



Regione Emilia - Romagna
Provincia di Forlì - Cesena
Comuni di Verghereto, Bagno di Romagna e Sarsina



Impianto Eolico denominato “Monte Comero” ubicato nel comune di Verghereto (FC) costituito da 6 (sei) aerogeneratori di potenza nominale 5 MW, per un totale di 30 MW, con relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Verghereto (FC), Bagno di Romagna (FC) e Sarsina (FC)

Titolo:

RELAZIONE ANEMOLOGICA

Numero documento:

Commessa

2 2 4 3 0 9

Fase

D

Tipo doc.

R

Prog. doc.

0 4 0 0

Rev.

0 0

Proponente:

FRI-EL

FRI-EL S.p.A.
Piazza della Rotonda 2
00186 Roma (RM)
fri-elspa@legalmail.it
P. Iva 01652230218
Cod. Fisc. 07321020153

PROGETTO DEFINITIVO

Progettazione:



PROGETTO ENERGIA S.r.l.

Via Cardito, 202 | 83031 | Ariano Irpino (AV)
+39 0825 891313 | info@progettoenergia.biz
www.progettoenergia.biz



SERVIZI DI INGEGNERIA INTEGRATA

ISO 9001 14001 45001
REGISTERED
CO 3156

Progettista:

Ing. Massimo Lo Russo



Sul presente documento sussiste il DIRITTO di PROPRIETÀ. Qualsiasi utilizzo non preventivamente autorizzato sarà perseguito ai sensi della normativa vigente

REVISIONI	N.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
	00	28.04.2025	EMISSIONE PER AUTORIZZAZIONE	C. ELIA	M. LO RUSSO	M. LO RUSSO

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
2.	DESCRIZIONE DEL SITO	3
3.	LAYOUT DEL PARCO	3
4.	CAMPAGNA ANEMOMETRICA	4
5.	VALUTAZIONE DELLE MISURE	4
6.	STATISTICA DEL VENTO MISURATO	6
7.	STATISTICA MEDIA ANNUALE A LUNGO TERMINE	7
8.	ESTRAPOLAZIONE VERTICALE	8
9.	ESTRAPOLAZIONE ORIZZONTALE	8
10.	CALCOLO DI PRODUZIONE	9
11.	INCERTEZZE	11
12.	CONCLUSIONI	12

1. INTRODUZIONE

La presente relazione ha lo scopo di valutare la risorsa eolica in riferimento al progetto di parco eolico nel comune di Verghereto (FC), con opere di connessione e infrastrutture nei comuni di Verghereto (FC), Sarsina e Bagno di Romagna (FC). In particolare, verrà riportata la descrizione della campagna anemometrica effettuata in sito e la producibilità espressa in ore equivalenti di funzionamento a pieno carico in un anno solare.

2. DESCRIZIONE DEL SITO

Il parco eolico proposto si sviluppa all'interno del territorio comunale di Verghereto (area aerogeneratori), Sarsina e Bagno di Romagna (cavidotti e area sottostazione elettrica). L'orografia del terreno, mediamente complessa, è di tipo montagnoso con elevazione massima fino a circa 1200 m di quota.



Fig. 1 - Layout del parco eolico su ortofoto

3. LAYOUT DEL PARCO

Il parco eolico, della potenza nominale massima pari a 30 MW, è costituito da 6 aerogeneratori di ultima generazione con caratteristiche dimensionali e prestazionali riassunte qui sotto:

- Diametro massimo rotore: 166 m

- Altezza massima torre: 117 m
- Altezza massima tip pala: 200 m
- Potenza nominale massima: 5 MW

Le turbine sono state disposte in modo da massimizzare la produzione elettrica del parco e ridurre gli effetti aerodinamici.

