

SOMMARIO

1	PREMESSA.....	2
2	DATI DI VENTO.....	2
3	AEROGENERATORI.....	2
3.1	Caratteristiche sintetiche dell'aerogeneratore Vestas V52.....	3
3.2	Caratteristiche sintetiche dell'aerogeneratore Gamesa G58.....	3
4	MODELLO DI CALCOLO.....	3
4.1	Area di applicazione del modello.....	4
4.2	Verifiche sul modello.....	4
4.2.1	Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull.....	4
5	RISULTATI DI WASP.....	5
5.1	Potenzialità del sito.....	6
5.2	Producibilità dell'impianto.....	6
6	PRODUCIBILITÀ DELL'IMPIANTO AL NETTO DELLE PERDITE.....	7
7	INCERTEZZE.....	7
8	PRODUCIBILITÀ CON PROBABILITÀ DI ESSERE SUPERATE IN UN ANNO.....	8
9	CONCLUSIONI.....	9

FIGURE, TAVOLE, TABELLE

1 PREMESSA

L'impianto eolico scaturito dalle attività svolte preventivamente in sito rappresenta la soluzione da sottoporre a valutazione di producibilità, sulla base dei dati di ventosità forniti dal Committente e sulla base dei modelli di aerogeneratori della medesima taglia prescelti allo scopo di stabilirne un confronto di resa.

L'attività comprende la definizione dell'andamento della ventosità e del potenziale energetico sul sito e la valutazione della producibilità (o produzione attesa) dell'impianto rispetto ai modelli di aerogeneratori prescelti.

2 DATI DI VENTO

I dati di vento sui quali è basata questa valutazione di producibilità sono quelli indicati al paragrafo 4.2 della sezione Sopralluogo ed elaborati con la relazione TG04/2006-VLP "Qualificazione anemometrica di un sito eolico – Sito di Monte Palerà – Comune di Comano (MS)" del Febbraio 2006 prodotta per Voi da TecnoGaia, alla quale si rimanda.

Nella relazione i dati vengono sottoposto ad all'analisi statistica, per verificarne la consistenza e la qualità, a ricostruzione delle parti mancanti e a storicizzazione. A termine dell'attività si è stabilito di considerare attendibili i dati della stazione di Monte Palerà (codice 4416, rinominata in questo testo **4416_S**) integrata con i dati della stazione di Passo del Giogo (codice 4414) a sua volta storicizzati con una stazione storica di Passo della Cisa.

Tutte le problematiche illustrate in relazione, di gestione delle stazioni, di durata delle misure, di bontà del coefficiente di correlazione con la stazione storica, concorreranno a determinare il grado di incertezza dei risultati di cui al Capitolo 7.

3 AEROGENERATORI

Per la determinazione della producibilità dell'impianto vengono presi in esame due diversi modelli di aerogeneratori per i quali produrre calcoli separati. Si tratta di due modelli della medesima taglia e della medesima potenza, di cui uno con rotore esteso adatto a funzionare anche con venti mediamente più bassi.

Gli aerogeneratori prescelti sono il Vestas V52 e il Gamesa G58 (con rotore esteso) entrambi di potenza nominale di 850 kW (in **Allegato A** sono riportati i depliant distribuiti dai rispettivi produttori). Per operare un confronto di resa con pari condizioni, si assume per entrambi l'altezza di mozzo di 60 m, consona per i due modelli di aerogeneratore.

Le curve di potenza, comprensive delle curve di spinta per la determinazione delle perdite per effetto scia, sono state reperite su documenti ufficiali diffusi dai rispettivi costruttori e riportate alla densità dell'aria del sito, approssimata a quella della quota media di 1.350 m s.l.m. Le curve di potenza, così modificate, sono rappresentate nelle **Figure 1 e 2**.

3.1 Caratteristiche sintetiche dell'aerogeneratore Vestas V52

L'aerogeneratore Vestas V52, di costruzione tripala, ha una potenza nominale di 850 kW. Il diametro del rotore della macchina è di 52 m equivalente ad un'area spazzata dalle pale di 2.124 m². Il rotore si avvia con un vento di 4 m/s (velocità di cut-in) raggiunge la potenza nominale a 16 m/s e si arresta a 25 m/s (velocità di cut-out). Le altezze modulari disponibili del sostegno variano da 44 a 65 m. L'aerogeneratore V52 dispone di 5 diversi livelli di emissione sonora (rumorosità) corrispondenti a 5 diverse curve di potenza. In questo caso, trattandosi di una località non soggetta a problemi di rumorosità, si prende in considerazione la versione più produttiva e, dunque, più rumorosa.

