



# REGIONE CAMPANIA

*Provincia di Avellino*

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO NEL  
COMUNE DI GUARDIA LOMBARDI

Comune di Guardia Lombardi

Località "Piani Mattine"

Proponente: **High Wind s.r.l.** Corso Italia, 27- 39100 Bolzano; pec: highwind@emsmail.it

**HIGH WIND S.r.l.**  
Corso Italia, 27  
39100 BOLZANO (BZ)  
C. F. e P. IVA: 02926860210

Tavola n. **R 05g**

## CALCOLO GITTATA MASSIMA

Progetto Definitivo

*Elaborazione: dicembre 2019*

Progettazione

Arch. Walter Donato MORANO



Spazio per visti ed autorizzazioni/osservazioni:

## Sommario

❖	<i>PREMESSA</i>	3
❖	<i>CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE</i>	3
❖	<i>STUDIO COSTRUTTORE VESTAS</i>	4
A.	VESTAS V120 2.2MW	5
B.	VESTAS V90 2.0MW	6
❖	<i>CALCOLO PER ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE</i>	7
	DEFINIZIONI	7
	FORMULE E CALCOLI RISULTANTI	8
A.	VESTAS V120 2.2MW	8
B.	VESTAS V90 2.0MW	9
❖	<i>CALCOLO PER DISTACCO FRAMMENTO DELLA PALA</i>	10
❖	<i>GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA</i>	11
❖	<i>CONCLUSIONI</i>	12
❖	<i>ALLEGATI</i>	12
1.	Individuazione Cartografica dei Ricettori in funzione della “Gittata Massima”	12
2.	Report Fotografico	12
3.	“Technical Report Vestas”	12

## ❖ *PREMESSA*

La presente Relazione contiene il Calcolo della Gittata per gli *“aerogeneratori tipo”* scelti:

A. VESTAS V120 2.2MW (n°7)

B. VESTAS V90 2.0MW (n°1)

La stessa fa parte della documentazione progettuale che la società proponente ha elaborato per la realizzazione e l'esercizio dell'Impianto Eolico di potenza pari a **17,4 MW**, costituito da 8 **aerogeneratori** da installare in agro di Guardia Lombardi (AV).

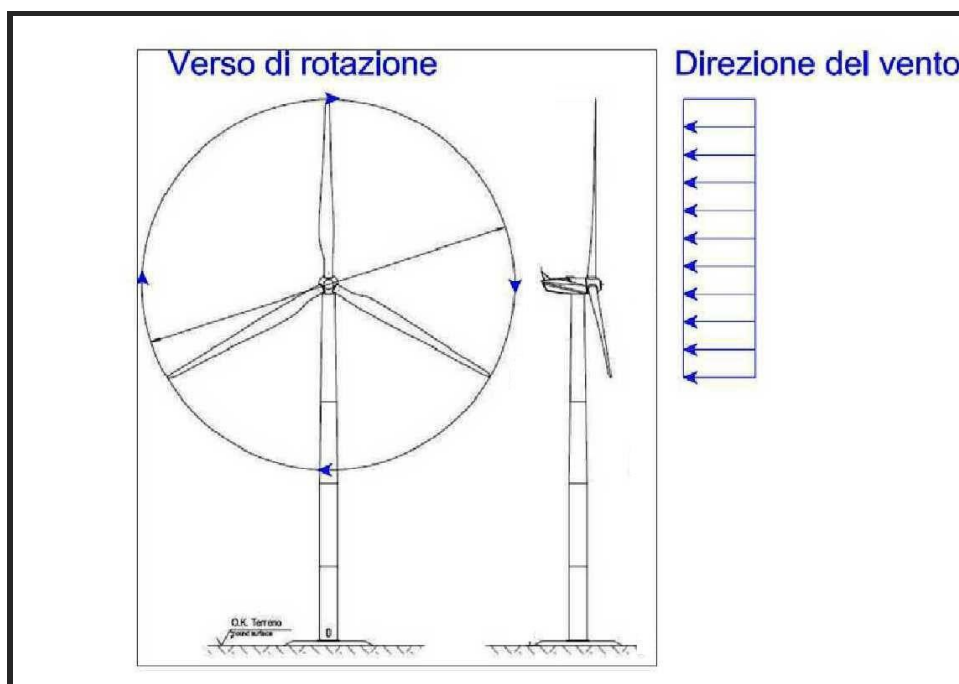
## ❖ *CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE*

Nel dettaglio, le pale sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore; il mozzo, a sua volta, è collegato ad un albero di trasmissione che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.



Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione. Questa considerazione ci serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano. Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto. Mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

### ❖ *STUDIO COSTRUTTORE VESTAS*

Il costruttore degli aerogeneratori Vestas Wind Systems A/S ha prodotto un documento denominato "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento" - Rev.13 -07/03/2014 (*allegato alla presente*), nel quale sono riportati i risultati dei calcoli della distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione. Il calcolo è stato eseguito per 10 modelli di aerogeneratori diversi.

Come già evidenziato in *Premessa*, gli "aerogeneratori tipo" di progetto sono i seguenti:

- A. VESTAS V120 2.2MW
- B. VESTAS V90 2.0MW

## A. VESTAS V120 2.2MW

Per l'aerogeneratore con caratteristiche più vicine a quello di progetto *Vestas V120*, ovvero l'aerogeneratore V117 (diametro rotore 117 m e torre di altezza pari a 91,5 m), è prevista una gittata massima di circa 135 m (vedi *"Technical Report Vestas"-allegato*), valore considerato peraltro ampiamente conservativo tanto che nelle conclusioni dello stesso Studio viene decrementato di circa 18% e *portato a 110 m circa*.

Da un confronto tra l'aerogeneratore V117 utilizzato da Vestas per il calcolo e quello del progetto (V120) risulta che i parametri delle due macchine sono assolutamente confrontabili come si può constatare dalla tabella in basso:

Tipo aerogeneratore	V117 3.3MW	V120 2.2MW
Diametro (m)	117	120
Lunghezza pala (m)	57,5	59
Altezza mozzo (m)	91,5	92
Velocità rotazione Max (giri/min)	17,7	14,9

Avendo la gittata massima, a seguito della rottura di una pala, una dipendenza lineare con l'altezza del mozzo ed il raggio della pala e quadratica rispetto alla velocità di rotazione del rotore, si desume facilmente che la **gittata massima** applicata al modello **V120**, che è caratterizzato da una velocità di rotazione inferiore del 19% del modello V117, avrà una traiettoria più breve dei valori calcolati: mt 110 o **in eccesso mt 135**.

