuati calcoli della producibilità attesa da due impianti minieolici, con potenza massima (nominale) rispettivamente di 40 kW e 60 kW e con le curve di potenza elettrica $P_R(v)$ rappresentate nella Fig. 2.13, di cui si è ipotizzata l'installazione in un sito che abbia la distribuzione sperimentale del vento riportata nella già citata Fig. 2.11. In particolare, per meglio evidenziare come la potenza massima di un sistema minieolico non sia l'unico parametro di cui tener conto ai fini della producibilità dell'impianto, si è volutamente ipotizzato il sistema da 40 kW con velocità nominale apprezzabilmente inferiore a quella del sistema da 60 kW.

⁴ Nel caso, assai raro per il minieolico, di impianti formati da più aerogeneratori vicini tra di loro, bisogna considerare un altro fattore riduttivo che tenga conto della perdita di produzione, variabile in funzione della direzione del vento, che un aerogeneratore subisce quando si trova sottovento rispetto ad un altro (effetto scia).

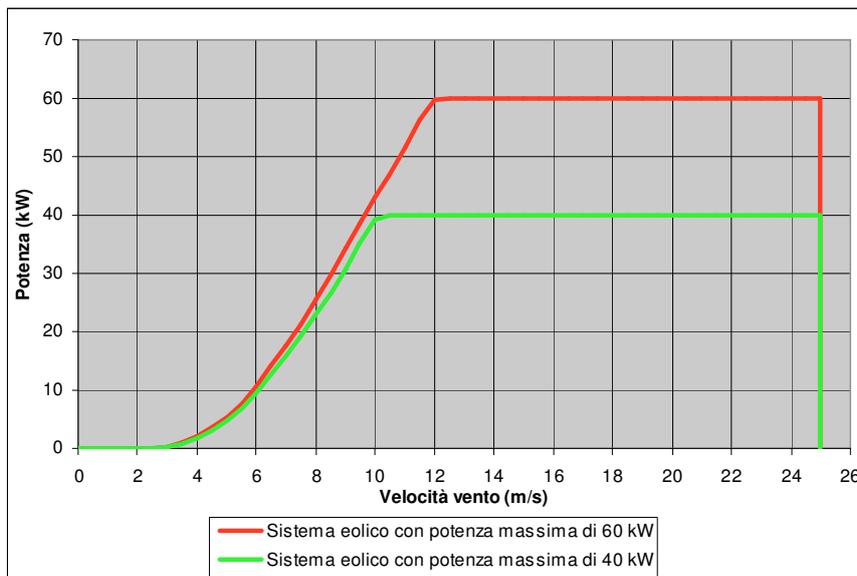


Fig. 2.13 – Curve di potenza ipotizzate per due impianti minieolici con potenza massima (nominale) rispettivamente di 40 kW e 60 kW.

Nella Fig. 2.14 sono riportate per i due sistemi le energie elettriche $E_{P_{1m/s}}$ producibili in un anno, per tutti i vari intervalli di velocità del vento di 1 m/s, ipotizzando una disponibilità dell'impianto e della rete del 100%.

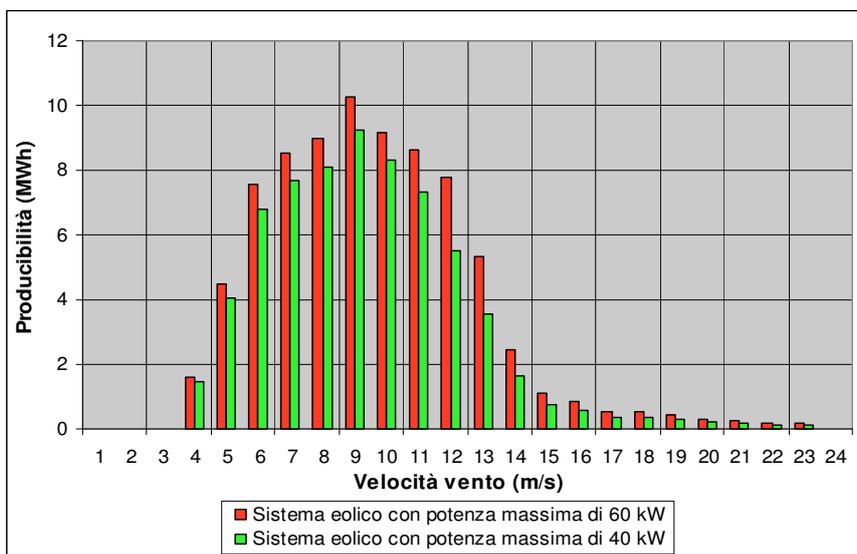


Fig. 2.14 - Energie elettriche $E_{P_{1m/s}}$ producibili, per i vari intervalli di velocità del vento di 1 m/s, con la distribuzione sperimentale del vento di Fig. 2.11 e le curve di potenza dei diagrammi precedenti.

Come si può osservare nel caso in esame, la producibilità elettrica in funzione della velocità del vento presenta un andamento all'incirca a campana, con i valori maggiori tra 6 e 12 m/s e con valori significativi tra 5 m/s e 13 m/s. Tale andamento, che si verifica assai spesso per quanto riguarda la forma, è conseguenza del connubio tra le caratteristiche del vento (che presenta maggiori contributi in termini di frequenza alle velocità più basse) e le prestazioni dei sistemi minieolici (che sono maggiori in termini di potenza con vento più elevato).

Il sistema minieolico con potenza maggiore presenta in genere, com'è ovvio attendersi, una maggiore producibilità a tutte le velocità del vento, la cui influenza assume però importanze diverse.

L'energia elettrica E_P immessa in rete in un anno da un sistema minieolico è la somma degli anzidetti contributi per i vari intervalli di velocità del vento, e risulta quindi determinabile attraverso la seguente relazione (con la sommatoria estesa a tutti gli intervalli delle velocità del vento presenti in sito)⁵:

$$E_P = 8760 \cdot \sum f(v_{1m/s}) \cdot P_R(v_{1m/s}) \cdot dis \quad (2.12)$$

dove:

8760 ore di un anno

$f(v_{1m/s})$ densità di probabilità della distribuzione del vento in un anno valutata in intervalli di 1 m/s (o eventualmente più ridotti, quali 0,1 m/s o 0,2 m/s ...)

$P_R(v_{1m/s})$ curva della potenza elettrica immessa in rete valutata in intervalli di 1 m/s (o eventualmente più ridotti) uguali a quelli precedenti

dis disponibilità dell'impianto e della rete in cui si immette l'energia elettrica

Nella Tab. 2.2 sono riportati i valori delle energie elettriche totali producibili, ottenuti sommando quelli degli istogrammi della Fig. 14, che a loro volta derivano dalla distribuzione sperimentale del vento rappresentata nella Fig. 2.11 e dalle curve di potenza dei sistemi minieolici indicate nella Fig. 2.13, e sono stati ricavati ipotizzando una disponibilità dell'impianto e della rete del 100 %. Nella stessa tabella sono riportate pure le ore equivalenti (annue) corrispondenti ai casi considerati, definite come rapporto tra l'energia producibile in un anno e la potenza massima (o nominale) dell'impianto.

Grandezza	Sistema minieolico da 40 kW	Sistema minieolico da 60 kW	Variazioni sistema da 60 kW rispetto a sistema da 40 kW
Potenza massima sistema (kW)	40	60	50,0%
Energia elettrica producibile (MWh)	66,6	79,2	18,9%
Ore equivalenti a piena potenza	1666	1320	-20,7%

Tab. 2.2 – Energia elettrica producibile e ore equivalenti dei due sistemi minieolici considerati.

I dati riportati nella tabella precedente indicano innanzitutto che, nel caso considerato, a fronte di un aumento della potenza nominale del 50%, la producibilità elettrica aumenta solo del 18,9%. Si osserva inoltre che il sistema da 40 kW presenta un numero di ore equivalenti più elevate di quelle del sistema da 60 kW. Questo risultato indica che il sistema da 40 kW utilizza meglio la distribuzione del vento nel particolare sito in questione e, quindi, tenuto conto del suo costo meno elevato, la sua installazione potrebbe anche risultare più vantaggiosa dal punto di vista economico.

Il procedimento descritto per il confronto tra i due impianti minieolici ipotizzati vale in generale, ma i risultati ottenuti sono conseguenti alle particolari ipotesi formulate e possono quindi variare, anche significativamente, con altre distribuzioni del vento e curve di potenza dei sistemi minieolici.

In considerazione del fatto che alcuni costruttori forniscono sistemi minieolici con lo stesso diametro del rotore dell'aerogeneratore (e quindi con uguali andamenti dei tratti ascendenti della curva di potenza), ma diversa potenza massima (nominale), sono state calcolate, sempre a titolo d'esempio e per effettuare interessanti osservazioni, le energie elettriche producibili da due ipotetici impianti con il medesimo rotore ma con potenza massima limitata, rispettivamente, a 20 kW e a 40 kW, come rappresentato dalle curve della Fig. 2.15, installati in siti con le condizioni di vento rappresentate nella già citata Fig. 2.12.

⁵ Nel caso di impianti formati da più aerogeneratori vicini tra di loro bisogna considerare un altro fattore riduttivo che tenga conto della perdita di produzione, in funzione della direzione del vento, che un aerogeneratore presenta quando si trova sottovento rispetto ad un altro (effetto scia).

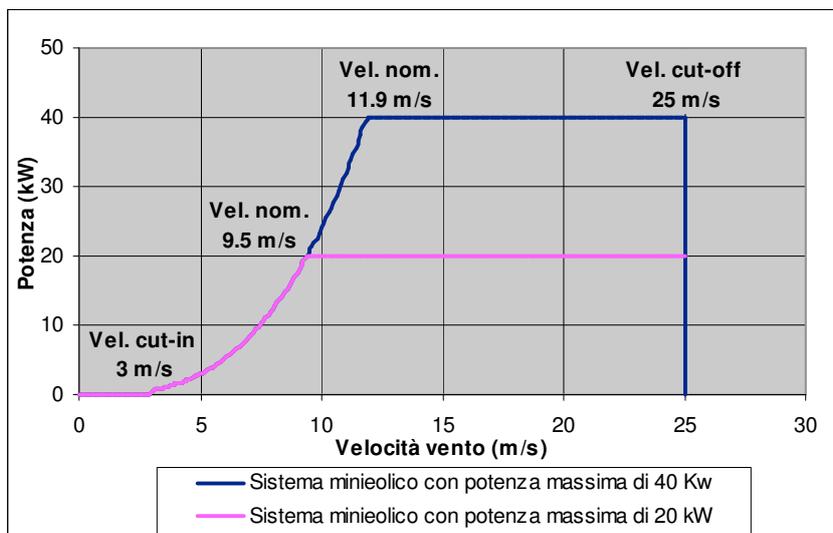


Fig. 2.15 – Curve di potenza dei due sistemi minieolici considerati, con uguali dimensioni del rotore ma con potenza massima rispettivamente di 20 kW e di 40 kW

I risultati ottenuti, ipotizzando una disponibilità dell’impianto e della rete del 100%, sono riportati nella Fig. 2.16, che in particolare permette di osservare il ruolo che giocano, nei casi esaminati, la velocità media ed il parametro di forma *k* del vento nel sito, e la potenza massima del sistema minieolico.

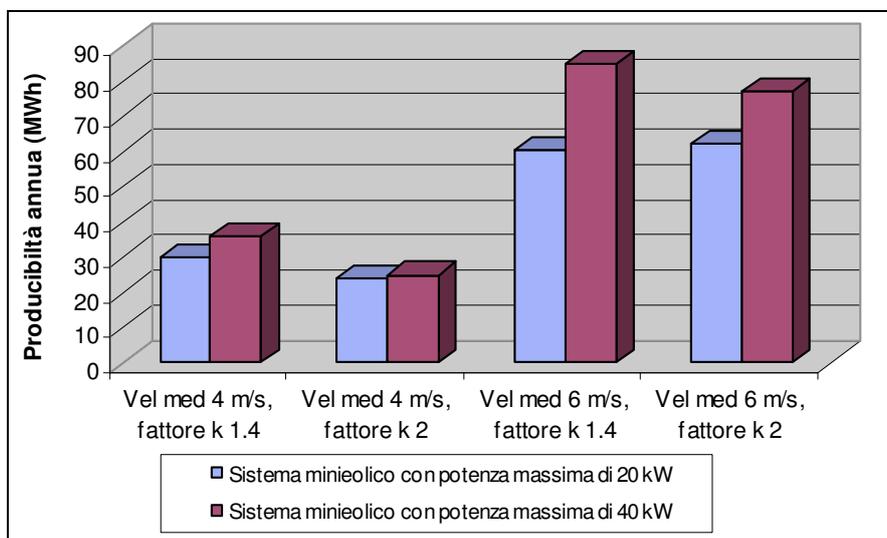


Fig. 2.16 – Energia elettrica annua producibile, in funzione di varie condizioni del vento, dai due sistemi minieolici considerati, con potenza massima rispettivamente di 20 kW e di 40 kW.

In particolare nei casi esaminati:

- esiste un evidente aumento dell’energia elettrica producibile all’aumentare della velocità media del vento da 4 a 6 m/s per entrambi i sistemi;
- al passare dal fattore di forma *k* da 1,4 a 2, l’energia elettrica producibile diminuisce in modo significativo per il sistema con potenza massima di 40 kW, mentre per il sistema con potenza massima di 20 kW diminuisce di meno o rimane pressoché costante;

- al passare della potenza massima del sistema da 20 a 40 kW, l'energia elettrica producibile aumenta dei seguenti valori percentuali:
 - velocità media del vento 4 m/s e parametro di forma $k = 1,4$: 19%
 - velocità media del vento 4 m/s e parametro di forma $k = 2$: 3 %
 - velocità media del vento 6 m/s e parametro di forma $k = 1,4$: 40%
 - velocità media del vento 6 m/s e parametro di forma $k = 2$: 24 %

Questi ultimi valori indicano che il sistema più potente produce in certi casi aumenti consistenti dell'energia elettrica producibile, mentre in altri casi tali aumenti sono ridotti se non quasi nulli. L'entità degli aumenti ottenuti è comunque sempre nettamente inferiore a quella dell'aumento della potenza massima, pari al 100 %, tra i due sistemi.

Presentando tuttavia il sistema più potente maggiori prezzi d'acquisto (perché con componenti maggiormente dimensionati e sottoposto a condizioni di lavoro più gravose), bisogna valutare se tali maggiori prezzi compensano il ricavo generato dalla maggiore energia producibile. Certamente ciò non avviene nel caso della velocità media del vento pari a 4 m/s e parametro di forma k pari a 2, mentre potrebbe accadere nei rimanenti casi, soprattutto con velocità media del vento pari a 6 m/s e parametro di forma k pari a 1,4.

Anche qui i risultati ottenuti sono conseguenti alle ipotesi considerate e possono quindi variare, anche significativamente, con altre distribuzioni del vento e curve di potenza dei sistemi minieolici. Sulla base dei risultati ottenuti si può comunque evincere che, come innanzi segnalato, la scelta di un sistema minieolico deve essere effettuata tenendo nella massima considerazione sia la sua curva di potenza, sia le caratteristiche del vento nel sito. Fare riferimento alla sola potenza massima del sistema a prescindere dalla distribuzione delle velocità del vento nel sito d'installazione potrebbe portare a sgradite sorprese, in quanto si potrebbero avere ritorni economici, per quanto riguarda l'energia prodotta, anche notevolmente inferiori a quelli attesi. Ad esempio, nel caso in esame, si potrebbe pensare di produrre il doppio dell'energia passando dal sistema da 20 kW a quello da 40 kW, mentre in realtà l'aumento dell'energia producibile rimane compreso tra il 3% e il 40% in funzione delle caratteristiche del vento assunte.

3 PANORAMICA SULLA PENETRAZIONE DEL MINIEOLICO IN ITALIA

3.1 Evoluzione della potenza installata in Italia

Un quadro della penetrazione del minieolico ammesso a fruire degli incentivi per l'allacciamento in rete è ricavabile dagli elenchi degli impianti qualificati IAFR pubblicati dal GSE [11]÷[14]. Nelle Tabb. 3.3-a e 3.3-b sono raccolti i dati relativi agli impianti qualificati già in esercizio al 31 dicembre 2010, mentre nelle Tabb. 3.4-a e 3.4-b sono riassunti i dati inerenti a tutti gli impianti qualificati in progetto alla stessa data. Nelle tabelle sono elencati il numero e l'ubicazione degli impianti, la rispettiva potenza installata ed il contributo delle varie province e regioni alla quota di potenza complessiva.

Si può così ricavare che al 31 dicembre 2010 erano in esercizio 119 impianti minieolici qualificati IAFR per una potenza totale di 3990 kW. I dati degli impianti qualificati in progetto indicano inoltre che è prevista l'installazione di ulteriori 146 impianti per una complessiva potenza nominale di 6458 kW. L'entrata in esercizio di questi impianti porterà quindi a quasi triplicare la potenza installata già in esercizio a fine 2010. Nonostante la forte crescita relativa, i numeri assoluti, soprattutto in fatto di potenza, rimangono tuttavia ancora modesti. Si può osservare ancora che la Puglia è la regione in cui si ha la massima concentrazione di impianti minieolici qualificati IAFR, sia in esercizio, sia in progetto. Nella Tab. 3.1 sono riportati i dati che documentano la crescita del numero d'impianti minieolici e della relativa potenza installata dal 2008 al 2010.

	30 Giugno 2008		30 Giugno 2009		31 Dicembre 2009		31 Dicembre 2010	
	In esercizio	In progetto	In esercizio	In progetto	In esercizio	In progetto	In esercizio	In progetto
Numero Impianti	23	n.d.	40	120	52	125	119	146
Potenza Installata [kW]	550	n.d.	1120	3700	1510	4253	3990	6458

Tab. 3.1 – Evoluzione del numero e della potenza installata totale degli impianti minieolici qualificati IAFR negli anni 2008÷2010 (ricavati da [11]÷[14]).

L'esame dei dati nella tabella evidenzia che, nei tre anni seguenti l'entrata in vigore delle incentivazioni e delle agevolazioni autorizzative specifiche per il minieolico previste dalla Legge 24 dicembre 2007 n. 244 (Finanziaria 2008) [5], il numero e la totale potenza installata degli impianti minieolici hanno avuto una crescita superiore a due volte i numeri iniziali, anche se, in realtà, nel successivo periodo di 6 o 12 mesi, non tutti gli impianti già previsti in progetto sono poi entrati in esercizio. Si potrebbe dedurre che i tempi di realizzazione degli impianti sono in media piuttosto lunghi.

E' poi interessante analizzare la distribuzione del numero degli impianti sulle diverse classi di potenza, come riportato in Tab. 3.2. I dati in tale tabella indicano una chiara tendenza a privilegiare macchine con potenza al limite delle fasce di agevolazione fiscale (20 kW) o autorizzativa (<60 kW) o con il massimo ritorno a parità di investimento per unità di potenza installata (200 kW). Resta scarsa l'attrattiva degli aerogeneratori di piccolissima taglia per collegamento alla rete, dati i costi specifici elevati.

Impianti in esercizio per Fasce di Potenza Nominale (P > [kW])							
P ≤ 5	5 < P ≤ 10	10 < P < 20	P = 20	20 < P < 60	P = 60	60 < P ≤ 150	150 < P ≤ 200
7	7	/	55	29	16	3	2
Impianti in progetto - Potenza installata (P) [kW]							
P ≤ 5	5 < P ≤ 10	10 < P < 20	P = 20	20 < P < 60	P = 60	60 < P ≤ 150	150 < P ≤ 200
4	3	4	77	22	22	3	11

Tab. 3.2 – Numero degli impianti minieolici qualificati IAFR a fine 2010 sulle diverse fasce di potenza nominale P (ricavati da [14]).

Regione	Provincia	Potenza Impianto [kW]	Numero Impianti	Potenza Totale [kW]	Percentuale Potenza
Abruzzo	Teramo	10	1	10	0.25%
		20	2	40	1.00%
	Totale		3	50	1.25%
Basilicata	Potenza	2	1	2	9.30%
		20	1	20	
		40	2	80	
		44	1	44	
		50	1	50	
		55	1	55	
	60	2	120		
Totale		9	371	9.30%	
Calabria	Catanzaro	20	2	40	1.00%
	Cosenza	20	4	80	3.88%
		25	3	75	
	<i>Totale</i>	7	155		
Crotone	20	2	40	1.00%	
Totale		11	235	5.89%	
Campania	Avellino	5	1	5	16.19%
		20	1	20	
		25	1	25	
		40	2	80	
		50	1	50	
		60	6	360	
	106	1	106		
<i>Totale</i>	13	646			
Benevento	20	4	80	2.01%	
Totale		17	726	18.20%	
Emilia Romagna	Parma	10	1	10	0.25%
	Bologna	20	1	20	0.50%
	Forlì	30	1	30	0.75%
	Modena	110	1	110	7.77%
		200	1	200	
<i>Totale</i>	2	310			
Totale		5	370	9.27%	
Lazio	Viterbo	20	1	20	0.50%
	Totale		1	20	0.50%
Liguria	Genova	6	1	6	0.15%
	Totale		1	6	0.15%
Marche	Ancona	1	1	1	0.08%
		2	1	2	
		<i>Totale</i>	2	3	
	Pesaro/Urbino	20	1	20	0.50%
Totale		3	23	0.58%	

Tab. 3.3-a – Impianti minieolici qualificati in esercizio in Italia al 31.12.2010 (ricavati da [14]).

Molise	Campobasso	20	1	20	0.50%
	Totale		1	20	0.50%
Piemonte	Cuneo	20	1	20	0.50%
	Torino	20	2	40	3.76%
		50	1	50	
		60	1	60	
<i>Totale</i>		4	150		
Totale			5	170	4.26%
Puglia	Bari	4	2	8	9.72%
		20	4	80	
		40	1	40	
		60	1	60	
		200	1	200	
	<i>Totale</i>		9	388	
	Foggia	6	1	6	7.59%
		7	1	7	
		20	7	140	
		40	1	40	
		50	1	50	
	60	1	60		
	<i>Totale</i>		12	303	
Lecce	5	1	5	3.63%	
	20	5	100		
	40	1	40		
<i>Totale</i>		7	145		
Taranto	20	9	180	18.30%	
	25	2	50		
	50	4	200		
	60	5	300		
<i>Totale</i>		20	730		
Totale			48	1566	39.25%
Sardegna	Olbia	20	1	20	0.50%
	Oristano	6	1	6	0.15%
	Totale		2	26	0.65%
Sicilia	Ragusa	20	5	100	2.51%
	Totale		5	100	2.51%
Toscana	Livorno	80	1	80	2.63%
		25	1	25	
		<i>Totale</i>		2	
	Pisa	50	3	150	3.76%
	Prato	20	1	20	0.50%
Totale			6	275	6.89%
Valle d'Aosta	Aosta	25	1	25	0.63%
	Totale		1	25	0.63%
Veneto	Vicenza	7	1	7	0.18%
	Totale		1	7	0.18%
Totale impianti qualificati in esercizio			119	3990	100%

Tab. 3.3-b – Impianti minieolici qualificati in esercizio in Italia al 31.12.2010 (ricavati da [14]).

Regione	Provincia	Potenza Impianto [kW]	Numero Impianti	Potenza Totale [kW]	Percentuale Potenza
Basilicata	Matera	52	1	52	0.81%
	Potenza	55	2	110	22.25%
		150	1	150	
		185	1	185	
		198	4	792	
		200	1	200	
		<i>Totale</i>	9	1437	
Totale		10	1489	23.06%	
Calabria	Cosenza	40	2	80	6.29%
		60	1	60	
		66	1	66	
		200	1	200	
Totale		5	406	6.29%	
Campania	Avellino	5	1	5	2.80%
		11	2	22	
		18	2	36	
		59	2	118	
		<i>Totale</i>	7	181	
	Benevento	110	1	110	1.70%
Salerno	40	1	40	0.62%	
Totale		9	331	5.13%	
Emilia Romagna	Forlì	20	1	20	0.31%
	Totale		1	20	0.31%
Lazio	Roma	10	1	10	0.15%
	Totale		1	10	0.15%

Tab. 3.4-a – Impianti minieolici qualificati in progetto in Italia al 31.12.2010 (ricavati da [14]).

Puglia	Bari	2	1	2	4.51%
		6	1	6	
		20	4	80	
		23	1	23	
		60	3	180	
		<i>Totale</i>	<i>10</i>	<i>291</i>	
	Barletta	60	6	360	5.57%
	Brindisi	60	1	60	0.93%
	Foggia	8	1	8	20.87%
		20	1	20	
		40	5	200	
		50	2	100	
		60	7	420	
		<i>Totale</i>	<i>19</i>	<i>1348</i>	
	Lecce	20	37	740	12.39%
		60	1	60	
		<i>Totale</i>	<i>38</i>	<i>800</i>	
	Taranto	20	27	540	17.19%
		40	1	40	
		50	3	150	
		60	3	180	
		200	1	200	
		<i>Totale</i>	<i>35</i>	<i>1110</i>	
Totale		109	3969	61.46%	
Sicilia	Ragusa	20	4	80	1.24%
	Palermo	50	1	50	0.77%
	Totale	5	130	2.01%	
Toscana	Grosseto	20	1	20	0.93%
		40	1	40	
		<i>Totale</i>	<i>2</i>	<i>60</i>	
	Livorno	3	1	3	0.05%
Totale		3	63	0.98%	
Trentino Alto Adige	Trento	1	1	1	0.02%
	Totale	1	1	0.02%	
Umbria	Perugia	20	2	40	0.62%
	Totale	2	40	0.62%	
Totale impianti qualificati in progetto		146	6458	100%	

Tab. 3.4-b – Impianti minieolici qualificati in progetto in Italia al 31.12.2010 (ricavati da [14]).

3.2 L'offerta di sistemi minieolici sul mercato italiano

Nel 2009 è stata condotta un'ampia rassegna [2] delle caratteristiche tecniche ed economiche dei miniaerogeneratori, sia di quelli offerti sul mercato internazionale, sia di quelli proposti sul mercato nazionale. Per questi ultimi, in particolare, si era cercato di identificare in maniera puntuale le società che a diverso titolo operano nella vendita dei miniaerogeneratori e, più in generale, degli impianti minieolici, con un'offerta che va dalla vendita dell'aerogeneratore o di componenti d'impianto fino all'installazione dell'impianto chiavi in mano. Stante la continua evoluzione del mercato dei

miniaerogeneratori, soprattutto delle taglie medio piccole, l'indagine sul mercato nazionale era poi stata aggiornata nel 2010 [3]. Il notevole fermento sul lato dell'offerta dei miniaerogeneratori, le ridotte dimensioni delle società operanti e un consolidamento del settore ancora lungi dall'essersi prodotto rendono pleonastico un ulteriore aggiornamento del quadro dell'offerta sul mercato domestico.

Nelle Tabb. 3.5-a e 3.5-b è comunque fornito un elenco, per quanto necessariamente non esaustivo, delle società operanti a diverso titolo nel settore. Le tabelle sono state stilate sulla base di quanto riportato nel rapporto già citato [3] e di ulteriori informazioni raccolte da contatti diretti con gli operatori presenti alle fiere SolarExpo di Verona ed Eolica-EXPO di Roma, tenutesi nel 2011. La consultazione dei siti indicati in tabella permette di verificare direttamente marchi e modelli offerti dai vari operatori.

Si sono potuti censire complessivamente 90 diversi operatori. Tutte le classi di potenza delle turbine minieoliche sono abbondantemente coperte; anche per le macchine di maggior taglia (60÷200 kW) si possono contare non meno di 25÷30 modelli differenti. Bisogna poi sottolineare che l'offerta, soprattutto di aerogeneratori delle taglie più piccole, deve essere intesa non solo per impianti da collegare alla rete, ma anche per impianti destinati ad alimentare utenze isolate, tipicamente di tipo agro-pastorale o residenziale in zone non servite dalla rete elettrica.

Si sono affacciati sul mercato anche alcuni costruttori italiani con progetti originali di miniaerogeneratori di taglia piccola o media, che si differenziano più o meno dall'offerta tradizionale per il disegno della turbina o per i materiali utilizzati. Nella Fig. 3.1 sono riportate, a titolo d'esempio, cinque di queste turbine eoliche, che figuravano tra quelle proposte all'Eolica-EXPO-2011 di Roma.

