



Comune di  
Tempio Pausania  
Regione Sardegna



Comune di  
Aglientu



**NUOVO IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE EOLICA  
"CAMPOVAGLIO" NEI COMUNI DI TEMPIO PAUSANIA - AGLIENTU (SS)**

**STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE**

**Acciona Energia Global Italia S.r.l.**  
Via Achille Campanile, 73  
00147 - Roma  
Phone: (+39) 06 50514225  
PEC: accionaglobalitalia@legalmail.it



PROPONENTE

**RELAZIONE MASSIMA GITTATA ELEMENTI ROTANTI**

OGGETTO



**STUDIO ROSSO  
INGEGNERI ASSOCIATI**

VIA ROSOLINO PILO N. 11 - 10143 - TORINO  
VIA IS MAGLIAS N. 178 - 09122 - CAGLIARI  
TEL. +39 011 43 77 242  
[studiorosso@legalmail.it](mailto:studiorosso@legalmail.it)  
[info@sria.it](mailto:info@sria.it)  
[www.sria.it](http://www.sria.it)

dott. ing. Roberto SESENNA  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino  
Posizione n.8530J  
Cod. Fisc. SSN RRT 75B12 C665C

dott. ing. Luca DEMURTAS  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Cagliari  
Posizione n.6062  
Cod. Fisc. DMR LCU 77E10 E441L

dott. ing. Fabio AMBROGIO  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino  
Posizione n.23B  
Cod. Fisc. MBR FBA 78M03 B594K

TIMBRI E FIRME

Coordinatore e responsabile delle attività: Dott. ing. Giorgio Efsio DEMURTAS

Consulenza studi ambientali: dott. for. Piero RUBIU

**SIATER s.r.l.** VIA CASULA N. 7 - 07100 - SASSARI



CONSULENZA



VIA IS MIRRIONIS N. 178 - 09121 - CAGLIARI

CONTROLLO QUALITA'

DESCRIZIONE	EMISSIONE
DATA	lug/2023
COD. LAVORO	576/SR
TIPOL. LAVORO	I
SETTORE	G
N. ATTIVITA'	01
TIPOL. ELAB.	RS
TIPOL. DOC.	E
ID ELABORATO	16
VERSIONE	0

REDATTO

ing. Luca DEMURTAS

CONTROLLATO

ing. Roberto SESENNA

APPROVATO

ing. Luca DEMURTAS

ELABORATO

**V.1.16**

## INDICE

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. ANALISI DEL RISCHIO DERIVANTE DALLA ROTTURA ACCIDENTALE DEGLI ELEMENTI ROTANTI .....</b>	<b>3</b>
2.1 SPECIFICHE TECNICHE .....	3
2.2 ROTTURA ACCIDENTALE DI PEZZI MECCANICI IN ROTAZIONE .....	4
<b>3. MASSIMA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI – ANALISI TEORICA .....</b>	<b>6</b>
3.1 TRAIETTORIA DEL FRAMMENTO .....	6
3.2 TEMPO DI VOLO .....	6
3.3 DISTANZA PERCORSA .....	6
<b>4. CALCOLO DELLA GITTATA .....</b>	<b>8</b>
<b>5. PROVE SPERIMENTALI E RISCHIO DI INCIDENTI .....</b>	<b>11</b>
5.1 RISCHIO DI INCIDENTI .....	11

## 1. PREMESSA

Il presente elaborato è parte integrante del progetto definitivo relativo al parco eolico, denominato "CAMPOVAGLIO" in Comune di Tempio Pausania e Aglientu (provincia di Sassari).