## B. VESTAS V90 2.0MW

Invece, per quanto concerne l'aerogeneratore di progetto, (caso B), *Vestas V90-2.0MW*, la citata casa costruttrice prevede una gittata massima di *circa 90 m* (vedi *"Technical Report Vestas"- allegato*), valore considerato peraltro ampiamente conservativo tanto che nelle conclusioni dello stesso Studio viene decrementato di circa il 19% e *portato a 75 m circa*.

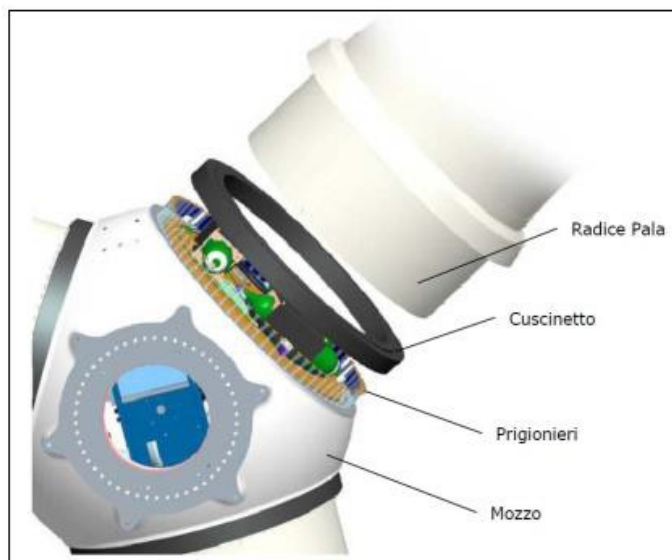
Tipo aerogeneratore	V90 2.0MW
Diametro (m)	90
Lunghezza pala (m)	44
Altezza mozzo (m)	95
Velocità rotazione Max (giri/min)	17

In aggiunta il costruttore Vestas nel dettagliato Report, forte dell'esperienza del suo parco macchine installato, conferma che su una flotta operativa di 15.679 unità, nel caso di distacco di una pala il moto è stato di tipo *"rotazionale complesso"* e le distanze raggiunte sono state inferiori a quelle calcolate nello stesso Report.

### ❖ CALCOLO PER ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE

Per completezza viene eseguito il **calcolo della gittata massima** in caso di rottura di una pala degli aerogeneratori di progetto V90 e V120, seguendo il *principio della balistica applicata al moto dei proiettili*.

Si assume il distacco della pala alla radice nel punto di accoppiamento Pala/Mozzo (vedi figura sottostante).



*Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo*

Evidenziamo ancora che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria considerando un corpo puntiforme e quindi con risultati in eccesso rispetto ad un calcolo più complesso che può fare solo il costruttore stesso, dotato di informazioni più dettagliate ma riservate e non divulgabili.

Nel caso in esame (tipologie VESTAS V120 e V90) si suppone che l'eventuale rottura della pala avvenga alle peggiori condizioni possibili ovvero:

- alla velocità massima del rotore
- nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo =  $\pi/4$
- con il centro di massa posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo.

### DEFINIZIONI

VESTAS V120	VESTAS V90
<u>velocità massima del rotore</u> <b>14,9 giri/min.</b>	<u>velocità massima del rotore</u> <b>17 giri/min</b>
<b>(H<sub>m</sub>)</b> altezza al mozzo uguale a <b>mt 92</b>	<b>(H<sub>m</sub>)</b> altezza al mozzo uguale a <b>mt 105</b>
<b>(L<sub>p</sub>)</b> Lunghezza pale circa <b>mt 60</b>	<b>(L<sub>p</sub>)</b> Lunghezza pale circa <b>mt 44</b>
<b>(D<sub>cm</sub>)</b> Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala = $L_p / 3 =$ <b>mt 20</b>	<b>(D<sub>cm</sub>)</b> Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala = $L_p / 3 =$ <b>mt 15</b> circa
<b>(V<sub>ang</sub>)</b> Max velocità ang. rotore <b>1.56 Rad/sec</b>	<b>(V<sub>ang</sub>)</b> Max velocità ang. rotore <b>1.78 Rad/sec</b>

## FORMULE E CALCOLI RISULTANTI

### A. VESTAS V120 2.2MW

L'Ordinata di Massima Velocità  $O_{mv}$  al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

$$i. \quad O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{106,14 \text{ m}}$$

Analogamente l'ascissa di Massima Velocità  $A_{mv}$  al momento di rottura:

$$ii. \quad A_{mv} = \text{Ascissa di Massima Velocità} = - D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{-14,14 \text{ m}}$$

La Velocità Lineare al Centro di Massa  $V_{max}$  è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$

$$iii. \quad V_{max} = \text{Velocità Lineare al Centro di Massa} = V_{ang} * D_{cm} = \mathbf{31,21 \text{ m/sec}}$$

Le componenti Verticale  $V_y$  ed Orizzontale  $V_x$  di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:

$$iv. \quad V_y = \text{Componente Verticale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{22,07 \text{ m/sec}}$$

$$v. \quad V_x = \text{Componente Orizzontale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{22,07 \text{ m/sec}}$$

Il tempo necessario  $T_y$  perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

$$T_y = \text{Tempo di decelerazione Verticale} = V_y / 9.8 \text{ m/sec}^2 = \mathbf{2,25 \text{ sec}}$$

L'altezza Massima  $H_{max}$  si ottiene dalla formula:

$$H_{max} = O_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = \mathbf{130,96 \text{ m}}$$

Il tempo necessario  $T_{max}$  affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{max} = \text{tempo di caduta} = \sqrt{130,96 / 9,8 \text{ m/sec}^2} = \mathbf{3,66 \text{ sec}}$$

La distanza massima  $DL_{max}$  dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{max} = V_x * (T_{max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = \mathbf{156,30 \text{ m}}$$



B. VESTAS V90 2.0MW (calcolata con  $H_m=mt\ 105$ )

L'Ordinata di Massima Velocità  $O_{mv}$  al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

$$vi. \quad O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{115,60\ m}$$

Analogamente l'ascissa di Massima Velocità  $A_{mv}$  al momento di rottura:

$$vii. \quad A_{mv} = \text{Ascissa di Massima Velocità} = - D_{cm} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{-10,61\ m}$$

La Velocità Lineare al Centro di Massa  $V_{max}$  è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$

$$viii. \quad V_{max} = \text{Velocità Lineare al Centro di Massa} = V_{ang} * D_{cm} = \mathbf{26,70\ m/sec}$$

Le componenti Verticale  $V_y$  ed Orizzontale  $V_x$  di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:

$$ix. \quad V_y = \text{Componente Verticale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{18,88\ m/sec}$$

$$x. \quad V_x = \text{Componente Orizzontale Velocità} = V_{max} * \sqrt{2} / 2 = \mathbf{18,88\ m/sec}$$

Il tempo necessario  $T_y$  perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

$$T_y = \text{Tempo di decelerazione Verticale} = V_y / 9,8\ m/sec^2 = \mathbf{1,93\ sec}$$

L'altezza Massima  $H_{max}$  si ottiene dalla formula:

$$H_{max} = O_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = \mathbf{133,79\ m}$$

Il tempo necessario  $T_{max}$  affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{max} = \text{tempo di caduta} = \sqrt{133,79 / 9,8\ m/sec^2} = \mathbf{3,70\ sec}$$

La distanza massima  $DL_{max}$  dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{max} = V_x * (T_{max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = \mathbf{124,65\ m}$$

### ❖ *CALCOLO PER DISTACCO FRAMMENTO DELLA PALA*

L'evento della rottura di un frammento consistente di pala risulta meno frequente. Per le caratteristiche del materiale strutturale, tende ad essere una rottura progressiva.



