



REGIONE SICILIA



PROVINCIA DI TRAPANI



COMUNE DI MAZARA DEL VALLO



COMUNE DI SANTA NINFA



COMUNE DI SALEMI

Proponente	Geremo S.r.l.				
Progettista:	SeaWindPower			Partnered by:	
Progettazione	<p>Ing. Francesco Desiderio Lanzalaco Via A. Ognibene n. 107 92013 - Menfi (AG) seawindpower@pec.it</p> <p>Centro degli Ingegneri della Provincia di Palermo n. 4488</p>		Studio Botanico Faunistico e Agronomico	<p>Dott. For. Giuseppe D'Angelo Corso Umberto I n. 140 90010 - Gratteri (PA) g.dangelo@conafpec.it</p>	
SIA PMA	<p>Ing. Francesco Desiderio Lanzalaco Via A. Ognibene n. 107 92013 - Menfi (AG) seawindpower@pec.it</p>		V.I. ARCH.	<p>Dott. Sebastiano Muratore Via G. P. Giraldi n. 16 90123 - Palermo (PA) mutatore@pec.paropos.com</p>	
Studio Idraulico	<p>Ing. Dario Tricoli Via Carlo Pisacane n. 25/F 88100 - Catanzaro (CZ) ruwa@pec.ruwa.it</p>		Studio Geologico Geofisico ed Idrogeologico	<p>Dott. Leonardo Mauceri Via Olanda n. 15 92010 - Montevago (AG) geologomauceri@epap.sicurezza postale.it</p>	
Studio impatto acustico	<p>Ing. Maurizio V. Salvo Via Cavour n. 28 91025 - Marsala (TP) mediacom srl@gigapec.it</p>		Studio preliminare strutture	<p>Ing. Gaspare La Porta Via Rosario n. 44 92015 - Raffadali (AG) gaspare.la.porta@ingpec.eu</p>	
Opera	Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato <i>Anemos</i>				
Oggetto	Codice elaborato interno - Titolo elaborato: ANMSS0R08-00 – CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI				
00	20/01/2023	Emissione per progetto definitivo	Ing. F.D. Lanzalaco	Ing. A. Letizia	Geremo s.r.l.
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

*Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos*

INDICE

1	Introduzione.....	3
1.1	Società proponente	3
1.2	Oggetto del documento	3
2	Strutture e ipotesi dell'analisi	4
3	Calcolo gittata	5
4	Rottura di un'estremità di una pala	8
5	Aree di rischio.....	8

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

1 Introduzione

L'intervento consiste nella realizzazione di un parco eolico di potenza nominale complessiva pari a 45 MW e delle relative opere di connessione che interessa i comuni di Mazara del Vallo, Salemi e Santa Ninfa tutti in provincia di Trapani.

Il parco eolico proposto è composto dall'insieme di n. 10 aerogeneratori di potenza nominale singola di 4,5 MW collegati tramite cavidotti in MT della lunghezza di circa 34 km alla stazione di trasformazione MT/AT che verrà realizzata a circa 1,2 km dalla costruenda sotto-stazione in AT (di proprietà TERNA) denominata Partanna 3, in entrata ed esci sulla linea AT 220 kV Partanna-Fulgatore, da realizzarsi nel comune di Santa Ninfa. Tale nuova sotto-stazione rappresenterà il punto di connessione/raccolta dell'energia elettrica prodotta dai diversi impianti da fonte rinnovabile presenti o che saranno presenti nelle aree circostanti. La SE Partanna 3 sarà collegata tramite un nuovo elettrodotto AT a 220 kV che si svilupperà per una lunghezza pari a circa 9 km attraverso 18 tralicci e collegherà la SE Partanna 3 e l'ampliamento della stazione a 220 kV di Partanna. Il progetto è stato realizzato da un'altra Società incaricata ed ha ricevuto benestare da parte del Gestore di Rete nonché con D.A. n. 44/GAB giudizio positivo di compatibilità ambientale (V.I.A.) ai sensi dell'art. 25 del D.Lgs. n. 152/2006 e ss.mm.ii.