3.2 Caratteristiche sintetiche dell'aerogeneratore Gamesa G58

L'aerogeneratore Gamesa G58, di costruzione tripala, ha una potenza nominale di 850 kW. Il diametro del rotore della macchina è di 58 m equivalente ad un'area spazzata dalle pale di 2.642 m². Il rotore si avvia con un vento di 3 m/s (velocità di cut-in) raggiunge la potenza nominale a 17 m/s e si arresta a 21 m/s (velocità di cut-out). Le altezze modulari disponibili del sostegno variano da 44 a 86 m.

4 MODELLO DI CALCOLO

Tutte le elaborazioni, le stime e le valutazioni in seguito descritte sono state effettuate con il codice (o modello) di calcolo WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) messo a punto dal Risoe National Laboratory di Danimarca e basato su un modello matematico del flusso del vento.

Il modello utilizza i dati anemologici per calcolare il vento geostrofico (vento indisturbato in quota) per una superficie di diversi km di raggio. Sovrapponendo tale vento alla modellazione tridimensionale del territorio, il programma valuta l'andamento della velocità media annua - e più in generale i parametri statistici della distribuzione della velocità media annua - in punti arbitrari di tale superficie, tenendo conto della natura orografica e della rugosità del terreno e dell'eventuale presenza di ostacoli al flusso del vento. Il campo di velocità fornito dal modello è tridimensionale e ciò consente di disporre in modo naturale anche del profilo della velocità media del vento alle varie altezze dal suolo.

Per il suo funzionamento, dunque, il modello necessita dei parametri statici del territorio quali l'orografia e la rugosità del terreno, e dei parametri dinamici quali il campo di vento. I primi vengono forniti sotto forma di modello territoriale, i secondi sotto forma di distribuzioni della velocità del vento rilevata dalla stazione anemometrica per ciascun settore di direzione.

4.1 Area di applicazione del modello

Per conferire sufficiente stabilità al calcolo è necessario disporre di un modello territoriale con superficie più vasta di quella propriamente destinata all'impianto.

In questo caso si è utilizzata una mappa di circa 45 km², precisamente un rettangolo di 6,5x7 km, ritenuta ai fini di questo calcolo più che sufficiente. La mappa è stata derivata dalla cartografia di base CTR in scala 1:10.000 dalla quale sono state digitalizzate le curve di livello con passo di quota di 10 metri. Per la medesima area si è provveduto a digitalizzare la rugosità del terreno assumendo come classe di rugosità 0,03 i pascoli e i prati senza ostacoli, come classe 0,05 la macchia boschiva, arbusti e piccoli alberi sparsi, come classe 0,2 i boschi radi, come classe 0,4 i boschi fitti e i piccoli centri abitati e come 0,8 i grandi centri abitati (classificazione suggerita dai manuali del modello di calcolo WASP adottato).

All'interno dell'area di applicazione del modello, in funzione della superficie propriamente destinata all'impianto, è stata selezionata una sub area di 4x4 km, detta area di studio, entro la quale sono state effettuate tutte le valutazioni.

L'area di applicazione del modello e l'area di studio sono rappresentate nella **Tavola 5**.

4.2 Verifiche sul modello

Dovendo agire all'interno di un modello virtuale e volendo disporre di risultati analizzabili criticamente, prima di intraprendere qualunque attività di valutazione con WASP occorre verificare che i dati offerti al modello abbiano prodotto un ambiente virtuale congruo con la realtà del sito, entro cui poi calare ogni simulazione.

Se in questa fase di messa a punto del modello non si riscontreranno incongruenze tali da inficiare l'intero calcolo o da costringere a riconsiderare alcuni processi precedenti, delle approssimazioni che verranno accettate si terrà conto comunque sia nella fase di correzione delle stime che nella determinazione delle incertezze.