AEROGENERATORE	COORDINATE AEROGENERATORE UTM (WGS84) - FUSO 33		
	Long. E [m]	Lat. N [m]	Z (m)
WTG 01	262.276,0	4.855.173,0	1.179,00
WTG 02	261.721,0	4.855.363,0	1.160,00
WTG 03	261.225,0	4.855.621,0	1.148,70
WTG 04	262.024,0	4.854.547,0	1.197,50
WTG 05	262.299,0	4.854.070,0	1.179,50
WTG 06	262.756,0	4.853.773,0	1.170,50

Tab. 1 – Coordinate aerogeneratori in UTM WGS84 Zona 33.

4. CAMPAGNA ANEMOMETRICA

L'analisi di vento è stata eseguita utilizzando un dispositivo Sodar (AQ500), che ha registrato dati nel periodo aprile 2024 / aprile 2025 (12 mesi). Il sodar, conosciuto anche come *Wind Profiler*, è un dispositivo di misura remoto (*Remote Sensing Device*) di velocità e direzione del vento che emette onde sonore ed elabora il segnale riflesso dall'atmosfera per poi ricavarne i dati di vento. Il sodar è uno strumento affidabile e preciso, che permette di ricavare il profilo del vento in maniera puntuale grazie alla proprietà di misurare contemporaneamente a diverse quote. In questo specifico caso, il sodar utilizzato è un AQ500, prodotto dalla svedese AQ Systems; le misure sono state effettuate a quote che vanno dai 20 ai 150 m ad intervalli di 5 m.

Codice sodar	Verghereto Sodar 1032
Coordinate (UTM WGS84 zona:33)	X 262149 Y 4854365
Periodo misurazione	09.04.2024 - 09.04.2025
Quote misura velocità	20 - 150 m, step 5 m
Quote misura direzione	20 - 150 m, step 5 m
Logger	Integrato
Availability (media sulle diverse quote)	81,5%

Tab. 2 - Descrizione dati Verghereto Sodar 1032

5. VALUTAZIONE DELLE MISURE

I dati registrati dal Sodar sono stati estratti e processati manualmente in modo da identificare i dati affetti da possibili malfunzionamenti o anomalie che si possono verificare, ad esempio, in caso di condizioni meteo particolarmente avverse: forti

piogge, nevicate etc. Altri eventi estremi, fulmini in particolare, possono compromettere in maniera irrimediabile il funzionamento dell'elettronica di acquisizione del dispositivo. Tutti questi dati sono stati esclusi e non considerati nell'analisi.

Quota [m]	Availability [%]
20	75,77
25	76,56
30	77,24
35	77,91
40	78,55
45	79,07
50	79,54
55	79,95
60	80,32
65	80,78
70	81,41
75	81,30
80	81,41
85	81,58
90	81,73
95	81,83
100	81,95
105	81,99
110	82,00
115	82,11
120	82,33
125	82,32
130	82,33
135	82,32
140	82,34
145	82,34
150	82,34

Tab. 3 - Disponibilità misure Verghereto Sodar 1032

6. STATISTICA DEL VENTO MISURATO

Nella tabella 4 viene riportata la statistica del vento misurata a 115 m. La statistica del vento è suddivisa in 12 settori cardinali e viene rappresentata tramite una funzione di Weibull. Nella Fig. 2 vengono riportati il grafico della statistica e la rosa dei venti. La velocità media del vento a 115 m è di 6,99 m/s e la rosa dei venti indica come vento prevalente quello proveniente dal settore SSO (libeccio).

Direction Sector	Weibull k	Weibull A [m/s]	Frequency [%]	Mean [m/s]
345° - 15°	1.368	6.347	8.18	6.427
15° - 45°	1.847	7.563	21.09	6.952
45° - 75°	1.749	5.687	7.85	5.351
75° - 105°	1.627	4.973	3.09	4.574
105° - 135°	1.398	4.211	1.66	4.210
135° - 165°	1.715	7.623	3.03	6.392
165° - 195°	1.809	9.503	16.51	8.674
195° - 225°	1.787	8.861	22.12	8.153
225° - 255°	1.705	7.073	9.75	6.652
255° - 285°	1.268	4.310	2.44	3.818
285° - 315°	0.946	4.765	2.41	5.238
315° - 345°	1.428	5.378	2.30	5.141
All data	1.641	7.596	100.00	6.993

