

# 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](mailto:highwind@emsmail.it)

---

## DOCUMENTAZIONE INTEGRATIVA

---

*Elaborazione: maggio 2020*



*Il Tecnico*

Arch. Walter Donato MORANO

*Spazio per visti ed autorizzazioni/osservazioni:*

## Premessa

*High Wind s.r.l.* è una società di scopo nata per valorizzare l'energia elettrica da fonte eolica attraverso la costruzione e la gestione di parchi produttivi che possano integrarsi in maniera ottimale nei territori individuati come potenzialmente validi, attraverso la costruzione di sinergie locali e l'utilizzazione delle migliori tecnologie.

Il Parco Eolico che la società intende realizzare sarà ubicato nel territorio comunale di *Guardia Lombardi* in provincia di Avellino e, nello specifico, sarà localizzato su una superficie a destinazione prettamente agricola, in località "Piani Mattine" a circa km 7,00 dal "centro abitato".

La localizzazione esatta dell'impianto, con particolare riferimento ai singoli aerogeneratori, è individuata dalle coordinate riportate nel prospetto che segue:

Torre	Coordinate WGS84	
	Latitudine	Longitudine
Wtg 01	40°58'5.45"N	15°17'31.15"E
Wtg 02	40°58'16.64"N	15°17'25.39"E
Wtg 03	40°58'53.99"N	15°17'24.41"E
Wtg 04	40°58'50.20"N	15°17'39.15"E
Wtg 05	40°59'24.54"N	15°16'52.22"E
Wtg 06	40°59'37.00"N	15°16'11.67"E
Wtg 07	40°59'45.27"N	15°16'0.79"E
Wtg 08	40°59'31.75"N	15°16'40.00"E

## **1. Adempimenti ex D.P.R. 151/2011**

**Per quanto concerne gli adempimenti ex. DPR 151/11**, si rappresenta che i *trasformatori elettrici isolati ad olio*, definiti ed individuati in progetto, **non rientrano** nella fattispecie di cui al punto 48/B dell'allegato I al D.P.R. 151/2011, in quanto *non utilizzano quantitativi superiori al metro cubo*.

Alla luce di codesta delucidazione progettuale, non si rende necessario produrre alcuna richiesta di valutazione del progetto ai sensi dell'art.3 del citato DPR, per l'ottenimento del parere preliminare di conformità antincendio.

Si chiarisce sin d'ora che, nella eventualità in cui il progetto esecutivo dovesse prevedere la necessità di implementare trasformatori elettrici isolati ad olio con quantitativi eccedenti il metro cubo, si procederà ad inoltrare regolare richiesta di valutazione del progetto ai sensi dell'art.3 del citato DPR, quale condizione necessaria, ai fini antincendio, per l'inizio dei lavori di realizzazione dell'impianto.

## **2. Altri Adempimenti: la valutazione dei rischi**

Con riferimento agli aspetti collegati all'attività di soccorso pubblico, svolta dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco ai sensi dell'art. 24 del D.L.vo 139/2006 e ss.mm.ii., con la presente relazione si illustra un'opportuno studio della valutazione dei rischi, considerando ogni possibile evento incidentale relativo a ciascuna delle fasi di trasporto, costruzione, esercizio e manutenzione del singolo aerogeneratore.

Si rimarca che il presente studio rappresenta solo una prima analisi preliminare dei rischi, mentre il PSC, redatto in fase esecutiva, dettaglierà in maniera puntuale tutti gli aspetti connessi alla sicurezza.

In questo studio preliminare si individuano e si elencano i rischi che possono risultare presenti in ogni fase critica, relativi e conseguenti alle modalità di esecuzione.

Si sono valutati i rischi connessi agli attrezzi, alle macchine, alle apparecchiature, alle opere provvisorie, all'impiego di materie o prodotti vari, alle caratteristiche dell'area interessata ed alla organizzazione del cantiere stesso, con particolare riferimento alla movimentazione dei materiali e delle persone addette ai lavori. Sono oggetto di studio i posti di lavoro mobili o fissi, situati in elevazione o in profondità, la realizzazione degli impianti di distribuzione di energia con illuminazione artificiale dei posti di lavoro e delle vie di circolazione del cantiere, con chiara segnaletica della zona di pericolo e della gestione delle interferenze in relazione alle unità in esercizio provvisorio.

## 2.1. Fase Trasporto

Per quanto concerne *l'accessibilità* alle aree di pertinenza di ogni singolo aerogeneratore, si rimarca che tutta la viabilità (sia “*ex novo*” che “*esistente*”) posta all'interno del Parco Eolico è stata progettata al fine di permettere il trasporto delle turbine con i mezzi di trasporto eccezionale e, pertanto, risulta garantito anche il transito dei mezzi di soccorso che sono dimensionalmente più piccoli.

Il trasporto delle pale e dei conci delle torri avviene con mezzi di trasporto eccezionale, le cui dimensioni possono superare i cinquanta metri di lunghezza e per tale motivo le strade da percorrere devono rispettare determinati requisiti dimensionali e caratteristiche costruttive (pendenze, stratificazioni della sede stradale, ecc.), stabiliti dai fornitori degli aerogeneratori.

La *viabilità esistente* non sempre ha le caratteristiche necessarie per permettere il passaggio di questi mezzi eccezionali e quindi sono previsti degli interventi di adeguamento, che generalmente consistono nell'ampliamento della sede stradale (larghezza minima di mt 5,00) e modifica del raggio di curvatura (*raggio interno della curva mt 25-35 > di mt 13,00 indispensabili al passaggio dei mezzi di soccorso*).

Gli interventi di adeguamento della *viabilità esistente* saranno improntati al recupero funzionale della stessa, *senza alterazione dei profili plano-altimetrici che presentano pendenze medie pari a circa il 5% (pendenza max 10% per l'accesso all'aerogeneratore wtg8)*; alcune strade “interne al parco” infatti versano in un pessimo stato conservativo ed attualmente sono utilizzate solo per scopi colturali per il transito di mezzi meccanici legati all'agricoltura.

Pertanto, gli interventi previsti non modificano le “*livellette*” ma comportano solo la regolarizzazione del piano di transito con la stesura di opportuno materiale lapideo (pietrisco, misto stabilizzato ecc.) e relativa compattazione (vedi elaborati grafici di progetto E02).

Per quanto concerne la *viabilità “ex-novo”* preme rimarcare che avrà un'ampiezza di circa mt 6,00 e sarà realizzata in modo da permettere il trasporto eccezionale degli aerogeneratori.

Pertanto, si sottolinea che tutta la viabilità interna al Parco Eolico presenterà una larghezza *ampiamente maggiore di quella necessaria al transito dei mezzi di soccorso (mt 3,50)*.

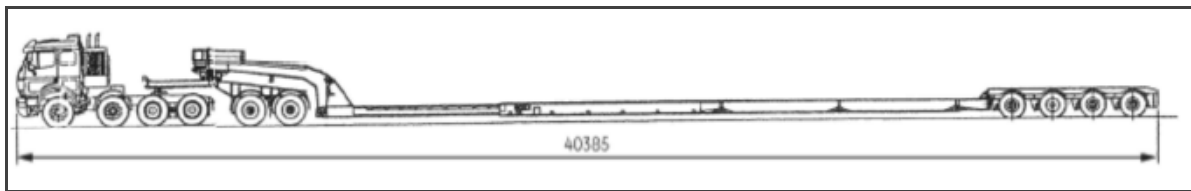
Per quanto concerne *l'altezza libera*, si sottolinea che non esistono impedimenti di sorta all'interno del sistema viario del Parco Eolico.

Il massimo peso supportato dalle strade, corrisponde al passaggio della navicella (circa 170 t) e quello della gru principale (500-700 t). In ogni caso, anche se il peso del trasporto è importante, l'esperienza insegna che una maggiore usura si verifica a causa

del passaggio continuo di camion che trasportano le diverse parti della turbina o anche di betoniere laddove viene utilizzata la stessa strada.

Sulla base di quanto detto, la capacità di carico per le vie di accesso sarà di almeno 2 kg/cm<sup>2</sup> (circa 200 kN/m<sup>2</sup>), mentre per le strade interne deve essere almeno 4 kg/cm<sup>2</sup>, mantenendo questo valore fino ad una profondità di 1 mt per le strade di accesso e di 3 mt per le strade interne al campo eolico.