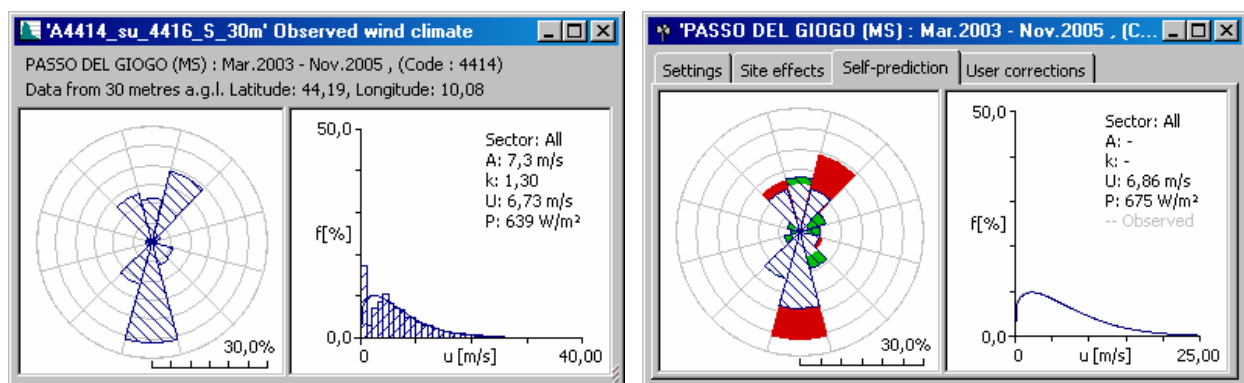
4.2.1 Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull

Il codice di calcolo WASP utilizza la distribuzione di Weibull per rappresentare i dati di vento e per definire il campo di vento indisturbato sull'area (Atlas). Esso effettua una regressione delle distribuzioni della velocità del vento rilevate per ciascuna direzione e fornite in input al modello e determina i parametri A (Valore caratteristico) e k (fattore di forma) della distribuzione di Weibull. Nella **Tabella 1** sono riportate le distribuzioni per la stazione anemometrica **4416_S** ed i corrispondenti parametri di Weibull calcolati dal modello.

In particolare, nella prima parte della tabella sono messi a confronto i valori misurati della velocità media del vento e della potenza della vena fluida con quelli derivati dalla curva di Weibull e sono indicate le relative discrepanze (+1,36% per la velocità del vento e -1,69% per la potenza della vena

fluida). Quando le discrepanze sono elevate, denotano la mancata stabilizzazione secondo una lineare distribuzione di Weibull dei dati di vento registrati sul campo e i risultati prodotti da WASP saranno affetti da approssimazione. Nel procedimento per la determinazione della producibilità dell'impianto, tali discrepanze verranno comunque corrette con metodi empirici, così come descritto nel Capitolo 5.

Una ulteriore verifica consiste nella quantificazione delle approssimazioni dovute al calcolo: il confronto avviene tra il valore della velocità media e della potenza della vena fluida in input (distribuzione di Weibull) e quelli ottenuti nello stesso punto spaziale dell'anemometro (self prediction) partendo dal campo di vento (Atlas) ottenuto con gli stessi dati di input.



Parametri della stazione 4416_S in input al modello e parametri stimati da WASP nel punto dell'anemometro

Le approssimazioni rilevate, che sono intrinseche al calcolo di WASP, possono essere tanto maggiori quanto più è complessa l'orografia del sito. In questo caso, sia in termini di velocità del vento che in termini di potenza della vena fluida, dai risultati (vedi figure) si deduce la buona capacità del modello di riprodurre la distribuzione del vento nel punto spaziale dell'anemometro. Quando le approssimazioni dovessero essere significative, se ne terrà conto nella definizione dell'incertezza del calcolo di producibilità di cui al Capitolo 7.

5 RISULTATI DI WASP

I risultati ottenuti con l'applicazione del modello di calcolo WASP sono soggetti ad elaborazioni grafiche e numeriche, sia per renderli più espliciti al committente e meglio analizzabili, sia per consentire le correzioni di tutte le approssimazioni introdotte dal modello. Le approssimazioni sono dovute essenzialmente al modello territoriale tridimensionale e alla distribuzione di Weibull. Le approssimazioni dovute al modello territoriale tridimensionale si possono trattare solamente al livello di incertezza; le approssimazioni dovute alla distribuzione di Weibull si possono correggere con opportuni metodi di aggiustamento della stima (ad esempio rapportando tutti i valori di produzione a quelli noti

dell'anemometro). Tali accorgimenti vengono utilizzati normalmente per correggere la stima di producibilità di un impianto.