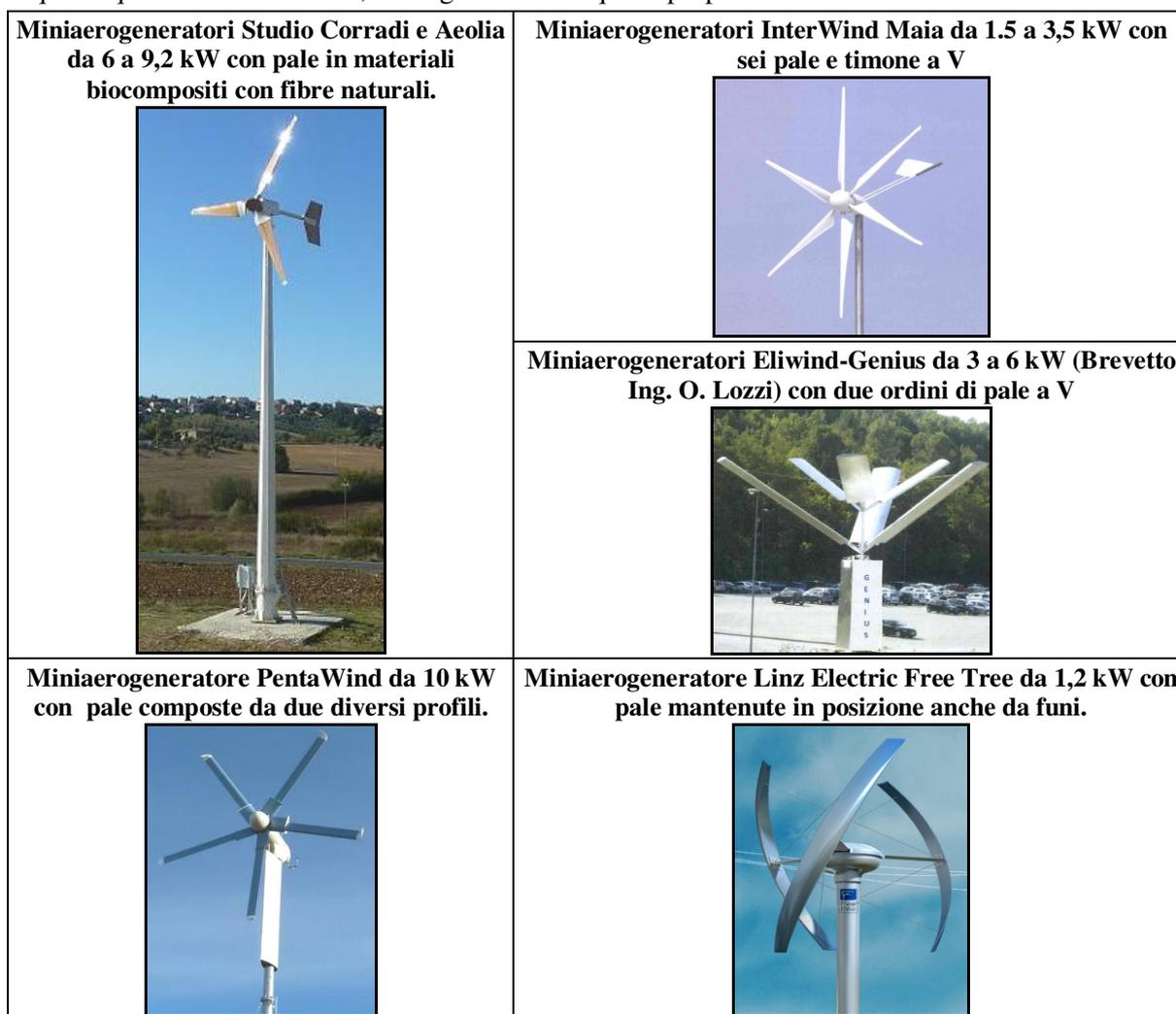


Fig. 3.1 – Turbine minieoliche di progetto e realizzazione italiana con caratteristiche insolite presentate a Eolica-EXPO-2011 di Roma [15].

#A&B Consulting srl; Via Dalmazia 24; 08100 Nuoro (NU); Tel: 0848 555885; Cell. 320 9217503/320 9215546; e-mail: info@aeiconsulting.it ; www.aeiconsulting.it	#ADVENTUM srl; Piazza IV Novembre 24; 73021 Calimera (Le); tel. 0832 872305; e-mail: europa@adventum.it ; www.adventum.eu
#Antaridi Elettrotecnica srl; V.le della Libertà 11/A; 47016 Predappio (FO); Tel. 0543 922478; e-mail: info@antaridi.it ; www.antaridi.it	#Aria srl; Via Guarini 90; Livorno; Tel. 0586 1862292/3; email: info@aria-srl.it ; www.aria-srl.it
#Blu Mini Power srl; P.za Cinque Giornate 10; 20129 Milano; Tel. 02 55183007; e-mail: commerciale@bluminipower.it ; www.bluminipower.it	#Blu-Wind srl; Via Lombardia 46; 24067 Sarnico (BG); Tel. 035 927500; e-mail: info@blu-wind.it ; www.blu-wind.it
#Carlo Gavazzi SpA; Via Milano 13, 20020 Lainate (MI); Tel. 02 931761; e-mail: info@gavazziacbu.it ; www.gavazziacbu.it	#Ciesse Energia srl; Via Cimone 93/C, 00141 Roma; tel. 06 96036800; e-mail: info@ciessenergia.it ; www.ciessenergia.it
#CO.E-COM. srl; Via Teatro Romano 12; 82100 Benevento (BN); Tel: 02320620842; email: coecom@coecom.com ; www.coecom.com	#Corradi srl (Ing. Gianluca de Maio); Via del Serpente 9; 05100 Terni; Tel. 0744 402303; info@studiocorradi.it ; www.studiocorradi.it
#C.R.I.E.L. srl ; Via La Martella 82; 75100 Matera; Tel. 0835 268800; info@criel.it ; www.criel.it	#C&F Green Energy Ltd. ; Cashla; Athenry co. Galway; Ireland; Tel. +353 91 790868; info@cfgreenenergy.com ; www.cfgreenenergy.com (presente a Eolica Expo 2011-Roma)
#Dealer Tecno srl; Via Santa Fermina 11ab; 00053 Civitavecchia (RM); Tel. 0766 390561; www.dealertecno.com	#Deltatronic Int. Srl; Via del Cimitero 16; 10090 REANO (TO); Tel. +39 011 9310 508/700; www.deltatronic.it
#DEVICES srl; Via Valdera P. #293; 56038 Ponsacco (PI); Tel. 0587 734520; email: info@minieolico.it ; www.minieolico.it/DEVICES	#Eco Motion- Espressione Ecologica; Via Giordania 16; 58100 Grosseto; Tel. 0564 455015; info@eco-motion.it ; www.eco-motion.it (Concessionario Blu mini Power per la Toscana)
#ECONOIDI srl; Via Ugo La malfa 24; 40026 Imola (BO); Tel. 0542 672533; info@econoidi.com ; www.econoidi.com	#EDILTERMICA; Loc. S.Chiodo 63; 06049 Spoleto (PG); Tel. 0743 43554; e-mail: info@ediltermica.net ; www.ediltermica.net
#Elektro-Weber GmbH; Marktstrasse 6; 31191 Algermissen; Germany; Tel. +49 5126 8291; e-mail: info@elektro-weber-gmbh.net ; www.elektro-weber-gmbh.net	#Elettromeccanica Salmini; Via Como 5; 21011 Casorate Sempione (VA); Tel. 0331 296729; e-mail: ssalmini@tiscali.it ; www.salmini.it
#Elios Energy Solution; Via A.Magliotto 2; c/o Polo Universitario (Pal Locatelli); 17100 Savona; Tel. 019 264702; info@eliosenergy.com ; www.eliosenergy.com	#El.Ma. Electronic Machining srl; Via S. Cassiano 20; 38066 Riva del Garda (TN); Tel: 0464 557665; www.elmanet.it
#EL.ME S.n.c., Via Irlanda, 11, 21013 Gallarate VA, Tel. 0331-786660, info@elmesnc.it , www.elmesnc.it	#Enatek srl; Piazza Verdi 14; 57025 Piombino (LI); Cell. 347 2973376 (Gianluca Cecchetti); www.enatek.it
#endurance wind power; 96 ighal alon st.; 67891 Tel Aviv; Israel; Tel. +972 546 223962; e-mail: nadav@windwvs.com ; www.endurancewindpower.com (presente a Eolica Expo 2011-Roma)	#en-eco energy for ecology srl; Via Odorico da Pordenone 32; 50127 Firenze; Tel. 055 333017; e-mail: info@en-eco.com ; www.en-eco.com
#EnerCasa; Via Firenze 23; 86100 Campobasso (CB); Tel. 087497330, Cell. 3295412149; E-mail: mail@enercasa.it ; www.enercasa.it	#ENERGIA RINNOVABILE srl; Via Giaretta; 37047 San Bonifacio (VE); Tel. 045 6315014; e-mail: info@energiarinnovabile.it ; www.energiarinnovabile.it
#ENERGIE NORD MILANO srl; Via T.Tasso 13, 20010 Canegrate (MI); Tel. 0331 405781; e-mail: info@energienordmilano.com ; www.energienordmilano.com	#ENERVOLT srl; VIA Ponticelli 58, 36020 Agigliara (VI); Tel. 0444 785488; e-mail: info@enervolt.it ; www.enervolt.it
#EolArt; Via Valle Po 88; 12100 Cuneo; Tel 0171 410410; e-mail: eolart@comecart.it ; www.eolart.it	#Eolica srl; P.za L. Guercio 1; Castellabate (Sa); Tel. 081 8716079; www.windsd.eu
#Eolicar; Via Livorno 60; Environment Park; 10144 Torino; Tel. 011 2257711; e-mail: info@eolicar.it ; www.eolicar.it	#Eolitalia Service srl; Via Roma 13; 26834 Corte Palasio (LO); Tel. 0371 471044; e-mail: info@eolitaliaservice.com ; www.eolitaliaservice.com
#EolPower; Prof. Domenico P. Coiro-Università degli Studi di Napoli "Federico II"; Dip. Ingegneria Aerospaziale; Tel: 0817683322; info@eolpower.com ; www.eolpower.com	#Fenyx; Via XX Settembre 14; 73049 Ruffano (LE); Tel. 0833 694106; e-mail: info.fenyx@gmail.com ; www.fenyx.it
#Flexienergy (di Alessandro Giubilo); Via Ostriana 12; 00199 Roma; e-mail: info@flexienergy.it ; www.flexienergy.it	#Fortore Servizi SpA ; Loc. Perazzo; 71036 Lucera (FG); e-mail: presidente@fortoreservizi.it ; www.fortoreenergia.com
#Gaia-Wind T.R.Energia srl (Dott. La Francesca Gianpaolo); Via Ten.Alberti 66/B; Trapani; Tel. 0923 363491; Cell. 3389862536; e-mail: info@geoambientesrl.it ; www.geoambientesrl.it	#Geatecno srl; Via dei Vetrai; 70026 Modugno (BA); Tel. 080 9751306; e-mail: eolico@geatecno.it ; www.geatecno.it
#Genius srl; Via Maiorino 27; 86170 Isernia; Cell. 333 5339275; e-mail: orlandolozzi@libero.it	#Geoambiente Energy srl (Ing.De Ronzi Enrico); Via B.Ravenna 4; 73100 Lecce; Tel. 0832 316864; Cell. 3389862536; e-mail: info@geoambientesrl.it ; www.geoambientesrl.it
#Global Business Energy srl; C.da Serritello La Valle s.n.; 75100 Matera; Tel. 0835 385704; Cell. 3491042009; e-mail: gbesrl@gpec.it ; www.gbenergy.it	#Green Power; Yonval; 51330 Possesse; Francia; Tel. +33 (0)3 26920113; e-mail: contact@greenpowersarl.com ; www.greenpowersarl.com (presente a Eolica Expo 2011-Roma)
#Green Power; Yonval; 51330 Possesse; Francia; Tel. +33 (0)3 26920113; e-mail: contact@greenpowersarl.com ; www.greenpowersarl.com (presente a Eolica Expo 2011-Roma)	#InterWind srl; Via Amman 45; 33084 Cordenons (PN); Tel. 0434 44183; e-mail: info@interwind.it ; www.iinterwind.it
#Italtech Wind srl; Viale Enrico Mattei 16; 25080 Mazzano (BS); Tel. 030 2060400; e-mail: info@italtechwind.it ; www.italtechwind.it	#It-Energy srl; Via F.B. Cavaliere 12; 36050 Zermeghedo (VI); info@it-energy.it ; www.it-energy.it

Tab. 3.5-a – Fornitori in Italia di miniaerogeneratori e impianti minieolici completi chiavi in mano.

# Itieolis srl ; Via Capovilla 73/Bis; 36030 Villaverla (VI); Tel. 0445 855311; info@itieolis.com ; www.itieolis.com	# Jcoplastic SpA ; V.le Spagna Z.I.; 84091 Battipaglia (SA); Tel. 0828 392111; mail@jcoplastic.com ; www.jcoplastic.com
# JONICA IMPIANTI Società Cooperativa ; Via Poerio 226; 74020 Lizzano (TA); Tel. 099 9551208; e-mail: jimpcoop@tin.it ; www.jimp.it	# Klimeko ; Via degli Abeti 134; 61122 Pesaro (PU); Tel 0721 401376; info@klimeko.com ; www.klimeko.com
# Kruberh Energia e Ambiente ; Via Roma 16; 20087 Robecco sul Naviglio (MI); Tel. 02 9471110; e-mail: Kruberh@alice.it ; www.kruberh.it	# Layer Electronics srl ; S.P. Km 5,300 C/da S. Cusumano; 91100 Erice (TP); Tel. 0923 562794; e-mail: info@layer.it ; www.layer.it
# Linz Electric srl ; Viale del Lavoro 30; 37040 Arcole (VR); Tel. 045 76392 01; e-mail: info@free-tree.com ; www.free-tree.com	# Lombard & Marozzini ; Via Alberico Albricci 9/11; 00135 Roma; Tel. 06 36301456; info@lombardemarozzini.com ; www.lombardemarozzini.com
# Mact srl ; Via Brigata GAP 98; 61122 Pesaro (PU); Tel. 0721 401160; e-mail: colico@mact.it ; www.mact.it	# M.D.F. Energia srl ; Via Marco Polo 37/4; 10129 Torino; Tel. 3357745948; info@mdfenergia.com ; www.mdfenergia.com
# MOSAICO Energia srl ; C.so Vittorio Emanuele 76, 70027 Palo del Colle (Ba); Cell. 392 9817813; infomosaico@mosaicenergia.it ; www.mosaicenergia.it	# MTL srl ; S.S.96 km. 112+800; Palo del Colle (BA); Tel. 080 3813623; e-mail: colico@mtl-srl.com ; http://www.mtl-srl.com
# Natural Power srl ; Strada C Z.I.; 09039 Villacidro (VS); Tel 070 9311440; info@naturalpowersrl.com ; www.naturalpowersrl.com	# Nautigamma / Nextboat ; Marina Punta Faro; 33054 Lignano (UD); Tel 0431 720 500; elettronica@nautigamma.it ; www.nextboat.it
# Newtak srl-Energy ; Via Volpicella 51; 80147 Napoli; Tel. 081 5590045; e-mail: info@newtak.it ; www.newtak.it	# PentaWind ; Via dell'Artigianato 6; 37030 Badia Calavena (VE); Tel. 045 6512107; e-mail: info@penta-wind.com ; www.penta-wind.com
# PLC System srl ; Zona ASI Loc. Pantano; 80011 Acerra (NA); Tel. 081 8039748; e-mail: chiara.esposito@plcssystem.com ; www.plcssystem.com	# PurEnergy Consulting srl ; C.so Romuleo 116; 83044 Bisaccia (AV); Tel. 0827 89469; e-mail: info@purenergy.it ; www.purenergy.it
# Quadrys srl ; Via Don Gnocchi 7; 20148 Milano; Tel. 02 89038294; www.quadrys.it	# RE-NOVA WIND ENERGY srl ; Via Gabriele D' Annunzio 21; 74015 Martina Franca (TA); Tel. 080 4837184; e-mail: re-nova.windenergy@aruba.it ; www.re-novawindenergy.it
# Ropatec srl ; Via Zuegg 38/40; 39100 Bolzano; Tel: 0471 052010; e-mail: info@ropatec.com ; www.ropatec.com	# SAVE srl ; C.da Piane di Chienti 21; 62010 Pollenza (MC); Tel. 0733 201606; e-mail: info@eolicosave.com ; www.eolicosave.com
# SEI Sistemi srl ; Via Calamelli 40; 40026 Imola (BO); Tel. 0542 640245; e-mail: sei@seisistemi.it ; www.seisistemi.it	# SILIKEN ITALIA srl ; (Sede Centrale) Via Alessandro Trotter 3; 00156 Roma; Tel. 06 8288521; e-mail: siliken.italia@siliken.com ; www.siliken.com
# SMEA srl ; Via Camporeale 6; 83031 Ariano Irpino (AV); Tel. 0825881074; info@smeaenergie.it ; www.smeaenergie.it	# Società Elettrica Italiana srl ; Via Giordania 185; 58100 Grosseto; Tel. 0564 417038; info@societaelettricaitaliana.it ; www.societaelettricaitaliana.it
# SoloSole srl ; Via Carso 10, 31040 Signoressa di Trevignano (TV); Tel. 0423 679140; Cell. 393 2086058; email: info@braunitalia.it ; www.braunitalia.it	# STAER srl ; Via Sibilla Aleramo 4; Segrate (MI); Tel: 02 26952067; e-mail: mario.fantini@staermisura.it ; www.staermisura.it
# STAER srl ; Via Sibilla Aleramo 4; Segrate (MI); Tel: 02 26952067; e-mail: mario.fantini@staermisura.it ; www.staermisura.it	# SUNERG Solar srl ; Via Donnini 51; Loc. Cinquemiglia; Città di Castello (PG); Tel: 075 854327; e-mail: info@sunergsolar.com ; www.sunergsolar.com
# Tecnoelettronica ; V.le Risorgimento 22; 48018 Faenza (RA); Tel. 0546 622353; e-mail: tecnoelettronica@tiscali.it ; www.tecnoelettronica.com	# TEKNA energy ; SP 115 km 1,200; 71122 Foggia (FG); Tel. 0881 750549, E-mail: teknaenergy@teknaenergy.net ; www.teknaenergy.net
# Terom SpA ; Via Nuova 16; 40050 Funo di Argelato (BO); Tel.051 8900311; e-mail: terom@terom.it ; www.terom.it	# Tozzi Nord srl ; Via Zuccherificio 10; 48100 Mezzano (RA); Tel. 0544 525311; email: info@tozzinord.com ; www.tozzinord.com
# Uflex srl ; Divisione Energia; Via Milite Ignoto 8A; 16012 Busalla (GE); Tel. 010 9620203; e-mail: ute@ultraflexgroup.it ; http://ultraflexenergia.ultraflexgroup.com	# Viento srl ; Via Torre dei Rai 547; 84025 Eboli (SA); Tel. 0828 1841601; Email: info@viento.it ; http://www.viento.it
# VOLTAIX srl ; Via Teatro Romano 12; 82100 Benevento; Tel. 0824 871684; voltaix@voltaix.it ; www.voltaix.it	# VP SOLAR srl ; Via Feltrina 3 - Crocetta del Montello (TV); Tel. 0423.6326; e-mail: colico@vpsolar.com ; www.vpsolar.com
# Windon Italia srl ; Vico della Neve 15; 09073 Cuglieri (OR); Tel: 345 6233798; www.windon.se/it/	# WINDSTAR Renewable Energy (Dott. Sergio Lima); Via Golgi 10; 25064 Gussago (BS); Tel. 030 22958; Cell. 348 6504800; e-mail: info@wind-star.it ; www.wind-star.it
# WIP energy srl ; Via Tito Angelini 18; 80129 Napoli (NA); Tel. 081 5561848; info@wipenergy.it ; www.wipenergy.it	# World Wide Wind Turbines b.v. ; Oude Bovensteweg 31; 6584 CJ Molehoek; The Netherlands; Tel. +31 24 3483157; sales@v27windturbines.com ; www.worldwidewindturbines.com (presente a Eolica Expo 2011-Roma)

Tab. 3.5-b –Fornitori in Italia di miniaerogeneratori e impianti minieolici completi chiavi in mano.

Si aggiunge che sul mercato sono attivi anche operatori che non offrono miniaerogeneratori o installazioni d'impianti completi chiavi in mano, bensì componenti d'impianto quali sistemi elettrici, inverter, sistemi di protezione e controllo, ovvero strumentazione e sistemi di monitoraggio. Questi operatori non sono stati inclusi negli elenchi qui riportati.

Altre società offrono invece pali e torri di sostegno per miniaerogeneratori o anemometri, spesso anche con l'offerta di servizi per l'effettuazione di campagne di misura anemometriche. Un certo numero di questi operatori erano già stati elencati nel rapporto di attività del 2010 [3].

Si ricorda infine che, in Italia, sono stati recentemente costituiti due diversi consorzi di operatori minieolici, entrambi presenti all'Eolica-EXPO-2011 di Roma. Il primo è il Consorzio Produttori Energia Minieolico (CPEM)⁶ che ha aderito ad APER; il secondo è ASSIEME, Associazione Italiana Energia Mini Eolica⁷.

⁶ Sito web : www.cpem.eu

⁷ Sito web : www.assieme.eu

4 IMPIANTO MINIEOLICO DA 3 kW INSTALLATO NELLA SEDE RSE DI MILANO

4.1 Generalità

Nell'area "Test Facility" della sede RSE a Milano - adibita alla sperimentazione di sistemi a energia rinnovabile, tra i quali campi fotovoltaici, un sistema dish-stirling, sistemi ibridi, attrezzature e componenti meteorologici - per potere raccogliere informazioni e dati su importanti aspetti delle installazioni minieoliche quali modalità autorizzative e realizzative, resa energetica, esercizio, manutenzione, integrazione/ interazione con la rete di bassa tensione (gestione, protezione, sicurezza, "power quality"), sono stati installati:

- un impianto minieolico, con potenza nominale di 3 kW e con avviamento e produzione elettrica anche a bassi venti, dotato di un miniaerogeneratore a tre pale con asse di rotazione orizzontale installato su un palo alto 12 m;
- un sistema di "monitoraggio per impianti minieolici", analogo a quelli descritti nel successivo par. 5.1, composto da:
 - un sistema meteo-anemometrico, installato prevalentemente su un apposito palo anemometrico e composto da un anemometro e una banderuola disposti ad altezze comparabili con quella del mozzo del miniaerogeneratore, un sensore termometrico, un sensore barometrico e una centralina di raccolta dati con alimentazione dalla rete elettrica;
 - un sistema di acquisizione dei dati, disposto all'interno del quadro dell'impianto (situato vicino alla base della torre dell'aerogeneratore) e composto da un misuratore della potenza elettrica prodotta dall'aerogeneratore e da un dispositivo per la raccolta e l'elaborazione preliminare sia di tale dato sia dei dati misurati dal sistema meteo-anemometrico anzidetto e trasmessi al sistema di acquisizione via cavo.

Nella Fig. 4.1 sono indicate, su una vista dall'alto ripresa da Google Earth, le posizioni del miniaerogeneratore e del palo anemometrico all'interno dell'area "Test Facility".



Fig. 4.1 – Posizione del miniaerogeneratore e del palo anemometrico all'interno dell'area RSE destinata alla sperimentazione delle energie rinnovabili.

In particolare l'aerogeneratore ed il palo anemometrico sono stati disposti distanti tra di loro 10 m, distanza ottimale, pari a 2,5 volte il diametro dell'aerogeneratore, prevista dalla Norma CEI EN 61400-12-1 "Verifica delle prestazioni di potenza degli aerogeneratori" [16]. L'impianto è stato collegato alla rete elettrica locale della "Test Facility". Come palo anemometrico, per ragioni di spazio, è stato utilizzato un palo per illuminazione alto 12 m installato su adeguato basamento in cemento armato.

4.2 Caratteristiche dell'impianto

Per la scelta del sistema minieolico da installare sono stati considerati, a suo tempo, i seguenti 5 sistemi minieolici – tutti con miniaerogeneratore ad asse di rotazione orizzontale, tre pale, avviamento e produzione elettrica anche a bassi venti - che sulla carta presentavano caratteristiche interessanti:

- sistema A: potenza nominale 2 kW, diametro rotore 4 m, velocità di cut-in 3 m/s
- sistema B: potenza nominale 3 kW, diametro rotore 4 m, velocità di cut-in 2,5 m/s
- sistema C: potenza nominale 3,5 kW, diametro rotore 4,05 m, velocità di cut-in 3 m/s
- sistema D: potenza nominale 2 kW, diametro rotore 3,2 m, velocità di cut-in 3 m/s
- sistema E: potenza nominale 3,5 kW, diametro rotore 4 m, velocità di cut-in 2,5 m/s

Per ognuno di tali sistemi, a partire dalle curve della sua potenza elettrica P_R immessa in rete e dalle dimensioni del suo rotore, sono stati ricavati i corrispondenti coefficienti di potenza C_P in funzione della velocità del vento attraverso la seguente relazione:

$$C_P = \frac{2 \cdot P_R}{\rho \cdot A \cdot v^3 \cdot K_G} \quad (4.1)$$

dove:

ρ densità dell'aria in sito (1,225 kg/m³ al livello del mare con temperatura di 15 °C)

A area "spazzata" dal rotore

v velocità del vento incidente sulle pale dell'aerogeneratore

K_G fattore di riduzione tra la potenza meccanica dell'aerogeneratore e la potenza elettrica immessa in rete

Nella Fig. 4.2 sono rappresentate le curve di potenza pubblicizzate dai costruttori/distributori dei sistemi anzidetti e i rispettivi coefficienti di potenza C_P ricavati da queste ultime come sopra detto ipotizzando un fattore di riduzione K_G pari a 0,8 (80%).

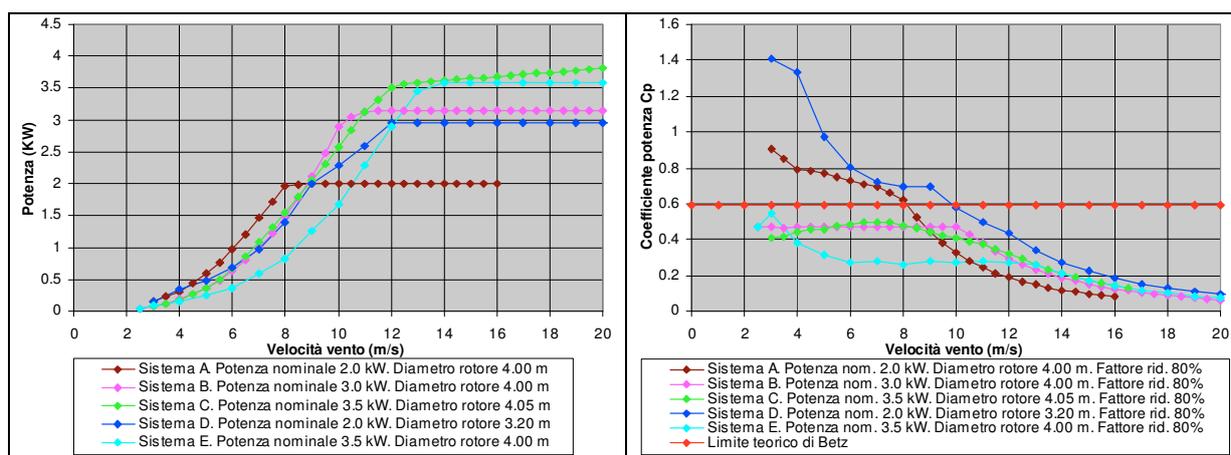


Fig. 4.2 – Curve di potenza e coefficienti di potenza C_P ricavati per i sistemi minieolici considerati.

Sulla base degli andamenti delle due famiglie di curve riportate nella figura e di altre considerazioni (numero di sistemi installati, caratteristiche costruttive, tempi di fornitura, costo, rete di assistenza,...) è poi stato scelto il sistema B, prevedendo peraltro di continuare la sperimentazione sostituendo in futuro questo sistema con un altro.

Nelle Figg. 4.3-a e 4.3-b sono riportate informazioni tecniche sul sistema minieolico prescelto ed installato, modello Mistral 3000 W, distribuito dalla ditta it-eNergy di Zermeghedo (VI) [17].



MINIGENERATORE EOLICO MISTRAL 3.000 W



Scheda Tecnica

Caratteristiche generali

Modello :	MISTRAL 3.000 W
Tensioni disponibile:	48, 110, 250 Vdc
Classe turbina:	Classe II conforme a direttiva IEC61400
Tipo:	Asse orizzontale, sopravento, direct drive
Potenza nominale :	3.000 W
Velocità del vento nominale :	10,5 m/s
Diametro del rotore :	4,0 m
Area Spazzata :	12,5 m ²
Velocità del vento di cut-in :	2,5 m/s
Velocità di cut-out :	Produce fino alla velocità di sopravvivenza
Velocità di sopravvivenza:	60 m/s
Controllo della potenza:	Passo variabile meccanico (pitch control)
Emissione sonora :	<45 dB alla velocità di 5 m/s
Orientamento al vento :	Passivo
Peso complessivo :	230 kg

Fig. 4.3-a – Scheda tecnica del sistema minieolico installato (prima pagina)

Pale

Numero di pale :	3
Materiale pale :	Resina epossidica rinforzata con fibra di vetro
Lunghezza :	2 m
Rotazione:	Oraria

Generatore

Tipo:	Magneti permanenti flusso assiale (brushless)
Tensione nominale:	48, 110, 250 Vdc
Grado di protezione :	IP 55

Controller

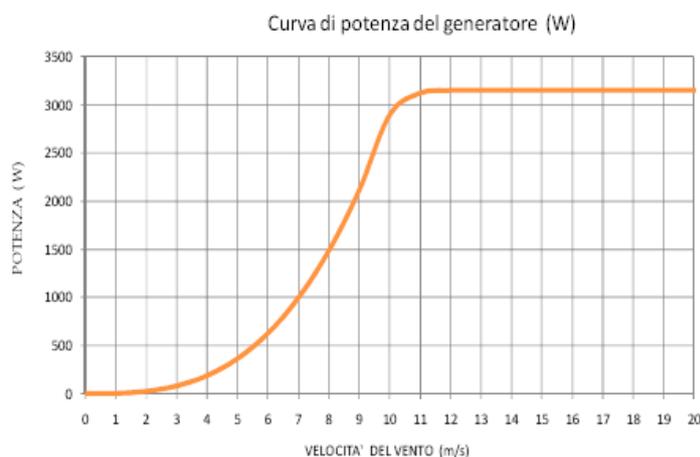
Funzioni:	Regolatore di carica con tensione modificabile in funzione del tipo di batteria (solo per isola), regolatore di tensione (solo per rete), gestione arresto turbina (freno di stazionamento per manutenzione), gestione della resistenza di dissipazione (inclusa nella fornitura)
-----------	---

Inverter

Tipo:	Conforme alla normativa Enel DK5940 (fornito solo per impianti connessi alla rete)
-------	--

Torre

Tipo:	Palo rastremato, autoportante e ribaltabile
Altezza:	12 – 18 – 24 – 30 m



* La curva di potenza e la stima di producibilità annua sono stata determinate in conformità alle disposizioni stabilite dalle normative EN 61400-2 e EN 61400-12-1

Fig. 4.3-b – Scheda tecnica del sistema minieolico installato (seconda pagina).