Si può concludere che la “resistenza al carico”, necessaria per il transito dei mezzi di soccorso (20 t) è ampiamente soddisfatta.



Mezzi di trasporto eccezionale

La massima lunghezza dei veicoli eccezionali è di circa mt 50,00 quando viene caricata con i componenti principali. La lunghezza del veicolo viene misurata dal fronte dello stesso fino alla fine del carico. Alla luce di codesti aspetti dimensionali si sottolinea nuovamente che il “Raggio di Volta” di tutte le strade sarà pari a mt 25-35 , valore doppio di quello necessario al transito dei mezzi di soccorso (mt 13,00).

Per quel che concerne il trasporto dei componenti delle turbine eoliche, come più volte rimarcato, avverrà tramite veicoli eccezionali la cui accessibilità all’area di intervento è stata esaminata e studiata già in fase progettuale (tessuto viario interno e/o prossimo al Parco Eolico); tale analisi preventiva si è resa indispensabile per rendere operativamente realizzabile l’opera e soprattutto per garantire che tutto ciò avvenga nella più assoluta sicurezza per gli operatori.

Con **trasporto eccezionale** si definisce un tipo di trasporto che ecceda i limiti dimensionali e/o di peso previsti dal Codice della Strada.

Tra i trasporti eccezionali, le categorie più frequenti riguardano ad esempio il trasporto di cisterne, silos, caldaie, lamiere, trasporti di macchinari industriali, blocchi di pietra, autobetoniere, turbine e pale eoliche, turbine a gas, trasporti di barche.

La normativa che disciplina la categoria dei trasporti eccezionali è l’articolo 10 del C.d.S.

Per veicoli o trasporti eccezionali fino a 4,20 m di larghezza e/o fino a 35 m di lunghezza è prescritta la scorta tecnica; su strade o tratti di strade di tipo A e B (statali e regionali) a tre corsie; su strade della stessa tipologia a due corsie, per veicoli o trasporti eccezionali fino a 3,80 m di larghezza e/o fino a 30 m di lunghezza; su strade o tratti di strada di tipo C e D (provinciali e comunali), per veicoli o trasporti eccezionali fino a 3,60 m di larghezza e/o fino a 28 m di lunghezza se presente più di una corsia per

senso di marcia, fino a 3,30 m di larghezza e/o fino a 27 m di lunghezza se presente una sola corsia per senso di marcia.

La scorta della polizia stradale è prescritta nei casi in cui il veicolo o il trasporto eccezionale superino i limiti indicati per la scorta tecnica.

Per il trasporto degli aerogeneratori ci si rivolgerà ad azienda del settore che dovrà garantire qualità, spessore organizzativo, esperienza con la componentistica eolica e dotazione di mezzi di avanguardia.

In sostanza offrire un servizio di qualità, curando ogni aspetto in maniera tale da garantire un trasporto eccezionale nel migliore dei modi anche su percorsi poco confortevoli in totale sicurezza.

Ogni veicolo dovrà essere dotato di lampeggianti, pannelli apribili automatici e luminosi, segnaletica stradale utilizzata in casi di emergenza, così come previsto dalla Legge (art.10 del CDS D.Lgs 285 del 30/04/1992).



Prima di procedere operativamente al trasporto eccezionale l'azienda dovrà redigere e presentare alla DL, uno "Studio di Fattibilità"; questo rappresenta uno step fondamentale e dovrà essere completo di sopralluoghi e documentazioni fotografiche che permetteranno di progettare al meglio il trasporto e prevedere eventuali imprevisti lungo il percorso che potrebbero rallentare il trasporto medesimo.

## **2.2. Fase esecutiva di cantiere**

### **2.2.1. Individuazione dei Rischi.**

Il rischio è correlato in misura diversa in funzione delle differenti tipologie delle opere, dell'area di lavoro, dell'organizzazione del cantiere, delle lavorazioni e delle loro interferenze con gli aspetti organizzativi del cantiere e con gli aspetti esterni allo stesso.

Nel cantiere in oggetto, la natura dei lavori da eseguire è rappresentata principalmente da opere civili stradali per l'accesso alle piazzole per consentire l'installazione dei mezzi d'opera, nonché da opere di fondazione speciali per i basamenti e di montaggio di prefabbricati pesanti per l'assemblaggio, a piè d'opera ed in quota, dei conci delle torri e delle macchine da installare in sommità.

Altra tipologia di lavori da eseguire riguarda le opere elettriche inerenti alla realizzazione della stazione elettrica di trasformazione per la consegna dell'energia elettrica alla Rete di Trasmissione nazionale (RTN), nonché delle opere di impiantistiche elettriche.

Inoltre, le dimensioni ed i pesi dei componenti degli aerogeneratori e delle gru necessarie al loro montaggio comportano la presenza nell'area di installazione di un intenso traffico di mezzi per il trasporto eccezionale.

La posizione delle 8 installazioni, lungo uno sviluppo complessivo di alcuni chilometri, non consente la realizzazione di un cantiere unico, ma rende necessaria la suddivisione in più aree di cantiere distinte ed indipendenti, anche a vantaggio della sicurezza.

### **2.2.2. Analisi dei Rischi**

L'individuazione preliminare delle fasi lavorative ha evidenziato le seguenti criticità nel percorso produttivo soggette a rischio:

- Allestimento dei cantieri;
- Approntamenti per la sicurezza;
- Opere provvisoriale;
- Scavi;
- Formazione di rilevati stradali;
- Palificazioni;
- Opere di fondazione in calcestruzzo armato;
- Assemblaggio a piè d'opera di elementi prefabbricati pesanti;
- Montaggio in quota di elementi prefabbricati pesanti e di macchinari;
- Impianti elettrici interni agli aerogeneratori;
- Realizzazione di elettrodotti interrati e connessione alla rete elettrica;
- Ripiegamento cantieri;

- Collaudi in corso d'opera e finali;
- Esercizio provvisorio.

**I rischi che potranno essere presenti** nelle criticità indicate si possono così riassumere:

- Caduta di persone dall'alto;
- Caduta di oggetti dall'alto;
- Seppellimento;
- Urto di mezzi in movimento;
- Taglio, schiacciamento di arti;
- Elettrocuzione;
- Polveri;
- Rumore e vibrazioni;
- Chimico;
- Incendio.

### **2.2.3. Valutazione dei Rischi**

Per quanto concerne la valutazione dei rischi, ciascun luogo del cantiere viene ad essere connotato da un "carico di pericolo" generato dagli agenti materiali di infortunio e/o dagli agenti patogeni associati alle lavorazioni presenti nelle diverse zone operative del cantiere. La pericolosità di un agente, intesa come la proprietà o la qualità intrinseca di un determinato agente avente il potenziale di causare infortuni o patologie, può essere a sua volta enfatizzata da una molteplicità di fattori di pericolo determinati da proprietà o qualità intrinseche connotanti una modalità, un luogo o un certo intervallo di tempo operativo.

Ai fattori di pericolo è comunque possibile contrapporre delle condizioni e degli aspetti del processo produttivo quali la formazione-informazione delle maestranze, la manutenzione dei mezzi produttivi o la conservazione di materiali i quali assumono il significato di fattori di sicurezza. Le caratteristiche organizzative e di durata di un ciclo produttivo edilizio suggeriscono poi di completare e contestualizzare la valutazione dei rischi sulla scorta del P.O.S. redatto dalle Imprese alla luce delle proprie capacità tecniche e delle risorse umane.

Dunque, mentre per quanto riguarda la pericolosità intrinseca delle attrezzature e dei mezzi d'opera è possibile sviluppare valutazioni simili a quelli di una linea di produzione industriale, ad esempio per la loro manutenzione, nel settore della cantieristica civile, assume un peso assai rilevante la possibilità dell'errore umano sotto una grande molteplicità di aspetti: scelta errata delle attrezzature, loro uso scorretto, rimozione delle protezioni ne costituiscono alcuni esempi.