*Esempio di rottura pala senza distacco*

Pertanto, nella maggior parte dei casi si ha una prima flessione della struttura con conseguente inevitabile urto con la torre (posta sottovento nella quasi totalità delle WTG). La conseguente rottura dà luogo a traiettorie varie che non sono deterministicamente calcolabili.

Nella maggior parte dei casi di lancio di piccoli frammenti di pala la causa registrata è la concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.



Tale fenomeno è stato considerato dai costruttori che hanno iniziato a dotare gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale. In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. È possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Per avere un ordine di grandezza sulla distanza raggiunta dai frammenti di una pala eolica, si fa riferimento allo studio "Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan". Secondo tale studio, la probabilità che un frammento di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di  $2 \times 10^{-5}$ .

Il già citato "Studio Vestas" conclude l'analisi confermando che *"l'effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso un collegamento bullonato"*.

#### ❖ GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DI PALA

Anche volendo stabilire quale sia la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato in sede progettuale, pari a  $10^{-6}$ , si raggiunge tale valore a meno della gittata massima determinata.

*Ad una distanza pari alla gittata max, la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.*

## ❖ CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale.

Il calcolo “analitico” illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a **mt 156.30 per la V120** e di **mt 124.65 per la V90 (con mozzo mt 105)**.

La gittata massima calcolata in entrambi i casi garantisce la distanza di sicurezza sia dalle strade asfaltate (provinciale e comunali) che dagli edifici presenti nell’area del Parco Eolico di progetto.

Si sottolinea come, dai dati messi a disposizione dal fornitore (Vestas), il calcolo rigoroso porta a risultati meno cautelativi di quanto non lo siano quelli effettuati “analiticamente” in questa sede.

Infine preme sottolineare che diverse strade comunali, riportate catastalmente in mappa, *non sono state considerate degli elementi sensibili*, in quanto le stesse versano in un pessimo stato conservativo e sono impraticabili da diversi anni; dal “Report Fotografico” allegato, infatti si evince che sono dei tracciati inesistenti o, nel migliore dei casi, delle semplici piste in “terra battuta” raramente frequentate da qualche agricoltore della zona.

## ❖ ALLEGATI

1. Individuazione Cartografica dei Ricettori in funzione della “Gittata Massima”
2. Report Fotografico
3. “Technical Report Vestas”

*Progettazione*

Arch. Walter Donato MORANO



Comune di Guardia Lombardi

Località "Piani Mattine"

Proponente: **High Wind s.r.l.** Corso Italia, 27- 39100 Bolzano; pec:  
highwind@emsmail.it