4.3 Modalità di realizzazione dell'impianto

La zona dove è realizzato l'impianto fa parte del territorio del Comune di Segrate, al confine con il Comune di Milano. Per ottenere l'autorizzazione a installare l'impianto, il 09/02/2012 è stata presentata, presso il Comune di Segrate, la Segnalazione Certificata di Inizio Attività (SCIA), sostanzialmente analoga alla Procedura Abilitativa Semplificata (PAS) istituita con il Decreto Legislativo n. 28 del 3 marzo 2011 [7], insieme alla Denuncia delle Opere Strutturali, entrambe firmate dal committente RSE, da un ingegnere progettista e direttore dei lavori e dall'impresa esecutrice dei lavori. Le somme versate

al Comune sono state quelle per i diritti di segreteria e una marca da bollo, complessivamente pari a 108,62 €.

Per l'esecuzione dei lavori, che pure sono iniziati il 09/02/2012, sono stati anche nominati un Coordinatore della Sicurezza per la Progettazione (CSP) e un Coordinatore della Sicurezza per l'Esecuzione (CSE).

Per le domande autorizzative globalmente sono stati prodotti gli elaborati di seguito indicati:

- documenti
 - Elenco elaborati
 - Relazione tecnica descrittiva
 - Relazione di calcolo
 - Computo metrico estimativo edile/strutturale
 - Cronoprogramma lavori
 - Piano di sicurezza e coordinamento
- elaborati grafici
 - Estratto PRG, stralcio aerofotogrammetrico e inquadramento geologico/geotecnico
 - Rilievo fotografico
 - Pianta scavi e tracciamento
 - Armatura plinti di fondazione
 - Progetto impianto eolico
 - Layout di cantiere

Il palo e il plinto del miniaerogeneratore sono stati dimensionati per azioni pari al doppio di quelle prodotte dall'aerogeneratore, in modo da poterlo sostituire in futuro con altri di taglia analoga, o leggermente superiore, e confrontarne così le prestazioni.

L'installazione dell'aerogeneratore è avvenuta l'08/03/2012, come rappresentato nella Fig. 4.4, fissando prima l'aerogeneratore sul palo sdraiato per terra, sollevando poi la struttura "aerogeneratore + palo" con una gru montata su automezzo, e disponendo infine sull'aerogeneratore in quota elementi di completamento leggeri (timone, pale, carter di protezione della macchina).



Fig. 4.4 – Operazioni d'installazione dell'aerogeneratore presso RSE.

Nella Fig. 4.5 è rappresentato il miniaerogeneratore installato, con dettagli sul collegamento tra il suo palo di sostegno e il relativo plinto di fondazione in cemento armato, e sul quadro dell'impianto.

Il palo impiegato per sostenere l'aerogeneratore è di tipo troncoconico a sezione poligonale (12 lati) con diametro di base 450 mm, diametro in sommità 140 mm, lunghezza 12 m, ed è dotato di una flangia alla base per il suo fissaggio al plinto e di una flangia alla sommità per il fissaggio dell'aerogeneratore.

Il plinto è costituito da un parallelepipedo in calcestruzzo con dimensioni 2,30 x 2,30 x 1,00 m³, armato adeguatamente e con 8 tirafondi per il fissaggio del palo, realizzati con barre ad aderenza migliorata del diametro di 24 mm.



Fig. 4.5 – Aerogeneratore installato presso RSE.

Il sistema di monitoraggio anzidetto acquisisce, con intervalli di campionamento di 1 secondo, i valori dei segnali rilevati - velocità del vento (m/s), direzione del vento (0-360 gradi), potenza elettrica attiva (kW), potenza elettrica reattiva (kvar), temperatura ambiente (gradi centigradi) e pressione atmosferica (hPa) - e ne fa un'elaborazione preliminare, fornendone i parametri più significativi (valori medi, minimi, e massimi e deviazione standard) su periodi di 1 minuto.

In successivi rapporti di RSE verranno riportati i dati rilevati dal sistema di monitoraggio dell'impianto, prevalentemente sulle condizioni di ventosità riscontrate nel sito e sul funzionamento del sistema minieolico a fronte di tali condizioni.

5 IMPIANTI MINIEOLICI MONITORATI

5.1 Sistemi di monitoraggio per impianti minieolici

Per poter raccogliere dati sulle prestazioni degli impianti minieolici, è stato effettuato il monitoraggio di alcuni di essi, descritti di seguito, fondamentalmente misurando il vento nel sito e la potenza prodotta dall'impianto.

Per tale scopo sono stati utilizzati appositi "sistemi di monitoraggio minieolici" sviluppati e realizzati, su indicazioni ed incarico di RSE, dalla TeamWare di Milano [18], ognuno dei quali è composto, come rappresentato nella Fig. 5.1, da:

- un sistema meteo-anemometrico - da installare su un'apposita torre a traliccio (o palo) prossima al miniaerogeneratore - composto da sensori per la misura del vento (uno o due anemometri e una banderuola installati ad altezze comparabili con quella del mozzo del miniaerogeneratore), da sensori della temperatura dell'aria e della pressione atmosferica (un sensore termometrico e un sensore barometrico), e da una centralina di raccolta dati con alimentazione dalla rete elettrica o da un pannello fotovoltaico;
- un sistema di acquisizione - da disporre in corrispondenza del quadro (o della cabina) dell'impianto - composto da un misuratore della potenza prodotta dall'aerogeneratore e da un dispositivo di raccolta, elaborazione ed invio, tramite rete GSM, sia di tale dato sia dei dati misurati, dal sistema meteo-anemometrico anzidetto al sistema di acquisizione; la trasmissione avviene via cavo (se possibile) o via wireless.

Per trasmettere via wireless i segnali tra il sistema meteo-anemometrico e il sistema di acquisizione, vengono utilizzate antenne omnidirezionali, oppure antenne direttive nel caso in cui siano presenti difficoltà di trasmissione.

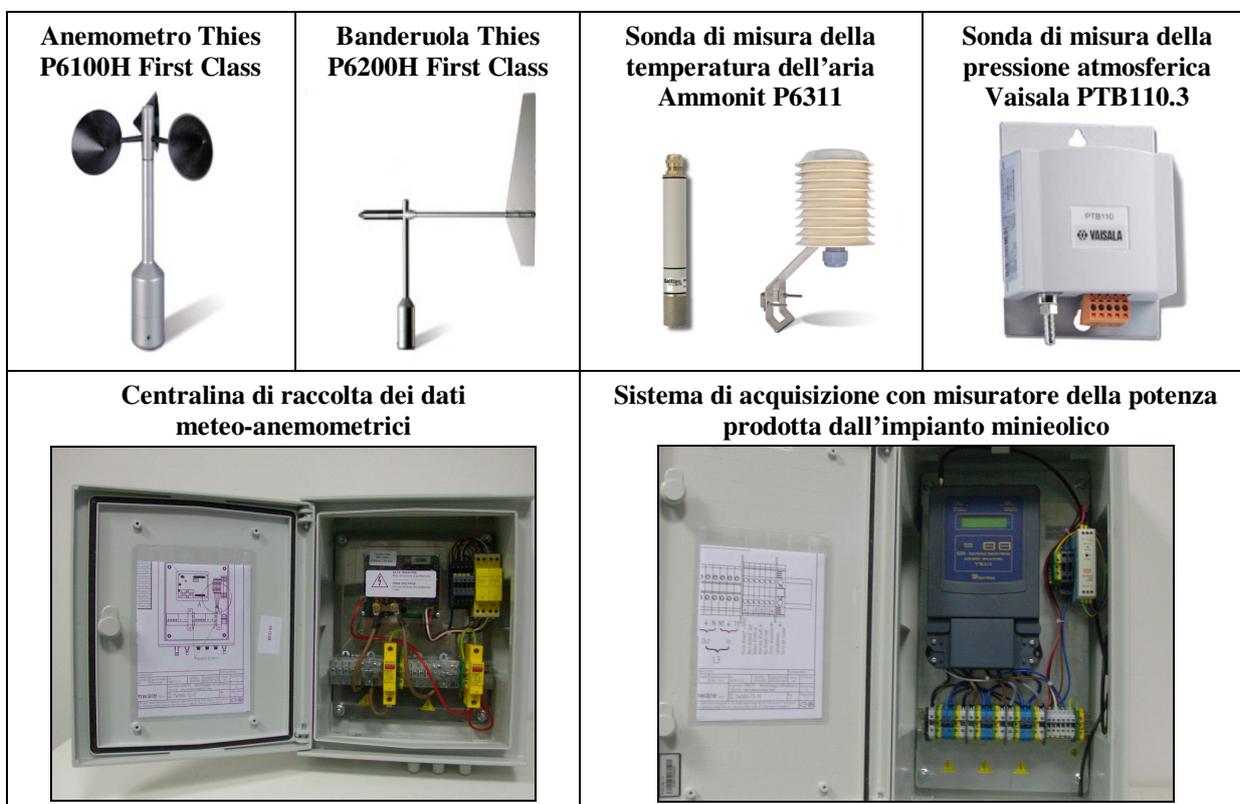


Fig. 5.1 – Sistema di monitoraggio RSE per impianti minieolici.

Di seguito si riportano le caratteristiche dei sensori di misura riprese dai loro “data sheet”.

- **Anemometro Thies P6100H First Class**
 - Manufacturer: Thies, Order-No: P6100H
 - Classified according to: IEC 61400-12-1, MEASNET, CLASSCUP, ISO 17713-1
 - Optoelectronic wind speed sensor
 - Very accurate measuring rates
 - Class: 1 / A 1.5 / B 2.9
 - Measuring range: 0.3...75 m/s
 - Temperature range: -50 °C to 80 °C
 - Resolution: 0.05 m/s
 - Low energy consumption
 - Heatable

- **Banderuola Thies P6200H First Class**
 - Manufacturer: Thies, Order-No: P 6200H
 - Robust high quality wind vane
 - Potentiometric wind direction sensor
 - Measuring Range: 0 to 360°, no north gap 0....2 k Ohm
 - Accuracy: $\pm 2^\circ$
 - Resolution: 1°
 - Damping coefficient: > 0.25
 - Survival speed: max. 85 m/s
 - Temperature range: -50°C to +80°C
 - Electr. output: potentiometric
 - Hysteresis- + non wearing magnet clutch between vane and potentiometric axis
 - Easy to be mounted and serviced
 - Heatable

- **Sonda di misura della temperatura dell'aria Ammonit P6311**
 - Order-No: P6311, Thermosensor
 - Measuring range: - 30...+70°C
 - Accuracy temperature: ± 0.2 K in the range -27°C to +70°C
 - Starting time: (calm air) < 20 s
 - Measurement element temperature: (acc. to DIN EN 60751) Pt 100 1/3 DIN

- **Sonda di misura della pressione atmosferica Vaisala PTB110.3**
 - Manufacturer: Vaisala, Order-No: P6331.2, PTB 110.3
 - Measuring range: 800...1100 hPa
 - Piezoelectric pressure sensor
 - Several pressure ranges
 - Total accuracy:
 - ± 0.3 hPa at 20 °C
 - ± 1.0 hPa at -20...60 °C
 - ± 1.5 hPa at -40...60 °C
 - Output voltage: 0...5 VDC
 - External on and off switch
 - Low energy consumption < 4 mA @ 12 VDC
 - Setting time: 1 sec. to reach full accuracy after power-up

I sistemi di monitoraggio utilizzati acquisiscono, con intervallo di campionamento di 1 secondo, i valori dei segnali rilevati - velocità del vento (m/s), direzione del vento (0-360 gradi), potenza elettrica attiva (kW), potenza elettrica reattiva (kvar), temperatura ambiente (gradi centigradi) e pressione atmosferica (hPa) - e ne forniscono i valori medi, minimi, massimi e deviazione standard con cadenza (a scelta dell'operatore) di 1 minuto o di 10 minuti.

Ogni sistema meteo-anemometrico viene installato su una torre meteo-anemometrica, chiamata di seguito anche semplicemente torre anemometrica, del tipo di quella illustrata a titolo d'esempio nella Fig. 5.2, sulla quale vengono installati i sensori anzidetti, disponendo l'anemometro alla stessa quota del mozzo del miniaerogeneratore monitorato. Per semplificare le operazioni di installazione delle torri anemometriche e gli interventi di manutenzione degli strumenti sulla loro sommità, ultimamente ne sono state acquisite alcune in cui il tradizionale traliccio è sostituito da un sostegno formato da tubi telescopici con elevazione pneumatica. Il pannello fotovoltaico viene installato solo nel caso in cui non sia possibile fornire alimentazione elettrica alla centralina di raccolta dei dati meteo-anemometrici.

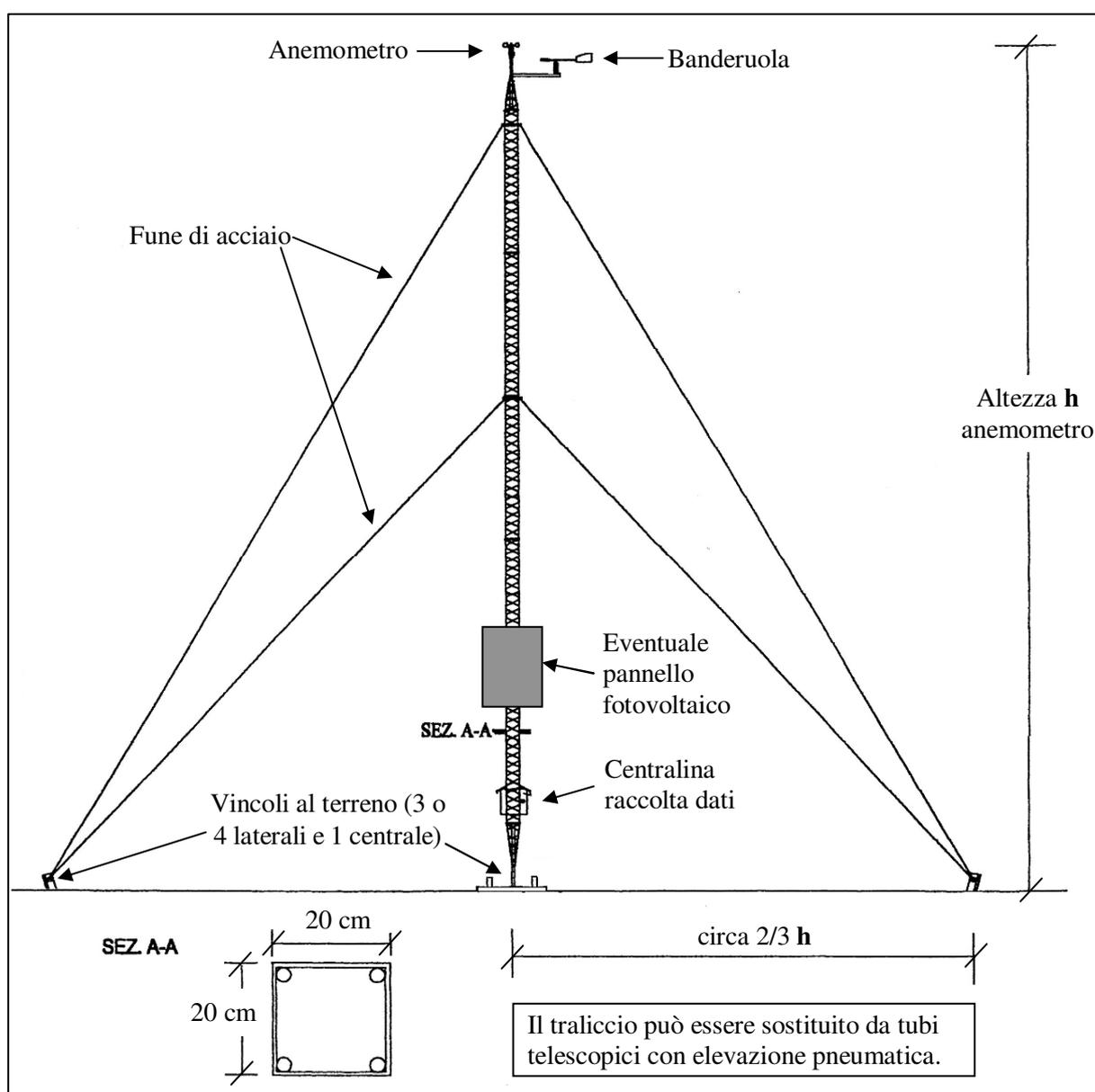


Fig. 5.2 – Esempio di torre meteo-anemometrica di un sistema di monitoraggio per impianti minieolici.

Per l'interpretazione dei dati misurati si opera seguendo, per quanto possibile, le indicazioni riportate nella già citata Norma CEI EN 61400-12-1 [16], la quale prescrive che:

- la torre anemometrica deve distare da 2 a 4 diametri (ottimale 2,5 diametri) dal palo dell'aerogeneratore;
- le misure del vento devono essere effettuate all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore;
- non devono essere considerati i dati rilevati nel cono disturbato dalla scia dell'aerogeneratore, che è ampia:
 - 81° per una distanza tra torre anemometrica e aerogeneratore pari a 2 diametri del suo rotore
 - 74° per una distanza tra torre anemometrica e aerogeneratore pari a 2,5 diametri del suo rotore
 - 59° per una distanza tra torre anemometrica e aerogeneratore pari a 4 diametri del suo rotore

Le velocità del vento vengono poi normalizzate applicando, nel caso di miniaerogeneratori con controllo attivo della potenza, le seguenti relazioni:

$$\rho_{1\min} = \frac{B_{1\min}}{R \times T_{1\min}} \quad (5.1)$$

$$V_n = V_{1\min} \times \left(\frac{\rho_{1\min}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.2)$$

dove:

- $\rho_{1\min}$ è la densità dell'aria calcolata, mediata su 1 min
- $B_{1\min}$ è la pressione atmosferica dell'aria misurata, mediata su 1 min
- R è la costante del gas, pari a 287,05 J / (kg x K)
- $T_{1\min}$ è la temperatura assoluta dell'aria misurata, mediata su 1 min
- V_n è la velocità del vento normalizzata
- $V_{1\min}$ è la velocità del vento misurata, mediata su 1 min
- ρ_0 è la densità dell'aria di riferimento pari a 1,225 kg/m³

5.2 Impianto da 2 kW a Cesenatico (FC)

5.2.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto si trova a Cesenatico (FC) ed è costituito da un sistema minieolico da 2 kW, che la società Amga Energia di San Mauro Pascoli (FC) [19] ha gentilmente concesso a RSE di monitorare, installandovi anche una torre anemometrica.

Nelle Figg. 5.3 e 5.4 sono indicate, su una vista dall'alto ripresa da Google Earth, le posizioni del miniaerogeneratore e del palo anemometrico. Come si può osservare, l'impianto si trova in una zona costiera libera da grossi ostacoli e distante circa 680 m dal mare.

La posizione della torre anemometrica è stata scelta 12 m a nord del miniaerogeneratore, in modo da essere distante meno di 4 volte il diametro del suo rotore, in accordo con quanto prescritto dalla Norma CEI EN 61400-12-1 "Verifica delle prestazioni di potenza degli aerogeneratori" [16].

Nella Fig. 5.5 sono rappresentati il miniaerogeneratore e la torre anemometrica, strumentata con sensori per la misura del vento (un anemometro e una banderuola installati sulla sua sommità), sensori della temperatura dell'aria e della pressione atmosferica (un sensore termometrico e un sensore barometrico), e una centralina di raccolta dati con relativo pannello fotovoltaico di alimentazione.

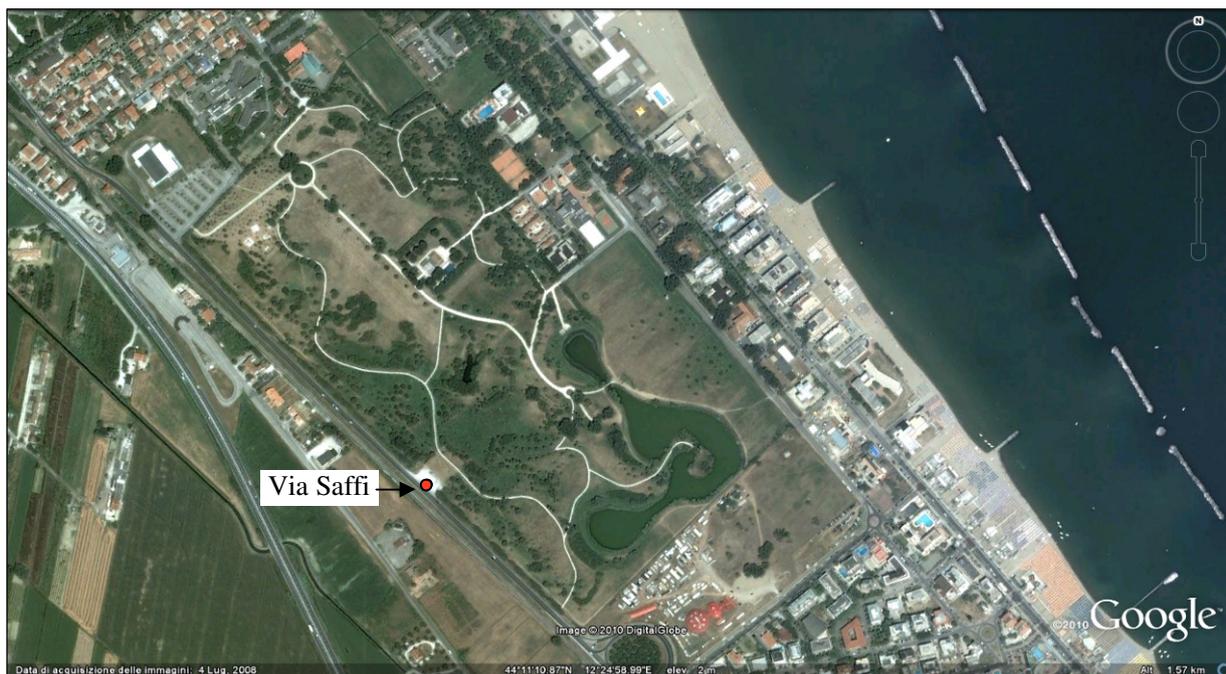


Fig. 5.3 – Posizione del miniaerogeneratore (cerchio rosso).



Fig. 5.4 – Posizioni del miniaerogeneratore (cerchio rosso) e della torre anemometrica (cerchio blu).



Fig. 5.5 – Miniaerogeneratore da 2 kW e torre anemometrica installati a Cesenatico.

Nella Tab. 5.1 e nella Fig. 5.6 sono riportati dati tecnici e la curva di potenza del sistema minieolico in oggetto, che viene distribuito in Italia e, in particolare, è costituito da un miniaerogeneratore Windon da 2 kW [20], con tre pale a passo fisso del diametro di 3,2 m e timone, e da un inverter SMA Windy Boy 2500 IT monofase [21].

Potenza nominale [kW]	2	
Asse di rotazione	Orizzontale	
Meccanismo di orientamento	Sopravento con timone	
Velocità del vento [m/s]	Cut-in	3
	Nominale	10
	Cut-out	25
	Sopravvivenza	45
Attivazione dell'aerogeneratore	Autonoma con vento	
Numero di pale	3	
Materiale delle pale	Fibra di vetro	
Velocità rotazione pale [rpm]	Minima	400
	Massima	500
Diametro del rotore [m]	3,2	
Sostegno	Palo tubolare autoportante	
Altezza da terra del mozzo [m]	8	
Moltiplicatore	Assente	
Generatore elettrico	Sincrono	

Tab. 5.1 – Caratteristiche tecniche indicate per il sistema minieolico monitorato.

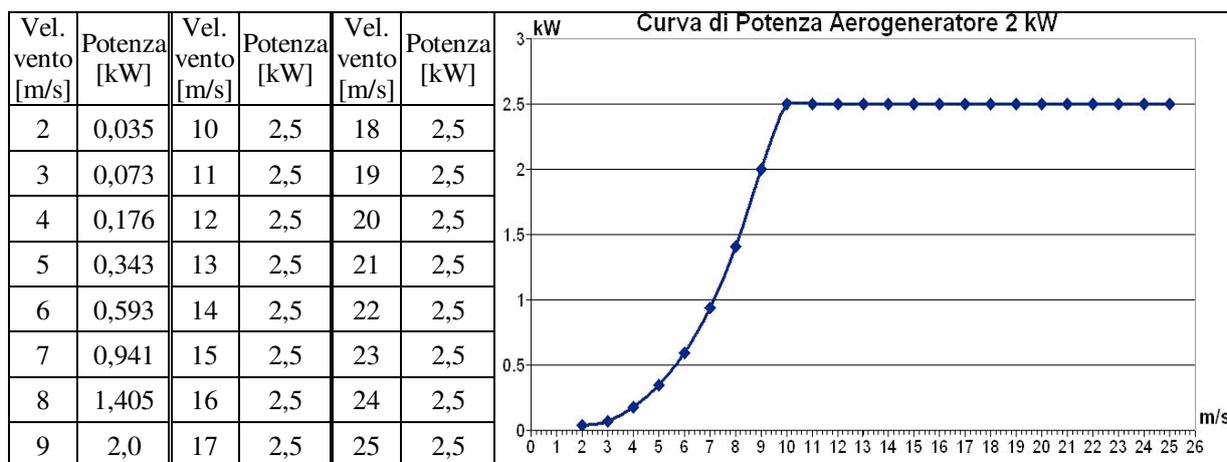


Fig. 5.6 – Curva di potenza indicata per il sistema minieolico monitorato.

5.2.2 Dati di esercizio dell'impianto

Il sistema di monitoraggio è stato installato ai primi di agosto 2011 e ha iniziato ad acquisire dati dal 4 agosto 2011. Nella Tab. 5.2 sono riportati valori riassuntivi, determinati mese per mese fino a febbraio 2012, della potenza attiva, della potenza reattiva e dell'energia elettrica prodotte dall'impianto, e delle caratteristiche del vento. I dati della potenza e dell'energia elettrica sono stati rilevati con continuità per tutto il periodo, mentre i dati meteo-anemometrici sono stati acquisiti con continuità nei mesi di agosto, settembre e ottobre e con discontinuità tra novembre e febbraio. Queste discontinuità sono dovute a periodi con ridotta insolazione, che hanno impedito al pannello fotovoltaico di fornire la necessaria alimentazione elettrica alla centralina meteo-anemometrica. Per questo motivo nella tabella vengono indicati i valori di sintesi della potenza attiva calcolati con riferimento sia agli interi mesi, che ai periodi nei quali era in funzione il sistema meteo-anemometrico.

Mese - anno	Misure di potenza					Misure con dati meteo-anemometrici acquisiti							
	Potenza attiva (kW)		Potenza reattiva (kvar)		Energia elettrica (kWh)	Campioni		Velocità vento (m/s)				Potenza attiva (kW)	
	Media	Max 1 min	Media	Max 1 min		Numero	Durata* (%)	Media	Max 1 min	Max 1 s	STD	Media	Max 1 min
ago-11	0.012	0.400	0.000	0.040	7.85	40316	100.0%	2.11	12.49	17.65	0.39	0.012	0.400
set-11	0.009	0.390	0.000	0.040	6.49	43200	100.0%	2.00	11.53	15.80	0.37	0.009	0.390
ott-11	0.021	0.380	0.000	0.030	15.91	44628	100.0%	2.24	11.29	20.90	0.37	0.021	0.380
nov-11	0.014	0.370	0.000	0.020	9.96	13874	32.1%	2.23	7.03	10.70	0.47	0.015	0.370
dic-11	0.028	0.390	0.001	0.040	20.90	9523	21.3%	2.41	11.49	14.95	0.40	0.032	0.380
gen-12	0.018	0.390	0.000	0.030	13.45	9960	22.3%	1.90	9.40	15.95	0.33	0.019	0.390
feb-12	0.010	0.370	0.000	0.020	7.04	10657	25.5%	2.98	11.51	17.10	0.44	0.006	0.340
Media	0.016	0.384	0.000	0.031	11.66	-	57.3%	2.27	10.68	16.15	0.40	0.016	0.379
Massimo	0.028	0.400	0.001	0.040	20.90	-	100.0%	2.98	12.49	20.90	0.47	0.032	0.400
Somma	-	-	-	-	81.60	172158		-	-	-	-	-	-

* Durata percentuale delle misure meteo-anemometriche rispetto a quelle di potenza.

Tab. 5.2 – Dati riassuntivi per mese delle principali grandezze rilevate dal sistema di monitoraggio dell'impianto.

Nella Fig. 5.7 vengono diagrammati gli andamenti, mese per mese, della velocità del vento e dell'energia elettrica e della potenza attiva prodotte dall'impianto. Come si può osservare dai dati innanzi riportati, l'energia prodotta dall'impianto è variata significativamente da mese a mese, mantenendo comunque valori estremamente ridotti e raggiungendo al massimo, a dicembre 2011, il valore di 20,9 kWh, cui corrisponde un funzionamento a piena potenza dell'impianto di solo 10 h e 27'.