L'impossibilità pratica di dominare tutti i micro ed i macro collegamenti di causalità a monte di un possibile infortunio, rendono praticamente impossibile il ricorso a metodi deterministici per la valutazione del rischio. Può allora essere significativo riferirsi ad una valutazione soggettiva della probabilità, da intendersi come la misura della fiducia che un soggetto attribuisce al verificarsi di un certo evento, frutto dell'elaborazione e della maturazione personale di un insieme di informazioni qualitative e quantitative sulle cause e sui meccanismi che possono determinarlo.

Le valutazioni del rischio in se e del rischio residuo saranno espresse organicamente, con altre analisi del rischio, nelle schede che saranno redatte in fase esecutiva col Piano di Coordinamento e Sicurezza.

### 2.3. Fase di esercizio

**Fattore di rischio: l'incendio.** *Nelle turbine eoliche possono verificarsi incendi per fulminazione o errori tecnici e guasti. In tali casi, all'incendio partecipano lubrificanti, oli, parti elettriche in tensione oppure l'involucro stesso della navicella.*

#### Misure e precauzioni preliminari

Gli operatori sono esposti a tale rischio principalmente quando sono all'interno della turbina eolica; pertanto, è fondamentale che siano mantenuti sempre efficienti i mezzi per la rilevazione e l'allarme, quelli per l'estinzione, la via di uscita, e che i lavoratori siano adeguatamente formati e addestrati contro l'incendio.

Dopo questa breve premessa circa il rischio incendio e le precauzioni preliminari da adottare, si ritiene utile analizzare **due situazioni limite di pericolo** e conseguente rischio che, anche se molto raramente, si potrebbero verificare in ambito eolico; questi casi interesserebbero direttamente l'attività di pubblico soccorso del Comando dei VV.FF, e rappresentano, per certi aspetti, una sorta di "unicum" nella casistica di intervento degli stessi:

**1° caso.** pericoli e conseguenti rischi per i lavoratori, che operano nell'HUB, nella navicella o nella torre, **ambienti assimilabili a quelli degli "ambienti confinati"**;

**2° caso.** rischi derivanti dal distacco di frammenti di pala mentre la stessa è in rotazione.

**1° caso.** Per quel che concerne la prima situazione critica, si sottolinea che malgrado gli ambienti della macchina eolica non siano formalmente definiti dalla legislazione come **ambienti confinati** o sospetti di inquinamento, possono però presentare, per gli operatori, in particolari condizioni, dei pericoli e quindi dei rischi tipici degli ambienti confinati o sospetti di inquinamento.

Gli ambienti confinati sono i seguenti:

- Hub: “è il mozzo a cui sono collegate le pale (di norma 3 posizionate a 120° una dall'altra). Il sistema mozzo/pale rappresenta il rotore”. “Non è pensato e concepito per essere un luogo con presenza continuativa di personale ma diventa luogo di lavoro solo nelle fasi in cui si rende necessaria svolgere attività di ispezione e/o manutenzione. All'area si accede in diversi modi (botole o passo d'uomo ellittico)”;
- Navicella eolica o gondola: “si tratta della cabina posta sulla sommità di una torre a fusto oppure a traliccio”. “L'accesso avviene tramite una botola di ingresso dall'ultima piattaforma della Torre. È prevista la presenza di personale di manutenzione e, per alcune fasi specifiche della manutenzione (es. saldature) potrebbero verificarsi delle condizioni assimilabili a quelle degli ambienti sospetti di inquinamento”;
- Torre: “analogamente a quanto visto per gli altri ambienti, dovrà esser fatta una valutazione puntuale tenendo conto degli elementi caratteristici e delle lavorazioni svolte, in particolare qualora fosse presente il locale trasformatore alla base della torre”.

#### Misure e precauzioni preliminari

Si ritiene utile riportare alcune misure e precauzioni preliminari contenute nel “Manuale illustrato per lavori in ambienti sospetti di inquinamento o confinati ai sensi dell'art. 3, comma 3, del d.p.r. 177/2011” che rappresenteranno i cardini della sicurezza nella prossima stesura del PSC.

Prima dell'inizio dei lavori si procederà:

- a. ad effettuare una specifica analisi per l'identificazione dei pericoli dalla quale deve discendere una adeguata valutazione dei rischi, tenendo conto delle possibili modifiche nel tempo delle condizioni ambientali e di lavoro iniziali (ad es. fumi della saldatura);
- b. a definire specifiche procedure operative che individuino:
  - caratteristiche dell'ambiente confinato, dei lavori che devono essere svolti e loro durata, tenendo conto anche dei turni degli operatori;

- modalità per delimitare l'area di lavoro (per evitare eventuali rischi da interferenza);
  - modalità per accertare l'assenza di pericolo per la vita e l'integrità fisica dei lavoratori;
  - modalità con la quale effettuare una bonifica se sono presenti sostanze pericolose;
- c. ad informare, formare e addestrare i lavoratori coinvolti nell'attività con particolare riferimento all'applicazione delle procedure e all'uso dei DPI, della strumentazione e delle attrezzature di lavoro sulla base delle attività da svolgere e dei rischi presenti.
- d. a dotare, già in fase progettuale esecutiva, gli aerogeneratori di una ventilazione forzata (o altri mezzi idonei);
- e. a programmare un monitoraggio ambientale attraverso adeguata strumentazione di rilevamento, opportunamente tarata, e dotata di sistemi di allarme acustico e/o luminoso (ad es. strumenti che rilevano la presenza di più gas, il contenuto di ossigeno, il livello di contaminanti, il livello di esplosività, le condizioni microclimatiche);
- f. a valutare preliminarmente (redazione PSC), l'eventuale presenza di rischi indotti dalle lavorazioni previste (ad es. formazione di fumi) o dal contesto in cui si opera (es. attività ad elevate altezze);
- g. a programmare un monitoraggio di verifica dell'idoneità e funzionalità delle attrezzature di lavoro e di soccorso, nonché quello di verifica dei requisiti e dell'idoneità dei DPC (dispositivi di protezione collettiva) e dei DPI;
- h. ad esaminare le modalità con le quale isolare l'ambiente confinato dal resto dell'impianto (ad es. chiusura e blocco di serrande, valvole, saracinesche che possano immettere sostanze pericolose nell'ambiente confinato, sezionamento degli impianti elettrici, movimentazione di parti meccaniche, lockout-tagout), installando eventualmente opportuna segnaletica e cartellonistica per i rischi residui.
- i. a programmare un eventuale monitoraggio in continuo, quando possa esservi dubbio sulla pericolosità dell'atmosfera. In caso di atmosfere potenzialmente esplosive, la strumentazione sarà rispondente al d.p.r. 126/98 - recepimento della direttiva di prodotto ATEX - e di categoria scelta dal responsabile dei lavori in relazione alla probabilità e durata dell'atmosfera esplosiva;
- j. a stabilire adeguate modalità di gestione di un'eventuale emergenza in funzione del rischio presente, dell'accesso (orizzontale o verticale, a livello del suolo o in quota), delle dimensioni e delle caratteristiche strutturali dell'ambiente confinato in coordinamento con il sistema di emergenza del Servizio Sanitario Nazionale e dei Vigili del Fuoco.

In riferimento a quest'ultimo punto, circa il coordinamento con il sistema di emergenza del Servizio Sanitario Nazionale e dei VV.FF., preme rimarcare che, in ottemperanza a tale concetto, nel più ampio spirito collaborativo, il Corpo dei Vigili del Fuoco, negli ultimi anni,

in diverse circostanze ed in varie località nazionali, ha effettuato delle esercitazioni negli aerogeneratori, simulando il verificarsi di diverse situazioni di pericolo:

**Uno.** Simulazione di soccorso ad una persona all'interno del HUB (ogiva ove è alloggiato il mozzo di fissaggio delle pale, che rappresenta la parte più critica per spazi molto confinati). La manovra effettuata ha previsto l'imbarellamento e calata dell'infortunato attraverso oblò del HUB con barella speleo controventata dal basso.

**Due.** Soccorso di una persona all'interno della navicella (ove sono installati i principali apparati della turbina eolica, generatori elettrici e sistemi di controllo). La manovra eseguita ha previsto l'imbarellamento e la calata dell'infortunato attraverso un passo d'uomo, (utilizzato da personale della ditta per il trasporto di materiale dal basso mediante un verricello), con doppia piastrina gi-gi (strumento adatto alla discesa in corda doppia) e controventata dal basso.