Tab. 4 - Statistica del vento a 115 m

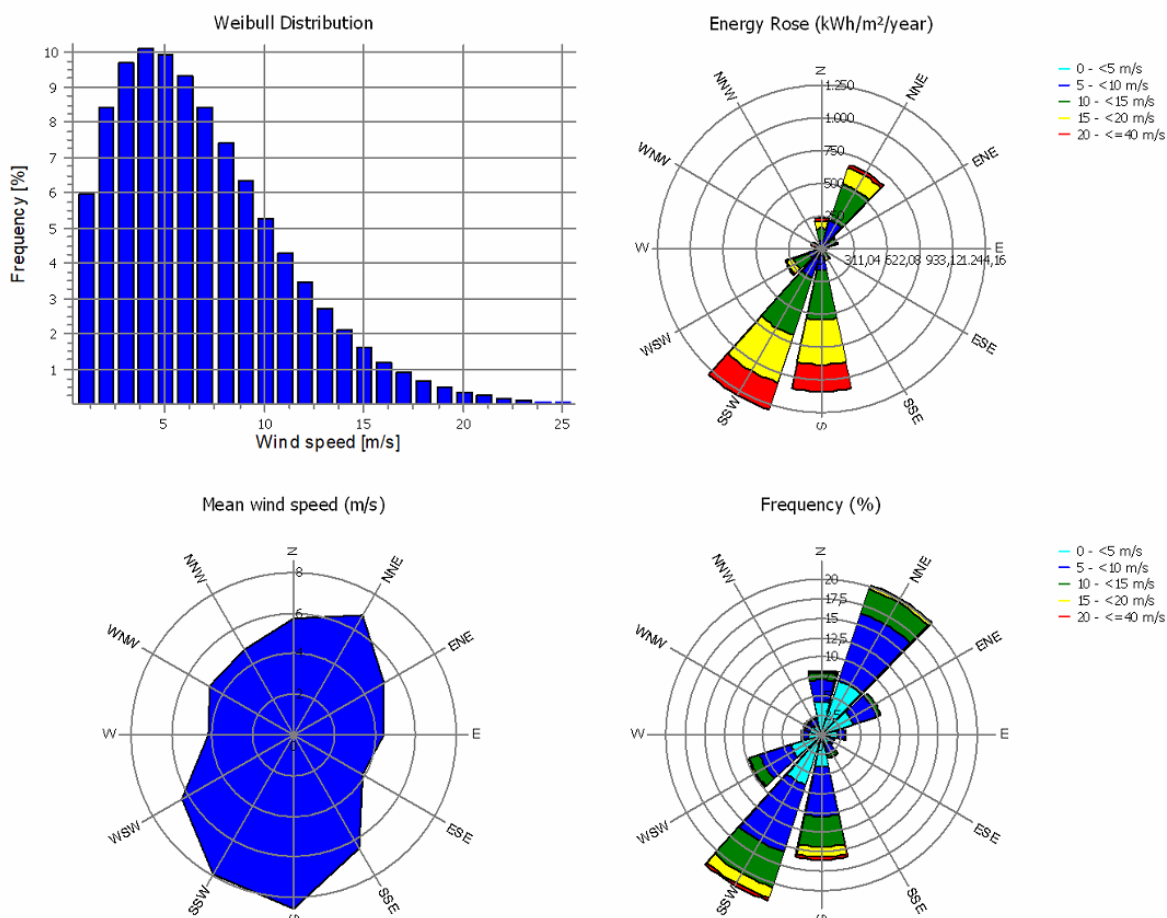


Fig. 2 - Statistica del vento a 115 m, grafici

7. STATISTICA MEDIA ANNUALE A LUNGO TERMINE

Per stimare la statistica media annuale a lungo termine (15/20 anni), si estende la serie di dati misurati tramite serie temporali a lungo termine reperibili da vari fornitori specializzati (es. ERA5, Merra2 etc). Per fare ciò e per colmare i buchi di dati mancanti è stato utilizzato il metodo di estensione/sintetizzazione. Questo metodo permette di sintetizzare i dati di vento di un anemometro (locale) a partire dai dati di vento a lungo termine (riferimento), i quali possono provenire da un altro mast/sodar nelle vicinanze del primo oppure, come accennato in precedenza, tramite fornitori di dati a lungo termine. Al fine di poter utilizzare questo metodo è necessario che le due serie anemometriche abbiano un periodo sufficiente di dati concorrenti e che ci sia una correlazione tra i due. Nel nostro caso l'anemometro locale è il sodar Verghereto Sodar 1032 mentre i dati di riferimento provengono dal punto più vicino disponibile sul database di ERA5+, con estensione temporale di 20 anni. I dati concorrenti vengono suddivisi per direzione considerando 12 settori di 30 gradi ciascuno. Per ogni settore i dati dei due anemometri vengono correlati tra loro comparando le velocità del vento. Dalla correlazione vengono calcolati dei coefficienti di regressione (speed up) che rappresentano una funzione di trasferimento che a partire dai dati di riferimento permettono di sintetizzare i dati dell'anemometro locale.

La correlazione è stata effettuata ai dati concorrenti di Verghereto Sodar 1024 e ERA5+ ottenendo un coefficiente di correlazione dell'86,6%, il quale dimostra che tra i due c'è un'ottima correlazione. A questo punto sono stati calcolati gli speed up e questi sono stati applicati ai dati ERA5+ per sintetizzare i dati di Verghereto Sodar 1032. Infine, dai dati misurati si è ottenuta una serie temporale