La velocità del vento è risultata con valori medi contenuti (tra 1,90 e 2,98 m/s), raggiungendo però valori massimi su un minuto significativi (tra 7,03 e 12,49 m/s) e anche elevati su un secondo (tra 10,70 e 20,90 m/s).

La potenza prodotta dall'impianto è risultata sempre ridotta, presentando valori massimi su un minuto tra 0,38 e 0,40 kW, mentre, in base alla curva di potenza indicata dal costruttore, a partire dalla velocità del vento di 10 m/s il sistema minieolico dovrebbe produrre una potenza di 2,5 kW.

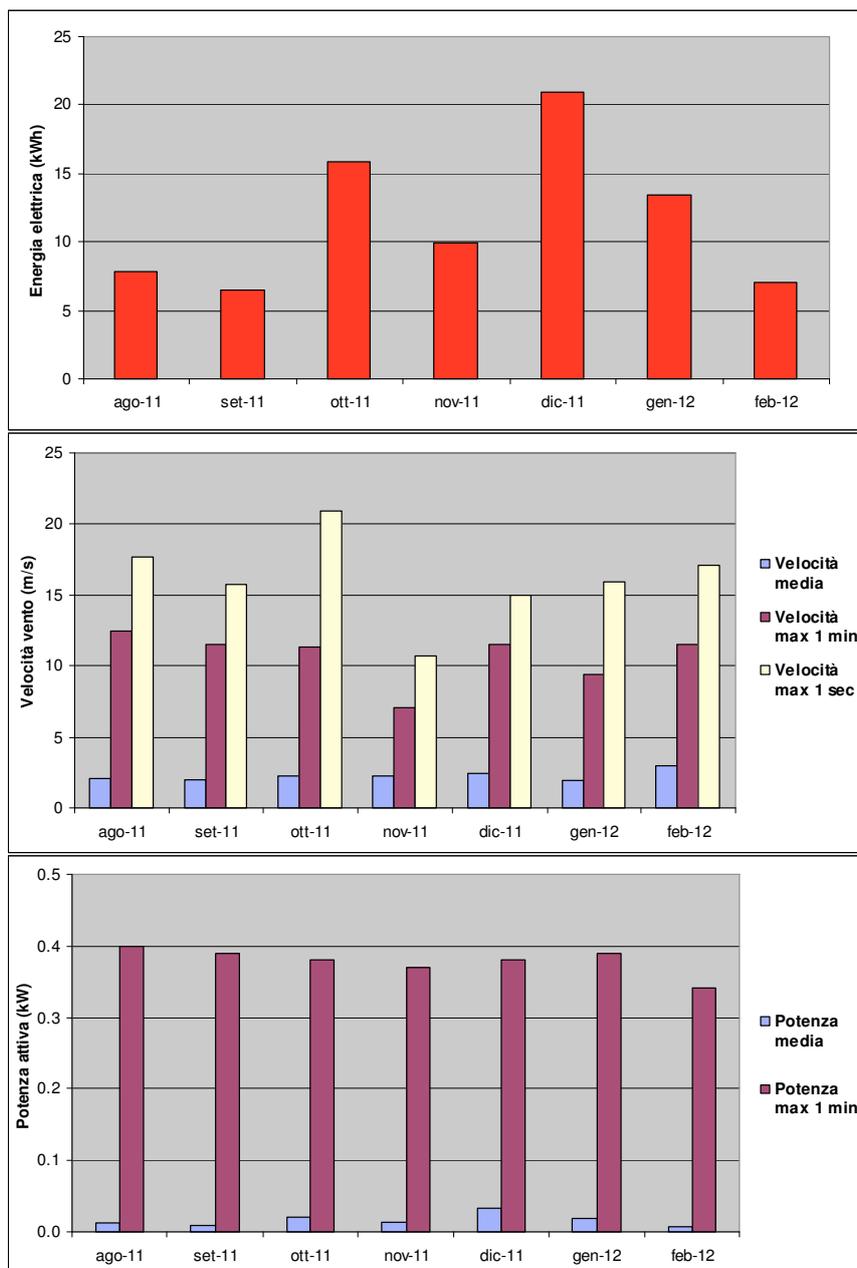


Fig. 5.7 – Valori riassuntivi per ogni mese della velocità del vento, nonché dell'energia elettrica e della potenza attiva prodotte dall'impianto da agosto 2011 a febbraio 2012.

Per fornire altre interessanti informazioni, nella Fig. 5.8 vengono diagrammati gli andamenti rilevati ad agosto 2011 della velocità e della direzione del vento e delle potenze attiva e reattiva prodotte.

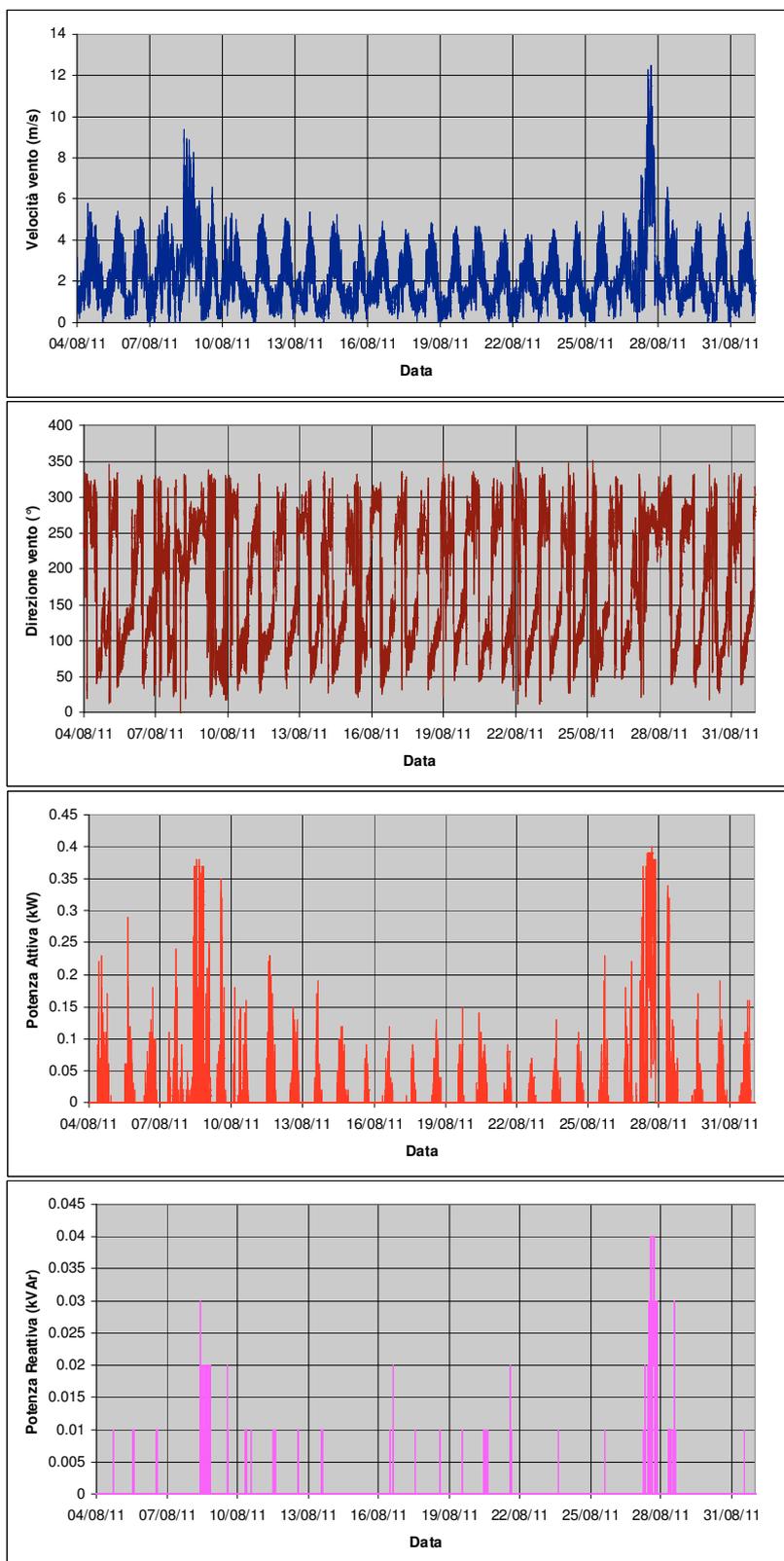


Fig. 5.8 – Valori medi, su un minuto, della velocità e della direzione del vento e delle potenze attiva e reattiva prodotte dall’impianto dal 4 al 31 agosto 2011.

I dati riportati nella figura precedente indicano che, durante tutti i giorni, a metà giornata ha spirato una brezza di mare, proveniente da est, che ha prodotto potenza attiva, con entità ridotta, e potenza reattiva, con entità ridottissima. I giorni 9 e 27 agosto il vento è stato più intenso che nei giorni precedenti, probabilmente a causa di perturbazioni atmosferiche, consentendo di rilevare i seguenti valori massimi:

	<u>8 agosto</u>	<u>27 agosto</u>
• velocità massima del vento (m/s)	9,36 m/s	12,49 m/s
• potenza attiva massima (kW)	0,38 kW	0,40 kW
• potenza reattiva massima (kvar)	0,03 kvar	0,04 kvar

Nella Fig. 5.9 vengono diagrammati gli andamenti della velocità e direzione del vento e della potenza attiva nei giorni dal 24 al 30 agosto, cioè a cavallo del 27 agosto, il giorno più ventoso riscontrato. Come si può osservare da tali diagrammi:

- l'impianto ha iniziato a produrre, seppure con potenza assai ridotta, tendenzialmente quando la velocità del vento era superiore a circa 3 m/s;
- oltre la velocità del vento di circa 8 m/s la potenza prodotta dall'impianto è rimasta pressoché costante.

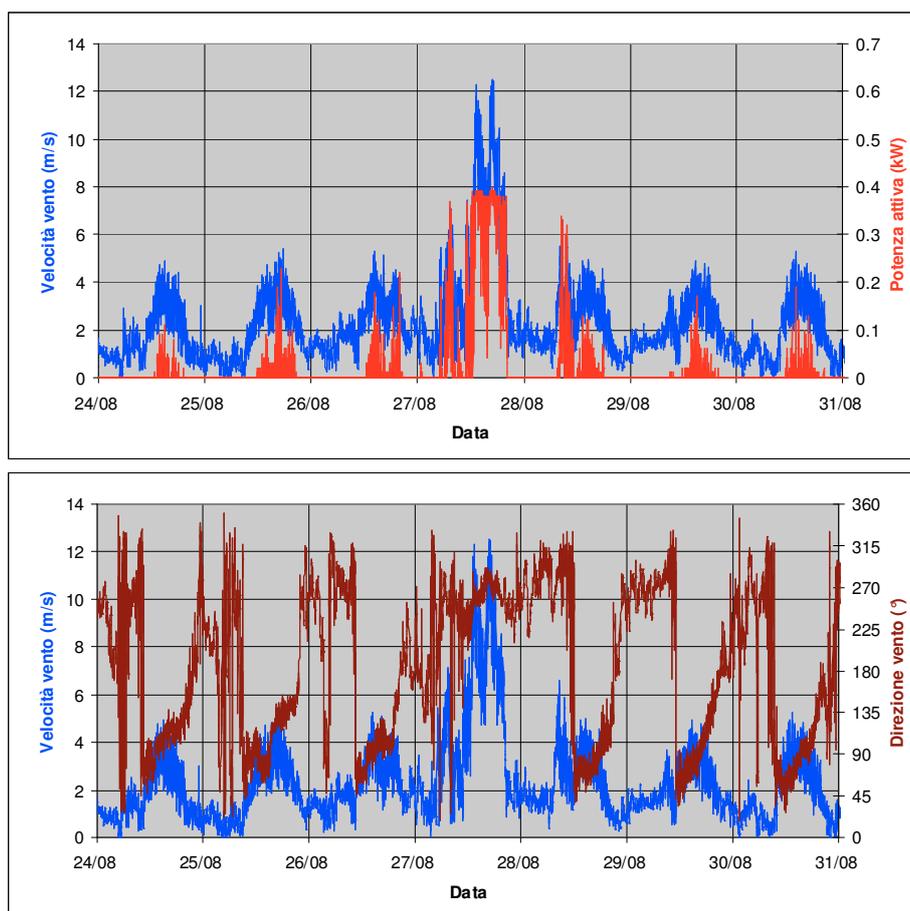


Fig. 5.9 – Valori medi, su un minuto, della velocità e direzione del vento e della potenza attiva prodotta dall'impianto dal 24 al 31 agosto 2011.

Nei giorni dal 24 al 30 agosto la brezza proveniva fondamentalmente da est, ovvero dal mare come si vede dalla Fig. 5.3, ad eccezione del periodo con vento più intenso, quando la direzione del vento era attorno a circa 270° (ovest), come rappresentato nel diagramma della Fig. 5.10.

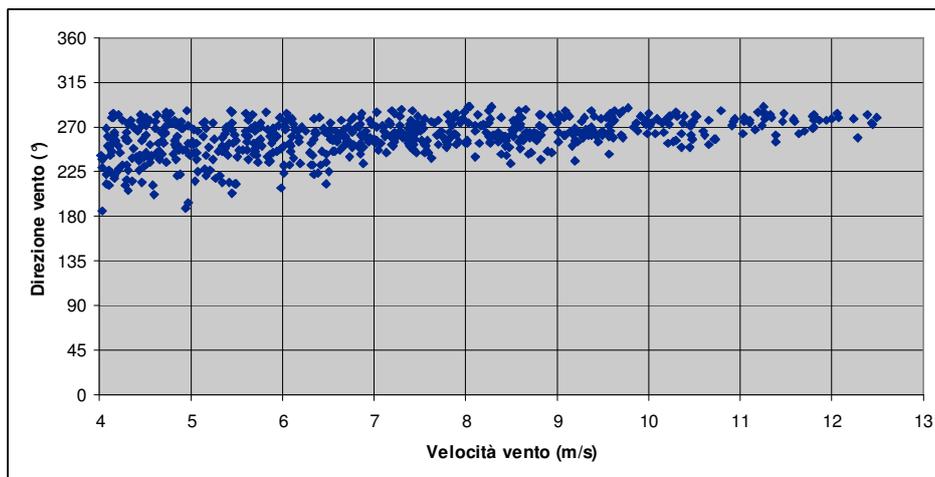


Fig. 5.10 – Direzione del vento in funzione della velocità del vento il 27 agosto 2011 per velocità del vento maggiore di 4 m/s.

Per fornire dati che permettano di comparare le prestazioni del sistema minieolico riscontrate rispetto a quelle attese in base ai dati indicati dal suo costruttore, nel diagramma della Fig. 5.11 viene riportata la potenza attiva immessa in rete dal sistema minieolico in funzione della velocità del vento; entrambe queste grandezze sono state determinate considerando i dati rilevati nel mese di agosto 2011 quando la torre anemometrica non si trovava in scia all'aerogeneratore.

In particolare nel caso in esame, in base alla già citata Norma CEI EN 61400-12-1 [16], i dati non considerati sono stati quelli con direzione del vento tra 149° e 211° gradi, che sono risultati solo il 10,7% dei dati rilevati, essendo la torre anemometrica ben ubicata.

Nello stesso diagramma vengono pure riportate la potenza attiva media ricavata dai dati appena citati per intervalli (bin) di velocità del vento con ampiezza di 0,5 m/s, e la curva di potenza indicata dal costruttore dell'aerogeneratore in esame.

Come si può osservare, i dati rilevati coprono un apprezzabile campo di velocità del vento e presentano una buona ripetibilità per velocità del vento superiori a 8 m/s. La curva di potenza dell'impianto minieolico risulta però, nel complesso, decisamente inferiore a quella indicata dal suo costruttore, e questo può spiegare le ridotte prestazioni fornite da questo impianto per quanto riguarda la potenza massima che ha prodotto e l'energia elettrica che ha generato nel periodo di misura.

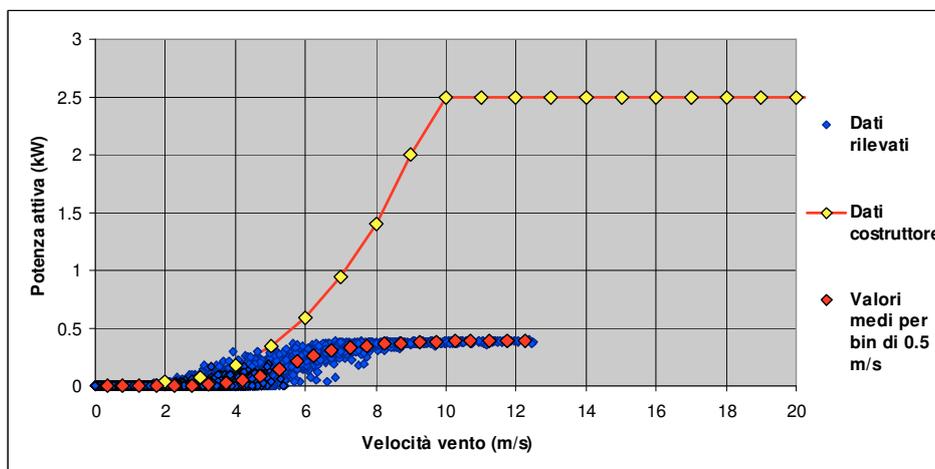


Fig. 5.11 – Potenza attiva prodotta dall'impianto minieolico in funzione della velocità del vento.

A proposito di tali ridotte prestazioni si segnala che, a pochi chilometri di distanza dall'impianto monitorato, esiste un altro impianto, in un sito presumibilmente esposto agli stessi venti, con il medesimo tipo di miniaerogeneratore, ma con un diverso tipo d'inverter, in questo caso SMA Windy Boy 3800IT invece che SMA Windy Boy 2500IT.

Nel già citato rapporto di RSE "Indagini sperimentali su sistemi minieolici" [3] sono riportati dati, gentilmente messi a disposizione di RSE da Amga Energia, rilevati prevalentemente nel 2010 su entrambi gli impianti da appositi sistemi di monitoraggio, che hanno permesso di determinare che:

- l'altro impianto ha avuto una produzione elettrica mediamente pari a 1,9 volte quella dell'impianto monitorato;
- l'altro impianto ha prodotto potenze (valore medio su 3 minuti) fino a 2,54 kW e ha superato più volte la potenza di 2 kW.

Questi risultati fanno ritenere che l'impianto monitorato in oggetto possa avere avuto un funzionamento anomalo, soprattutto perché ha prodotto al massimo solo una potenza di 0,40 kW (valore medio su 1 min, che diventano 0,39 kW come valore medio su 3 min), mentre con le velocità del vento riscontrate avrebbe dovuto generare potenze fino a 2,5 kW, come del resto è avvenuto nell'altro impianto.

Per ricavare informazioni che possano permettere di individuare le cause del comportamento marcatamente differente dei due sistemi minieolici, nella Fig. 5.12 vengono riportate le caratteristiche elettriche dei due inverter anzidetti, fra cui in particolare quelle della tensione e corrente continua in ingresso (nel caso in esame risultanti dal raddrizzamento della tensione e corrente alternata a frequenza variabile prodotta dal miniaerogeneratore) da essi richieste per poter poi immettere tensione e corrente alternata a 50 Hz in rete.

Inverter impianto monitorato da 2 kW		Inverter altro impianto da 2 kW	
Windy Boy 2500		Windy Boy 3800	
Ingresso (CC)		Ingresso (CC)	
Potenza CC max	2700 W	Potenza CC max	3820 W
Potenza del generatore consigliata con 2500 / 5000 ore di pieno carico all'anno	2100 W / 1900 W	Potenza consigliata del generatore con 2500 / 5000 ore di pieno carico all'anno	3100 W / 2800 W
Tensione CC max	600 V	Tensione CC max	500 V
Tensione nominale CC	300 V	Tensione nominale CC	200 V
Tensione a vuoto minima per attivazione del "Turbine Mode"	300 V	Tensione a vuoto minima per attivazione del "Turbine Mode"	250 V
Range operativo "Turbine Mode"	250 V - 600 V	Range operativo "Turbine Mode"	200 V - 500 V
Corrente d'ingresso max	12,0 A	Corrente d'ingresso max	20,0 A

Fig. 5.12 – Estratti delle caratteristiche tecniche degli inverter SMA impiegati [21][22].

Come si può osservare dalla figura precedente, l'inverter dell'impianto monitorato, per attivarsi o mantenersi operativo, richiede tensioni continue minime in ingresso rispettivamente di 300 V e di 250 V, valori che sono invece di 250 V e di 200 V nell'inverter dell'altro impianto. Questo fatto, da cui dipenderebbe in pratica un periodo di tempo di attività del primo inverter più limitato ai venti bassi rispetto al secondo, potrebbe essere una delle cause delle ridotte prestazioni riscontrate sull'impianto minieolico monitorato.

Altre cause potrebbero essere dovute a differenti composizioni o "settaggi" dei due sistemi minieolici o ad anomalie presenti nell'impianto monitorato.

Per chiarire quali siano effettivamente le cause che hanno portato il sistema minieolico monitorato a produrre potenze decisamente inferiori a quelle attese, sarebbe comunque opportuno continuare il

monitoraggio dell'impianto in questione, acquisendo in particolare anche la potenza prodotta dal miniaerogeneratore (ossia quella rilevabile in ingresso all'inverter) e sostituendo altresì lo stesso inverter con un altro caratterizzato da più bassi valori delle anzidette tensioni di ingresso.

5.3 Impianto da 10 kW a Favara (AG)

5.3.1 Descrizione dell'impianto

Come indicato nella Fig. 5.13, l'impianto si trova alla quota di circa 290 m s.l.m., al confine tra un'area agricola e un'area industriale del Comune di Favara (AG), ed è costituito da due sistemi minieolici da 10 kW e una torre anemometrica, il tutto di proprietà della società Campione Industries di Agrigento [23].

Su gentile concessione di questa società è stato strumentato da RSE uno di questi miniaerogeneratori, utilizzando pure la torre anemometrica esistente.

In particolare la torre anemometrica si trova a circa 28 m a Nord-Nord-Ovest dall'aerogeneratore monitorato, ossia a circa 4 volte il diametro del suo rotore, distanza limite indicata dalla Norma CEI EN 61400-12-1 "Verifica delle prestazioni di potenza degli aerogeneratori" [16].

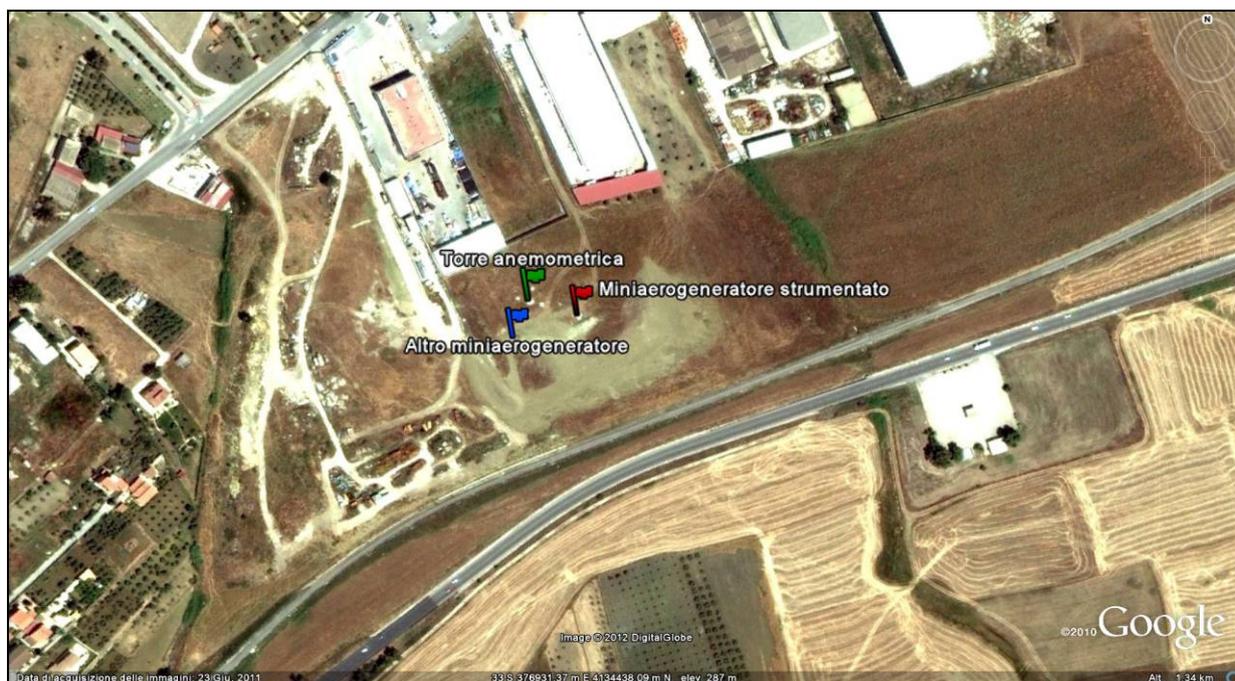


Fig. 5.13 – Posizioni del miniaerogeneratore monitorato, dell'altro miniaerogeneratore e della torre anemometrica.

Nella Fig. 5.14 sono rappresentati il miniaerogeneratore, che ha il palo di sostegno alto circa 15 m, e la torre anemometrica.

Sulla torre anemometrica sono stati disposti sensori per la misura del vento (un anemometro e una banderuola, installati sulla sua sommità), sensori della temperatura dell'aria e della pressione atmosferica (un sensore termometrico e un sensore barometrico), e una centralina di raccolta dati con relativo pannello fotovoltaico di alimentazione.

In particolare, l'anemometro e la banderuola di RSE sono stati installati a una quota leggermente inferiore rispetto alla sommità della torre anemometrica, com'è visibile nella figura anzidetta, in modo che non interferiscano con gli analoghi sensori preesistenti.



Fig. 5.14 – Miniaerogeneratore da 10 kW e torre anemometrica installati a Favara, con visibili i vecchi e i nuovi sensori del vento, questi ultimi disposti a quota inferiore.

Nella Fig. 5.15 sono riportati i dati tecnici e la curva di potenza del sistema minieolico in oggetto, che viene distribuito in Italia e, in particolare, è costituito da un miniaerogeneratore di costruzione cinese da

10 kW, con rotore sottovento del diametro di 7 m dotato di tre pale a passo fisso, e da un inverter trifase Elpower da 10 kW [24].

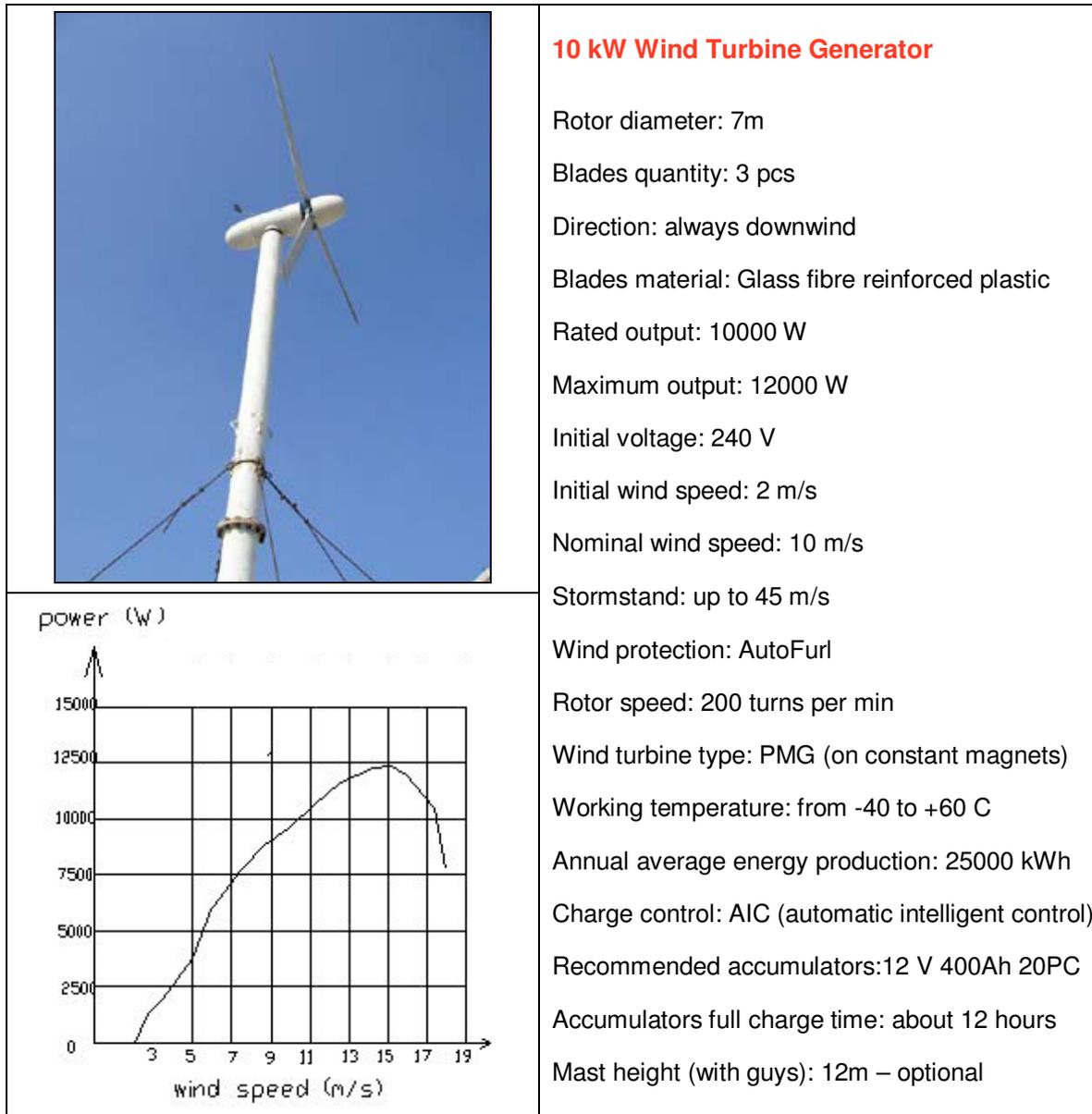


Fig. 5.15 – Caratteristiche tecniche e curva di potenza indicate per il sistema minieolico in oggetto.