**Tre.** Nella terza casistica è stato simulato il soccorso a persona all'interno della torre, ove è installata una scala di salita con apposita linea vita, che permette di raggiungere la navicella a circa 100 mt di altezza. La manovra eseguita ha previsto l'imbarellamento dell'infortunato e la calata della barella in verticale e parallela alla scala con doppia piastrina gi-gi.

**Tali esercitazioni (svolte dal nucleo SAF), sono state organizzate in aerogeneratori che, dimensionalmente e strutturalmente sono molto simili a quelli di progetto.**

Le prescrizioni per gli operatori

Il lavoratore che entra nell'ambiente confinato deve:

- avere l'idoneità sanitaria per la mansione specifica;
- conoscere i pericoli presenti e la procedura di lavoro;
- conoscere le caratteristiche tecniche dei DPI ed utilizzarli in modo appropriato secondo l'addestramento ricevuto;
- indossare i DPI idonei per consentire una rapida estrazione in caso di condizioni anomale e/o impreviste (ad esempio una imbracatura completa) - mantenersi in costante comunicazione (vocale e/o visiva) con l'addetto esterno e nel caso in cui la comunicazione avvenga con apparecchi trasmettenti deve essere assicurata la non schermatura di tali trasmissioni dagli stessi ambienti di natura metallica;
- conoscere le procedure di emergenza;
- evacuare immediatamente l'ambiente confinato e comunicare al proprio responsabile ogni condizione anomala e/o imprevista riscontrata all'interno dell'ambiente;
- evacuare immediatamente l'ambiente confinato quando ordinato dall'operatore esterno e/o all'attivazione di qualche segnale codificato di allarme e/o al riconoscimento di qualche sintomo di malessere fisico".

**2° caso.** Per quel che concerne la seconda situazione critica, innanzitutto si sottolinea che, in allegato alla presente è inserito un documento-studio del costruttore Vestas Wind Systems A/S, denominato ***“Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento - rev.13 del 09/07/2014”***, già presente nell’elaborato “R05g” del progetto definitivo; preso atto di quanto richiesto nella citata missiva del Comando dei VV.FF. del 20.03.2020, di seguito si illustra e si approfondisce la casistica relativa ad una eventuale proiezione a distanza di frammenti.

Prima di esporre codesto approfondimento, si ritiene utile e necessario rimarcare quanto riportato al punto **i)** del paragrafo precedente, in quanto è sottolineato che le turbine eoliche saranno oggetto di monitoraggio continuo nel caso in cui sussista un dubbio sulla pericolosità dell’atmosfera. Ovviamente, monitorando codesta situazione di pericolo, si riduce o addirittura si rende **nullo il rischio di incendio provocato da scariche atmosferiche**; tutto ciò comporta l’azzeramento di una delle principali cause di incendio e conseguente eventuale proiezione a distanza di frammenti.

In primis è d’uopo riportare quanto recita il citato documento-studio Vestas,

*“...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...”*.

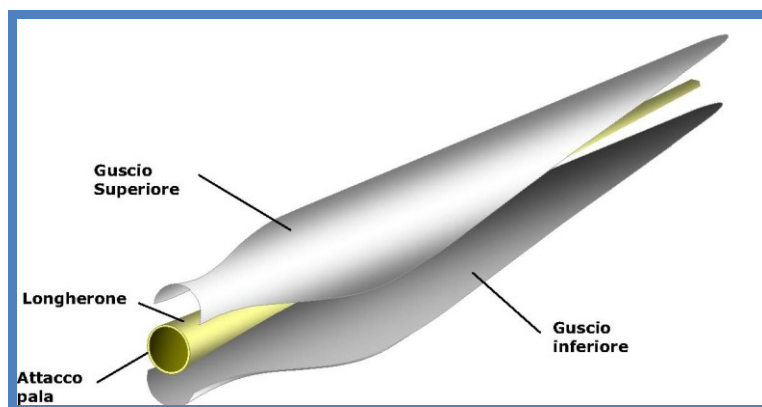
Tale denominazione ***“fail safe”***, viene attribuita solo ed esclusivamente a quei sistemi (apparati, componenti, strutture ecc.) che sono stati progettati in modo da evitare che eventuali avarie arrechino danni a persone o ad altri sistemi a loro interconnessi od operanti in prossimità.

Il costruttore inoltre sottolinea che *“ ... eventi di distacco di una sezione di pala non si sono verificati a tutt’oggi sulle turbine installate...”*.

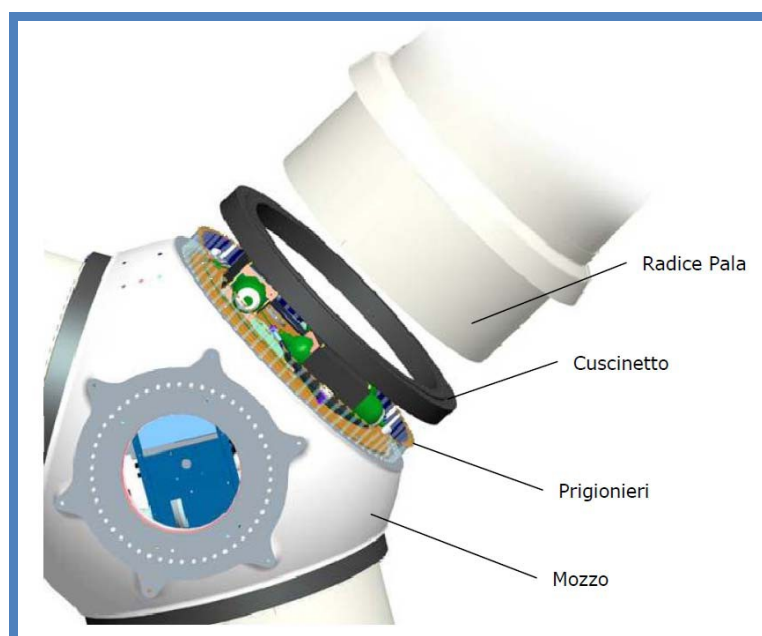
Tutto ciò premesso, si ritiene utile esaminare le “pale” di progetto le quali sono costituite:

- da una parte strutturale (*longherone*) posta all’interno della pala
- 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.



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.



Premesso che tutte le pale prodotte dalla Vestas e di conseguenza anche quelle di progetto, sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine e che pertanto riescono a drenarne una buona parte senza danni alle pale, l'incidente che, con delle probabilità molto remote, potrebbe eventualmente verificarsi, è rappresentato da un danneggiamento all'estremità della pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma non si distacca dal resto del corpo come si può evincere dalla seguente rappresentazione fotografica.



*Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica*

Detto ciò, come la stessa casa produttrice rimarca, “ ... 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... ”.

In merito alle caratteristiche costruttive delle pale, preme rimarcare, che sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici (poliestere e le fibre epossidiche); quest’ultima circostanza limita sino ad annullare la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione. Inoltre, in caso di gravi rotture, i sistemi di controllo dell’aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento si possa distaccare. Il danneggiamento di una pala farebbe funzionare il rotore in condizioni non bilanciate, portando necessariamente il sistema di sicurezza a fermare il dispositivo.

L'utilizzo dei citati materiali plastici limita, sino quasi ad annullare, la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture **le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo** (seppure gravemente danneggiato), e i sistemi di controllo dell’aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l’alto.

Per quel che concerne la presente analisi, si evidenzia che 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 IEC 61400-1, che impone l’utilizzo di condizioni particolarmente gravose. Le norme tecniche seguite in fase di dimensionamento sono tali da poter rendere trascurabile l’ipotesi di un significativo danneggiamento della pala per tutta la vita utile della WTG (20 anni).



Ciononostante, nella remota ipotesi in cui ci sia un danneggiamento del materiale che compone i gusci o i rinforzi interni della pala, è assolutamente impossibile che si stacchi un frammento terminale della pala, dal momento che non esistono giunzioni trasversali rispetto allo sviluppo della pala, ma esclusivamente la giunzione longitudinale tra i due semigusci.