Il Parco Eolico è sito nel Comune di Tempio Pausania, nell'isola territoriale a nord di Luogosanto; parte del cavidotto elettrico e la stazione utente di connessione alla linea elettrica nazionale ricadono invece nel territorio confinante di Aglientu. Il progetto prevede l'installazione di 11 aerogeneratori del tipo NORDEX N163 6.X o similare. Gli aerogeneratori hanno potenza nominale fino a 7,0 MW, per una potenza complessiva del parco eolico massima di 77 MW. L'altezza delle torri sino al mozzo (HUB) è fino a 158.5 m, il diametro delle pale è fino a 163 m, per un'altezza complessiva della struttura fino a 240 m.

L'obiettivo del presente elaborato è quello di analizzare il rischio connesso al distacco degli elementi rotatori caratteristici degli aerogeneratori in progetto, per tutte le cause che possano comportare tale situazione.

Viene calcolata la distanza che teoricamente e realisticamente può raggiungere un elemento in rotazione con una data velocità, determinata dalle condizioni di esercizio della pala eolica, nel caso ipotetico di distacco dello stesso e valutato il rischio che ciò può provocare nei confronti delle strutture/infrastrutture presenti in tale raggio da ciascuna torre eolica.

## 2. ANALISI DEL RISCHIO DERIVANTE DALLA ROTTURA ACCIDENTALE DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Appare evidente che, durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio per le persone possa essere dovuto alla caduta di oggetti dall'alto.

Queste cadute possono essere dovute a:

- pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto, la sua probabilità si può considerare praticamente nulla e perciò non verrà approfondita nel seguito della trattazione.

### 2.1 SPECIFICHE TECNICHE

L'aerogeneratore NORDEX Delta4000 – N163/6.X, preso in considerazione ai fini del presente studio, è dotato di un sistema di regolazione che, agendo abbinatamente sulla velocità di rotazione e sul passo delle pale, consente di operare sempre ai valori ottimali per le condizioni correnti del vento. Il diametro del rotore, il cui asse di rotazione si trova a 158,5 m dal suolo, è pari a 163 m.

**Tabella 1 -Specifiche tecniche dell'aerogeneratore NORDEX Delta4000 – N163/6.X**

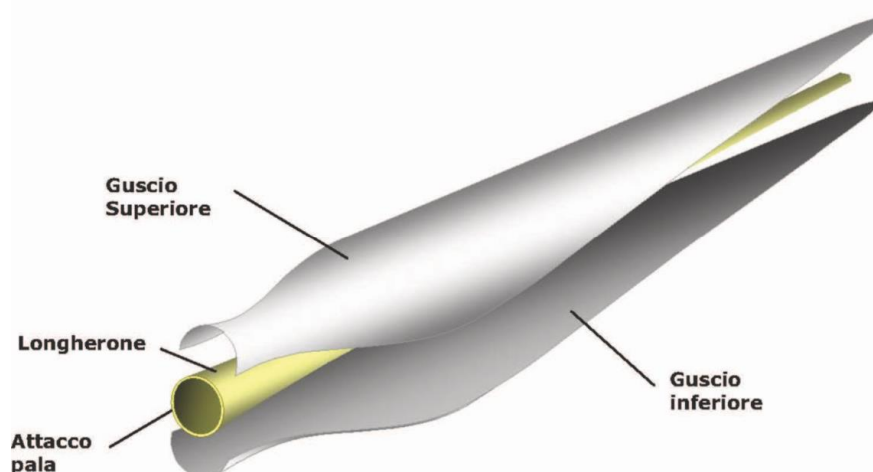
Descrizione generale	
Modello	NORDEX Delta4000 – N163/6.X
Orientamento	Sopravvento
Velocità del vento nominale	13,5 m/s
Velocità del vento di cut-out	26 m/s
Rotore	
Numero di pale	3
Diametro	163
Lunghezza della pala	79,7 m
Torre	
Altezza	158,5 m
Performance	
Potenza elettrica nominale	7,0 MW
Velocità massima del rotore	11,6 r.p.m.

La velocità del vento per cui si raggiunge la produzione nominale è 13,5 m/s con una velocità massima di rotazione di 11,6 rotazioni per minuto. La massima velocità del vento oltre la quale il rotore si ferma (velocità di cut-out) è 26,0 m/s (94 km/h).