Al momento non sono stati ancora raccolti dati di funzionamento del sistema minieolico monitorato, poiché entrambi gli aerogeneratori in campo sono stati oggetto di interventi migliorativi dei loro dispositivi di sicurezza, effettuati in officina dopo averli smontati dal palo di sostegno. Questi interventi sono terminati soltanto di recente e presto sarà possibile raccogliere dati sul funzionamento del sistema minieolico monitorato.

5.4 Impianto da 10 kW a Bresciadega, Comune di Novate Mezzola, Val Codera (SO)

5.4.1 Descrizione dell'impianto

Per fornire energia elettrica ad un gruppo di case nella località Bresciadega del Comune di Novate Mezzola (Sondrio), è stato realizzato sul posto un impianto ad isola, alimentato da più fonti energetiche, tra le quali un sistema minieolico da 10 kW. Questa località si trova nella parte centrale della Val Codera, alla quota di circa 1200 m s.l.m.; è costituita da circa 30 case (abitate per lo più in estate e nei periodi di fine settimana) e da un rifugio turistico, ed è priva di collegamento stradale.

L'impianto è installato in prevalenza presso l'edificio rappresentato nella Fig. 5.16, che è utilizzato come appoggio locale dal Consorzio Forestale della Val Codera (CFVC). Il trasporto dei materiali necessari per realizzare l'impianto, mancando il collegamento stradale, è avvenuto in elicottero.



Fig. 5.16 – Edificio nella località Bresciadega, in Val Codera, dove sono installati diversi sistemi di generazione (tra i quali uno fotovoltaico da 14 kWp sul tetto e uno minieolico da 10 kW nel cortile) per alimentare un impianto ad isola predisposto per fornire corrente elettrica a 15 abitazioni.

L'impianto, il cui schema a blocchi è rappresentato nella Fig. 5.17, è realizzato per fornire energia elettrica a 15 abitazioni, tramite una mini rete di distribuzione a bassa tensione in corrente alternata trifase (con tensione di 400 V trifase e frequenza di 50 Hz). È composto da:

- un sistema di generazione fotovoltaico da 14 kWp;
- un sistema di generazione minieolico da 10 kW, con aerogeneratore dotato di timone direzionale e avente un rotore con tre pale a passo fisso del diametro di 7 m;
- un gruppo elettrogeno diesel da 22 kVA, utilizzato in caso di mancanza di energia da parte dei due sistemi anzidetti;
- una batteria di accumulatori da 168 kWh;
- alcuni inverter con potenza complessiva di 20 kW.

L'impianto è completamente automatizzato e funziona in modo non presidiato. L'energia elettrica viene

generata in prevalenza dal sistema fotovoltaico e in parte minore dal sistema eolico; solo in caso di necessità si ricorre all'impiego del gruppo elettrogeno. Tuttavia, onde evitare guasti dovuti a soste troppo prolungate, il sistema di gestione dell'impianto avvia periodicamente il gruppo elettrogeno per alcune ore.

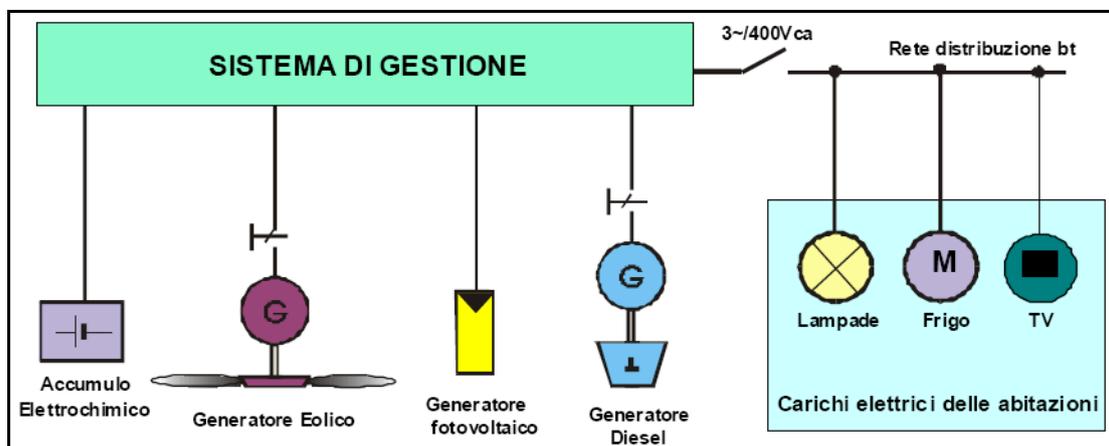


Fig. 5.17 – Schema a blocchi dell'impianto ad isola nella località Bresciadega, in Val Codera, alimentato anche da un sistema minieolico da 10 kW [25].

L'energia è fornita alle utenze mediante la mini rete trifase locale a 400 V, che è gestita da opportuni convertitori di batteria i quali, in funzione della tensione della rete e dello stato di carica della batteria, fanno operare il sistema nel seguente modo:

- batteria sovraccarica, vengono scollegati, in ordine, il generatore eolico e progressivamente parti del generatore fotovoltaico al fine di ridurre la corrente entrante nella batteria; al ripristino delle condizioni normali di carica della batteria, il generatore fotovoltaico viene automaticamente ricollegato in modo completo e quindi viene connesso nuovamente anche il generatore eolico;
- batteria quasi scarica, vengono scollegate, per periodi limitati, parti dei carichi elettrici (ad esclusione di quelli indispensabili per il sistema) per ridurre la corrente uscente dalla batteria; al ripristino delle condizioni normali di carica della batteria, i carichi elettrici precedentemente scollegati vengono automaticamente ricollegati;
- batteria scarica, viene avviato il gruppo elettrogeno che provvede ad alimentare i carichi e, se possibile, a ricaricare la batteria.

Come rappresentato nella Fig. 5.18, l'impianto minieolico comprende essenzialmente un miniaerogeneratore BWC EXCEL S/50 da 10 kW e un sistema di conversione dell'energia, descritto di seguito.



Fig. 5.18 – Miniaerogeneratore BWC EXCEL S/50 da 10 kW e parte del sistema di gestione dell’impianto minieolico; in particolare i tre contenitori rossi più piccoli della foto a destra sono inverter SMA Wind Boy WB1200.

Nelle Figg. 5.19 e 5.20 sono riportate informazioni sul sistema minieolico installato riprese da documentazione emessa dal suo fornitore. L’aerogeneratore (corrispondente alla curva di potenza blu del diagramma riportato nella Fig. 5.20⁸) è installato su un traliccio a tre montanti alto 18 m e presenta le seguenti caratteristiche principali:

- diametro del rotore: 7 m
- peso: 475 kg (1050 lbs)
- velocità del vento di start-up: 3,4 m/s (7,5 mph)
- velocità del vento di cut-in: 3,6 m/s (8 mph)
- velocità del vento nominale: 13,9 m/s (31 mph)
- velocità del vento di furling: 16,1 m/s (36 mph)
- massima velocità del vento di progetto: 55,9 m/s (125 mph)
- potenza nominale: 10 kW
- potenza massima (alla velocità del vento di furling): 12 kW
- velocità di rotazione nominale: 310 rpm (giri al minuto)

Per ridurre la potenza agli alti venti, oltre la velocità del vento detta di “furling” viene prodotto automaticamente un disallineamento del timone rispetto all’asse del rotore, com’è visibile nella già citata Fig. 5.18, mediante l’attuazione di un apposito meccanismo illustrato nella Fig. 5.19.

⁸ A proposito di tale diagramma si fa osservare che la sua scala WIND SPEED in mph è stata convertita in m/s facendo erroneamente riferimento a miglia nautiche (1853 m) all’ora, anziché a miglia terrestri (1609 m). La stessa ditta Bergey indica del resto, nella sua documentazione, di utilizzare le miglia terrestri (1 m/s = 2,24 mph).

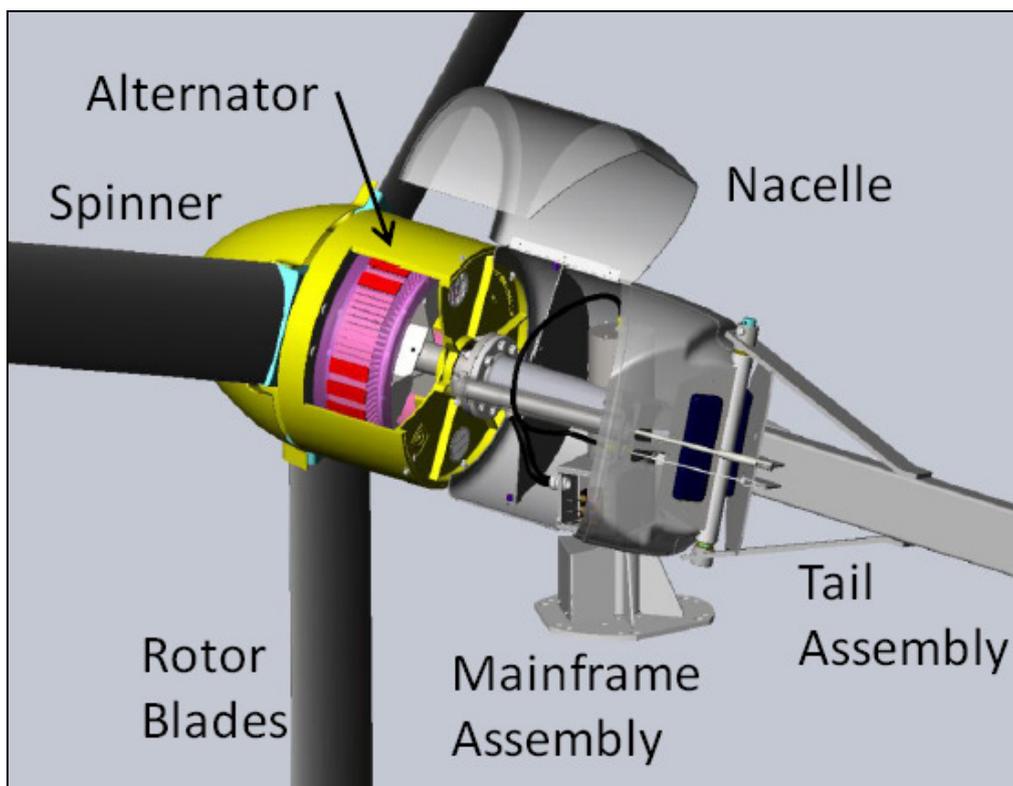
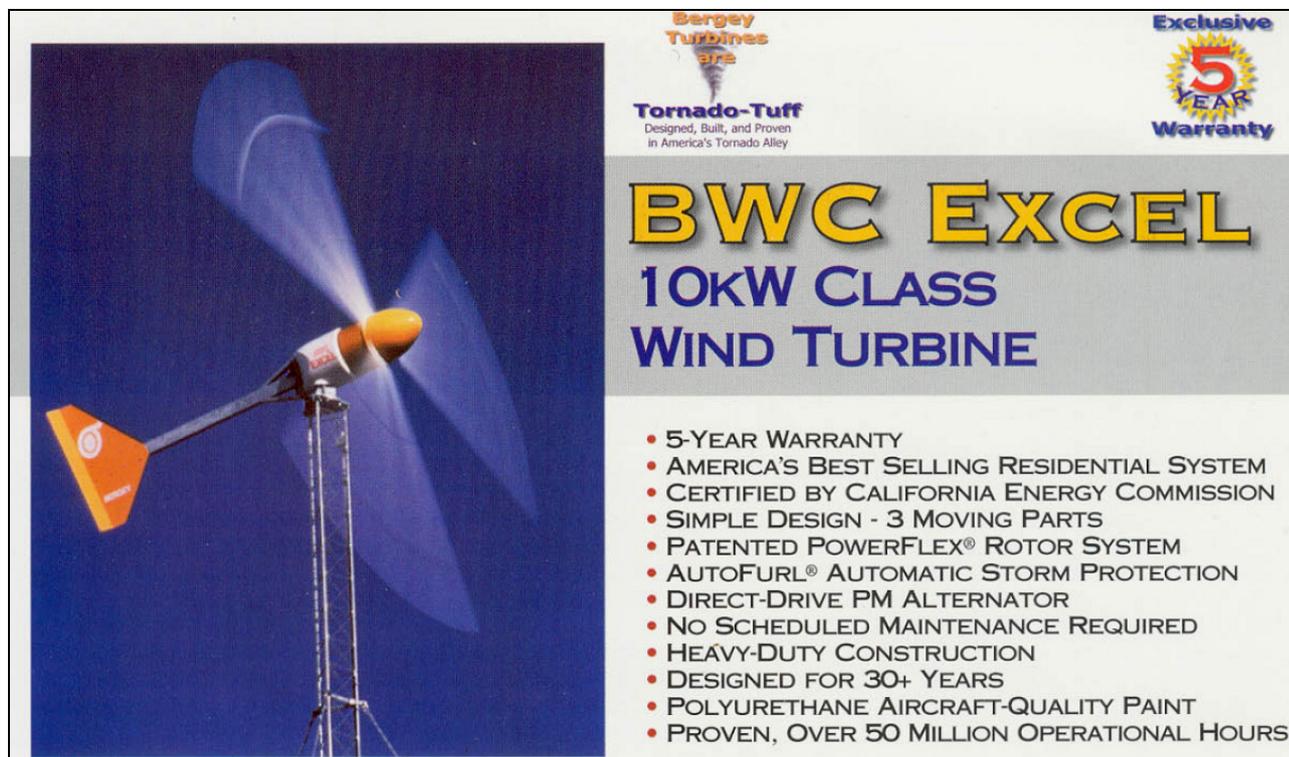


Fig. 5.19 – Disegno schematico del miniaerogeneratore BWC EXCEL da 10 kW [26].



Bergey Turbines are
Tornado-Tuff
Designed, Built, and Proven
in America's Tornado Alley

Exclusive
5 YEAR
Warranty

BWC EXCEL

10KW CLASS WIND TURBINE

- 5-YEAR WARRANTY
- AMERICA'S BEST SELLING RESIDENTIAL SYSTEM
- CERTIFIED BY CALIFORNIA ENERGY COMMISSION
- SIMPLE DESIGN - 3 MOVING PARTS
- PATENTED POWERFLEX® ROTOR SYSTEM
- AUTOFURL® AUTOMATIC STORM PROTECTION
- DIRECT-DRIVE PM ALTERNATOR
- NO SCHEDULED MAINTENANCE REQUIRED
- HEAVY-DUTY CONSTRUCTION
- DESIGNED FOR 30+ YEARS
- POLYURETHANE AIRCRAFT-QUALITY PAINT
- PROVEN, OVER 50 MILLION OPERATIONAL HOURS

The Bergy BWC Excel is a rugged and reliable small wind turbine that has been proven in hundreds of installations around the world. It comes from the world's leading manufacturer of small wind turbines and is backed by the longest warranty in the industry. Whether you want to reduce the electric bills at your home or power a critical load far from the power grid, the BWC Excel will deliver years of "worry-free" power.

Excel-S: Grid-Intertie Applications (10kW)
 Excel-R: Battery Charging Applications (7.5kW)
 Excel-PD: Pumping Applications (10kW)



Excel-S GridTek 10 Power Processor (AC output)
 Excel-R OptiCharge Voltage Regulator (DC output)

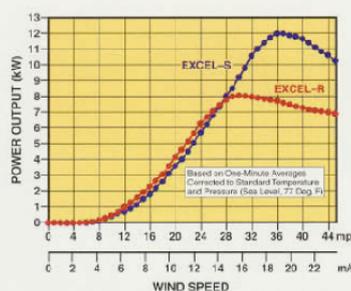


23 ft (7 meter) Rotor Diameter
 Net Weight: 1,050 lbs
 Shipping Weight: 1,200 lbs

THE ONLY MOVING PARTS ARE THE PARTS YOU SEE MOVING

PERFORMANCE

Start-up Wind Speed...7.5 mph
 Cut-In Wind Speed...8 mph
 Rated Wind Speed...31 mph
 Rated Rotor Speed...310 RPM
 Furling Wind Speed...36 mph
 Max. Design Wind Speed...125 mph
 (with Extra-Stiff Blades...150 mph)



Predicted Monthly Energy Production
 Wind Speeds Taken at Top of Tower

Average Wind Speed	6 mph	8 mph	10 mph	11 mph	12 mph	13 mph	14 mph
Excel-S (AC kWh)	240	370	520	700	900	1,130	1,370
Excel-R (DC kWh)	340	500	680	880	1,090	1,320	1,550

Wind Speeds Taken at 10 meters (per standard wind resource maps)

Average Wind Speed	6 mph	8 mph	10 mph	11 mph	12 mph	13 mph	14 mph
60 ft. Tower Excel-S	330	490	670	870	1,110	1,350	1,610
60 ft. Tower Excel-R	440	620	830	1,050	1,280	1,570	1,740
80 ft. Tower Excel-S	430	620	840	1,100	1,370	1,670	1,960
80 ft. Tower Excel-R	550	730	1,030	1,290	1,550	1,820	2,060
100 ft. Tower Excel-S	490	700	950	1,220	1,510	1,820	2,130
100 ft. Tower Excel-R	630	870	1,140	1,410	1,680	1,950	2,200
120 ft. Tower Excel-S	650	790	1,050	1,340	1,650	1,970	2,280
120 ft. Tower Excel-R	700	950	1,240	1,530	1,800	2,070	2,320

Assumptions: Inland Site, Rayleigh Distribution, Shear Exponent = 0.18, Altitude = 1,000 ft.
 Note: Battery charge regulation (batteries full) will reduce actual Excel-R performance.
 Your Performance May Vary.

POINT, CLICK, LEARN, ANALYZE & BUY WISELY: WWW.BERGEY.COM




**2001 PRIESTLEY AVE.
 NORMAN, OK 73069
 T: 405-364-4212
 F: 405-364-2078
 SALES@BERGEY.COM
 WWW.BERGEY.COM**

SIMPLICITY • RELIABILITY • PERFORMANCE

Fig. 5.20 – Scheda tecnica del sistema minieolico BWC EXCEL S/50 da 10 kW [27].

Nella Fig. 5.21 che segue è rappresentato il basamento del traliccio che sorregge il miniaerogeneratore, costituito da un plinto in cemento armato con dimensioni 3,7 x 3,7 x 1,20 m con 4 x 3 tirafondi (posizionati con apposita dima) per il vincolo dei tre piedi del traliccio.



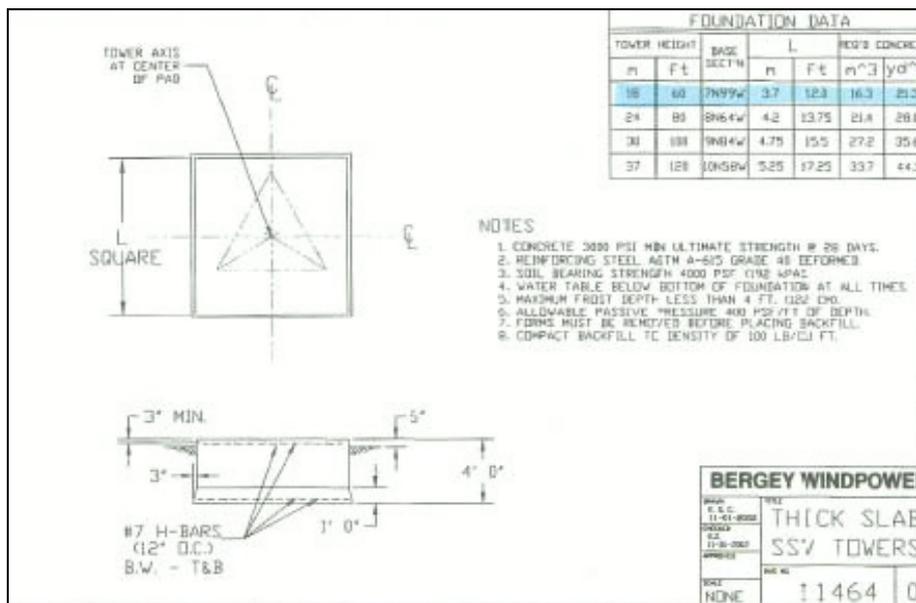


Fig. 5.21 Basamento del miniaerogeneratore BWC EXCEL S/50 da 10 kW.

Nella Fig. 5.22 è illustrata schematicamente la soluzione adottata per collegare l'aerogeneratore (la cui tensione di uscita è alternata a frequenza e tensione variabile, ed è poi raddrizzata, ma rimane comunque inferiore a 100 Vcc con basso vento) con il gruppo di inverter (la cui tensione di uscita è 400 Vca trifase a 50 Hz) della minirete. In particolare, questa soluzione impiega i seguenti componenti:

- n. 3 SMA Windy Boy Protection Box WBP-Box 400, che hanno anche la funzione di raddrizzatore;
- n. 3 SMA Windy Boy WB1200, che richiedono tensioni continue minime in ingresso, per attivarsi o mantenersi operativi, rispettivamente di 120 V e di 100 V;
- n. 3 carichi resistivi.
- n. 1 pannello di distribuzione in alternata.

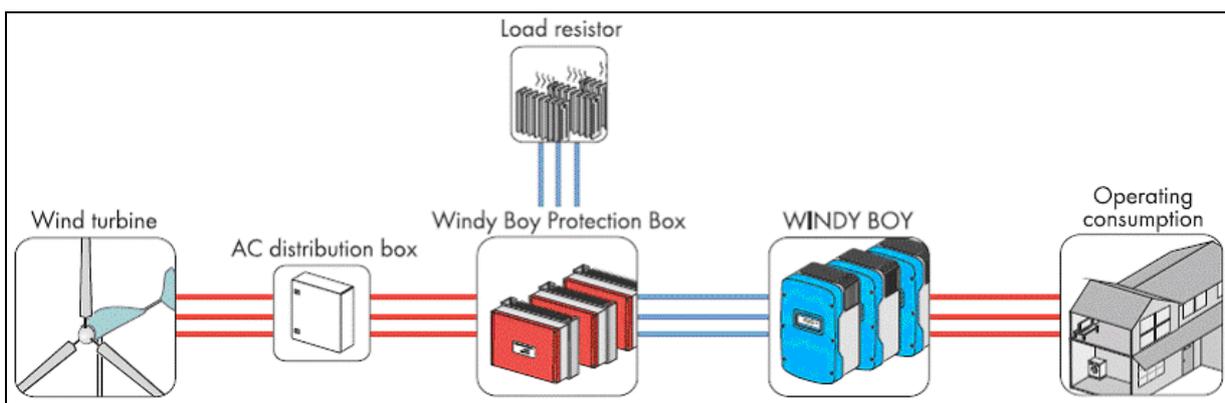


Fig. 5.22 - Sistema di collegamento del miniaerogeneratore alla minirete.

Per valutare le prestazioni dell'impianto minieolico, ad agosto 2011 è stato installato, in corrispondenza del miniaerogeneratore, un sistema di monitoraggio come quello descritto nel par. 5.1, costituito da:

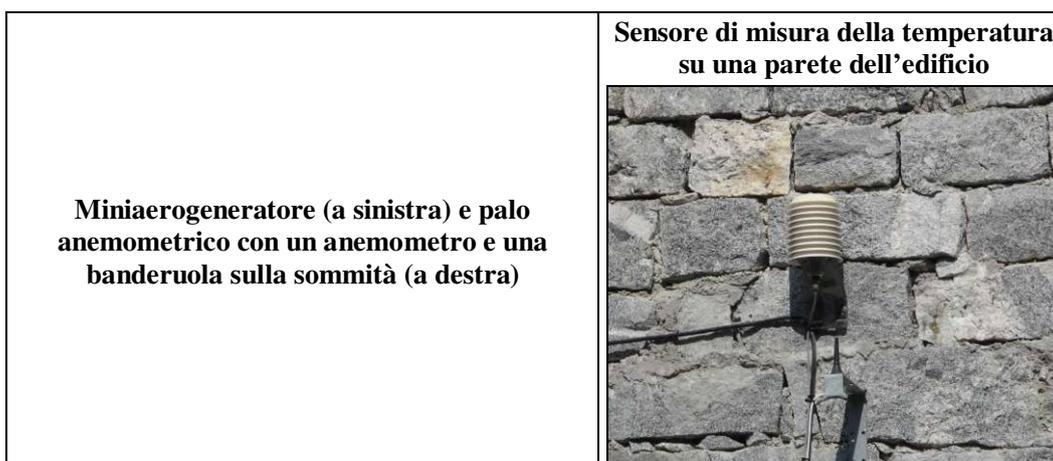
- un sistema meteo-anemometrico composto da sensori per la misura del vento (un anemometro e una banderuola installati sulla sommità di un palo a circa 15 m da terra), da sensori della temperatura dell'aria e della pressione atmosferica (un sensore termometrico e un sensore barometrico), e da una centralina di raccolta dati con alimentazione dalla rete elettrica;

- un sistema di acquisizione, composto da un misuratore della potenza prodotta dall'aerogeneratore e da un dispositivo per la raccolta, l'elaborazione e l'invio, tramite rete GSM, sia di tale dato sia dei dati misurati dal sistema meteo-anemometrico anzidetto, al sistema di acquisizione via cavo.

Nelle Figg. 5.23 e 5.24 sono riportate, rispettivamente, una mappa tratta da Google Earth, con indicate le coordinate del miniaerogeneratore e del palo anemometrico, e immagini che rappresentano l'aerogeneratore, il palo anemometrico, e il sistema di monitoraggio anzidetto.



Fig. 5.23 – Posizioni del miniaerogeneratore e del palo anemometrico nella località Bresciadega.



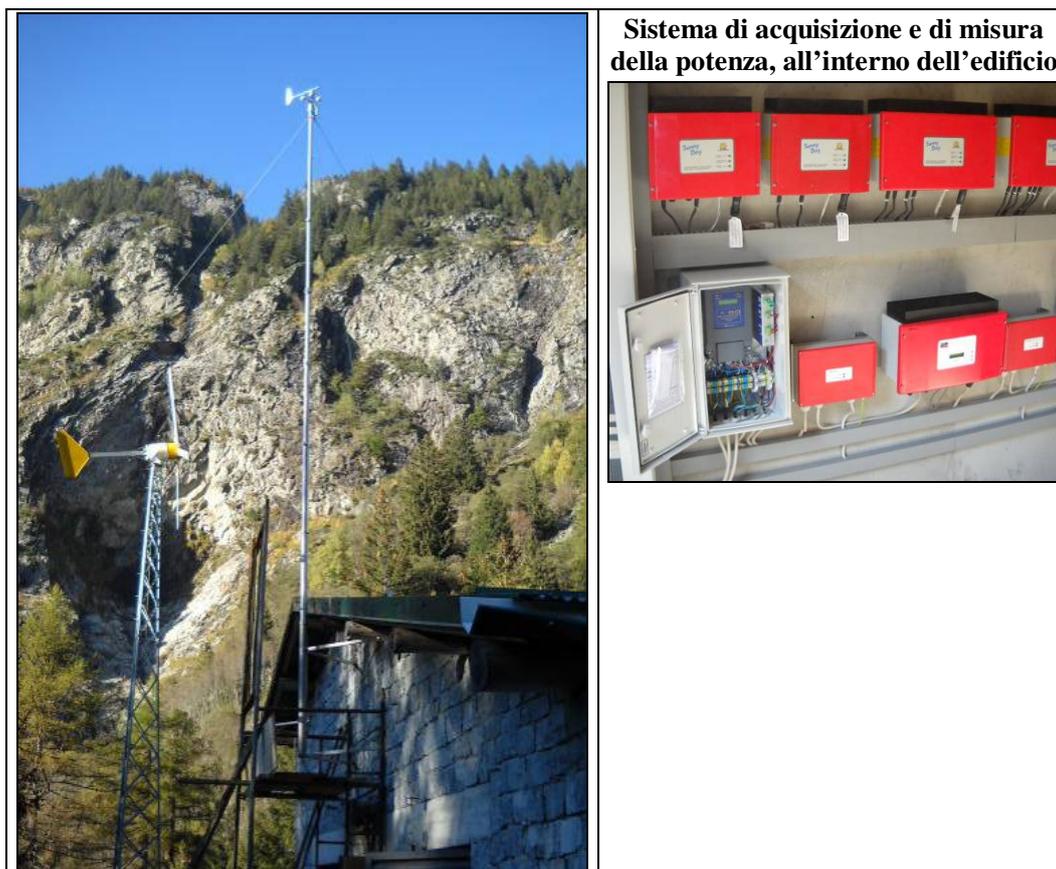


Fig. 5.24 – Miniaerogeneratore da 10 kW e sistema di monitoraggio dell'impianto minieolico.