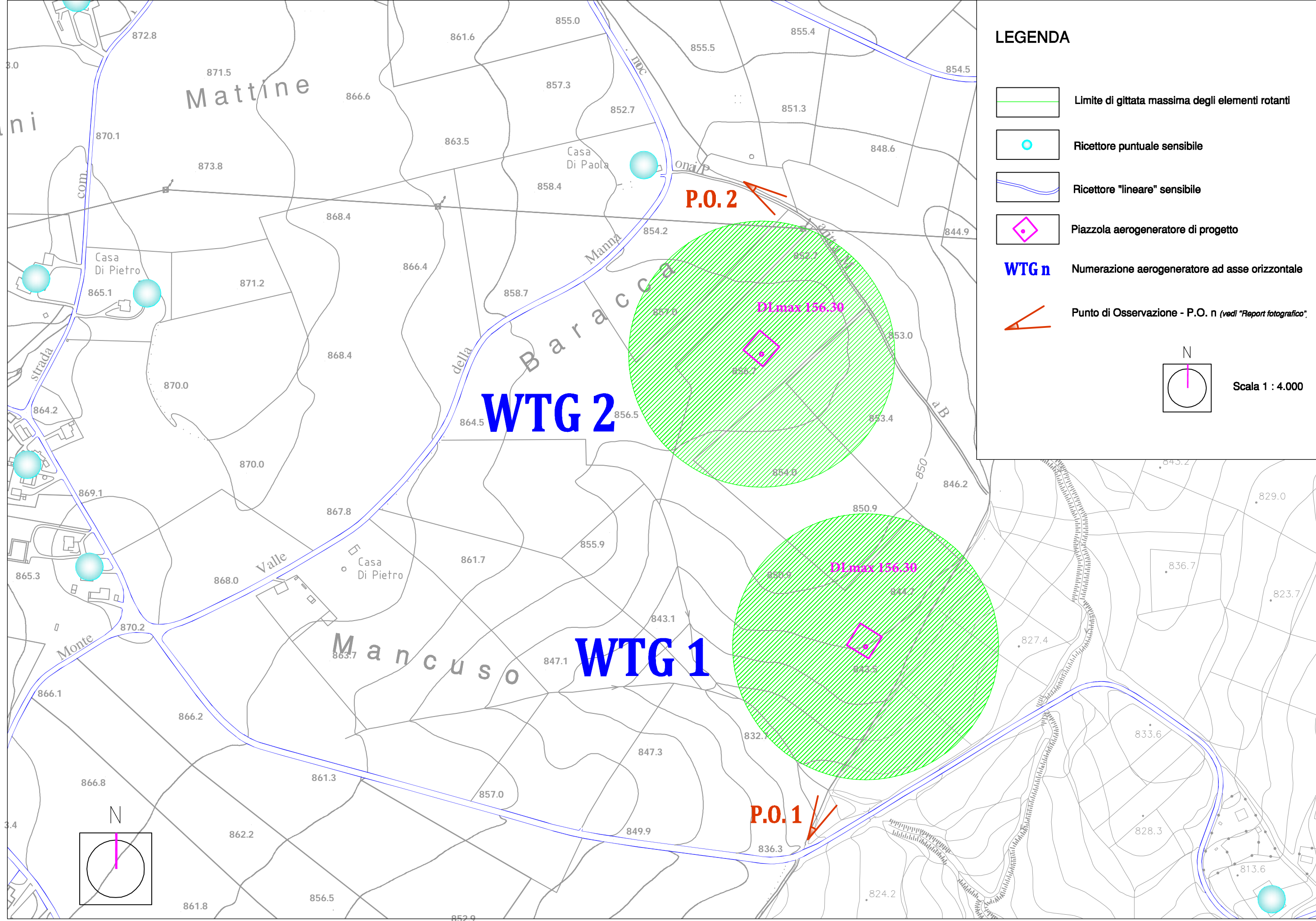
ALLEGATO n°1

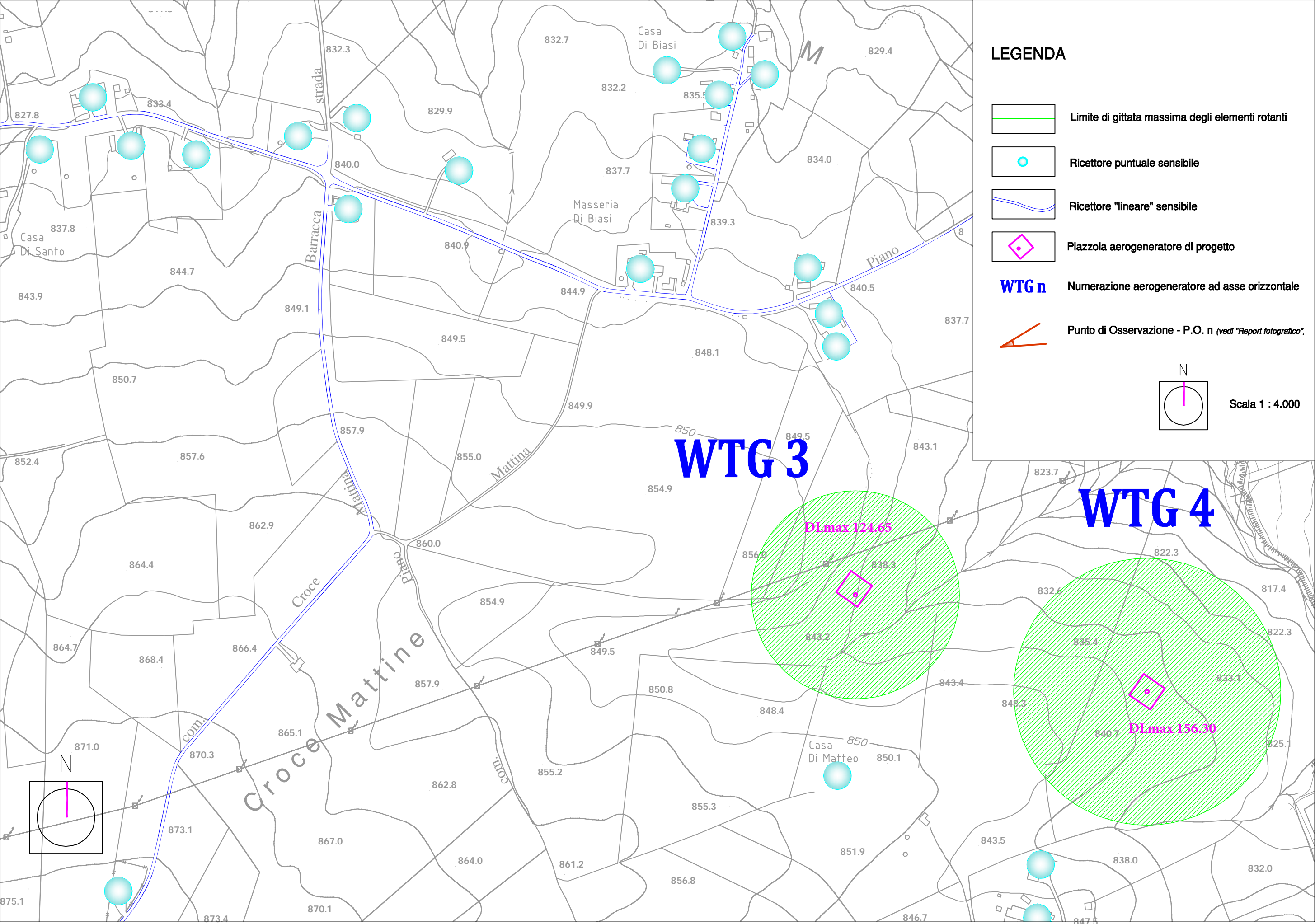
**Individuazione Cartografica dei Ricettori in funzione della**  
**"Gittata Massima"**