rappresentativa del lungo termine che va dal 09.04.2005 al 09.04.2025. Si è stimata così una velocità media a lungo termine del vento a 115 m di 7,79 m/s, dato superiore alla media dei 12 mesi di misurazioni, ad evidenziare il fatto che l'anno di misura sia stato mediamente meno ventoso rispetto al lungo termine.

8. ESTRAPOLAZIONE VERTICALE

Per estrapolare il vento medio a quota hub viene applicata la legge di potenza del profilo del vento:

$$V_{hub} = V_m * (H_{hub} / H_m)^\alpha$$

dove **V_m** è la velocità del vento medio alla quota dell'anemometro, **V_{hub}** è la velocità del vento medio alla quota hub, **H_m** è la quota dell'anemometro, **H_{hub}** è la quota hub e **α** è il coefficiente di wind shear. Il wind shear viene calcolato a partire dalle misure di vento effettuate sulle diverse quote della torre anemometrica.

Si calcolato così un coefficiente di wind shear misurato:

$$\alpha = 0,12$$

Il wind shear è stato applicato alla serie ricavata nel capitolo 7 e si è estrapolato il vento medio a 117 m. Il modello di aerogeneratore scelto per le simulazioni è il MingYang MySE 5.0 166, con torre tubolare da 117 m (quota hub).

Nella tabella seguente sono riportati i risultati.

Quota hub[m]	Velocità media [m/s]
117 m	7,81 m/s

Tab. 5 - Velocità media annuale a lungo termine

9. ESTRAPOLAZIONE ORIZZONTALE

La variazione della velocità del vento su tutto il parco eolico viene predetta utilizzando il programma Wasp sviluppato dall'istituto di ricerca danese Risoe. Wasp è un modello computazione di flusso che a partire dalla statistica del vento in un punto calcola la statistica del vento nell'area circostante considerando l'influenza dell'orografia del terreno, della rugosità e degli ostacoli presenti. Partendo dalla statistica calcolata e applicando Wasp è stato possibile calcolare il vento medio a quota hub per ogni aerogeneratore del parco. Nella tabella seguente vengono riportati i valori di vento stimati per ogni aerogeneratore. I valori riportati fanno riferimento alla velocità media indisturbata ovvero non tengono in considerazione gli effetti scia.