5.4.2 Dati di esercizio dell'impianto

Come detto, l'abitato di Bresciadega è privo di collegamento stradale ed è raggiungibile solo a piedi, percorrendo un sentiero di montagna per 2÷3 ore, oppure in elicottero. Per tale motivo non è facile porre rimedio in tempi brevi a eventuali guasti sui componenti dell'impianto ad isola.

Per quanto riguarda in particolare l'impianto minieolico, questo è stato rimesso in esercizio il giorno 11 agosto 2011, installando nuovi inverter SMA Windy Boy WB1200 in sostituzione dell'inverter originale GridTek 10, di concezione più antiquata, che è stato trovato bruciato poco dopo l'installazione senza che l'impianto avesse prodotto.

Anche i nuovi inverter SMA Windy Boy WB1200 a fine settembre 2011 sono stati trovati bruciati, come descritto di seguito, probabilmente a causa di una forte sovratensione prodotta da una scarica elettrica atmosferica, non adeguatamente deviata verso terra dagli scaricatori appositamente inseriti prima dell'inverter.

Nella Fig. 5.25 sono rappresentati gli andamenti, valutati come valori medi su un minuto, della velocità e della direzione del vento e delle potenze attiva e reattiva prodotte dall'impianto dall'11 agosto al 30 settembre 2011.

Come si può osservare, la velocità del vento è stata di norma piuttosto bassa, a parte due periodi ben definiti collocati tra il 26 e 27 agosto e il 19 e 20 settembre, nei quali sono state raggiunte velocità del vento significative, superiori a 9 m/s, per cui il sistema minieolico ha prodotto potenza sia attiva che reattiva.

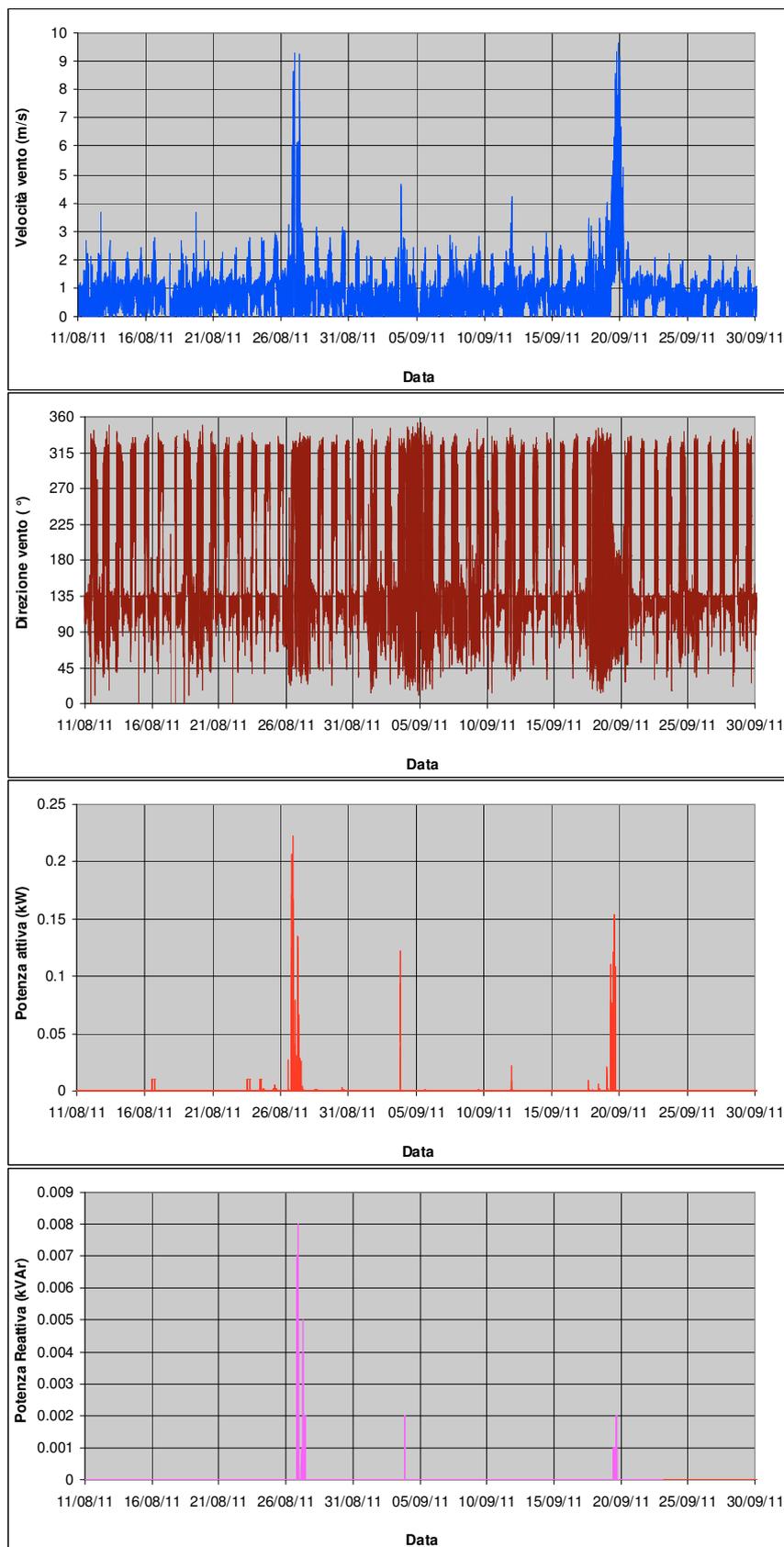


Fig. 5.25 – Valori medi, su un minuto, della velocità e della direzione del vento e delle potenze attiva e reattiva prodotte dall’impianto dall’11 agosto al 30 settembre 2011.

Nella Fig. 5.26 sono rappresentati, con una scala dei tempi di risoluzione maggiore e quindi di migliore leggibilità, gli andamenti della velocità e della direzione del vento e della potenza attiva prodotta dall'impianto dal 26 al 27 agosto.

Come si può osservare da tali diagrammi:

- l'impianto ha iniziato a produrre, seppure con potenza molto ridotta, tendenzialmente quando la velocità del vento era superiore a circa 2 m/s;
- si sono verificati tre periodi con maggiore produzione: il 26 agosto tra le ore 20 e 23, e il 27 agosto tra le ore 3 e 4 e tra le ore 6 e 8, durante i quali la direzione del vento era abbastanza costante.

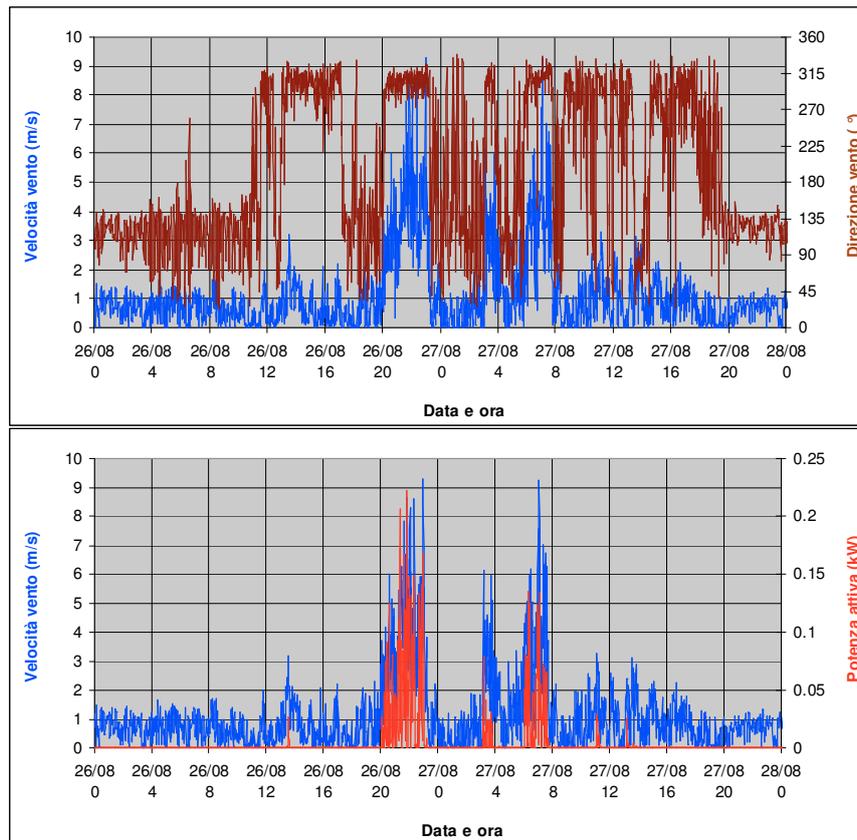


Fig. 5.26 – Valori medi, su un minuto, della velocità e della direzione del vento e della potenza attiva prodotta dall'impianto dal 26 al 27 agosto 2011.

Nella Fig. 5.27 sono rappresentati, sempre con una scala dei tempi di risoluzione maggiore e quindi di migliore leggibilità, gli andamenti della velocità e della direzione del vento e della potenza attiva prodotta dall'impianto dal 19 al 20 settembre.

Come si può osservare da tali diagrammi, anche in questo caso il sistema ha iniziato a produrre, seppure con potenza estremamente ridotta, tendenzialmente quando la velocità del vento era superiore a circa 2 m/s.

Il giorno 19 settembre alle ore 17,35 si è però interrotta bruscamente la produzione, iniziata verso le ore 9,30, anche se il vento continuava a spirare con velocità significativa.

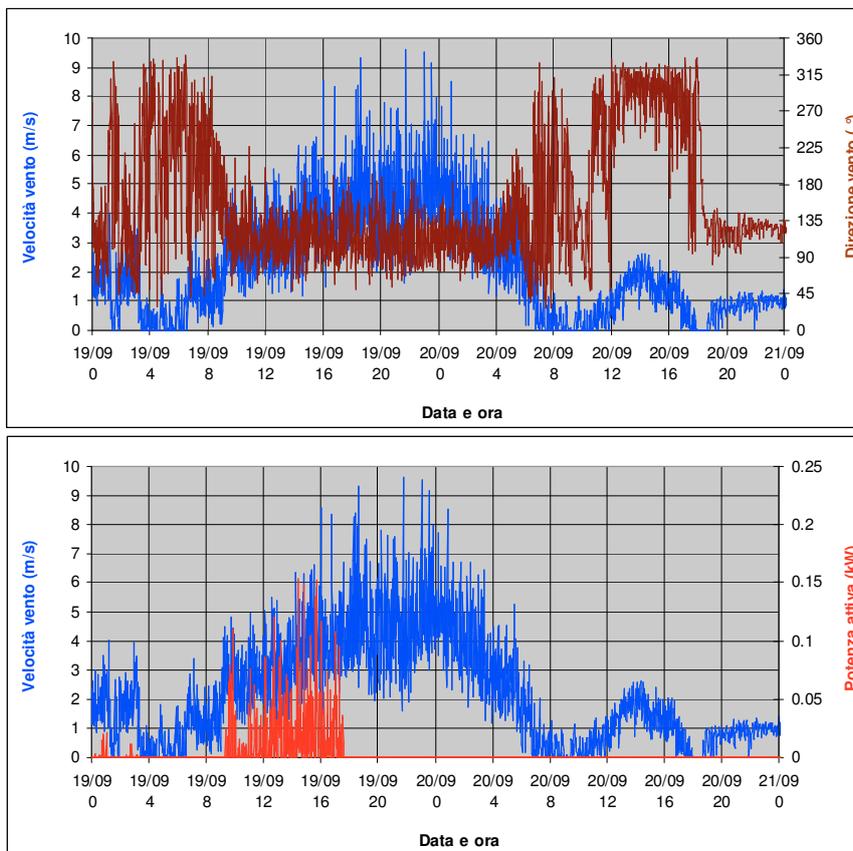


Fig. 5.27 – Valori medi, su un minuto, della velocità e della direzione del vento e della potenza attiva prodotta dall’impianto dal 19 al 20 settembre 2011.

Per ricavare elementi che permettano di individuare la causa che ha prodotto l’interruzione della produzione dell’impianto minieolico, nella Fig. 5.28 vengono diagrammati gli andamenti della temperatura dell’aria e della pressione atmosferica dal 16 al 21 settembre. Come si può osservare, il 18 e il 19 settembre si è verificato un brusco abbassamento della temperatura dell’aria e della pressione atmosferica. Sulla base di questo dato e di quanto osservato in precedenza, vi è motivo di ritenere, come già detto sopra, che l’interruzione della produzione del sistema minieolico sia stata causata da una forte sovratensione prodotta da una scarica atmosferica non adeguatamente deviata verso terra dagli scaricatori appositamente inseriti prima dell’inverter.

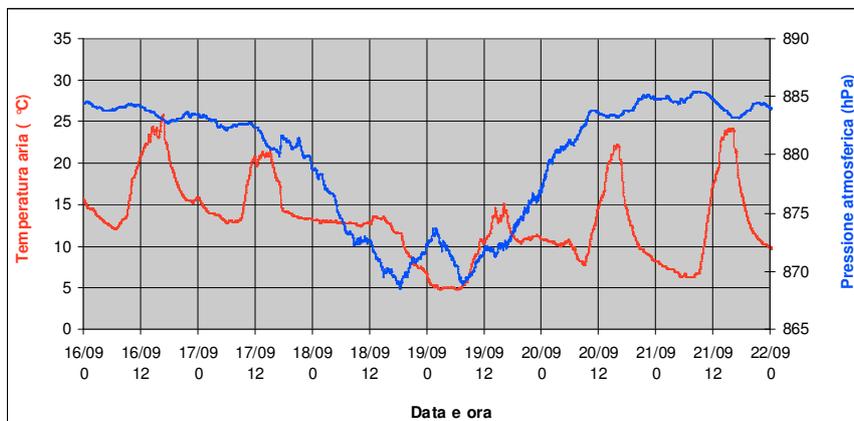


Fig. 5.28 – Valori medi, su un minuto, della temperatura dell’aria e della pressione atmosferica in prossimità dell’impianto dal 16 al 21 settembre.

Nel diagramma della Fig. 5.29 sono riportate la potenza attiva prodotta dal sistema minieolico in funzione della velocità del vento, rilevata dal giorno 11 agosto fino alle ore 17,35 del 19 settembre, e la curva di potenza indicata dal costruttore dell'aerogeneratore in esame.

Come si può osservare, i dati rilevati coprono un ridotto campo di funzionamento del sistema minieolico. Per velocità del vento inferiori a circa 4 m/s non si possono effettuare osservazioni sulle differenze tra la potenza prodotta e quella attesa, essendo questi valori comunque piccoli e i dati rilevati dispersi. Per velocità del vento superiori a circa 4 m/s si può invece osservare che la potenza prodotta è ampiamente inferiore a quella attesa e inoltre non cresce chiaramente con la velocità del vento.

Per permettere di individuare la causa di questo comportamento e come porvi rimedio, è necessario continuare il monitoraggio dell'impianto, acquisendo nel contempo, per maggiore chiarezza, anche la potenza prodotta in uscita dal miniaerogeneratore (ossia quella in ingresso all'inverter), oltre a quella in uscita dal sistema minieolico completo.

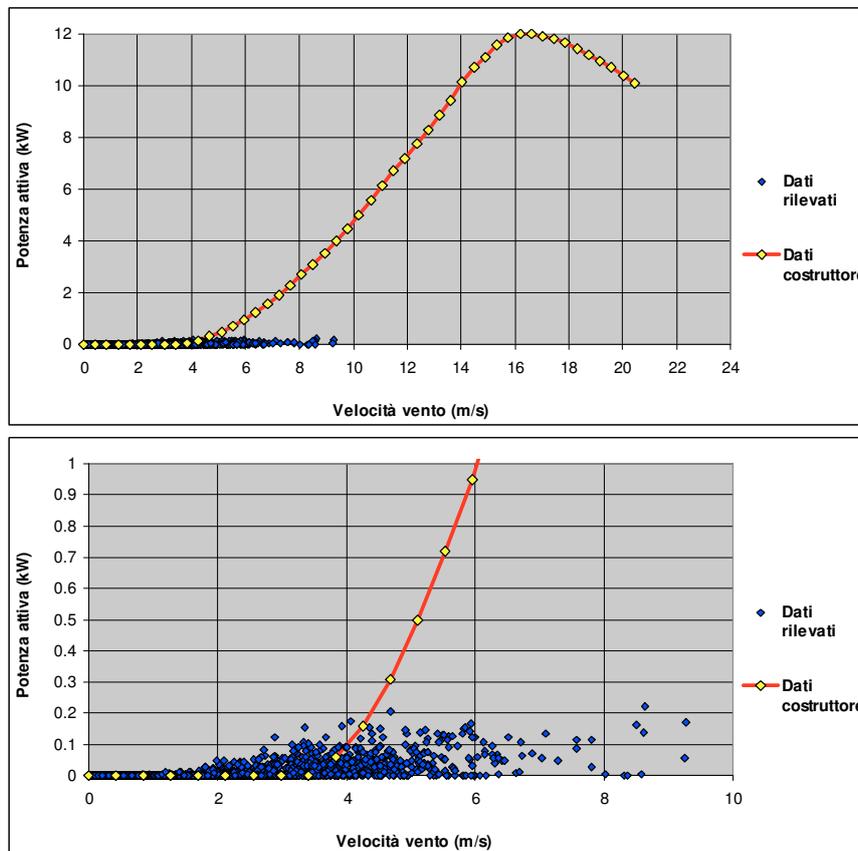


Fig. 5.29 – Potenza attiva prodotta dall'impianto minieolico in funzione della velocità del vento.

5.5 Impianto da 55 kW a Castellina Marittima (PI)

5.5.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto è costituito da sistema minieolico con aerogeneratore "Libellula" con potenza nominale di 55 kW, prodotto dalla società Aria, che è anche proprietaria dell'impianto. L'aerogeneratore è installato in Toscana, a circa 5 km dal mare in una zona collinare in aperta campagna leggermente ondulata, essenzialmente priva di vegetazione ad alto fusto. Nelle Figg. 5.30 e 5.31 sono illustrati l'area di ubicazione dell'impianto e l'aerogeneratore ivi installato.

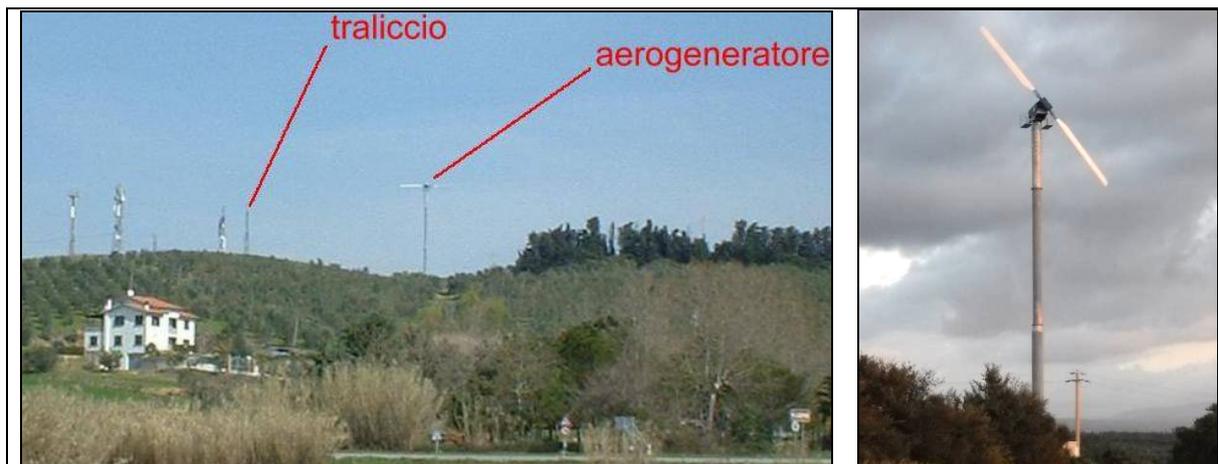


Fig. 5.30 – Aerogeneratore Aria "Libellula" e la sua area di installazione con gli adiacenti tralicci per telecomunicazioni.

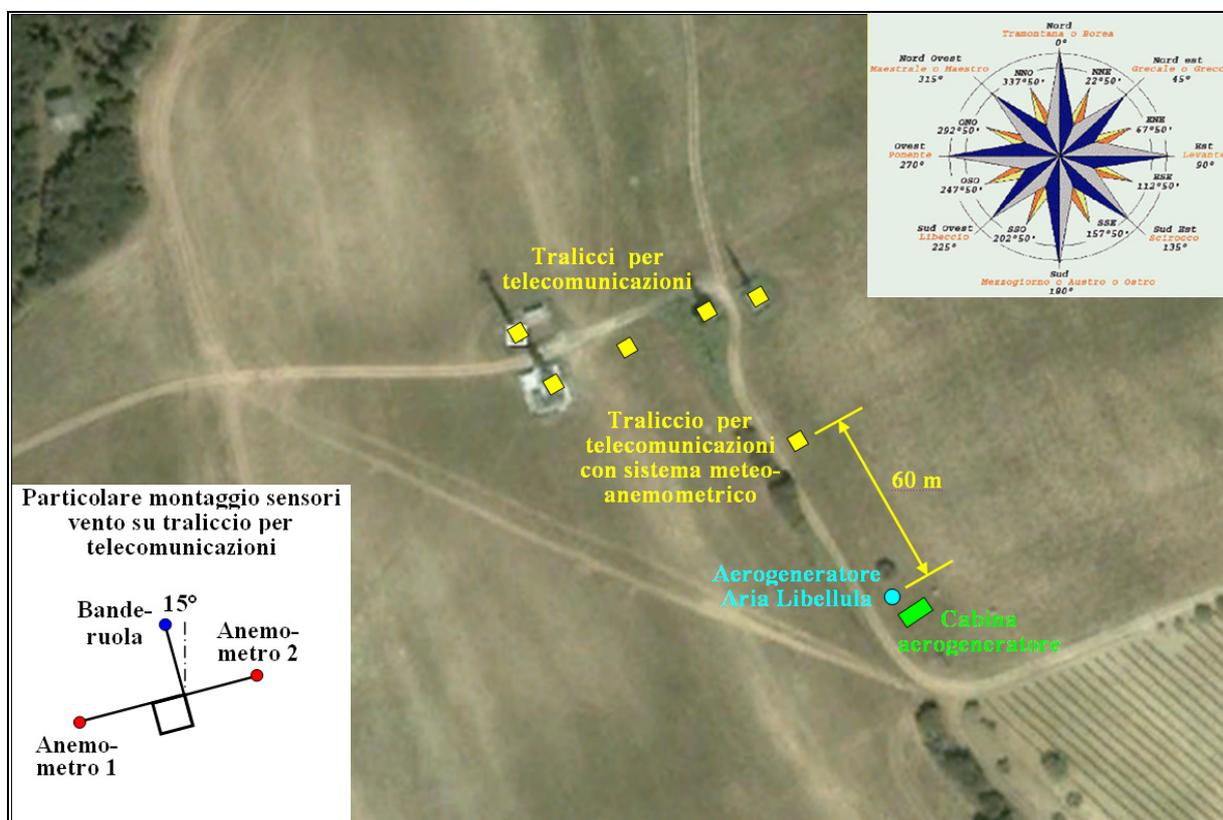


Fig. 5.31 – Posizioni dell'aerogeneratore e dei tralicci per telecomunicazioni, con evidenziato quello strumentato con un sistema meteo-anemometrico.

Come si rileva dalle precedenti figure, l'aerogeneratore è disposto in prossimità di alcuni tralicci per telecomunicazioni, su uno dei quali, evidenziato nelle figure, è stato installato da RSE un sistema meteo-anemometrico. In particolare, la distanza fra tale traliccio e la torre di sostegno dell'aerogeneratore è di circa 60 m, ossia circa 3,3 volte il diametro del rotore dell'aerogeneratore (18 m).

Nella Tab. 5.3 sono riassunte le caratteristiche principali del sistema minieolico Aria "Libellula" indicate dal costruttore [28]. In particolare, l'aerogeneratore è dotato di due pale a passo variabile; il rotore, del diametro di 18 m, è posto sopravvento rispetto alla torre e l'imbardata è controllata in modo attivo; è presente un moltiplicatore di giri, che aziona un generatore asincrono a 4 poli.

Potenza nominale [kW]		55
Asse di rotazione		Orizzontale
Meccanismo di orientamento		Sopravvento con motore di orientamento
Velocità del vento [m/s]	Cut-in	3
	Nominale	11
	Cut-out	25
	Sopravvivenza	52,5
Attivazione dell'aerogeneratore		Autonoma con vento
Numero di pale		2
Controllo di potenza		Variazione del passo + Inverter
Materiale delle pale		Vetroresina con rinforzi in carbonio
Velocità rotazione pale [rpm]		Variabile 60÷95
Diametro del rotore [m]		18
Sostegno		Palo tubolare autoportante
Altezza da terra del mozzo [m]		31
Peso navicella [kg]		2800
Peso torre [kg]		7200
Moltiplicatore		Presente
Generatore elettrico		Asincrono 4 poli

Tab. 5.3 - Dati caratteristici indicati per il sistema minieolico Aria "Libellula".

Nella Fig. 5.32 sono riportate le curve di potenza del sistema minieolico fornite dal costruttore per potenze nominali di 50 e 55 kW e per intensità della turbolenza pari a 0 (regime laminare) e a 0,18, valore, quest'ultimo, indicato dalla Norma CEI EN 61400-2 come prescrizione di progettazione con riferimento a una velocità del vento di 15 m/s. È da segnalare che la potenza nominale di un sistema minieolico Aria "Libellula" standard è di 55 kW, mentre quella del particolare sistema installato nel caso in esame è stata ridotta a 50 kW, modificando leggermente la regolazione del passo delle pale. Ciò è avvenuto perché tale sistema è stato connesso alla rete nel 2009 con un contratto che prevedeva una potenza in immissione di 50 kW, essendo allora tale il limite di potenza per la connessione alla rete BT in questione.

La regolazione della potenza immessa in rete dal sistema minieolico avviene elettronicamente in funzione del numero di giri raggiunto dal rotore, mentre la limitazione del numero di giri del rotore è realizzata meccanicamente in modo passivo tramite masse centrifughe e molle che fanno variare il passo delle pale con conseguente caduta del rendimento aerodinamico del profilo delle pale stesse.

In particolare l'aerogeneratore, fino alla velocità del vento nominale, funziona con passo delle pale fisso e con regime di rotazione variabile con la velocità del vento, in modo che l'angolo di incidenza del vento sul profilo delle pale sia mantenuto sempre vicino a quello ottimale. Al raggiungimento della velocità del vento nominale, e quindi anche della velocità di rotazione nominale, interviene invece il sistema di regolazione passivo del passo delle pale. L'aerogeneratore mantiene così un regime di rotazione controllato in qualsiasi condizione, anche in caso di totale black-out del sistema di controllo.

Per l'aerogeneratore monitorato il sistema di molle è stato regolato con tensione leggermente inferiore a quella standard per limitare la potenza massima erogabile a circa 50 kW come anzidetto. Tuttavia, anche

in questo caso, per effetto della costante elastica delle molle, la potenza erogata continua ad aumentare leggermente al crescere della velocità del vento al di sopra del vento nominale, fino a raggiungere il valore massimo del sistema, limitato elettronicamente, pari a 55 kW.

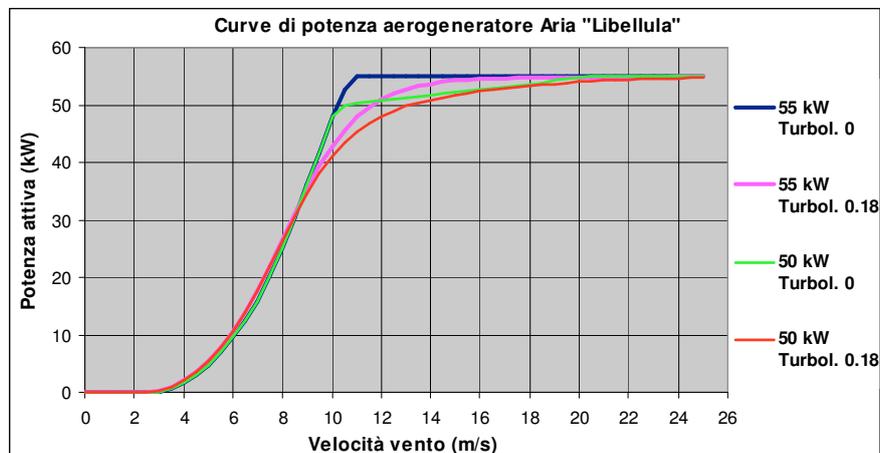


Fig. 5.32 – Curve di potenza fornite dal costruttore per l'aerogeneratore Aria "Libellula" da 50÷55 kW

Per valutare le prestazioni dell'impianto, RSE ha installato, sul traliccio anzidetto, il sistema meteo-anemometrico innanzi citato e, nella cabina dell'impianto, un sistema di acquisizione dati. La strumentazione del sistema meteo-anemometrico è costituita da:

- due anemometri per la misura della velocità del vento installati, con sbalzo di circa 2 m, su due angoli del traliccio alla quota da terra di 31 m, pari a quella del mozzo dell'aerogeneratore;
- una banderuola per il rilievo della direzione del vento installata, con sbalzo di circa 2 m, su un angolo del traliccio pure alla quota da terra di 31 m;
- un sensore di misura della pressione atmosferica;
- un sensore di misura della temperatura dell'aria.