**HIGH WIND S.r.l.**  
Corso Italia, 27  
39100 BOLZANO (BZ)  
C. F. e P. IVA. 02926860210

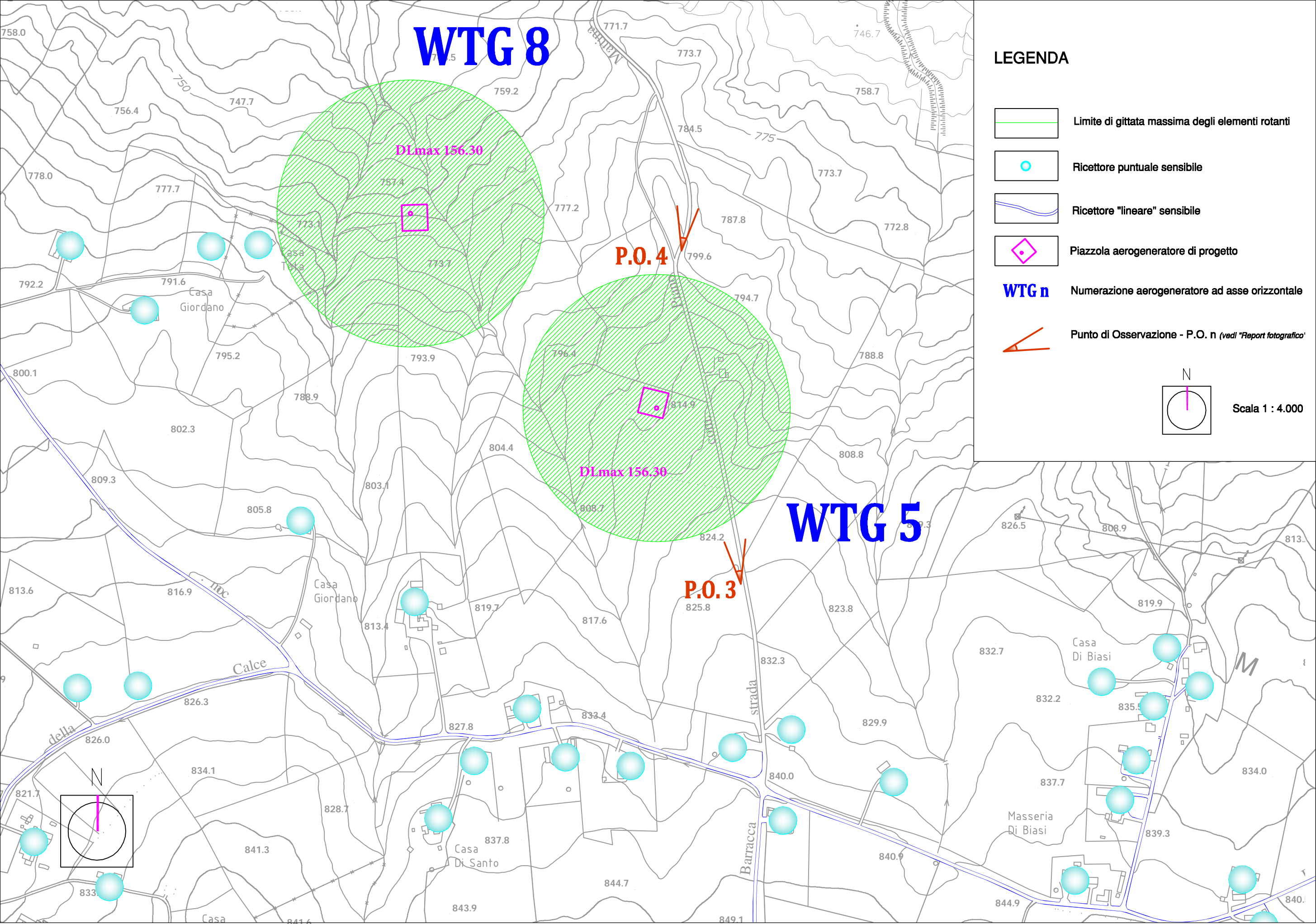
**Progettazione**  
**Arch. Walter Donato MORANO**  
**MORANO**  
**ARCHITETTO**  
**N° 560**  
PROVINCIA DI AVELLINO



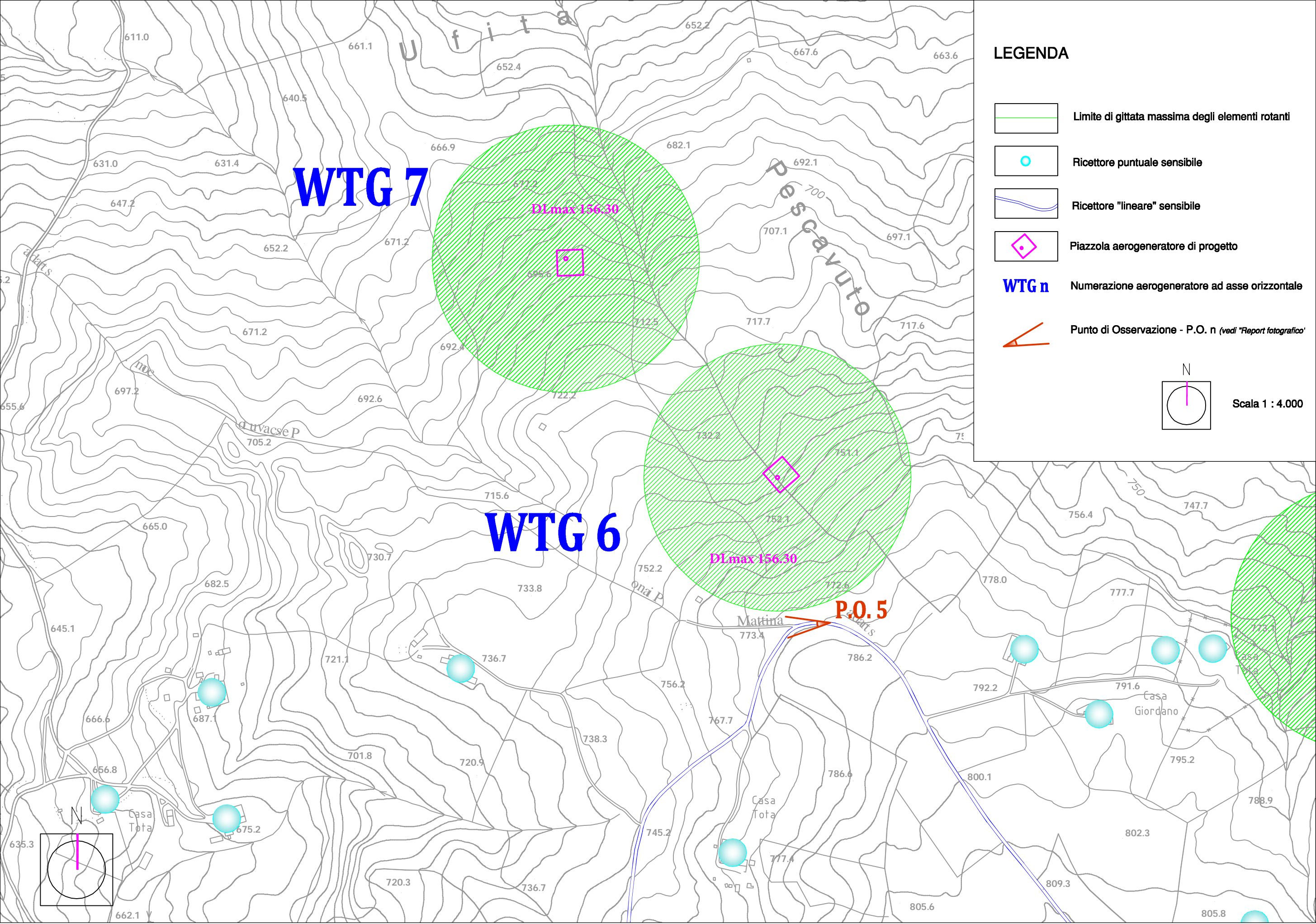








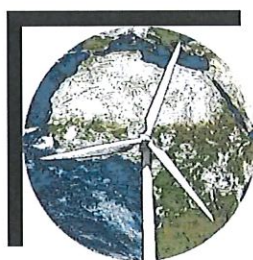




Comune di Guardia Lombardi

Località "Piani Mattine"

Proponente: **High Wind s.r.l.** Corso Italia, 27- 39100 Bolzano; pec:  
highwind@emsmail.it



ALLEGATO n°2

### Report Fotografico

**HIGH WIND S.r.l.**  
Corso Italia, 27  
39100 BOLZANO (BZ)  
C. F. e P. IVA: 02926860210

Progettazione

Arch. Walter Donato MORANO







P.O. 1



P.O. 2

Come si può evincere dalle immagine riportate, il tracciato stradale, allo stato attuale, non presenta i crismi della carrabilità, eccezion fatta per i mezzi meccanici connessi alla produzione agricola; in sostanza sono delle *piste di servizio* (“in terra battuta”) per i fondi rustici.