## 2.2 ROTTURA ACCIDENTALE DI PEZZI MECCANICI IN ROTAZIONE

Viene indagato il tipo di danno che potrebbe essere provocato da elementi rotanti in caso di rottura con particolare riferimento alla gittata massima di tali frammenti.

Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzata con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche 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).



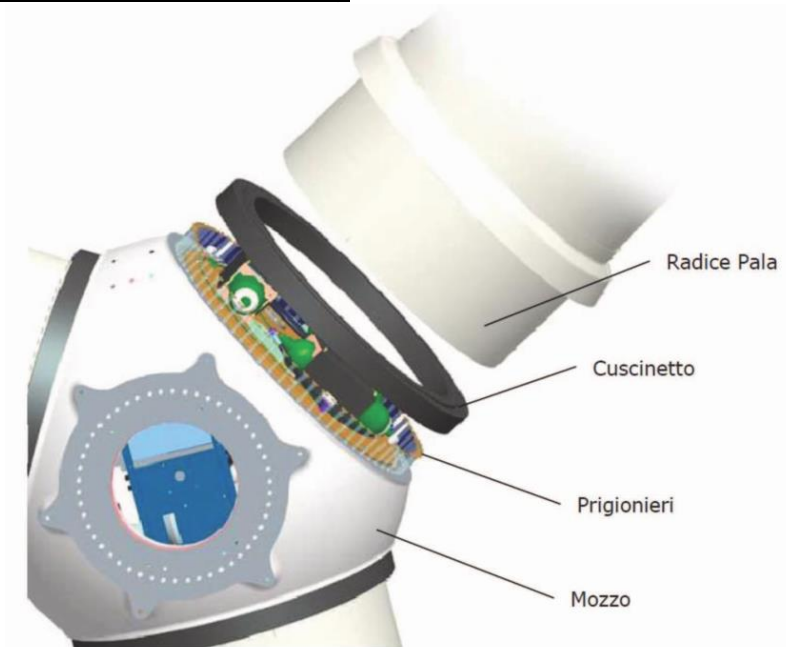
*Figura 1 - Schema strutturale di una pala eolica.*

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (guscio) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone ed i due gusci, sono uniti 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 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.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con un parafulmine. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta

(Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).



*Figura 2 - Schema strutturale di collegamento elemento pala – mozzo.*

Infatti, la rottura dell'estremità della pala si manifesta quasi sempre in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Tutte le pale prodotte dalla NORDEX Delta4000 – N163/6.X 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.

Pertanto si può sicuramente affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è bassa, seppure esistente.

### 3. MASSIMA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI – ANALISI TEORICA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a  $45^\circ$  e di moto a "giavellotto" del frammento. Le forze di resistenza viscosa agendo sulla superficie del frammento si oppongono al moto e ne riducono il tempo e la distanza di volo. A questa azione si contrappongono le forze aerodinamiche di portanza che si innescano sulla pala/sezione-di-pala distaccata (in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa), prolungando il tempo e la distanza di volo.

Il prevalere di una o dell'altra forza è fortemente dipendente dalle caratteristiche di volo: rollio, imbardata e impennamento della pala/sezione-di-pala durante il volo. L'azione della portanza può essere considerata nei calcoli schematizzandola in una riduzione percentuale di peso della parte distaccata.

#### 3.1 TRAIETTORIA DEL FRAMMENTO

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico, static & dynamic forces, static drag e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

#### 3.2 TEMPO DI VOLO

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione-di-pala immediatamente dopo il distacco - in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

#### 3.3 DISTANZA PERCORSO

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco,
- dalle forze di attrito in-plane ed out-plane che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo,
- dal tempo di volo così come definito immediatamente sopra.