Nella Fig. 5.33 sono riportate le fotografie degli anemometri e della banderuola installati sul traliccio, del quadro che contiene il sistema di acquisizione, e della cabina dell'impianto.



Fig. 5.33 – Sensori per la misura del vento installati sul traliccio per telecomunicazioni, quadro contenente il sistema di acquisizione dati, cabina dell'impianto con, nell'angolo in alto a destra, l'antenna direttiva del sistema di acquisizione.

Come risulta dalla figura anzidetta, i sensori del vento sono stati installati su angoli opposti del traliccio, in modo da poter confrontare i dati raccolti dai due sensori ed eliminare così quelli disturbati dagli elementi del traliccio. Inoltre, per trasmettere i dati dalla centralina meteo-anemometrica al sistema di acquisizione, sono state impiegate antenne direttive, essendo nella zona presenti significativi disturbi elettromagnetici indotti dalla presenza delle antenne per telecomunicazioni.

5.5.2 Dati di esercizio dell'impianto

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi effettuate sui dati rilevati dal sistema di monitoraggio per un anno dal 1° marzo 2011 al 29 febbraio 2012. In particolare, nella Tab. 5.4 sono riportati valori riassuntivi, mese per mese, della potenza attiva, della potenza reattiva e dell'energia elettrica prodotte dall'impianto e le caratteristiche del vento rilevate. I dati della potenza e dell'energia elettrica sono stati rilevati con continuità per tutto il periodo, mentre i dati meteo-anemometrici sono stati acquisiti con discontinuità, evidenti soprattutto nei mesi da novembre a marzo. Queste discontinuità sono dovute prevalentemente a periodi con ridotta insolazione, che hanno impedito al pannello fotovoltaico di fornire la necessaria alimentazione elettrica alla centralina meteo-anemometrica. Le discontinuità presenti nei rimanenti mesi, di entità molto ridotta (~0,1 % dei dati rilevati), sono state causate da disturbi nella trasmissione, via Wi-Fi, dei segnali meteo-anemometrici al sistema di acquisizione. Per questi motivi nella tabella vengono indicati i valori di sintesi della potenza attiva calcolati con riferimento sia agli interi mesi, sia ai periodi nei quali sono stati effettivamente acquisiti i dati meteo-anemometrici.

La disponibilità dell'impianto è risultata di norma elevata, a parte alcuni mesi nei quali non è stato possibile rilevarla con significatività, essendo stati effettuati dal costruttore interventi di affinamento del sistema minieolico, che hanno prodotto delle fermate dell'impianto.

Mese e anno	Misure di potenza						Misure con dati meteo-anemometrici acquisiti											
	Potenza attiva (kW)		Potenza reattiva (kW)		Energia elettrica (kWh)	Disponibilità (%)	Campioni		Velocità vento 1 (m/s)				Velocità vento 2 (m/s)				Potenza attiva (kW)	
	Media	Max 1 min	Media	Max 1 min			N.ro	Durata* (%)	Media	Max 1 min	Max 1 sec	STD	Media	Max 1 min	Max 1 sec	STD	Media	Max 1 min
mar-11	9.86	54.57	3.97	19.39	7332	97.2%	37155	83.2%	4.67	24.78	26.96	0.40	4.84	28.13	30.76	0.40	7.82	53.86
apr-11	5.86	53.85	2.64	19.50	4218	97.5%	43023	99.6%	4.33	19.55	23.62	0.37	4.56	22.25	25.66	0.38	5.88	53.85
mag-11	4.84	54.13	2.26	19.60	3601	99.2%	44580	99.9%	4.07	16.13	18.99	0.36	4.27	17.17	19.90	0.36	4.85	54.13
giu-11	4.01	55.24	3.76	40.33	2888	#	43141	99.9%	3.63	17.75	20.56	0.39	3.83	16.78	19.76	0.36	4.02	55.24
lug-11	5.56	54.54	8.22	40.95	4138	#	44578	99.9%	3.97	16.86	21.09	0.38	4.05	17.12	21.95	0.38	5.57	54.54
ago-11	1.61	52.85	3.29	40.07	1195	#	44581	99.9%	3.18	15.88	18.46	0.34	3.46	13.47	16.43	0.30	1.61	52.85
set-11	5.60	54.87	2.94	38.45	4036	99.8%	43143	99.9%	3.74	18.96	26.57	0.35	4.17	17.97	23.00	0.35	5.61	54.87
ott-11	7.23	54.62	3.07	22.37	5376	#	44534	99.8%	4.86	21.28	26.67	0.37	5.17	23.18	28.47	0.39	7.24	54.62
nov-11	9.05	53.45	3.97	19.53	6517	99.8%	41083	95.1%	4.52	15.66	18.46	0.34	4.89	17.22	20.38	0.35	8.70	53.45
dic-11	11.30	54.64	4.78	20.25	8410	96.3%	35475	79.5%	4.92	21.12	25.52	0.38	5.58	23.83	28.28	0.40	10.78	54.64
gen-12	5.27	54.07	2.44	19.36	3918	97.9%	41697	93.4%	3.85	20.19	24.38	0.31	4.03	20.40	24.62	0.34	4.31	54.07
feb-12	5.57	54.65	2.11	19.68	3876	#	37391	89.5%	6.38	24.23	27.24	0.41	7.05	27.46	31.95	0.41	5.28	53.72
Minimo	1.61	52.85	2.11	19.36	1195	96.3%	-	79.5%	3.18	15.66	18.46	0.31	3.46	13.47	16.43	0.30	1.61	52.85
Media	6.31	54.29	3.62	26.62	4625	98.3%	-	95.0%	4.34	19.37	23.21	0.37	4.66	20.41	24.26	0.37	5.97	54.15
Max	11.30	55.24	8.22	40.95	8410	99.8%	-	99.9%	6.38	24.78	27.24	0.41	7.05	28.13	31.95	0.41	10.78	55.24
Somma	-	-	-	-	55504	-	500381	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

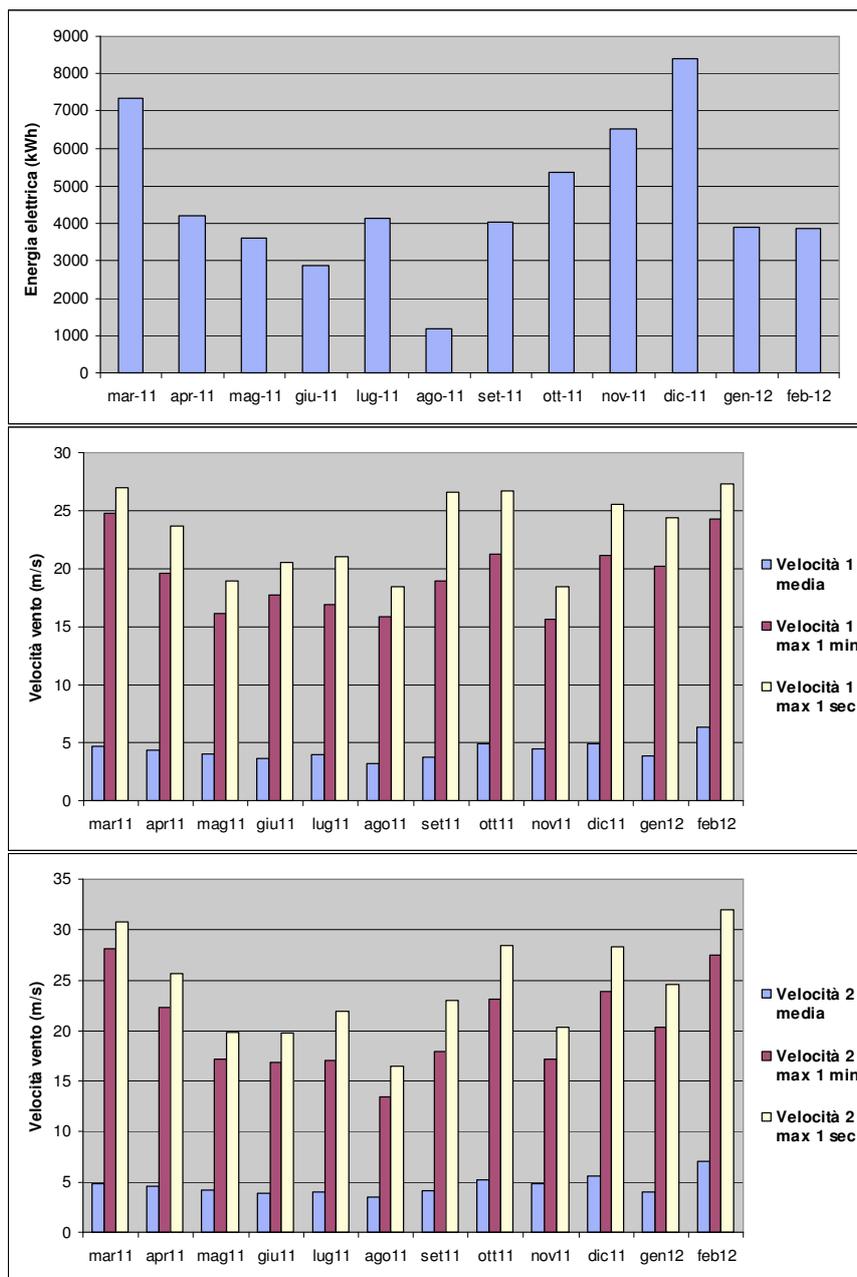
* Durata percentuale delle misure meteo-anemometriche rispetto a quelle di potenza.
Dato non significativo essendo stati effettuati dal costruttore interventi di affinamento del sistema minieolico.

Tab. 5.4 – Dati riassuntivi, mese per mese, delle principali grandezze rilevate dal sistema di monitoraggio dell'impianto.

Nella Fig. 5.34 sono diagrammati gli andamenti, mese per mese, della velocità del vento e dell'energia elettrica e della potenza attiva prodotte dall'impianto. Come si può osservare dai dati riportati nella Tab. 5.4 e nella Fig. 5.34, l'energia prodotta dall'impianto è variata significativamente da mese a mese, con valori massimi nei mesi di marzo e di dicembre e con valore minimo ad agosto, anche a causa delle anzidette fermate per interventi sul sistema minieolico. La velocità del vento è risultata con valori medi apprezzabili (tra 3,18 e 7,05 m/s), raggiungendo valori massimi di tutto rispetto (28,13 m/s con base 1 minuto e 31,95 m/s con base 1 secondo). L'impianto durante ogni mese ha raggiunto la sua potenza

attiva massima di progetto, essendo stati rilevati valori massimi di potenza variabili tra 52,85 kW e 55,24 kW. La potenza reattiva massima dell'impianto è cresciuta significativamente, a pari potenza attiva, tra giugno e settembre (passando da valori di 19,39 ÷ 22,37 kvar a valori di 38,45 ÷ 40,95 kvar) a causa di anomalie del banco di condensatori di rifasamento, che sono state poi eliminate dal costruttore con opportune riparazioni. A parte questo periodo, la potenza reattiva si è mantenuta a valori accettabili in rapporto a quella attiva dal punto di vista della rete.

Nella Fig 5.35 vengono invece rappresentati, a titolo d'esempio, gli andamenti - valutati come valori medi su un minuto - della velocità e della direzione del vento e delle potenze attiva e reattiva prodotte dall'impianto in un periodo significativo, comprendente anche avviamenti, dal 21 al 22 marzo 2011.



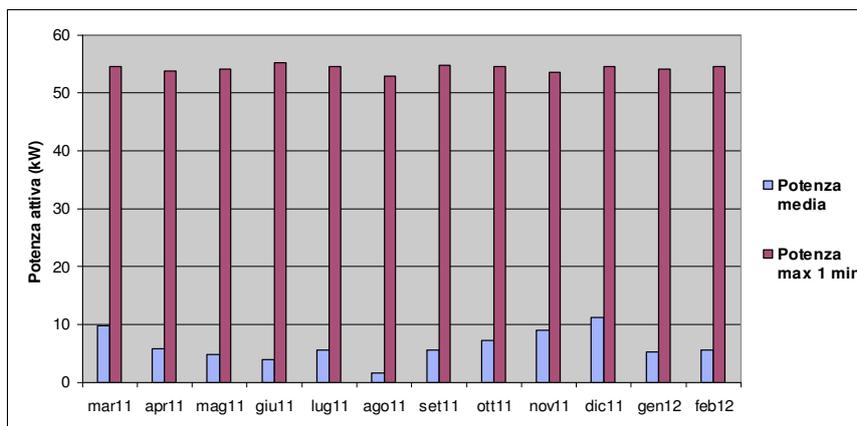
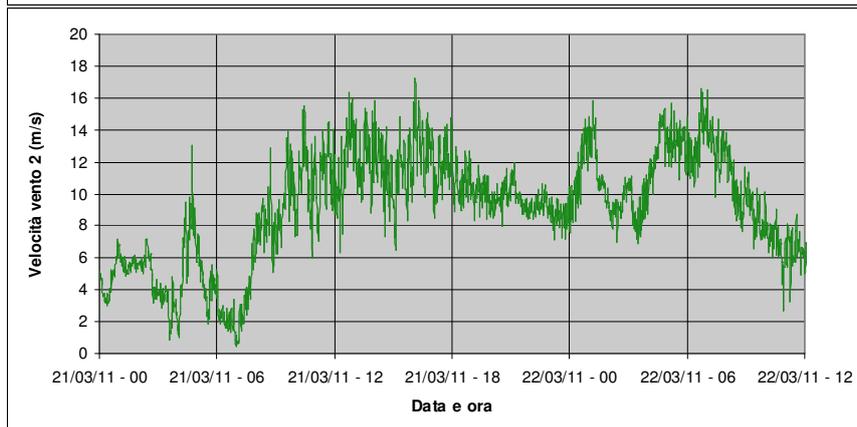
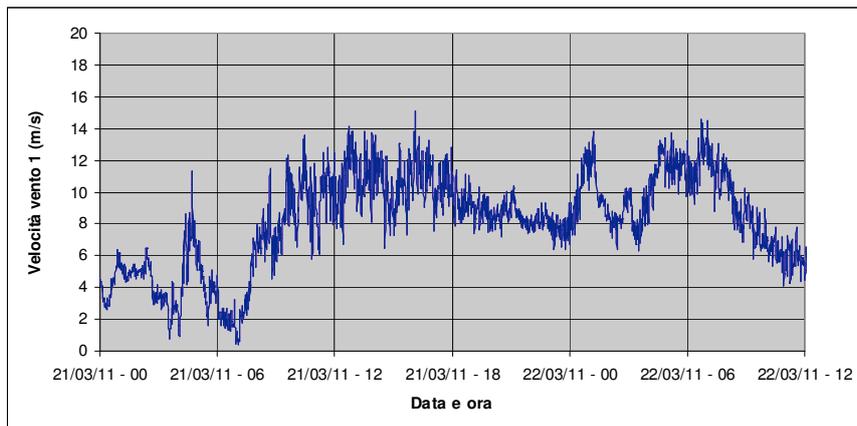


Fig. 5.34 – Valori riassuntivi per mese della velocità del vento e dell’energia elettrica e della potenza attiva prodotte dall’impianto.



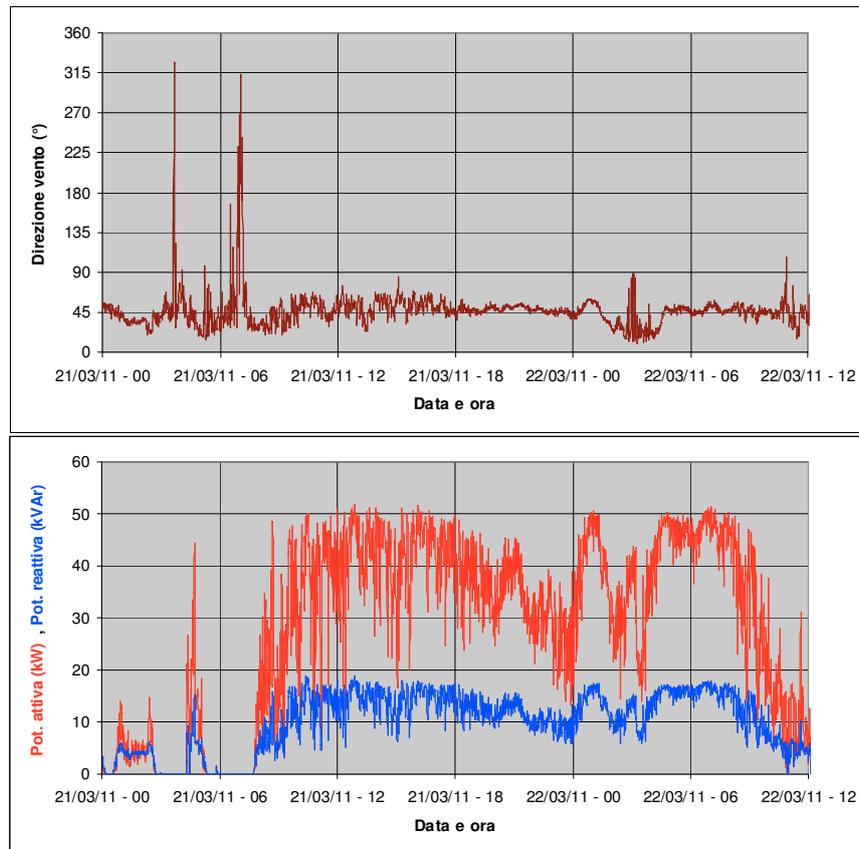


Fig. 5.35 – Valori medi, su un minuto, della velocità e della direzione del vento e della potenza attiva e reattiva prodotta dall’impianto dal 21 al 22 marzo 2011.

A commento dei dati riportati nella precedente Fig. 5.35, si fa osservare innanzitutto che la velocità del vento rilevata dai due anemometri presenta lo stesso andamento nel tempo, ma valori leggermente inferiori, nel caso della velocità 1, rilevata dall’anemometro 1. Si ritiene che la spiegazione di questo risultato, di cui si è tenuto conto nelle elaborazioni di seguito descritte, possa essere attribuita ad effetti di scia prodotti dalla torre anemometrica. Tali effetti sono stati risentiti in questo caso dal solo anemometro 1, provenendo il vento da circa 45°(ossia dalla direzione nord-est) ed incontrando quindi, prima di esso, la torre anemometrica, come si può dedurre guardando la disposizione degli anemometri riportata nella già citata Fig. 5.31.

Per fornire dati che permettano di comparare le prestazioni del sistema minieolico riscontrate rispetto a quelle attese in base ai dati indicati dal suo costruttore, nel diagramma della Fig. 5.36 viene riportata la potenza attiva immessa in rete dal sistema minieolico in funzione della velocità del vento, determinata tenendo conto delle indicazioni della già citata Norma CEI EN 61400-12-1 [16] e applicando i seguenti ulteriori criteri in modo da utilizzare dati maggiormente rappresentativi:

- utilizzo delle sole velocità normalizzate con aerogeneratore disponibile, sistema con banco di rifasamento funzionante regolarmente, e vento proveniente dalle direzioni con sostegno anemometrico non in scia all’aerogeneratore, ossia tra $0^{\circ} \div 116^{\circ}$ e $182^{\circ} \div 360^{\circ}$ nel caso in esame;
- valutazione della velocità incidente come media delle due velocità normalizzate rilevate dagli anemometri 1 e 2 solo quando la differenza tra queste è risultata inferiore al 3%.

In tale diagramma vengono pure riportate le potenze attive medie ricavate dai dati appena citati per intervalli (bin) di velocità del vento con ampiezza di 0,5 m/s, e le curve di potenza indicate dal costruttore dell’aerogeneratore. La regolazione dell’aerogeneratore è stata impostata in modo da limitarne la potenza nominale a circa 50 kW, come detto sopra.

Guardando questa figura si può notare che i dati rilevati presentano di norma un andamento ben identificabile, con una dispersione contenuta, e che i valori medi per intervalli (bin) di velocità del vento con ampiezza di 0,5 m/s ricavati dai dati sperimentali sono in buon accordo con quelli indicati dal costruttore nella sua curva di potenza.

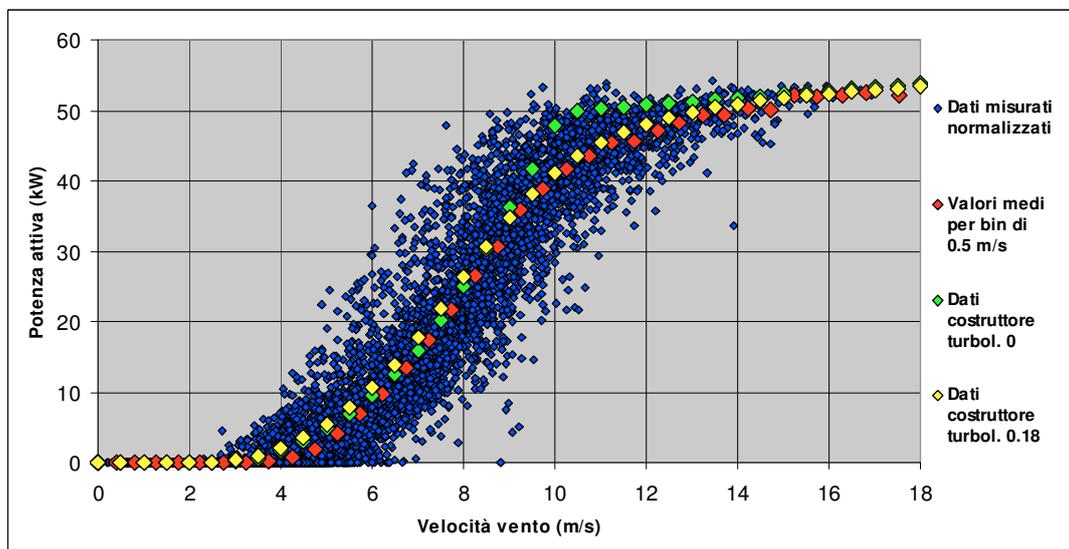


Fig. 5.36 – Potenza attiva prodotta dall’impianto minieolico in funzione della velocità del vento.

Nella Fig. 5.37 viene infine rappresentata, in funzione dell’anzidetta potenza attiva media per “bin” di velocità del vento, la corrispondente potenza reattiva prodotta dall’impianto minieolico, valutata in modo analogo per “bin”. Come si può osservare, i dati riportati presentano un andamento soddisfacente per un’ampia gamma di regimi di funzionamento, in quanto da essi si possono ricavare valori del fattore di potenza ($\cos\phi$) superiori a 0,9 (spesso dell’ordine di 0,93-0,94) per potenze attive erogate oltre i 10 kW fino al valore massimo.

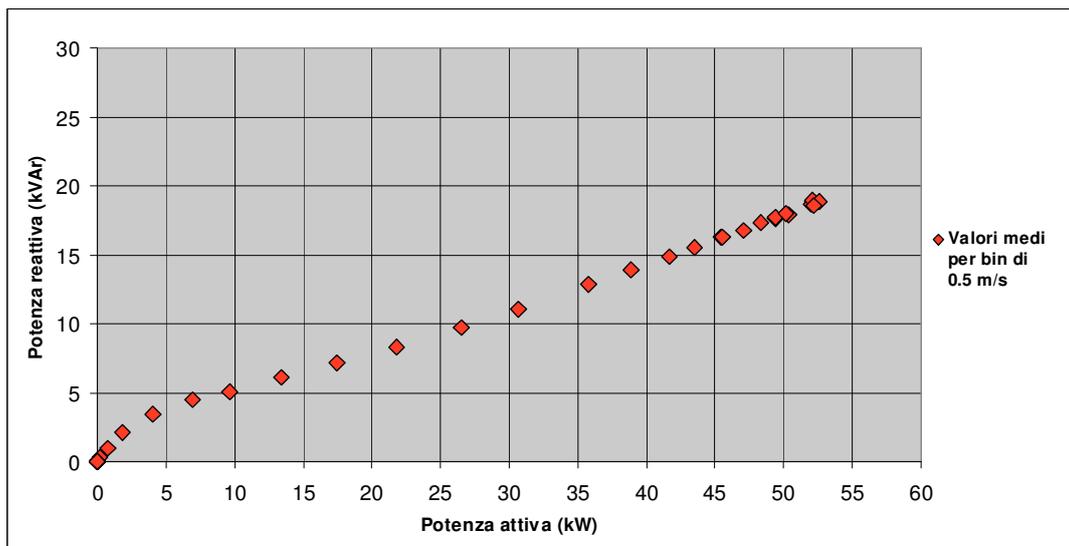


Fig. 5.37 – Potenza attiva e reattiva prodotte dall’impianto minieolico.

6 CONSIDERAZIONI ECONOMICHE SUGLI IMPIANTI MINIEOLICI

La redditività di un impianto minieolico collegato alla rete dipende dai costi sostenuti per la sua realizzazione e conduzione, dall'energia producibile e dai ricavi ottenibili con la vendita dell'energia elettrica immessa in rete. A questi fattori si aggiungono altri componenti, fra i quali vari aspetti finanziari, come i tassi per l'attualizzazione dei flussi di cassa e l'eventuale prelievo fiscale sui ricavi.

Oltre ai costi d'acquisto dell'aerogeneratore stesso, della torre di sostegno, dell'inverter e dei quadri elettrici, bisogna mettere in conto anche i costi delle opere civili, dei cavi elettrici di connessione e relative canaline, delle cabine di trasformazione BT/MT per i miniaerogeneratori di maggior taglia, della progettazione, dell'iter autorizzativo e, infine, dell'installazione e avviamento dell'impianto.

Nella seguente Tab. 6.1 sono riportati dati di costo complessivo (IVA esclusa) validi in prima approssimazione per impianti minieolici installati "chiavi in mano". I costi indicati sono riferiti all'anno 2011 e devono intendersi come valori medi da assumere con il necessario beneficio d'inventario, e quindi utilizzabili solo ai fini di stime economiche preliminari di redditività dell'investimento.

Potenza Nominale [kW]	1	5	10	20	60	100	200
Costi (IVA Esclusa) [€/kW]	7000	5000	4000	3500	3500	3200	2700

Tab. 6.1 – Costi orientativi per unità di potenza tipici di impianti installati "chiavi in mano".

Per completezza sono infine da ricordare i costi di dismissione dell'impianto e anche una voce di spesa "una tantum" iniziale costituita dal costo della pratica di qualificazione IAFR (Impianto a Fonte Rinnovabile) presso il GSE per l'ammissione alle diverse forme di incentivazione (in particolare, alla tariffa onnicomprensiva, oppure ai Certificati Verdi). Alla data corrente, il costo di qualificazione per impianti di potenza non superiore a 20 kW è di 181,5 € (IVA inclusa), mentre per impianti di potenza superiore a 20 kW e non superiore a 200 kW il costo sale a 242 € (IVA inclusa).

I costi totali (C_t) annuali di conduzione dell'impianto sono invece il risultato di diversi fattori di costo, tra i quali si annoverano i costi di esercizio e manutenzione (valutabili mediamente dell'ordine del 2% annuo del costo totale d'impianto), i costi di affitto del terreno ovvero i costi legati ai mancati introiti derivanti da un utilizzo alternativo del terreno posseduto (anche se per un impianto minieolico, soprattutto se con una sola unità, l'incidenza di questi costi è molto modesta), i costi di assicurazione dell'impianto, i costi degli interessi passivi sul capitale eventualmente preso a prestito e gli oneri fiscali di diversa natura.

Per quanto riguarda l'onere degli interessi passivi sul capitale preso a prestito è da osservare che, mentre per un privato si può ipotizzare che l'intero investimento iniziale in un impianto minieolico sia coperto con capitale proprio, per un'impresa o un ente pubblico che intenda realizzare un progetto, soprattutto con una o più macchine di taglia relativamente grande, è prassi comune ipotizzare che il capitale proprio ("equity") sia pari al 30% dell'investimento e che il restante 70% sia ottenuto come capitale di debito, percentuali tipiche del settore eolico. In questi casi è quindi opportuno tenere conto, nei calcoli, anche di questi interessi passivi. Inoltre, se trascorre un tempo significativo tra l'ottenimento del finanziamento e l'inizio dell'esercizio dell'impianto (ad esempio in conseguenza di ritardi nell'iter autorizzativo o nella fornitura o installazione dei componenti), ciò si traduce in un ulteriore incremento del costo effettivo sostenuto dal proprietario dell'impianto.

Per valutazioni più conservative dei costi di conduzione, si potrebbero prevedere, prudentemente, anche importanti interventi di manutenzione per sostituzioni di parti di macchina o impianto (specialmente l'inverter) dopo un certo numero di anni di vita operativa. Questa eventualità dipende anche dalla qualità dei componenti utilizzati e dalla scelte progettuali adottate. L'epoca in cui può verificarsi è tipicamente

dell'ordine dei 10 anni dall'entrata in servizio per gli impianti eolici di grande potenza, mentre allo stato attuale non è ancora stimabile con sufficiente chiarezza per gli impianti minieolici.

I ricavi R_t (Ricavi totali) annuali ottenibili da un impianto minieolico sono il prodotto dei seguenti fattori:

- la producibilità annua netta stimata di energia ($NAEP$, Net Annual Energy Production) in kilowattora (kWh);
- il prezzo di cessione o vendita dell'energia (P_{ve}) in centesimi di euro al kilowattora (c€/kWh).

Il valore di $NAEP$, cioè l'energia annua che può essere effettivamente immessa in rete e quindi conteggiata ai fini dei ricavi, può essere stimato a partire dal valore calcolato dell'energia teoricamente producibile (AEP , "Annual Energy Production") moltiplicato per un coefficiente di riduzione globale che tiene conto di perdite di varia origine (aerodinamiche, nella rete elettrica e per indisponibilità dell'impianto, come indicato nel rif.[1]) e che, per impianti minieolici, può presentare orientativamente valori dell'ordine di 0,9 (corrispondenti a una perdita complessiva intorno al 10%).