Aerogeneratore	Velocità media [m/s]
WTG 1	7,27
WTG 2	7,20
WTG 3	6,98
WTG 4	7,35
WTG 5	7,38
WTG 6	7,03

Tab. 6 - Vento medio indisturbato a quota hub (117 m) sul parco

10. CALCOLO DI PRODUZIONE



Come accennato in precedenza, per ottenere la produzione del parco si è optato per usare, come possibile turbina di progetto, la MingYang MySE 5.0 166 con potenza nominale di 5,0 MW ad un'altezza al mozzo (altezza hub) di 117m. Nella tabella 7 viene riportata la curva di potenza della MingYang MySE 5.0 166 per una densità dell'aria di 1,225 kg/m³.

Velocità del vento [m/s]	Potenza [kW]
0	0
1	0
2	0
3	70,7
4	288,8
5	642,3
6	1.154,7
7	1.860,1
8	2.685,8
9	3.449,8
10	4.064,4
11	4.513,0
12	4.802,0
13	4.957,8
14	4.996,8
15	5.000,0
16	5.000,0
17	5.000,0
18	5.000,0
19	5.000,0
20	5.000,0
21	4.765,0
22	4.379,0
23	4.019,0
24	3.671,0
25	3.404,0

Tab. 7 - Curva di potenza dell'aerogeneratore MingYang MySE 5.0 166, con densità dell'aria 1,225 kg/m³

A partire dalla statistica del vento calcolata nel capitolo 7 si calcola la produzione energetica di ogni singolo aerogeneratore, tramite il programma di calcolo Windpro (versione 4.1.273).

Nella tabella 8 viene mostrata la produzione netta per ogni aerogeneratore del parco. Le ore equivalenti sono il rapporto tra la produzione annua e la potenza nominale dell'aerogeneratore.

	<p style="text-align: center;">RELAZIONE ANEMOLOGICA</p> <p>Impianto Eolico denominato "Monte Comero" ubicato nel comune di Verghereto (FC) costituito da 6 (sei) aerogeneratori di potenza nominale 5 MW, per un totale di 30 MW, con relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Verghereto (FC), Bagno di Romagna (FC) e Sarsina (FC)</p>	
Codifica Elaborato: 224309_D_R_0400 Rev. 00		

Aerogeneratore	Produzione netta [MWh]	Potenza nominale [MW]	Ore equivalenti [h]
WTG 1	16.128	5,0	3226
WTG 2	16.520	5,0	3304
WTG 3	15.949	5,0	3190
WTG 4	16.549	5,0	3310
WTG 5	16.979	5,0	3396
WTG 6	16.046	5,0	3209

Tab. 8 - Produzione netta e ore equivalenti

Nella tabella seguente viene riportata la stima della produzione energetica annuale del parco. La produzione seguente rappresenta la stima centrale annuale che si otterrebbe dopo 10 anni operativi.

N° turbine	6
Potenza nominale	30,0 MW
Produzione lorda	109,8 GWh/anno
Perdite	10,6%
Produzione netta	98,2 GWh/anno
Ore equivalenti	3272 h

Tab. 9 - Stima della produzione energetica annuale del parco eolico

La produzione netta rappresenta l'effettiva produzione energetica a valle dell'impianto che viene contabilizzata dal gestore della rete. Nella tabella seguente vengono elencate le potenziali perdite che agiscono sull'impianto:



Wake effect	-2,8%
Availability WTGs	-2,0%
Availability Grid, Substation and BoP	-0,4%
Electrical losses	-2,4%
Power Curve Adjustment	-1,0%
High Temperature Shut Down	-0,2%
Environmental (Icing)	-0,1%
High Wind Hysteresis	-0,2%
Grid curtailment	-1,5%
Total	-10,6%

Tab. 10 - Sorgenti di perdita

Wake Effect: sono gli effetti scia ovvero le perdite aerodinamiche causate dagli aerogeneratori stessi che implicano una diminuzione della velocità del vento dietro le turbine. Il modello di calcolo dell'effetto scia utilizzato è il N.O. Jensen.