5.1 Potenzialità del sito

Sulle **Tavole 6, 7, e 8** vengono riprodotte graficamente le stime di WASP sul sito. Tutte le elaborazioni qui esposte sono da considerarsi teoriche e potenziali e non hanno nessun rapporto con quella che sarà la strategia di sfruttamento del sito.

Nella **Tavola 6** viene ricostruita sul sito la ventosità all'altezza di 60 m dal suolo, cioè all'altezza del mozzo prescelta, rappresentata secondo curve isovento; le curve derivano da una griglia orizzontale di valori, con passo di 25 m, che si adagia sull'altimetria del sito all'altezza del mozzo. I medesimi valori, integrati con le curve di potenza, consentono di ricostruire il potenziale produttivo presente sul sito in relazione alle due macchine (**Tavola 7** per la Vestas V52 e **Tavola 8** per la Gamesa G58).

5.2 Producibilità dell'impianto

Le elaborazioni numeriche di seguito descritte si riferiscono alla resa energetica di una particolare distribuzione di aerogeneratori (layout d'impianto) calata all'interno nel campo di vento appena descritto. La distribuzione degli aerogeneratori è quella di progetto. Le elaborazioni tengono conto delle interferenze reciproche tra le macchine (effetto scia) e contemplano gli aggiustamenti di stima dovuti alle approssimazioni del modello.

Nelle **Tabella 2 e 3** sono riportati i risultati di resa dei due aerogeneratori, nell'ordine V52 e G58.

Nelle colonne con campitura in verde sono indicate tutte le grandezze stimate da WASP all'altezza del mozzo. Tali grandezze, che sono ancora affette dalle approssimazioni dovute alle distribuzioni di Weibull in input al modello di calcolo vengono riportate, nelle colonne con campitura in giallo, ai dati sperimentali rilevati dall'anemometro. Le colonne riportate sotto la voce "Coefficiente orografico" indicano, infine, la bontà del posizionamento di ogni singolo aerogeneratore nel campo di vento.

Dalle tabelle si può constatare, in entrambi i casi, una perdita contenuta di energia per effetto scia. Ciò si spiega per la particolare conformazione della rosa dei venti che vede i settori di maggiore provenienza dell'energia distribuiti quasi univocamente in una sola direzione (vedi **Tavola 9**).

I risultati conseguiti confermano la bontà della distribuzione degli aerogeneratori sul sito e il layout rappresentato in **Tavola 9** può rappresentare la soluzione finale di progetto.

6 PRODUCIBILITÀ DELL'IMPIANTO AL NETTO DELLE PERDITE

Le producibilità lorde in GWh/anno stimate tengono conto delle perdite dovute alla scia degli aerogeneratori, già considerate nelle curve di potenza.

La tabella sottostante riporta in sintesi le producibilità lorde stimate.

Producibilità lorde					
Impianto	Potenza nominale [kW]	N° aerogeneratori	Potenza impianto [MW]	Producibilità [GWh/anno]	Ore
Vestas V52	850	4	3,40	7,672	2.256
Gamesa G58	850	4	3,40	8,264	2.431

A tali producibilità lorde devono essere sottratte le seguenti ulteriori perdite:

Perdite considerate	Vestas V52	Gamesa G58
	%	%
Densità dell'aria (già considerata nella curva di potenza)	0,00	0,00
Indisponibilità e manutenzione	3,00	3,00
Perdite elettriche	3,00	3,00
Altre perdite	1,00	1,00
Totale perdite	6,85	6,85

Le perdite vengono valutate in media sulla base della pratica e della letteratura del settore.

Ne risultano, pertanto, le seguenti producibilità nette:

Producibilità nette					
Impianto	Potenza nominale [kW]	N° aerogeneratori	Potenza impianto [MW]	Producibilità [GWh/anno]	Ore
Vestas V52	850	4	3,40	7,146	2.102
Gamesa G58	850	4	3,40	7,698	2.264

7 INCERTEZZE

Con il termine incertezza di un parametro si intende lo scarto quadratico medio della distribuzione statistica dell'errore di stima di quel parametro. La tabella sottostante riporta tutti i fattori di incertezza considerati, assegnando a ciascuno di essi lo scarto S della loro distribuzione. Tali fattori di incertezza comunemente utilizzati nel processo di valutazione della producibilità di un sito eolico, vengono adattati, incrementando o diminuendo il valore a seconda del grado di aggiustamento e di verifica dei risultati

riscontrati nelle diverse fasi del processo, sia in fase di trattamento dei dati che di elaborazione dei risultati.