Comune di Tempio Pausania e Aglientu  
Provincia di Sassari - REGIONE SARDEGNA

**NUOVO IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA  
DA FONTE EOLICA "CAMPOVAGLIO"  
NEI COMUNI DI TEMPIO PAUSANIA - AGLIENTU (SS)**

*Progetto definitivo*



La distanza in-plane dipende dalle forze di attrito e dalla componente orizzontale della velocità iniziale in-plane quando il distacco avviene in corrispondenza di un angolo di 45 gradi; la distanza out-plane dipende dalle forze di attrito e dalla velocità del vento nel momento del distacco. La somma vettoriale della distanza in-plane e della distanza out-plane permette di ricavare la distanza totale percorsa in volo dalla pala/sezione di pala distaccata.



#### 4. CALCOLO DELLA GITTATA

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco e che più si avvicina al caso reale è il modello "Complex Rotational Motion": in caso di rottura, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da escludere data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento, come peraltro si evince dallo studio eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System "VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions" (2001).

Qualora dovesse verificarsi il distacco della pala dal rotore, il moto della stessa può essere scomposto in un moto traslatorio del centro di massa e da un moto rotatorio intorno al centro stesso.

La determinazione delle forze agenti sulla pala al momento della rottura è estremamente complessa in quanto, oltre al moto rotatorio, sono da considerarsi anche le tensioni interne determinate dalla flessione della pala, la forza del vento non perfettamente ortogonale al piano del rotore e le sollecitazioni indotte dalla rotazione della navicella (yawing).

Inoltre, durante la fase di volo sarebbero da considerarsi anche i fenomeni resistivi dati dalla densità dell'aria e dalla portanza del profilo alare.

Per semplificare il problema rimanendo nelle condizioni conservative vengono fatte le seguenti ipotesi:

- moto irrotazionale: la pala non ruota intorno al proprio baricentro;
- forze resistenti nulle;
- forze inerziali: si considera solamente la forza di gravità.

Fatte tali ipotesi, la traiettoria della pala è una parabola dipendente dalle seguenti variabili:

- Velocità di lancio (V): espressa come costante dalle caratteristiche dell'aerogeneratore;
- Angolo sotteso dalla pala con il piano ( $\alpha$ );
- Altezza di lancio (h): funzione dell'altezza della torre e dell'angolo  $\alpha$ .

La gittata massima sarà quindi calcolata in funzione dell'angolo  $\alpha$  che ne massimizza l'effetto.

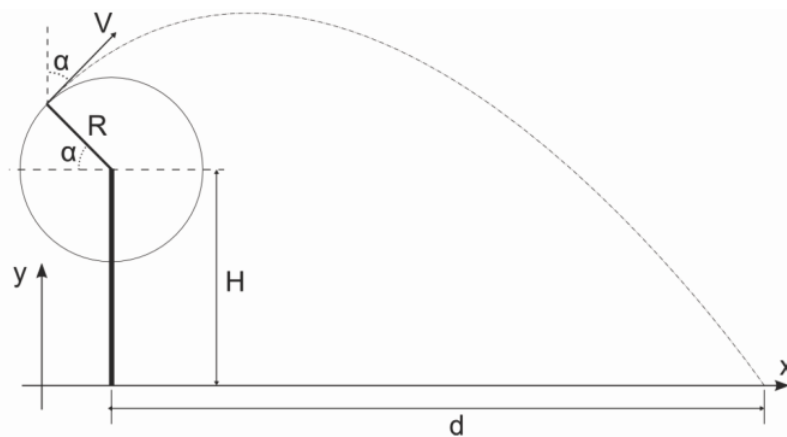
Tutte le considerazioni sono state svolte considerando una velocità di rotazione del rotore pari a 11,6 r.p.m.

Possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro della pala (R), date le caratteristiche geometriche della pala e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, sia posizionato a circa un terzo della lunghezza della pala stessa (pari a 79,5 m), corrispondente a 26,5 m dal centro di rotazione.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\alpha$  e dalla velocità tangenziale  $V$  al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}x_0 &= -R \cos(\alpha) \\y_0 &= H + R \sin(\alpha) \\ \omega &= V * \left(\frac{2\pi}{60}\right) = 1,16 \text{ rad/s} \\ V &= R\omega \\ v_x &= V \sin(\alpha) \\ v_y &= V \cos(\alpha)\end{aligned}$$



**Figura 3 – Schema della traiettoria della pala in caduta.**

Riferendosi allo schema riportato in Figura 3 e considerando la legge del moto nel piano si ha:

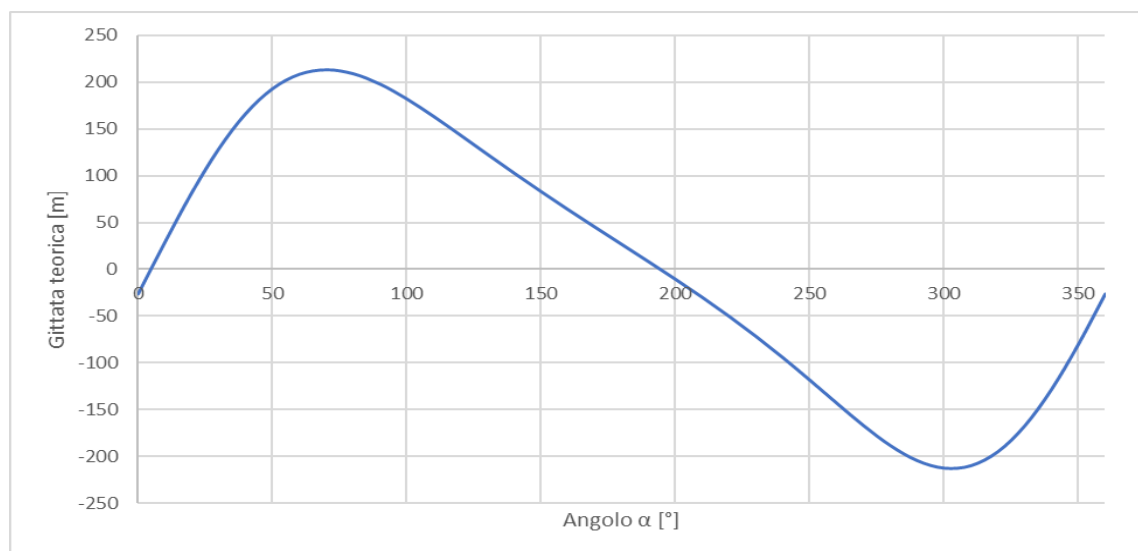
$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + x_x t \\ y(t) &= y_0 + x_y t - \frac{1}{2}gt^2 \\ t &= \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g}\sqrt{v_y^2 + 2y_0g}\end{aligned}$$

La velocità di lancio risulta, secondo le ipotesi suddette, pari a 32,2 m/s.

Ed in definitiva risulta possibile calcolare la distanza di caduta ( $d$ ) dall'asse della torre eolica, in funzione dell'angolo  $\alpha$ :

$$d = \frac{V \sin(\alpha)}{g} \left[ V \cos(\alpha) + \sqrt{V^2 \cos^2(\alpha) + 2(H + R \sin(\alpha))g} \right] - R \cos(\alpha)$$

Ipotizzando che il distacco avvenga, come detto, nelle condizioni più gravose, quindi per  $\alpha = 70^\circ$  (v. Figura 4), si determina una gittata massima teorica pari a 212,95 m con un tempo di volo (t) pari a circa 6,91 secondi.