P.O. 3



P.O. 4

Anche la strada sopra riportata, malgrado abbia un “tracciato” ancora parzialmente identificabile, è sostanzialmente utilizzata solo per fini colturali (vedi foto successiva – foto 01) in quanto si presenta talmente disconnesso da non essere transitabile.





*Foto 01 – Strada utilizzata solo per fini colturali*



**P.O. 5**



Progettazione

Arch. Walter Donato MORANO

Comune di Guardia Lombardi

Località "Piani Mattine"

Proponente: **High Wind s.r.l.** Corso Italia, 27- 39100 Bolzano; pec:  
highwind@emsmail.it



ALLEGATO n°3

**"Technical Report Vestas"**

**HIGH WIND S.r.l.**  
Corso Italia, 27  
39100 BOLZANO (BZ)  
C. F. e P. IVA: 02926860210

*Progettazione*  
Arch. Walter Donato MORANO



# Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento

## Indice

1	Introduzione.....	2
2	Risultati.....	3
3	Metodologia e ipotesi.....	4
4	Velocità di rotazione.....	5
5	Forze agenti sulla traiettoria pala .....	6
6	Caratteristiche della pala.....	7
7	Casi di studio .....	8
7.1	Caso 1: Moto irrotazionale.....	8
7.2	Caso 2: Moto irrotazionale.....	8
7.3	Caso 3: Moto rotazionale complesso.....	8
8	Esperienze e note statistiche .....	10
8.1	Distacco di una delle pale dal rotore.....	10
8.2	Rottura (apertura) dell'estremità di pala.....	12
9	Conclusioni.....	14
10	Riferimenti.....	15
11	Appendice .....	16

# 1 Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro è determinare la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione. Il calcolo è stato eseguito su otto aerogeneratori VESTAS:

- V80-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 20 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V90-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m; [aerogeneratore di progetto \(caso B\)](#)
- V90-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 18,4 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V100-1,8/2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,6 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2,6MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 13,38 RPM posto su una torre di altezza pari a 100 m;
- V110-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 54 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m (125 m);
- V112-3,0/3,3MW con una pala di lunghezza pari a 54,6 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 94 m (119 m).
- V117-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 57,15 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17,7 RPM posto su una torre di altezza pari a 91.5 m (116.5 m). [aerogeneratore di riferimento \(caso A\)](#)
- V126-3,3MW con una pala di lunghezza pari a 61,66 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16,5 RPM posto su una torre di altezza pari a 117 m (137 m).

Per la pala della V80-2,0MW si è fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni: la prima, più conservativa, include solo le forze d'inerzia ed esclude le forze viscosi; la seconda include le forze viscosi; la terza considera il moto della pala completo. La prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%.

Per la pala V90-1,8/2,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8/2,0MW, V100-2,0MW, V100-2,6MW, V110-2,0MW, V112-3,0/3,3MW, V117-3,3MW e V126-3,3MW si è fatto uno studio considerando la condizione più conservativa e cioè considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati ottenuti e mostrati di seguito nel paragrafo 2 sono da considerare del 20% maggiori di quelli reali.



## 2 Risultati

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3 riportato in seguito in questo documento) la gittata della pala per la V80-2,0MW (nel caso peggiore, ma non reale (caso 1) è 125 m) è di poco inferiore ai 100m.

La gittata della pala per la V90-1,8/2,0MW è di ca. 90 m, per la V90-3,0MW è di ca. 105 m, per la V100-1,8/2,0MW è di ca. 100 m, per la V100-2,0MW è di circa 85 m, per la V100-2,6MW è di circa 75 m, per la V110-2,0MW è di circa 95 m (100 m), per la V112-3,0/3,3MW è di ca. 120 m (135 m) e per la V117-3,3MW è di ca. 135 m (145 m) e infine per la V126-3,3MW è di ca. 140 m (150 m). Per le macchine appena menzionate l'unico caso studiato è quello conservativo, per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale.

### 3 Metodologia e ipotesi

Da un punto di vista teorico, se non si considerano le forze aerodinamiche la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di  $45^\circ$  ( $135^\circ$  in posizione azimutale). Le forze di resistenza che agiscono sulla pala in realtà rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata. Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

## 4 Velocità di rotazione

Si è ipotizzato che il distacco della pala dal rotore avvenga alla velocità di rotazione massima del “Dynamic Operation Range” della macchina.

Pertanto, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala sono le seguenti:

- V80-2,0MW è pari a 20 RPM;
- V90-1,8/2,0MW è pari a 17 RPM;
- V90-3,0MW è pari a 18,4 RPM;
- V100-1,8/2,0MW è pari a 16,6 RPM;
- V100-2,0MW è pari a 14,9 RPM;
- V100-2,6MW è pari a 13,38 RPM;
- V110-2,0MW è pari a 14,9 RPM;
- V112-3,0/3,3MW è pari a 17,7 RPM.
- V117-3,3MW è pari a 17,7 RPM.
- V126-3,3MW è pari a 16,5 RPM.

## 5 Forze agenti sulla traiettoria pala

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore, esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di  $45^\circ$  sul piano verticale (cioè  $135^\circ$  azimuth). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

## 6 Caratteristiche della pala

Le caratteristiche delle pale, input della simulazione, sono riportate in tabella.

WTG type	(Outboard) Section of blade	Plan area Plane XY m <sup>2</sup>	Plan area Plane XZ m <sup>2</sup>	Plan area Plane YZ m <sup>2</sup>	Mass kg
V80-2,0MW	39	81,46	22,8	2,38	6300
V90-1,8/2,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6700
V90-3,0MW	44	87,84	25,69	2,37	6700
V100-1,8/2,0MW	49	-	-	-	7700
V100-2,0MW	49	-	-	-	-
V100-2,6MW	49	-	-	-	7700
V110-2,0MW	54	-	-	-	-
V112-3,0/3,3MW	54,6	-	-	-	12300
V117-3,3MW	57,15	-	-	-	-
V126-3,3MW	61,66	-	-	-	-

## 7 Casi di studio

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25m/s. Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

### 7.1 CASO 1: MOTO IRROTAZIONALE

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

### 7.2 CASO 2: MOTO IRROTAZIONALE

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.. In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- La traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

- Caso 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.
- Caso 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.
- Caso 2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

### 7.3 CASO 3: MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alla stessa in direzione XY

moltiplicata per il quadrato del coseno di  $45^\circ$ . La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

- Caso 3a.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- Caso 3b.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- Caso 3c.  $C_d$  (in-plane e out-of-plane) = 1,5

## 8 Esperienze e note statistiche

E' necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori Vestas.