Availability WTGs: rappresenta le perdite causate dallo spegnimento degli aerogeneratori dovute alla manutenzione ordinaria.

Availability Grid, Substation and BoP: rappresenta le perdite causate dalla manutenzione ordinaria sulla rete elettrica del parco.

	<p style="text-align: center;">RELAZIONE ANEMOLOGICA</p> <p>Impianto Eolico denominato "Monte Comero" ubicato nel comune di Verghereto (FC) costituito da 6 (sei) aerogeneratori di potenza nominale 5 MW, per un totale di 30 MW, con relative opere connesse ed infrastrutture indispensabili nei comuni di Verghereto (FC), Bagno di Romagna (FC) e Sarsina (FC)</p>	
Codifica Elaborato: 224309_D_R_0400 Rev. 00		

Elettrical Loss: sono le perdite elettriche dovute per effetto Joule causate dai cavidotti e dall'impianto di sottostazione.

Power Curve Adjustment: la curva di potenza fornita dal costruttore viene generalmente misurata su terreni e condizioni climatologiche diverse dal sito dove viene installata. Tipicamente si riscontrano nell'aerogeneratore prestazioni inferiori che possono essere contabilizzate in una perdita di circa l'1%.

High Temperature Shut Down: sono le perdite dovute dallo spegnimento automatico degli aerogeneratori causato dal raggiungimento di temperature elevate in navicella.

Enviromental: perdite dovute a eventi climatici quali ghiaccio, neve, sabbia ecc...

High Wind Hysteresis: perdita dovuta al tempo di isteresi che un aerogeneratore impiega per riattivarsi dopo essere entrato in stallo a causa di venti che superano la velocità massima di operatività dell'aerogeneratore.

Grid Curtailment: perdite dovute alle riduzioni di potenza richieste dal gestore della rete.

11. INCERTEZZE

Nella tabella 11 vengono elencate le fonti di incertezza. Ogni incertezza viene considerata come un errore indipendente e viene modellata come un processo Gaussiano.

Incetezza	Tipo incetezza	Errore Standard %	Errore Standard Produzione %
Dati di vento misurati	velocità del vento	5,0	6,99
Estrapolazione verticale	velocità del vento	0,2	0,28
Estrapolazione orizzontale	velocità del vento	2,0	2,80
Correlazione a lungo termine	velocità del vento	2,0	4,19
Curva di potenza	produzione	4,0	4,00
Variabilità inter annuale	velocità del vento	6,0	8,39
Variabilità futura del vento basata su 10 anni	velocità del vento	2,0	2,80
Incetezza totale	produzione		10,26

Tab. 11 - Incetezza sulla stima di produzione

Queste incetzezze vengono applicate sulla stima centrale al fine di calcolare la produzione con probabilità di eccedenza P50, P75 e P90 con una base statistica di 10 anni.

Livello di eccedenza	Produzione netta [GWh]	Ore equivalenti [h]
P50	98,2	3272
P75	91,4	3046
P90	85,3	2842

Tab. 12 - Produzione energetica con i livelli di eccedenza a 10 anni

12. CONCLUSIONI

In questa relazione è stato descritto il calcolo di produzione tramite dati misurati dal sodar ed estesi con dati a lungo termine ERA5+. La statistica finale ha indicato una velocità media del vento a 117 m pari a 7,81 m/s. Utilizzando il software Windpro/Wasp è stata estrapolata la statistica del vento nella posizione di ogni aerogeneratore e a partire da questa è stata calcolata la produzione totale del parco eolico. La produzione annuale P50 al netto delle perdite è di 98,2 GWh ovvero 3272 ore equivalenti.