**Figura 4 – Calcolo della gittata in funzione dell'angolo  $\alpha$  sotteso dalla pala (posizione della pala al momento della rottura).**

Lo studio, come specificato in precedenza, è stato effettuato senza tener conto degli effetti mitigativi quali attrito dell'aria, portanza, moto rotazionale della pala stessa. Da letteratura e dalle considerazioni sopra elencate è verosimile ritenere, con buona approssimazione, che nel caso reale i risultati siano minori di circa il 20% rispetto a quelli teorici ottenuti; per cautela verrà comunque considerato il caso peggiore che non considera l'attrito dell'aria.

Nel caso reale i risultati possono quindi essere riassunti in questi termini:

- Distanza teorica nel piano: 212,95 m
- Distanza reale nel piano: 170,36 m

A questi valori andremo a sommare la massima lunghezza della pala oltre al baricentro, ossia 79,5 m \* 2/3 (53 m), per ottenere infine una gittata totale del corpo pala pari a:

- Distanza teorica nel piano: 266 m

## 5. PROVE SPERIMENTALI E RISCHIO DI INCIDENTI

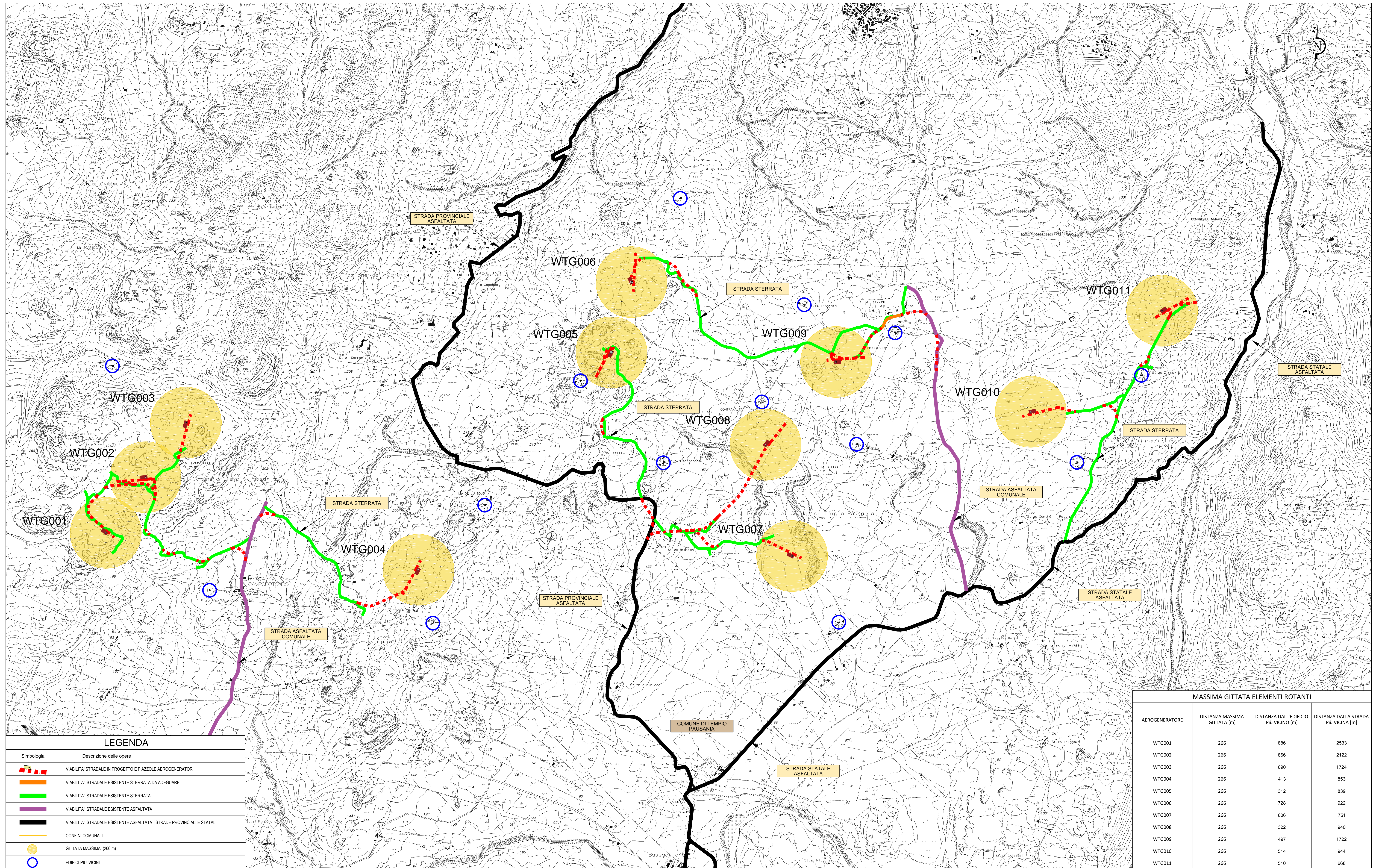
Esperienze pratiche su parchi eolici esistenti, con analisi effettuata su un lungo periodo di osservazione, hanno dimostrato che ciò che si verifica in realtà in caso di rottura di parti della pala (caso in cui la gittata risulta essere superiore al caso di rottura/distaccamento dell'intera pala) è un moto di rotazione complesso e la distanza di volo è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti attraverso i calcoli matematici. Le parti che subiscono il distacco a causa di eventi esterni come la fulminazione sono state rinvenute a non più di 40-50 m dalla base della torre eolica.