L'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (relativa alle sole turbine considerate nel presente report) di 15679 unità ha mostrato che in caso di distacco di pala il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente state inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Eventi di distacco di una sezione di pala non si sono verificati a tutt'oggi sulle turbine installate per i modelli considerati nel presente report.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

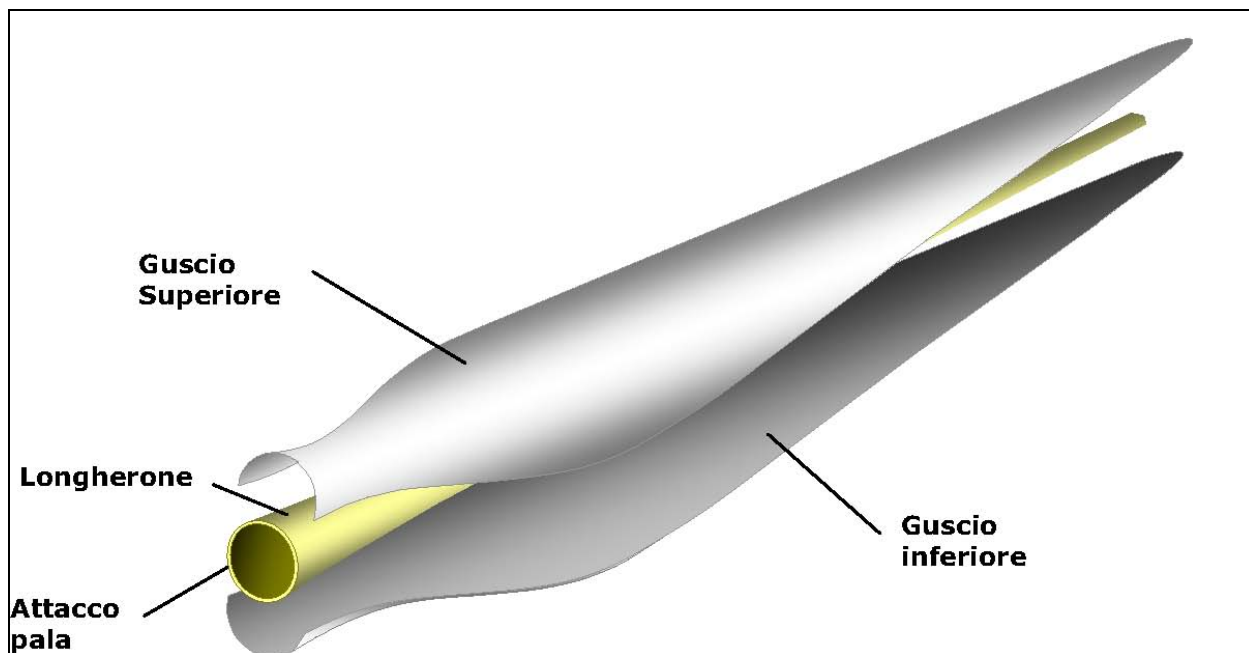
### 8.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

Questo tipo d'incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno a una distanza inferiore ai cento metri.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posta all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente la funzione di forma del profilo. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

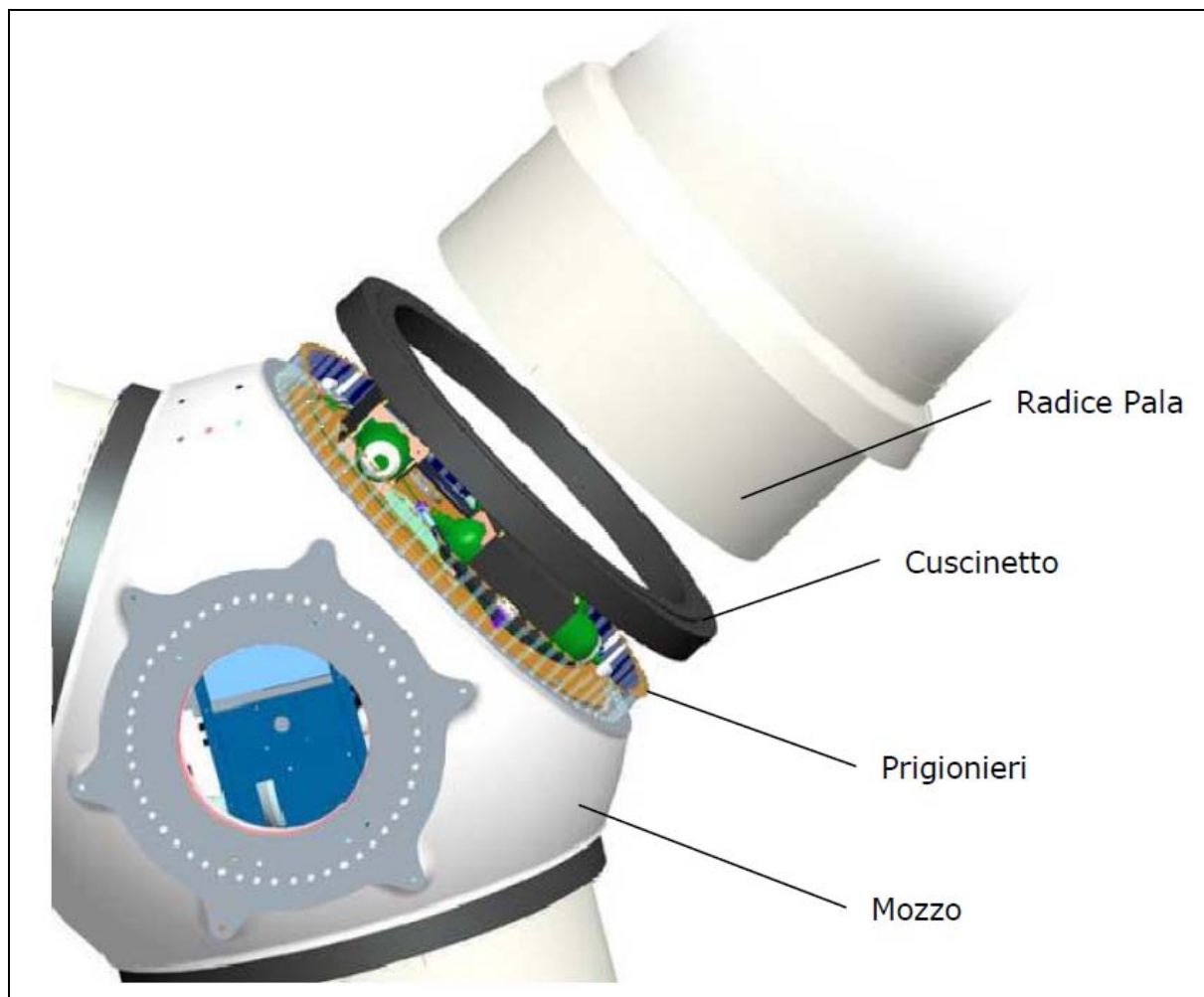




**Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica**

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore: l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.