1.1 Società proponente

Il soggetto proponente è la società GEREMO SRL, costituita il 15/06/2022, ha sede legale ed operativa in Bologna (BO), alla via Milazzo n. 17 ed è iscritta alla Sezione Ordinaria della Camera di Commercio Industria Agricoltura ed Artigianato di Bologna, con numero REA BO - 564887, C.F. e P.IVA n.04045191204.

La società proponente ha per oggetto sociale lo sviluppo, la costruzione, l'acquisto, la gestione, l'esercizio e la vendita di impianti di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, nonché la costruzione di ogni tipo di infrastrutture e opere connesse e/o meramente funzionali ai detti impianti inclusi gli strumenti di misurazione delle risorse rinnovabili, nonché le attività connesse di produzione agricola finalizzate alla realizzazione e implementazione dei progetti agro-energetici.

La Società proponente ha dato mandato, per la progettazione definitiva, alle società Sea Wind Power srls e Green Go srl, socio unico della Geremo srl.

1.2 Oggetto del documento

L'obiettivo della presente relazione è la stima dell'area intorno agli impianti soggetta a rischio in caso di rottura accidentale di un elemento rotante.

I 10 impianti del parco eolico sono aerogeneratori Vestas V163, i quali presentano le seguenti caratteristiche:

Tabella 1 - Caratteristiche generali aerogeneratore Vestas V163

VESTAS V163	
Tipologia	Asse orizzontale, tripala, sopravento
Potenza nominale	4,5 MW
Altezza mozzo	118,5 m
Diametro rotore	163 m
Lunghezza pala	80,1 m
Materiale pale	Fibra di vetro rinforzata con resina epossidica
Velocità massima di rotazione	12,7 rpm

2 Strutture e ipotesi dell'analisi

Durante il funzionamento dell'impianto la caduta di oggetti dall'alto può essere dovuta principalmente a tre eventi:

- **distacco di pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala:** data la latitudine e le caratteristiche climatiche del sito, questa eventualità può essere trascurata;
- **distacco di un frammento della pala in seguito a rottura:** i materiali utilizzati per la realizzazione delle pale (fibra di vetro rinforzata con resina epossidica) riduce quasi a zero la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione; infatti, anche in caso di gravi rotture, le fibre che compongono la pala la mantengono unita in un unico pezzo, anche se danneggiato.

Inoltre, gli aerogeneratori di grande taglia, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati, che comprendono anche il controllo della presenza di fratture sulle pale, con la conseguente riparazione o sostituzione del pezzo.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno le fratture prodotte direttamente o indirettamente da fulminazioni.

Per questo motivo l'impianto è protetto, come previsto dalla norma CEI 81-1, da un parafulmine di classe I (la classe di protezione più alta), la quale assicura un livello di protezione del 98% (ovvero si ha il 2% di probabilità che in seguito ad una fulminazione si abbiano danni al sistema); le pale sono dotate all'estremità di ricettori metallici collegati ad un sistema di messa a terra, che riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni per le pale stesse.

Nel caso in cui la corrente del fulmine ecceda 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, senza comunque, in genere, distaccarsi dal corpo della pala; eventuali residui hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni realistiche su eventuali traiettorie e gittate.

- **distacco dell'intera pala dal mozzo:** questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore durante la rotazione, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) interna e da due gusci esterno, che ha essenzialmente una funzione aerodinamica. Le tre parte (il longherone e i due gusci) sono unite tra loro mediante incollaggio costituendo, alla fine del processo produttivo, un unico corpo.

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono il collegamento con il mozzo tramite bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione dell'aerogeneratore; tra i controlli previsti durante le operazioni di manutenzione vi è il serraggio dei bulloni.