### 5.1 RISCHIO DI INCIDENTI

I principali rischi di incidente connessi con la fase di realizzazione dell'opera sono quelli tipici della realizzazione di opere in quota: carichi sospesi, cadute accidentali dall'alto. Si farà pertanto uso di tutti i dispositivi di sicurezza e modalità operative per ridurre al minimo il rischio di incidenti con ovvia conformità alla legislazione vigente in materia di sicurezza nei cantieri.

Al fine di ridurre al minimo le pur residue possibilità di impatto con elementi distaccatisi dal rotore, in fase di progettazione si è verificato il valore calcolato della gittata massima di elementi rotanti (pari a 266 m), in relazione ai seguenti elementi (vedi allegato **Tavola V.1.16 τ**):

- alla distanza da strade statali e provinciali, rispettando le indicazioni della DGR 59/90, che risultano ad una distanza di almeno  $H_{max}$  della WTG + 10%, pari a **264 m**.
- alla distanza da qualsiasi edificio abitato o effettivamente utilizzato, insistente nell'area di impianto, distanza che sarà comunque mantenuta superiore a **300 m** da ogni turbina eolica.



**LEGENDA**

Simbologia	Descrizione delle opere
	VIABILITA' STRADALE IN PROGETTO E PIAZZOLE AEROGENERATORI
	VIABILITA' STRADALE ESISTENTE STERRATA DA ADEGUARE
	VIABILITA' STRADALE ESISTENTE STERRATA
	VIABILITA' STRADALE ESISTENTE ASFALTATA
	VIABILITA' STRADALE ESISTENTE ASFALTATA - STRADE PROVINCIALI E STATALI
	CONFINI COMUNALI
	GITTATA MASSIMA (266 m)
	EDIFICI PIU' VICINI

MASSIMA GITTATA ELEMENTI ROTANTI			
AEROGENERATORE	DISTANZA MASSIMA GITTATA (m)	DISTANZA DALL'EDIFICIO PIU' VICINO (m)	DISTANZA DALLA STRADA PIU' VICINA (m)
WTG001	266	886	2533
WTG002	266	866	2122
WTG003	266	690	1724
WTG004	266	413	853
WTG005	266	312	839
WTG006	266	728	922
WTG007	266	606	751
WTG008	266	322	940
WTG009	266	497	1722
WTG010	266	514	944
WTG011	266	510	668

TAVOLA GRAFICA DELLA GITTATA MASSIMA - ELEMENTI ROTANTI  
Base carta: Carta Tecnica Regionale 1:10.000 e Catastale