La valutazione precisa dei costi e l'attualizzazione dei flussi di cassa richiedono che vengano fissati diversi altri parametri, elencati nella Tab. 6.2 per le due tipologie d'investitori di cui si è detto.

Parametro di calcolo	Tipologia dell'investitore	
	Privato	Impresa Comm./Indust
	Proventi non tassati	Proventi tassati
Vita Utile [anni]	20	20
Tempo da disponibilità capitale a esercizio [anni]	0	1
Valore residuo Impianto [% CostoImp.Inst.]	0	0
Costi di dismissione impianto [% CostoImp.Inst.]	0	0
Costi annui di manutenzione [% CostoImp.Inst.]	2	2
Costi annui di assicurazione [%CostoImp.Inst.]	0	0
Costi annui affitto terreno [%CostoImp.Inst.]	0	0
Capitale proprio (Equity) [%]	100	30
Capitale di debito [%]	0	70
Tempo di restituzione del debito [anni]	/	15
Rate per la restituzione del debito	/	Costanti
Tasso di interesse sul debito [%]	/	5
Coefficiente di inflazione [%]	3	3
Remunerazione capitale proprio [%]	5	10
Tasso di sconto per VAN e TR [%]	5 / 8	5 / 8
Tasso di sconto per CME [%]	7	7

Tab. 6.2 – Parametri di calcolo che intervengono nelle stime economiche di investimento.

Si sottolinea che tutte le assunzioni adottate in tabella per questi parametri e utilizzate nell'effettuazione dei calcoli qui riportati potrebbero variare anche considerevolmente e non essere più attuali nel corso degli anni futuri.

Nella Tab. 6.3 sono riassunte le condizioni d'imposizione fiscale gravante sugli impianti minieolici per diversi profili del produttore e diverse taglie dell'impianto. Si ipotizza il caso tipico in cui l'energia immessa in rete sia remunerata con la tariffa onnicomprensiva cui possono accedere gli impianti eolici fino a 200 kW. Si ipotizza altresì che venga venduta la totalità dell'energia elettrica producibile, senza alcuna quota di energia utilizzata per uso proprio, in quanto la tariffa onnicomprensiva per il minieolico rende comunque conveniente la cessione integrale dell'energia prodotta alla rete.

Infatti la tariffa onnicomprensiva è oggi pari a 30 c€/kWh per i primi 15 anni di esercizio dell'impianto e vale per la sola energia immessa in rete. Si è ancora in attesa del decreto attuativo del Decreto Legislativo del 28 marzo 2011, n. 28, che fissa il valore e la durata della tariffa per gli impianti che entreranno in servizio dal 1° gennaio 2013 in poi.

	Tipologia dell'investitore		
	Privato o Ente non Commerciale	Impresa Comm./Indust.	
	Impianti posti al servizio dell'abitazione	Impianti non posti al servizio dell'abitazione o superiori a 20 kW	> 20 kW
Potenza Impianto (P)	$P \leq 20$ kW	$P \leq 20$ kW 20 kW < $P \leq 200$ kW	1 kW $\leq P \leq 200$ kW
Remunerazione	Tariffa onnicomprensiva	Tariffa onnicomprensiva	Tariffa onnicomprensiva
IVA su Acquisto	10%	10%	10%
Detrazione IVA Acquisto	NO	SI	SI
Ammortamento	NO	50% Investimento	100% Investimento
Fattore Annual. Ammort.	/	9%	9%
Imposte Dirette	Redditi Diversi	/ (*)	/
IRES	/	27,5% (*)	27,5%
IRAP	/	3,9% (*)	3,9%
Ritenuta d'acconto 4% GSE	NO	NO	NO
IVA Proventi Tariffa	Non Imponibile	Imponibile	Imponibile
Accatastamento ICI	Cat. D/1	Cat. D/1	Cat. D/1

(*) Fanno eccezione le persone fisiche, soggette alle imposte dirette (Redditi diversi) e non a IRES e IRAP

Tab. 6.3 – Assunzioni relative agli oneri fiscali gravanti sugli impianti minieolici.

Nelle stime che vengono esposte nel seguito si è assunto un periodo di diritto alla tariffa onnicomprensiva pari, come oggi, a 15 anni, al termine dei quali si è ipotizzato che il produttore acceda al meccanismo di "scambio sul posto" previsto anch'esso dalla stessa Legge 244/2007 che ha istituito la tariffa onnicomprensiva. In quest'ultimo caso la valorizzazione dell'energia prodotta è pari al prezzo evitato di acquisto dell'energia da parte dell'utente in questione (privato, impresa, ente, ecc...), prezzo difficile da definire e prevedere in modo univoco e legato anche all'andamento dell'inflazione.

Nella successiva Tab. 6.4 vengono sintetizzati i dati qui assunti, come detto, per la remunerazione dell'energia elettrica ceduta alla rete nelle stime economiche sugli impianti minieolici.

Legislazione corrente e fino al 31.12.2012			
Produttore	Energia ceduta [%]	Prezzo di cessione [c€/kWh]	
		Anni 1÷15	Anni 16÷20
Privato	100	30	$16 * (1+0.03)^n, n=15.5\div 19.5$
Impresa	100	30	$10 * (1+0.03)^n, n=16.5\div 20.5$
Probabile quadro legislativo a partire dal 01.01.2013			
Produttore	Energia ceduta [%]	Prezzo di cessione [c€/kWh]	
		Anni 1÷20	
Privato	100	30 (o altro valore da definire)	
Impresa	100	30 (o altro valore da definire)	

Tab. 6.4 – Prezzi assunti di cessione dell'energia per tipologia di produttore (IVA inclusa).

I più significativi indicatori economici solitamente impiegati per la stima della redditività di un investimento in un'attività produttiva, e quindi applicabili anche agli impianti minieolici, sono i seguenti:

- *VAN*, Valore Attuale Netto (*NPV*, Net Present Value)
- *TR*, Tempo di Ritorno dell'investimento (*PBP*, PayBack Period)
- *TIR*, Tasso Interno di Rendimento (*IRR*, Internal Rate of Return)
- *CME*, Costo Medio dell'Energia (*LCOE*, Levelized Cost of Electricity)

Il significato dei quattro indici suddetti è stato illustrato in un precedente rapporto [2]. Le stime numeriche di questi indicatori in relazione all'installazione di un impianto minieolico sono state condotte per sei diverse situazioni, che si differenziano tra loro per il profilo del proprietario dell'impianto, per il costo unitario (€/kW) dell'impianto stesso, e per la producibilità annua netta, come riportato in Tab. 6.5.

Caso	Proprietario Impianto	Costo Unitario [€/kW]	Producibilità [Ore Eq./Anno]
1	Privato	3500	1600
2	Privato	3500	1800
3	Impresa	3500	1600
4	Impresa	3500	1800
5	Impresa	2700	1800
6	Impresa	2700	2000

Tab. 6.5 – Le sei situazioni assunte per le stime economiche sugli impianti minieolici.

Si può ritenere che una producibilità di 1600÷1800 ore/anno equivalenti sia raggiungibile con venti di velocità media annua di circa 5 m/s [2], mentre producibilità di 1800÷2000 ore/anno equivalenti sono realizzabili con venti di almeno 6 m/s e miniaerogeneratori di taglia relativamente elevata (quindi anche con altezze del mozzo del rotore dal suolo tali da attingere a venti più intensi).

Per ciascuno dei sei casi in esame si sono calcolati i quattro indicatori *CME*, *VAN*, *TR* e *TIR*, nelle due diverse ipotesi dei valori del tasso di sconto indicati nella Tab. 6.2. In questi calcoli non è stata inclusa la tassazione ICI e, per i casi d'installazione da parte di privati o enti non commerciali, i calcoli prescindono dalla tassazione dovuta per i ricavi da elencare in dichiarazione come "redditi diversi".

Nella Tab. 6.6 sono riportati i risultati del calcolo del costo medio dell'energia producibile (*CME*), ovviamente indipendente dal valore dell'effettiva remunerazione dell'energia prodotta.

Si evidenzia che il costo medio dell'energia così calcolato è risultato sempre superiore ai prezzi di acquisto dell'energia elettrica dalla rete. Da ciò si deduce che è sempre conveniente vendere la totalità dell'energia piuttosto che prevederne un uso proprio anche parziale. Alle condizioni indicate, per un privato (o un ente non commerciale) il costo medio dell'energia prodotta è del resto sempre pari o inferiore ai valori della tariffa incentivante di 30 c€/kWh.

Per un'impresa, invece, l'effetto combinato delle tassazioni e degli oneri di restituzione del debito fa sì che il costo medio dell'energia risulti significativamente inferiore alla tariffa incentivante solo per costi d'installazione dell'ordine di 2700 €/kW e per un numero di ore/anno equivalenti non inferiore a 1800. Queste ipotesi, d'altra parte, si verificano solo qualora siano installati impianti minieolici delle taglie più grandi in siti con ventosità opportunamente elevata.

CME (Costo Medio dell'Energia) [€/kWh]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso di sconto [%]		Tasso di sconto [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	0,251	0,301	/	
2	3500	1800	0,223	0,268		
3	3500	1600	/		0,327	0,347
4	3500	1800			0,298	0,315
5	2700	1800			0,244	0,258
6	2700	2000			0,226	0,238

Tab. 6.6 – Stime del costo medio dell'energia prodotta dai sei impianti minieolici ipotizzati.

Nella Tab. 6.7 sono riportati i risultati relativi ai restanti tre indicatori nell'ipotesi di applicazione della tariffa onnicomprensiva di 30 c€/kWh per 15 anni, come previsto dalla legislazione ora vigente.

I dati documentati nella Tab. 6.8 sono stati invece ottenuti ipotizzando l'applicazione dell'attuale tariffa onnicomprensiva per tutta la vita utile dell'impianto, assunta pari a 20 anni.

Dai risultati riportati nelle due tabelle si desume che redditività e tempi di ritorno dell'investimento interessanti sono ottenibili da un'impresa soltanto per costi d'impianto dell'ordine di 2700 €/kW, che ai prezzi attuali del mercato del minieolico sono propri degli impianti con aerogeneratori delle taglie più elevate.

Si osserva ancora che l'eventuale allungamento del periodo di corresponsione della tariffa incentivante da 15 a 20 anni ovviamente migliora il quadro di redditività dell'investimento, ma non lo cambia in modo sostanziale.

VAN (Valore Attuale Netto) [€/kW]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso di sconto [%]		Tasso di sconto [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	900	-70	/	
2	3500	1800	1638	513		
3	3500	1600	/		-693	-777
4	3500	1800			-215	-390
5	2700	1800			711	409
6	2700	2000			1088	711
TR (Tempo di Ritorno dell'investimento) [Anni]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso di sconto [%]		Tasso di sconto [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	13,73	> 20	/	
2	3500	1800	11,21	14,72		
3	3500	1600	/		> 20	> 20
4	3500	1800			> 20	> 20
5	2700	1800			7,03	8,19
6	2700	2000			5,61	6,29
TIR (Tasso Interno di Rendimento) [%]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso Interno di Rendimento [%]		Tasso Interno di Rendimento [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	7,74		/	
2	3500	1800	9,81			
3	3500	1600	/		-4,41	
4	3500	1800			2,36	
5	2700	1800			14,60	
6	2700	2000			18,95	

Tab. 6.7 – Stime di redditività di un impianto minieolico con tariffa onnicomprensiva corrisposta per 15 anni.

VAN (Valore Attuale Netto) [€/kW]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso di sconto [%]		Tasso di sconto [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	981	-21	/	
2	3500	1800	1729	569		
3	3500	1600	/		-463	-638
4	3500	1800			44	-233
5	2700	1800			970	566
6	2700	2000			1375	885
TR (Tempo di Ritorno dell'investimento) [Anni]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso di sconto [%]		Tasso di sconto [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	13,73	> 20	/	
2	3500	1800	11,21	14,72		
3	3500	1600	/		> 20	> 20
4	3500	1800			19,44	> 20
5	2700	1800			7,03	8,19
6	2700	2000			5,61	6,29
TIR (Tasso Interno di Rendimento) [%]						
Caso	Costo [€/kW]	Producibilità [OreEq/Anno]	Privato		Impresa	
			Tasso Interno di Rendimento [%]		Tasso Interno di Rendimento [%]	
			5	8	5	8
1	3500	1600	7,93		/	
2	3500	1800	9,98			
3	3500	1600	/		0,63	
4	3500	1800			5,4	
5	2700	1800			15,69	
6	2700	2000			19,71	

Tab. 6.8 – Stime di redditività di un impianto minieolico con tariffa onnicomprensiva corrisposta per 20 anni.

7 CONCLUSIONI

Le incentivazioni per gli impianti minieolici con potenza tra 1 e 200 kW collegati alla rete (tariffa onnicomprensiva di 300 €/MWh per tutta l'energia elettrica immessa in rete, possibilità di seguire la Procedura Abilitativa Semplificata per potenze installate inferiori a 60 kW, limite estendibile a livello regionale fino a 1 MW) si stanno dimostrando interessanti e stanno promuovendo lo sviluppo del settore. In particolare, gli impianti qualificati IAFR sono passati da 23, per una potenza installata di 550 kW, a metà 2008, a 119, per una potenza installata di 3990 kW, a fine 2010, con un incremento quindi percentualmente notevole, seppure a fronte di valori assoluti complessivi di potenza installata ancora modesti. Anche gli impianti IAFR in progetto a fine 2010 presentano una consistenza apprezzabile, essendo in numero di 146 per una potenza totale di 6458 kW.

Nel rapporto è fornita, a beneficio di eventuali investitori o Enti interessati, una panoramica sugli impianti minieolici, con descrizione dei loro principali componenti, i tipi di miniaerogeneratori (ad asse orizzontale, ad asse verticale), le tipologie dei pali (o torri) di sostegno, i più usuali sistemi di controllo della potenza prodotta. Vengono anche effettuate utili considerazioni sulla potenza e sull'energia elettrica producibile da un impianto minieolico in funzione delle caratteristiche del vento, la cui determinazione e rappresentazione viene trattata anch'essa in modo dettagliato.

Riprendendo quanto già descritto con ben maggiore dettaglio in rapporti precedenti, sono poi fornite indicazioni aggiornate al 2011 sul mercato dei sistemi minieolici, in particolare sui produttori e i distributori di sistemi minieolici operanti in Italia. Si sono potuti censire complessivamente 90 diversi operatori. Tutte le classi di potenza delle turbine minieoliche sono abbondantemente coperte; anche per le macchine di maggior taglia (60÷200 kW) si sono contati non meno di 25÷30 modelli differenti. L'offerta è intesa non solo per impianti da collegare alla rete, ma anche per impianti destinati ad alimentare utenze isolate in zone non servite dalla rete elettrica. Si sono affacciati sul mercato anche alcuni costruttori italiani con progetti originali che si differenziano più o meno dall'offerta tradizionale per il disegno della turbina o per i materiali utilizzati.

Nel rapporto possono anche essere reperite utili informazioni su come realizzare un impianto minieolico, grazie alla descrizione delle attività condotte direttamente da RSE prima per ottenere l'autorizzazione e poi per eseguire l'installazione di un sistema minieolico da 3 kW, adatto ai bassi venti e con interessanti soluzioni tecnologiche, nell'area della sede RSE a Milano adibita alla sperimentazione di sistemi a energia rinnovabile. Presso questo impianto è stato anche installato un sistema di monitoraggio per potere raccogliere, e riportare in prossimi rapporti, informazioni e dati su importanti aspetti delle installazioni minieoliche, quali resa energetica, esercizio, manutenzione, integrazione/interazione con la rete di bassa tensione (gestione, protezione, sicurezza, "power quality").

Altre interessanti informazioni possono essere ricavate dai monitoraggi effettuati da RSE su altri impianti minieolici di diversa potenza e tecnologia, impiegando sistemi (definiti da RSE e di proprietà di RSE stessa) composti prevalentemente da sensori per la misura del vento, installati su apposite torri anemometriche, e della potenza generata dall'impianto.

In particolare, il monitoraggio condotto su un impianto minieolico da 2 kW a Cesenatico (FC) ha evidenziato prestazioni energetiche del sistema decisamente inferiori a quelle attese, fatto che al momento si ipotizza possa essere imputato, perlomeno in parte, ad un non perfetto connubio dell'aerogeneratore con l'inverter adottato. Per chiarire quali siano effettivamente le cause che hanno portato il sistema minieolico monitorato a produrre potenze decisamente inferiori a quelle attese, sarebbe comunque opportuno continuare il monitoraggio dell'impianto in questione, acquisendo in particolare anche la potenza prodotta in uscita dal miniaerogeneratore (ossia quella rilevabile in ingresso all'inverter) e sostituendo altresì lo stesso inverter con un altro di caratteristiche diverse.

Su un altro impianto minieolico da 10 kW installato a Favara (AG) è già stato installato da RSE un sistema di monitoraggio, ma al momento non sono stati ancora raccolti dati di funzionamento, essendo l'impianto rimasto fermo perché soggetto a interventi migliorativi dei dispositivi di sicurezza. Questi

interventi sono terminati da poco; sarà quindi possibile iniziare presto a raccogliere dati anche su questo impianto, che si prospetta di particolare interesse.

Il monitoraggio di un terzo impianto minieolico da 10 kW collegato ad una minirete isolata a Bresciadega, Comune di Novate Mezzola, Val Codera (SO), in un ambiente montano con severe condizioni climatiche, ha evidenziato prestazioni energetiche decisamente inferiori alle attese, anche a causa di danni subiti ripetutamente dall'inverter. Vi è motivo di ritenere che le bruciature riscontrate negli inverter siano state probabilmente causate da sovratensioni prodotte da scariche elettriche atmosferiche e non adeguatamente deviate verso terra dagli scaricatori appositamente inseriti. Per permettere di individuare tutte le cause delle ridotte prestazioni energetiche del sistema e i rimedi attuabili, è comunque necessario continuare il monitoraggio dell'impianto, acquisendo nel contempo, per maggiore chiarezza, anche la potenza prodotta in uscita dal miniaerogeneratore (ossia quella in ingresso all'inverter), oltre a quella in uscita dal sistema minieolico completo.

Il monitoraggio di un quarto impianto da 55 kW installato a Castellina Marittima (PI) ha indicato prestazioni energetiche in linea con quelle dichiarate dal costruttore, oltre che una disponibilità a produrre normalmente elevata. Si è anche evidenziato un periodo di tempo con produzione di potenza reattiva insolitamente elevata a causa di malfunzionamenti del banco di condensatori di rifasamento, poi eliminati dal costruttore con opportune riparazioni. A parte ciò, la potenza reattiva ha però mostrato un andamento soddisfacente per un'ampia gamma di regimi di funzionamento, con valori del fattore di potenza ($\cos\phi$) superiori a 0,9 e spesso dell'ordine di 0,93-0,94.

Infine, nel rapporto sono state fornite indicazioni sui costi degli impianti minieolici e sulle metodologie per il calcolo del costo unitario dell'energia elettrica prodotta e della redditività degli investimenti. A tale riguardo sono stati effettuati, a titolo d'esempio, calcoli della redditività di alcuni impianti minieolici, riportando risultati ottenuti con diversi costi d'impianto, tipologie d'investitore e condizioni di ventosità. Questi dati possono essere utili a investitori interessati al settore minieolico. In particolare, si è evidenziato che, per un privato (o un ente non commerciale), il costo medio dell'energia prodotta è, naturalmente in siti con sufficiente ventosità (almeno 5 m/s di velocità media annua), di norma inferiore ai valori della tariffa incentivante di 30 c€/kWh oggi disponibile in Italia. Per un'impresa, invece, l'effetto combinato delle tassazioni e degli oneri di restituzione del debito fa sì che il costo medio dell'energia risulti significativamente inferiore alla tariffa incentivante solo per costi d'impianto complessivi dell'ordine di 2700 €/kW e per un numero di ore/anno equivalenti di funzionamento a piena potenza non inferiore a 1800, ipotesi che si verificano solo qualora siano installati impianti minieolici delle taglie più grandi in siti con ventosità opportunamente elevata.

RIFERIMENTI

Di seguito vengono riportati i riferimenti bibliografici. I collegamenti ai siti internet, sottolineati, sono aggiornati a marzo 2012.

- [1] C. Casale, S. Viani, G.A. Zanetta, "Linee guida per la realizzazione d'impianti minieolici", Rapporto RSE 12000820, 31/03/2011.
- [2] C. Casale, E. Lembo, S. Viani, G.A. Zanetta, "Gli impianti minieolici in Italia: macchine, quadro normativo, valutazioni tecnico-economiche", Rapporto ERSE 10000252, 28/02/2010
<http://www.rse-web.it/progetti/progetto/documento/418/2862?objId=418&docIdType=1&typeDesc=Rapporto>
- [3] S. Viani, G.A. Zanetta, "Indagini sperimentali su sistemi minieolici", Rapporto RSE 10000359, 31/03/2011.
<http://www.rse-web.it/progetti/progetto/documento/418/314242?objId=418&docIdType=1&typeDesc=Rapporto>
- [4] Guida agli impianti mini eolici. Enel.si. Aprile 2009.
- [5] Parlamento Italiano. Legge 24 dicembre 2007, n. 244 "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (Legge Finanziaria 2008)", pubblicata nella Gazzetta Ufficiale n. 300 del 28 dicembre 2007 - Supplemento ordinario n. 285.
<http://www.parlamento.it/parlam/leggi/072441.htm>
- [6] Ministero dello Sviluppo Economico. Decreto 18 dicembre 2008. "Incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, ai sensi dell'articolo 2, comma 150, della legge 24 dicembre 2007, n. 244".
- [7] Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. "Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE".
<http://www.gazzettaufficiale.biz/atti/2011/20110071/011G0067.htm>
- [8] D.M. Sviluppo economico. 10 settembre 2010. Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili.
<http://www.ambiente.al.it/multimedia/387/Dm%20Sviluppo%20economico%2010.09.2010%20linee%20guida.pdf>
- [9] "Panoramica della tecnologie di micro- e mini-generazione eolica, in ambito rurale, di mini-grid per aree industriali e con integrazione nell'ambiente costruito urbano", Mauro Andriollo, Università di Padova, DIE-Dipartimento di Energia Elettrica, Convegno "Mini- e Micro-Eolico. Scambio sul posto e incentivazione in conto energia con "tariffa onnicomprensiva": le novità normative. Tecnologie, prestazioni, prodotti sul mercato", SolarExpo. Fiera di Verona. 9 maggio 2009.
- [10] IEC 61400-12-1 Edition 1.0 "Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines" 2005-12.
- [11] "Incentivazione delle fonti rinnovabili. Bollettino aggiornato al 31 dicembre 2008". GSE Gestore Servizi Elettrici.
- [12] "Incentivazione delle fonti rinnovabili. Bollettino aggiornato al 30 giugno 2009". GSE Gestore Servizi Elettrici.
- [13] "Incentivazione delle fonti rinnovabili. Bollettino aggiornato al 31 dicembre 2009". GSE Gestore Servizi Elettrici.
- [14] "Incentivazione delle fonti rinnovabili. Bollettino aggiornato al 31 dicembre 2010". GSE Gestore Servizi Elettrici.
- [15] Eolica Expo Mediterranean 2011, Fiera di Roma, 14 ÷ 16 settembre 2011.
- [16] Norma Italiana CEI EN 61400-12-1 del febbraio 2007 "Sistemi di generazione a turbina eolica. Parte 12: "Verifica delle prestazioni di potenza degli aerogeneratori."

- [17] Sito internet della società it-energy di Zermeghedo (VI)
<http://www.it-energy.it/Default.aspx>
- [18] Sito internet della società TeamWare di Milano
<http://www.teamware.it/>
- [19] Sito internet della società Amga Energia di San Mauro Pascoli (FC)
<http://www.amgaenergia.it/home/>
- [20] Sito internet della società Windon.
<http://www.windon.se/it/>
- [21] Caratteristiche tecniche inverter SMA Wind Boy 2500
<http://www.sma-italia.com/it/prodotti/inverter-per-energia-eolica/windy-boy-2500-3000.html>
- [22] Caratteristiche tecniche inverter SMA Wind Boy 3800
<http://www.sma-italia.com/it/prodotti/inverter-per-energia-eolica/windy-boy-3300-3800.html>
- [23] Sito internet della società Campione Industries di Agrigento.
<http://www.campioneindustries.com/index.html>
- [24] Sito internet della società Elpower
<http://www.elpower.it/>
- [25] S. Guastella, F. Paletta, F. Groppi, F. Bregani, "Monitoraggio, verifiche e analisi dei dati di funzionamento. Sistema ibrido Fotovoltaico/Eolico/ Diesel in Val Codera. Comune di Novate Mezzola (SO)", Rapporto CESI A5049539, 31/12/2005.
<http://wolf.rse-web.it/Documenti/SintesiDoc.aspx?idN=101266&idD=313010>
- [26] Owner's Manual. Bergey EXCEL 10.
<http://production-images.webapeel.com/bergey/assets/2011/9/7/96578/Excel.S.OM.2011.R1.pdf>
- [27] Data sheet "BWC EXCEL 10 kW Class Wind Turbine".
<http://genproenergy.com/cutsheet/bergey/Excel.Spec.Frt.pdf>
- [28] Sito internet della società Aria con sedi a Livorno e Prato.
http://www.aria-srl.it/aria/ariacm/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2

Riferimenti non utilizzati

- [29] IEC 61400-2 ed. 2.0, "Wind turbines - Part 2: Design requirements for small wind turbines", 2006-03-21
- [30] "AWEA. Small Wind Turbine Global Market Study". Year Ending 2008. American Wind Energy Association
http://www.awea.org/smallwind/pdf/09_AWEA_Small_Wind_Global_Market_Study.pdf
- [31] Sito internet della società Ammonit
<http://www.ammonit.com/en/products/sensors/anemometers>
- [32] Sito internet della società Ammonit
<http://www.ammonit.com/en/products/sensors/wind-vanes>
- [33] SWIIS (Small Wind Industry Implementation Strategy) Consortium. Small Wind Turbines Siting. Some Basic Issues. 27 May 2005.
- [34] L. Misuraca, "Cosa frena il decollo del minieolico in Italia", QualEnergia.it, 31/05/2011
<http://qualenergia.it/articoli/20110531-quei-freni-che-impediscono-il-decollo-del-minieolico>
- [35] G. Meneghello, "Il mini eolico, come il fotovoltaico di sette anni fa", QualEnergia.it, 06/02/2012
<http://www.qualenergia.it/articoli/20120206-il-mini-eolico-come-il-fotovoltaico-di-sette-anni-fa>
- [36] GSE "Il quadro autorizzativo per impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Ricognizione della normativa nazionale e regionale"
<http://www.google.it/url?q=http://rinnova.gse.it/autorizzazioni/Documents/Autorizzazioni%2520impianti%2520FER.pdf&sa=U&ei=Vm9GT-LVD9Pc4QTvooDhDg&ved=0CBEQFJAA&usq=AFQjCNGtP2cBYkQ0It20G7v2s6u1nYnVug>

- [37] IEA Wind, "Recommended practices for wind turbine testing and evaluation-12. Consumer label for small wind turbines", 1.Edition, 2011.
- [38] Regione Abruzzo. D.G.R. n. 294 del 02/05/2011. "Attuazione D.Lgs. 03.03.2011 n. 28 – Disposizioni in tema di Autorizzazione generalizzata ai sensi delle DD.GG.RR. n.351 del 12.04.2007 e n. 244 del 22.03.2010".
- [39] Allegato A alla deliberazione ARG/elt 99/08 - Versione integrata e modificata dalle deliberazioni ARG/elt 179/08, 205/08, 130/09 e 125/10. "Testo integrato delle condizioni tecniche ed economiche per la connessione alle reti con obbligo di connessione di terzi degli impianti di produzione (testo integrato delle connessioni attive – TICA)". Autorità per l'energia elettrica e il gas.
- [40] L. Pirazzi, A. Gargini, "Nuove vie del vento-Realtà industriale e sfida continua", Giugno 2008, Franco Muzzio Editore
- [41] J.O. Tande, R. Hunter, "Recommended practices for wind turbine testing - 2.Estimation of cost of energy for wind energy conversion systems", 2.Edition 1994, IEA
- [42] M. Benini, M. Gallanti, F. Parozzi, F. Polidoro, "Valutazione dei costi di produzione dell'energia elettrica da fonte nucleare", Rapporto CESI RICERCA, RdS, Rapp. 06002964, 20 Novembre 2006
- [43] DOE, "Market-Based Advanced Coal Power Systems", DOE Report, 1999
- [44] IEFE-Università Bocconi, "I costi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili", Dic. 2008, Rapporto commissionato da AEEG.
- [45] C. Casale, E. Sesto, "Costo e valore dell'energia elettrica da fonte eolica", Giornata di Studio su: "Energia dal vento: aspetti tecnologici ed economici", Bari, 9 Giugno 1994
- [46] "BWEA. Small Wind Systems UK Market Report 2009". British Wind Energy Association
http://www.bwea.com/pdf/small/BWEA_SWS_UK_Market_Report_2009.pdf
- [47] "Qualificazione Impianti", GSE Gestore Servizi Elettrici.
<http://www.gse.it/attivita/Incentivazioni%20Fonti%20Rinnovabili/Servizi/Pagine/RilascioCertificativerdi.aspx?Idp=1&Anno=&SortField=Created&SortDir=DESC>