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

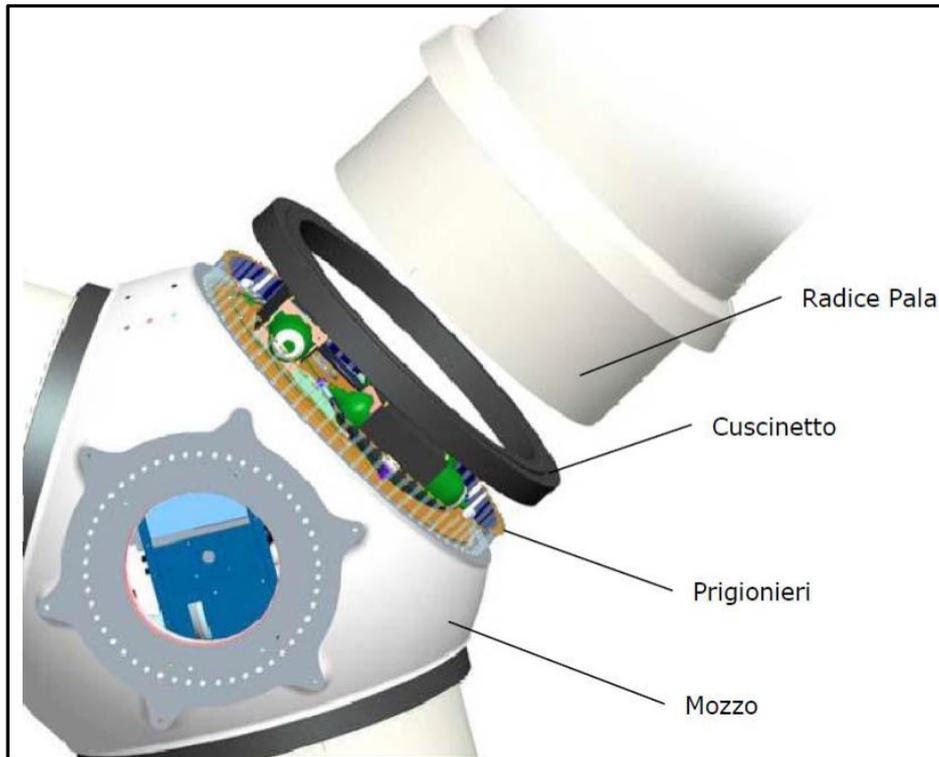


Figura 1 - Rappresentazione collegamento pala - mozzo

Considerate le caratteristiche costruttive e meccaniche della pala, si può concludere che ha senso calcolare esclusivamente il calcolo della gittata della pala intera, in quanto esiste effettivamente un punto di discontinuità nell'attacco bullonato tra le pale ed il mozzo ed è quindi ipotizzabile, seppur con una probabilità molto bassa, il cedimento di tale attacco.

3 Calcolo gittata

Per stimare la gittata della pala che si distacca completamente dal mozzo è possibile ipotizzare 3 differenti condizioni di moto:

- Moto irrotazionale con presenza delle forze d'inerzia ed assenza delle forze viscosse
- Moto irrotazionale con presenza delle forze d'inerzia e delle forze viscosse
- Moto di rotazione intorno ai tre assi principali della pala; infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, la pala tenderà a ruotare intorno al proprio asse ortogonale al proprio piano e, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, tende a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Tra le tre condizioni è la prima quella che dà luogo alla massima gittata, e quindi risulta essere la più cautelativa. Questa condizione porta ad una sovrastima del 20% rispetto ai valori che si otterrebbero considerando le forze di resistenza che si esercitano sulla pala (attrito dell'aria).

Quanto appena affermato è confermato anche da uno studio della VESTAS del 2011, attraverso il Technical report – Rev.8 – 23/12/2011 – 'Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni normali di funzionamento', nel quale sono riportate le distanze raggiunte dalla pala per 8 diverse macchine, e per ogni aerogeneratore la distanza calcolata considerando un moto ideale irrotazionale è molto superiore a quella ottenuta considerando un moto rotazionale complesso.