L'unica, remota possibilità di danneggiamento, riguarda una "separazione" parziale dei due semigusci. In questo scenario i rinforzi interni e la parte di semiguscio non danneggiata tratterrebbero la parte di guscio ipoteticamente rovinata e la macchina andrebbe automaticamente in pausa, evitando categoricamente la possibilità di proiezione di un frammento di pala alla massima velocità. Non è pertanto ipotizzabile la rottura improvvisa e di netto di un frammento della pala con proiezione dello stesso.

Inoltre, è doveroso nuovamente precisare che le turbine eoliche sono dotate di un sistema di sicurezza in grado di mandare in pausa la macchina a seguito di sbilanciamenti del rotore, eccessivo carico aerodinamico sulla pala o scostamenti sensibili tra velocità del vento e power curve. Il danneggiamento di una pala -che per quanto già spiegato evidentemente precede qualunque ipotesi di proiezione di un frammento della stessa- farebbe funzionare il rotore in condizioni non bilanciate, e porterebbe necessariamente il sistema di sicurezza a rilevare almeno una delle tipologie di errori codificate come di seguito:

- **"Tower Acceleration"**: dovuto a un forte sbilanciamento del rotore.
- **"Power Curve Error"**: dovuto a un forte scostamento rispetto alla Power Curve attesa (che potrebbe essere generato da una variazione del profilo pala);
- **"Tilt yaw Control"**: dovuto ad un eccessivo carico sulla pala misurato da un sensore.

Ciascuna di queste anomalie mette la macchina in pausa, e ferma quindi il rotore in attesa di un intervento tecnico. Non è, pertanto, possibile che il rotore giri alla sua massima velocità se una delle pale è danneggiata, e quindi che scagli un frammento di pala alla massima velocità ipotizzabile.

Si richiama ancora il fatto che il modello della turbina eolica è dotato di un sistema di protezione contro le fulminazioni per la torre, per l'hub e per le pale.

Pertanto, in caso di fulminazione di una delle pale del rotore, la corrente di fulminazione sarebbe scaricata a terra e non comporterebbe alcun danneggiamento della pala.

Per quanto spiegato è del tutto evidente che, anche in caso di rottura del frammento di una pala, lo stesso rimarrebbe vincolato (sostanzialmente "appeso") alla restante parte della pala e non sarebbe proiettato. Peraltro, anche nella assolutamente remota ipotesi di distacco del frammento, la maggior parte dell'energia cinetica sarebbe spesa per rompere il vincolo del frammento alla pala.



Il documento-studio di Vestas infine conclude asserendo 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 un collegamento bullonato.

Malgrado Vestas escluda il distacco di una porzione di pala, si è esaminato lo 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 metri dalla torre è dell'ordine di  $2 \times 10^{-5}$ .

Pertanto, volendo stabilire la gittata massima del frammento di pala, facendo riferimento al rischio accettato in sede progettuale (European Wind Turbine Standard), pari a  $10^{-6}$ , si raggiunge tale valore ad una distanza inferiore alla gittata massima della pala (vedi elaborato di progetto R05g). Ad una distanza pari alla gittata massima della pala, la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

**Concludendo**, alla luce di quanto è emerso da codesto approfondimento, malgrado:

- il documento Vestas escluda il distacco di una porzione di pala;
- lo studio "*Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan*" ritenga altamente improbabile che un frammento staccatosi da una turbina eolica vada oltre i 50 metri;

tenuto altresì conto dei seguenti fattori:

**a) attrito dell'aria:** la forza di attrito viscoso che si instaura tra il frammento e l'aria è molto più significativo a differenza del caso di distacco dell'intera pala perché è direttamente proporzionale al peso: più il frammento è leggero, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso;

**b) riduzione della velocità di rotazione nel momento del distacco reale:**

quando si manifesta un'anomalia la macchina si mette automaticamente in pausa. Tuttavia, supponiamo che ci sia un tempo  $t$  che intercorre tra l'istante in cui si manifesta l'anomalia e il momento in cui l'impianto si mette in pausa.

Il frammento non si potrà mai staccare al tempo  $t=0$ , ovvero quando insorge l'anomalia, per via della composizione materiale delle pale, come descritto sopra. Pertanto, quando il frammento si staccherà, avrà già perso parte della sua energia cinetica e quindi non verrà

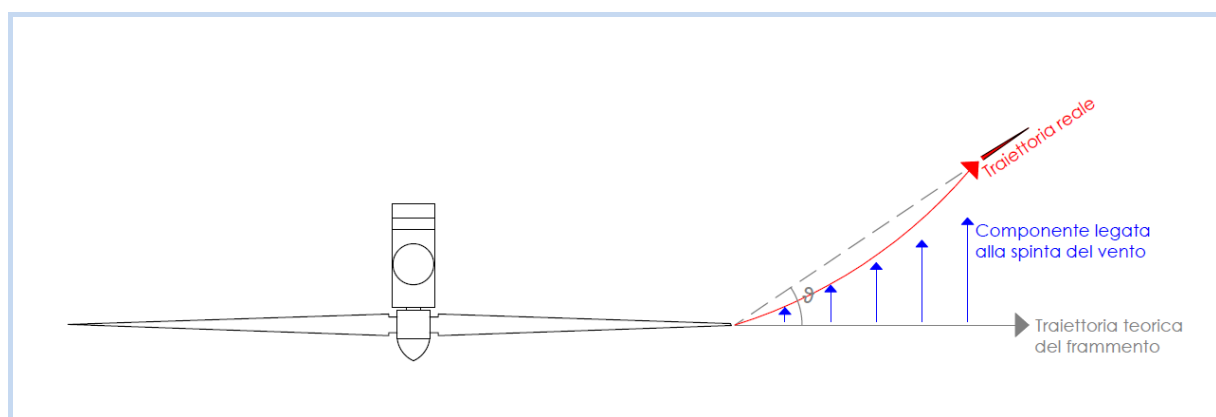
mai scagliato alla velocità di rotazione massima. Bisogna quindi tenere conto della enorme dissipazione di energia che, comunque, si avrebbe al momento del distacco per vincere la resistenza del vincolo del frammento alla pala dell'aerogeneratore: infatti quand'anche si consideri il caso di distacco del frammento, è evidente che il dispendio di energia cinetica per rompere il vincolo con l'aerogeneratore non può essere nullo;

**c) Componente vettoriale ortogonale al piano di rotazione delle pale legata alla spinta del vento:**

nel caso teorico si suppone che il frammento viaggi nel piano bidimensionale di rotazione delle pale. Tuttavia, non si può trascurare l'azione del vento che è ortogonale al piano di rotazione delle pale e costituisce una componente vettoriale significativa per il calcolo reale della gittata massima.

Per di più, il vento non è una forza sempre costante nel tempo e non ha la stessa intensità in tutti i punti, pertanto fa compiere al frammento una traiettoria non rettilinea.

Inoltre, la componente legata alla spinta del vento è preponderante rispetto alla traiettoria del caso teorico ed euristicamente si può assumere un angolo di deviazione  $\vartheta = 60^\circ$ ;



A valle della valutazione della Gittata massima degli elementi rotanti, si può tuttavia ragionevolmente affermare che non è assolutamente verosimile che un frammento di pala si stacchi dalla stessa e venga scagliato a distanze significative, men che meno è verosimile l'ipotesi che un frammento di pala si stacchi dalla stessa e segua un moto assimilabile a quello di un proiettile scagliato con una velocità di partenza pari a quella della massima rotazione del rotore.

**lo scrivente, a tutto vantaggio della sicurezza e dell'incolumità delle persone, ritiene opportuno prendere come valori di riferimento quelli della gittata massima delle pale così come determinati nell'elaborato di progetto R05g;** di seguito si riporta graficamente la rappresentazione delle aree di pericolo con indicazione dei ricettori (allegato 2).