**Figura 2: Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo.**

## 8.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA

Questo tipo d'incidente si è spesso manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti a un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.

**Vestas Italia S.r.l.**

Via Tirso 14, 00198 Roma, Italy  
Tel: +39 099 4606 111, Fax: +39 099 4606 333, [vestas-italia@vestas.com](mailto:vestas-italia@vestas.com), [www.vestas.com](http://www.vestas.com)  
Capital share: EUR 3,000,000.00 i.v., Company Reg. No.: 02170340737 presso il Registro Imprese di Roma N., REA 1192488  
C.F./P.IVA 02170340737, Company Reg. Name: Vestas Italia S.r.l.  
Società a socio unico soggetta a direzione e coordinamento di Vestas Wind Systems A/S ex c.c. artt. 2497 ss  
Company with a sole quota holder subject to direction & coordination of Vestas Wind Systems A/S per Article 2497 ff. of the Italian Civil Code



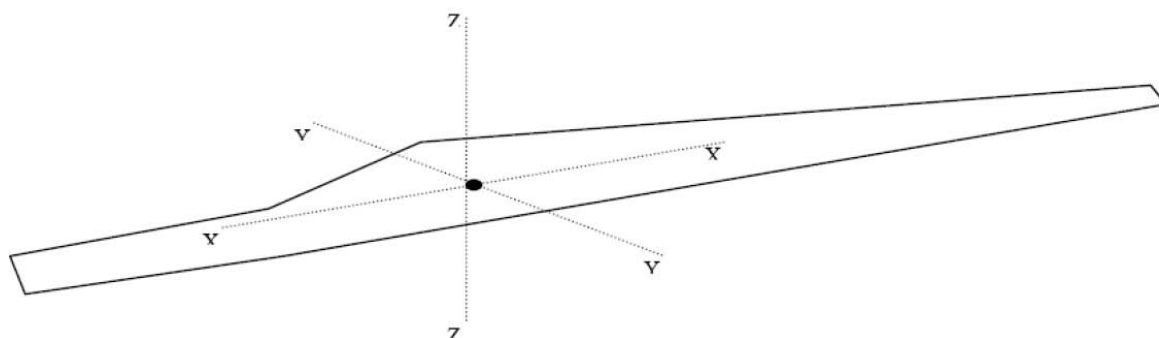
**Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.**

## 9 Conclusioni

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è ‘irrotazionale’, allora la distanza raggiunta dalla pala da 39 m (V80-2,0MW) sarà di ca. 125 m, dalla pala da 44m (V90-1,8/2,0MW) sarà di ca. 90 m, dalla pala da 44 m (V90-3,0MW) sarà di ca. 105 m, dalla pala da 49m (V100-1,8/2,0MW) sarà di ca.100 m, dalla pala da 49m (V100-2,0MW) sarà di ca.85 m, dalla pala da 49 m (V100-2,6MW) sarà di ca. 75 m, dalla pala da 54m (V110-2,0MW) sarà di ca.95 m (100 m), dalla pala da 54.6m (V112 3,0/3,3 MW) sarà di ca. 120 m (135 m), dalla pala da 57,15m (V117-3,0MW) sarà di ca. 135 m (145 m) mentre dalla pala da 61,66 m (V126-3,3 MW) sarà ca. 140 m (150 m) . Il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a) per il tempo invece è il 2c. Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla pala sarà di ca. 99.6m per la V80-2,0MW.

Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una pala di una V80-2,0MW (39 m di lunghezza) è di ca. 99.6m, di una V90-1.8/2.0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 75 m, di una V90-3,0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 85 m, di una V100-1,8/2,0MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 80 m, di una V100-2,0MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 70 m, di una V100-2.6MW (49 m di lunghezza) sarà di ca. 60, di una V110-2,0MW (54 m di lunghezza) sarà di ca. 75 m (80 m), di una V112-3,0/3,3MW (54,6 m di lunghezza) sarà di ca. 95 m (110m) e di una V117-3,3MW (57,15 m di lunghezza) sarà di ca. 110 m (115 m) e di una V126-3,3MW (61,66 m di lunghezza) sarà di ca. 115m (120 m) (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1).

Dalle note operative espone si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l’attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un’ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. Mentre l’effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso una collegamento bullonato.



**Figura 4: Sistema di coordinate usato per la pala**  
(YY – Flapwise; XX – Pitchwise; ZZ – Edgewise)

## 10 Riferimenti

“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001

### **Vestas Italia S.r.l.**

Via Tirso 14, 00198 Roma, Italy  
Tel: +39 099 4606 111, Fax: +39 099 4606 333, [vestas-italia@vestas.com](mailto:vestas-italia@vestas.com), [www.vestas.com](http://www.vestas.com)  
Capital share: EUR 3,000,000.00 i.v., Company Reg. No.: 02170340737 presso il Registro Imprese di Roma N., REA 1192488  
C.F./P.IVA 02170340737, Company Reg. Name: Vestas Italia S.r.l.  
Società a socio unico soggetta a direzione e coordinamento di Vestas Wind Systems A/S ex c.c. artt. 2497 ss  
Company with a sole quota holder subject to direction & coordination of Vestas Wind Systems A/S per Article 2497 ff. of the Italian Civil Code

## 11 Appendice

Caso 3	Pala V80 2,0MW	Pala V90 1,8/2,0MW	Pala V90 3,0MW	Pala V100 1,8/2,0MW	Pala V100 2,0MW	Pala V100 2,6MW	Pala V110 2,0MW HH95	Pala V110 2,0MW HH125
Velocità di rotazione	20	17	18,4	16,6	14,9	13,4	14,9	14,9
Tempo di volo	7,6	7	7.5	7	6,5	7	6,5	7
Distanza Vettoriale	99,6	75	85	80	70	60	75	80

Caso 3	Pala V112 3,0/3,3MW HH94	Pala V112 3,0/3,3MW HH119	Pala V117 3,3MW HH91.5	Pala V117 3,3MW HH116,5	Pala V126 3,3MW HH117	Pala V126 3,3MW HH137
Velocità di rotazione	17,7	17,7	17,7	17,7	16,5	16,5
Tempo di volo	7	8	7,5	7,5	7,6	8,0
Distanza Vettoriale	95	110	110	115	115	120

Gli altri casi sono stati studiati solo per la V80-2,0MW quindi non sono rilevanti per il caso in questione.