Fattori di incertezza	Scarto S (%)	Vestas V52		Scarto S (%)	Gamesa G58	
		Z	(%)		Z	(%)
Misura del vento	10,00	1,46	14,58	10,00	1,23	12,26
Durata misure	8,00	1,46	11,66	8,00	1,23	9,81
Distribuzione curva di Weibull	0,00	1,46	0,00	0,00	1,23	0,00
Gradiente al suolo	1,00	1,46	1,46	1,00	1,23	1,23
Complessità orografica			1,00			1,00
Curva di potenza			2,00			2,00
Altri fattori			1,00			1,00
Incertezza totale			18,89			15,94

Il fattore di conversione Z , converte l'incertezza sulle stime della velocità in incertezza di producibilità (scarto quadratico medio della distribuzione statistica dell'errore di stima della producibilità). In particolare il fattore di conversione Z dipende dalla curva di potenza della macchina e dalle caratteristiche della distribuzione del vento e quindi deve essere determinato con specifici calcoli per il tipo di macchina considerata.

8 PRODUCIBILITÀ CON PROBABILITÀ DI ESSERE SUPERATE IN UN ANNO

Le stime di producibilità calcolate al **Capitolo 6**, già al netto delle perdite considerate, rappresentano la cosiddetta $P_{50\%}$, ossia la producibilità calcolata con le condizioni medie di vento. In considerazione delle incertezze ottenute, semplici considerazioni di statistica consentono di determinare i valori di $P_{70\%}(1)$ e $P_{90\%}(1)$, vale a dire le producibilità che presentano rispettivamente una probabilità del 70% e del 90% di essere superate nel corso di un anno di produzione:

GWh/anno	Vestas V52	Gamesa G58
$P_{50\%}$	7,146	7,698
$P_{70\%}(1)$	6,438	7,055
$P_{90\%}(1)$	5,416	6,126

Che in termini di ore medie annue equivalenti di funzionamento alla potenza nominale della macchina risultano:

Ore	Vestas V52	Gamesa G58
$P_{50\%}$	2.102	2.264
$P_{70\%}(1)$	1.894	2.075
$P_{90\%}(1)$	1.593	1.802

9 CONCLUSIONI

I siti più interessanti dal punto di vista dell'installazione di un impianto eolico sono caratterizzati da livelli di ventosità tali da comportare valori di utilizzazione dell'impianto almeno nell'ordine di 2.000 – 2.200 ore annue di funzionamento alla potenza nominale. Questo valore può variare a seconda della taglia dell'aerogeneratore adottato poiché varia il costo dell'aerogeneratore stesso e quindi il costo per ogni kW di potenza installata (si deve presumere che il costo di un kW diminuisca all'aumentare della potenza nominale dell'aerogeneratore).

Tale valore di 2.000 – 2.200 ore annue di funzionamento alla potenza nominale deve essere considerato indicativo, tanto più che non tiene conto delle eventuali perdite dovute alla disponibilità effettiva per tutto l'anno degli aerogeneratori e delle perdite elettriche dell'impianto che nel caso specifico sono previste in maniera conservativa del 6,85%. Le valutazioni economiche circa il ritorno dell'investimento devono essere perciò commisurate al valore di producibilità netta risultante.

L'impianto eolico prospettato nel sito di Monte Palerà, a giudicare dai risultati di stima conseguiti, parrebbe porsi in linea con tali valori di riferimento. Tuttavia il calcolo lascia ampi margini di incertezza che, nella prospettiva di finalizzazione del progetto, devono essere necessariamente riconsiderati. Tali fattori d'incertezze dipendono quasi esclusivamente dalla scarsa qualità, sia in termini di gestione dell'attività di monitoraggio che in termini di durata del monitoraggio stesso, dei dati anemometrici offerti al processo di stima. L'impressione, tuttavia, è che tali fattori di incertezza tendano più a mortificare che ad esaltare i risultati.

Si consiglia, pertanto, di riconsiderare l'attività di monitoraggio, con soluzioni idonee per la specificità orografica del sito e per un periodo di tempo congruo.