*Infine, preme sottolineare che diverse strade comunali, riportate catastalmente in mappa, non sono state considerate degli elementi sensibili, in quanto le stesse non hanno le caratteristiche tecniche che le possano annoverare tra le strade carrabili; 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.*

Il Tecnico

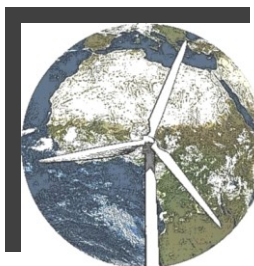
Arch. Walter Donato MORANO



Comune di Guardia Lombardi

Località “*Piani Mattine*”

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



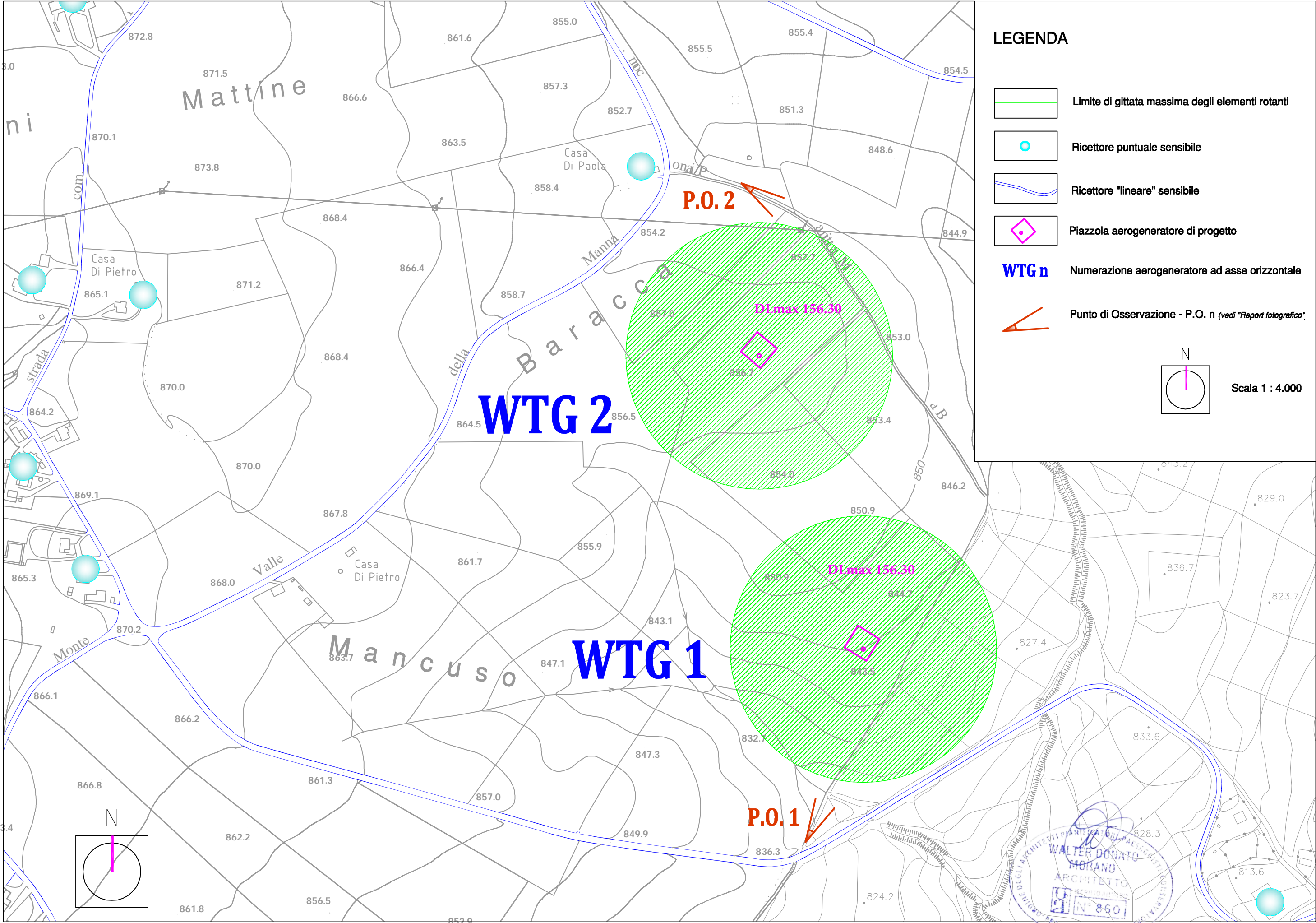
ALLEGATO n°1

**Individuazione Cartografica dei Ricettori in funzione della**  
**“Gittata Massima”**

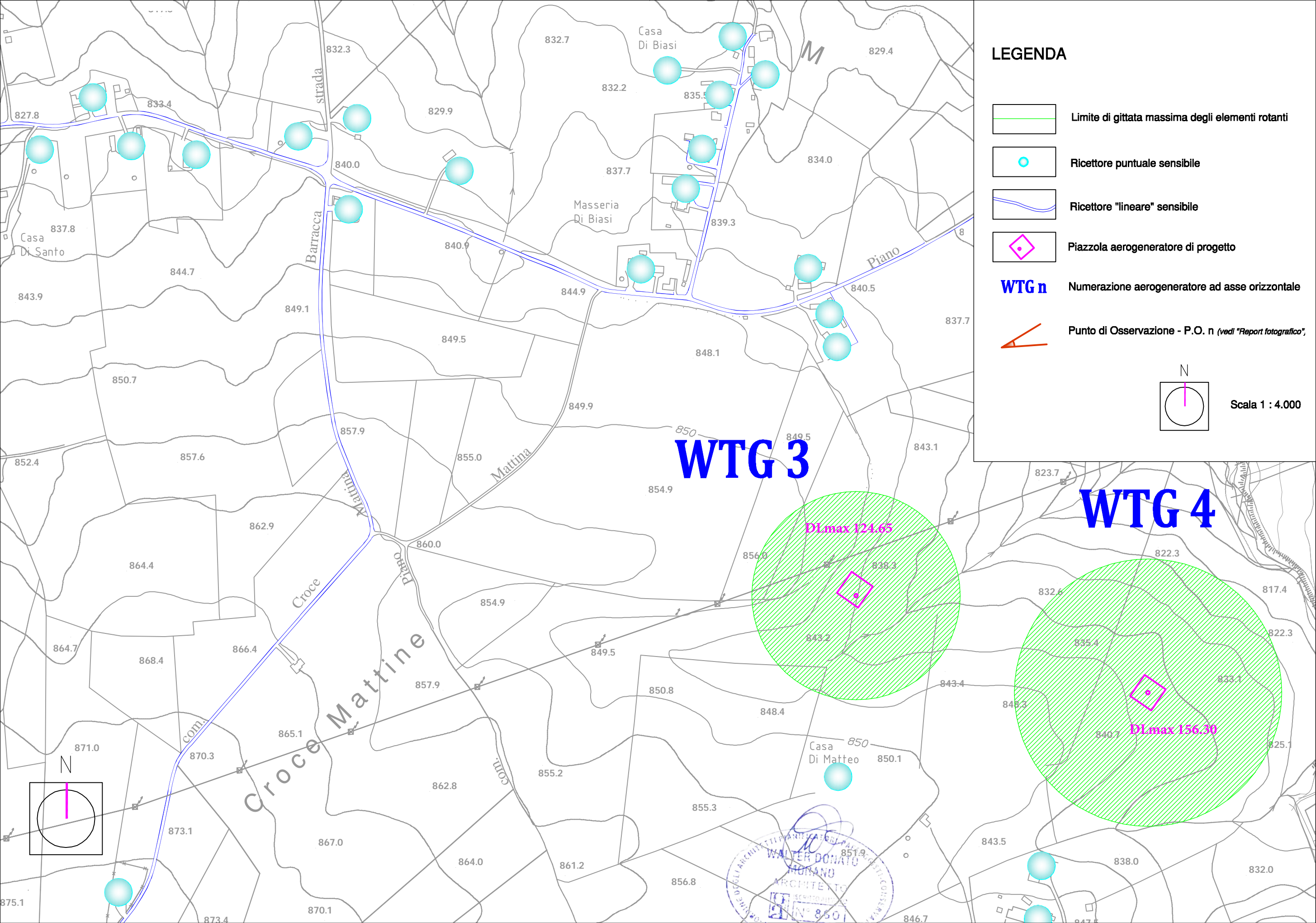


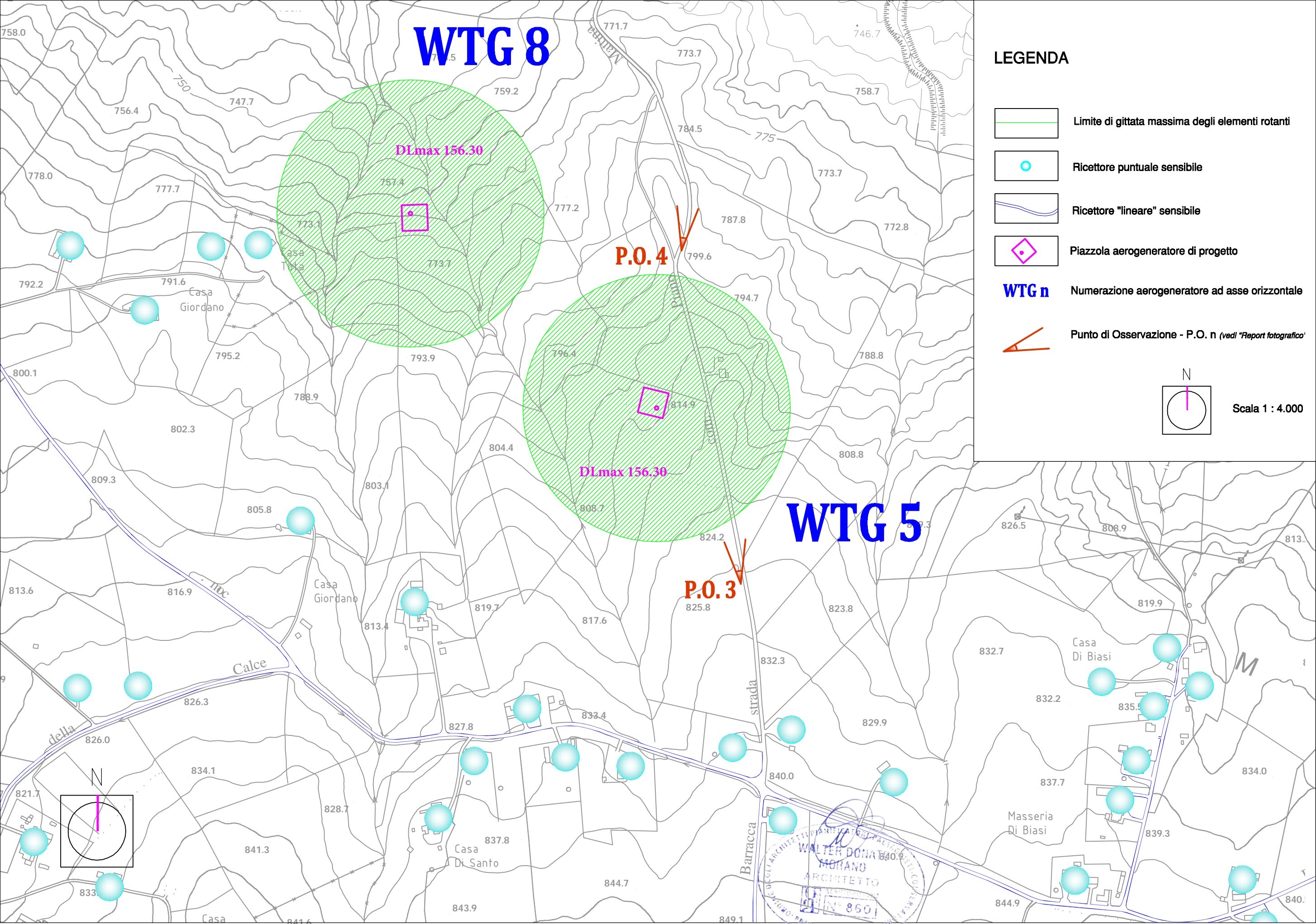
Progettazione

Arch. Walter Donato MORANO

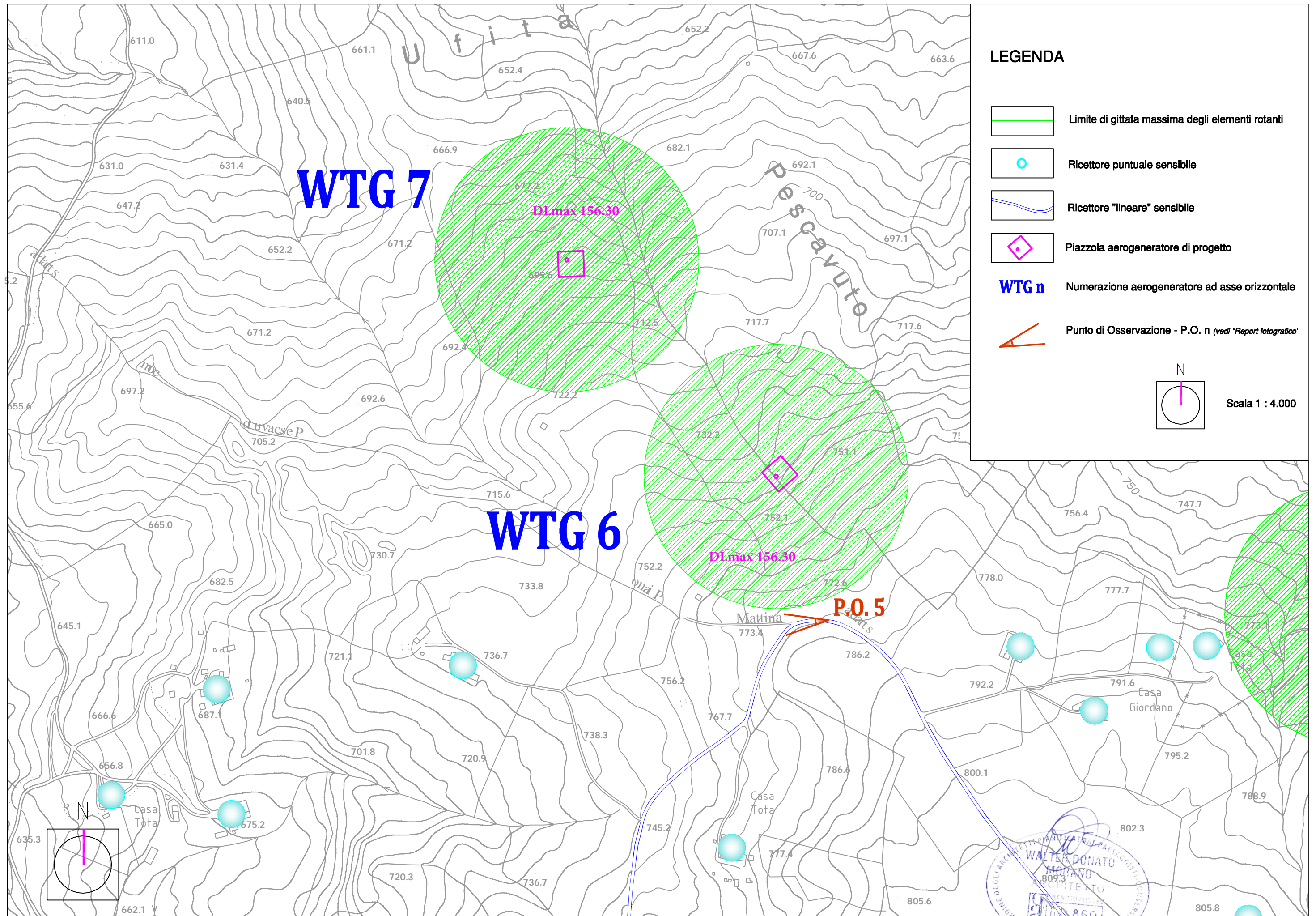










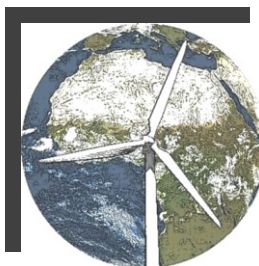




Comune di Guardia Lombardi

Località “*Piani Mattine*”

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



ALLEGATO n°2

## **Report Fotografico**

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**



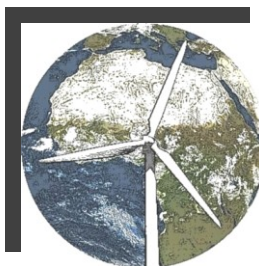
Progettazione

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”**



# 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.

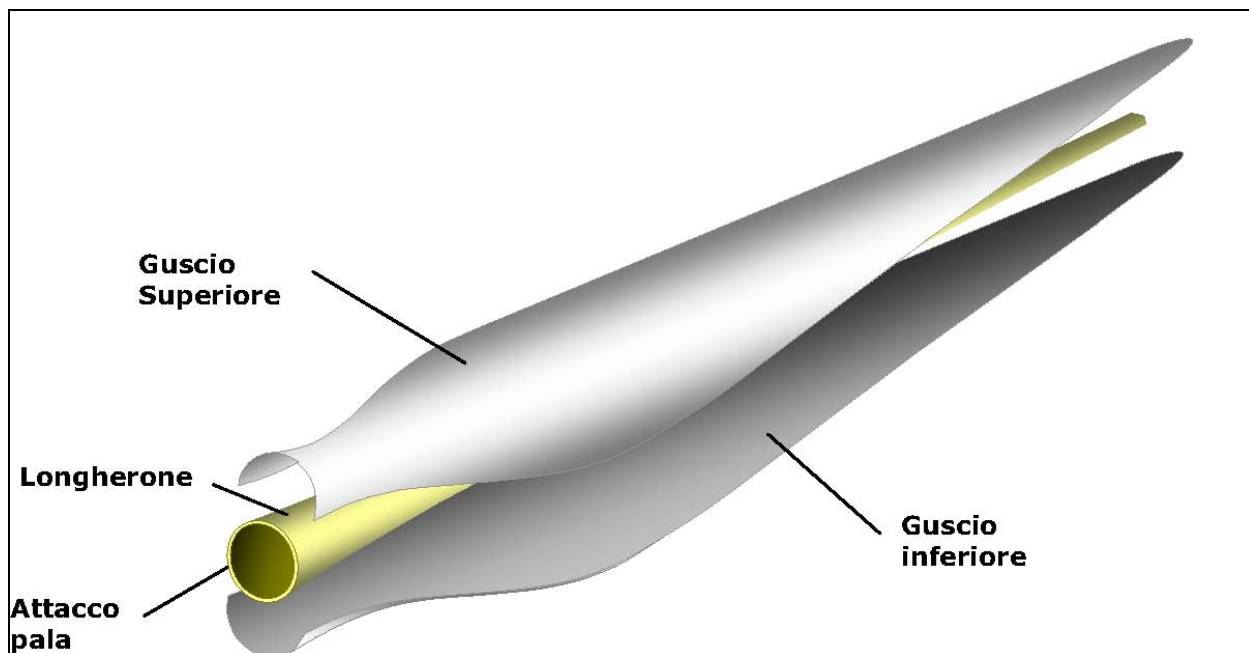
Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

### 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.

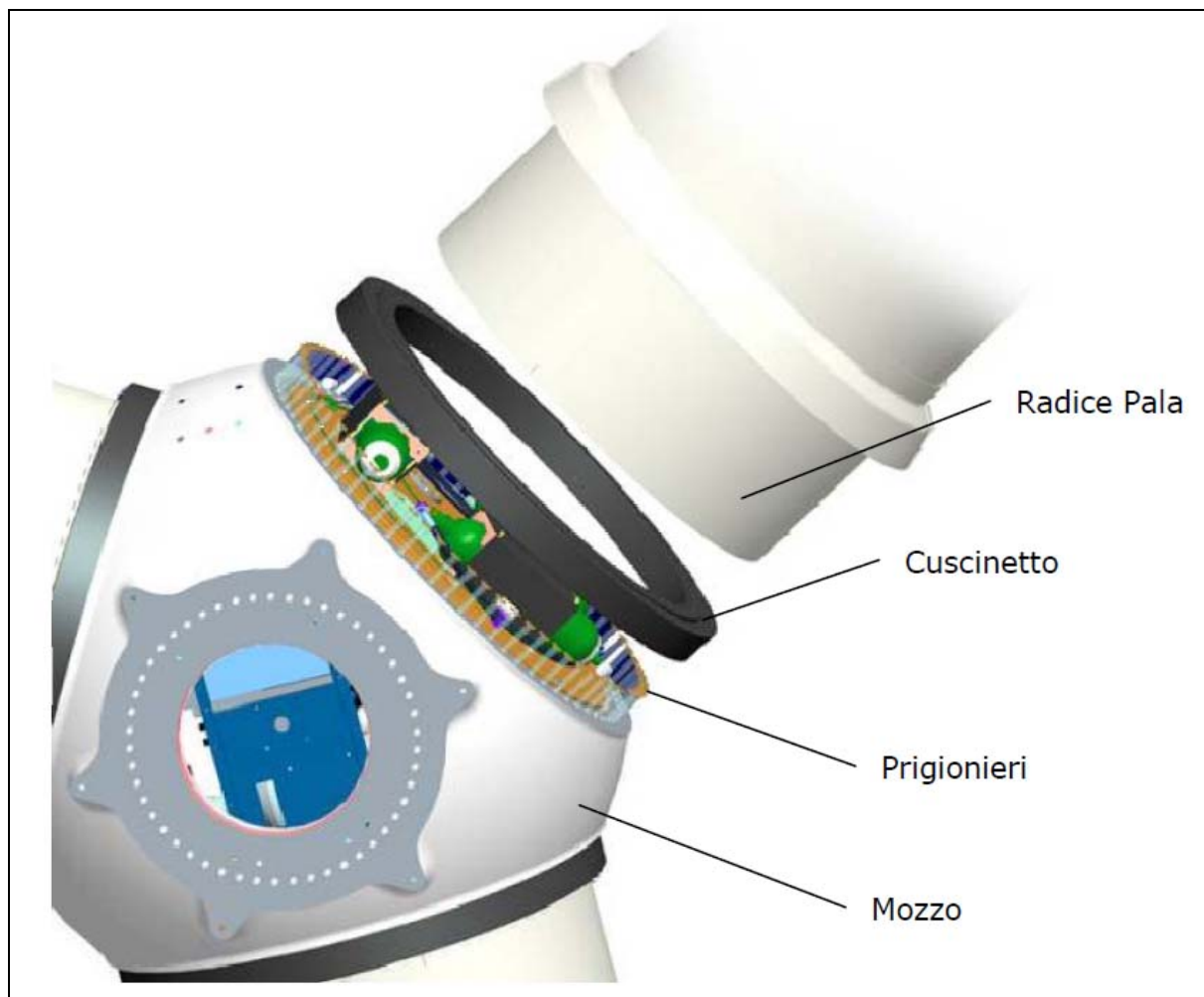


**Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica**

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



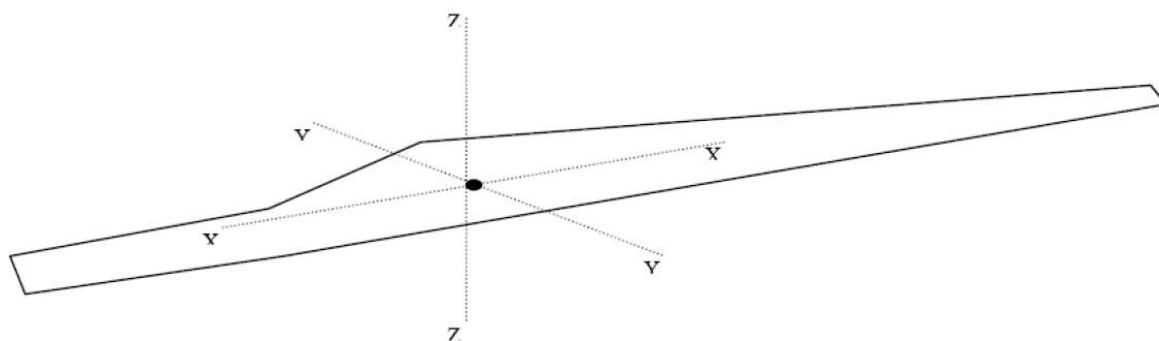
**Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.**

## 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.