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

*Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos*

È quindi possibile studiare il moto della pala come moto parabolico bidimensionale di un punto materiale corrispondente al baricentro della pala stessa, il quale sarà governato dalle seguenti equazioni:

$$x(t) = x_0 + v_x t$$

$$y(t) = y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2$$

Con (x_0, y_0) la posizione iniziale del baricentro e (v_x, v_y) la velocità iniziale (nell'istante nel quale avviene il distacco dal rotore, pari alla velocità tangenziale del baricentro) e g l'accelerazione gravitazionale, pari a $9,81$ m/s.

Considerando quindi la velocità di rotazione massima durante le condizioni normali di funzionamento pari $12,7$ giri/min, il baricentro della pala ad $1/3$ della sua lunghezza rispetto alla radice ed un sistema di coordinate bidimensionale con il centro posto alla base della torre, si ottiene per ogni angolo di rotazione la seguente gittata massima:

Tabella 2 - gittata massima baricentro in funzione dell'angolo di rotazione della pala

Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]	Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]	Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]	Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]	Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]	Angolo di rotazione (°)	Distanza da base torre [m]
0	194.1	62	73.0	124	-25.8	186	-168.6	248	-147.4	310	177.8
2	190.5	64	69.6	126	-29.3	188	-173.8	250	-138.3	312	184.1
4	186.8	66	66.3	128	-32.8	190	-178.9	252	-128.7	314	189.8
6	183.0	68	62.9	130	-36.3	192	-183.9	254	-118.7	316	195.0
8	179.1	70	59.7	132	-39.9	194	-188.6	256	-108.3	318	199.6
10	175.1	72	56.4	134	-43.6	196	-193.1	258	-97.6	320	203.8
12	171.0	74	53.2	136	-47.4	198	-197.3	260	-86.6	322	207.4
14	166.9	76	50.0	138	-51.2	200	-201.3	262	-75.3	324	210.4
16	162.7	78	46.8	140	-55.2	202	-204.9	264	-63.7	326	213.0
18	158.5	80	43.6	142	-59.2	204	-208.2	266	-52.0	328	215.1
20	154.3	82	40.5	144	-63.2	206	-211.0	268	-40.1	330	216.6
22	150.1	84	37.4	146	-67.4	208	-213.5	270	-28.1	332	217.7
24	145.9	86	34.3	148	-71.7	210	-215.5	272	-16.0	334	218.4
26	141.7	88	31.2	150	-76.1	212	-217.0	274	-3.9	336	218.6
28	137.6	90	28.1	152	-80.5	214	-218.0	276	8.2	338	218.3
30	133.4	92	25.0	154	-85.1	216	-218.5	278	20.3	340	217.7
32	129.3	94	21.9	156	-89.8	218	-218.5	280	32.2	342	216.7
34	125.3	96	18.9	158	-94.6	220	-217.9	282	44.1	344	215.3
36	121.2	98	15.8	160	-99.5	222	-216.7	284	55.8	346	213.6
38	117.2	100	12.7	162	-104.4	224	-214.9	286	67.3	348	211.6
40	113.3	102	9.6	164	-109.5	226	-212.5	288	78.5	350	209.3
42	109.4	104	6.5	166	-114.7	228	-209.5	290	89.5	352	206.7
44	105.5	106	3.4	168	-119.9	230	-206.0	292	100.1	354	203.9
46	101.7	108	0.3	170	-125.2	232	-201.8	294	110.4	356	200.8
48	98.0	110	-2.9	172	-130.6	234	-197.0	296	120.4	358	197.6
50	94.3	112	-6.0	174	-136.0	236	-191.6	298	130.0	360	194.1
52	90.6	114	-9.2	176	-141.5	238	-185.6	300	139.1		
54	87.0	116	-12.5	178	-147.0	240	-179.0	302	147.8		
56	83.5	118	-15.7	180	-152.4	242	-171.9	304	156.0		
58	79.9	120	-19.1	182	-157.9	244	-164.3	306	163.8		
60	76.5	122	-22.4	184	-163.3	246	-156.1	308	171.1		

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

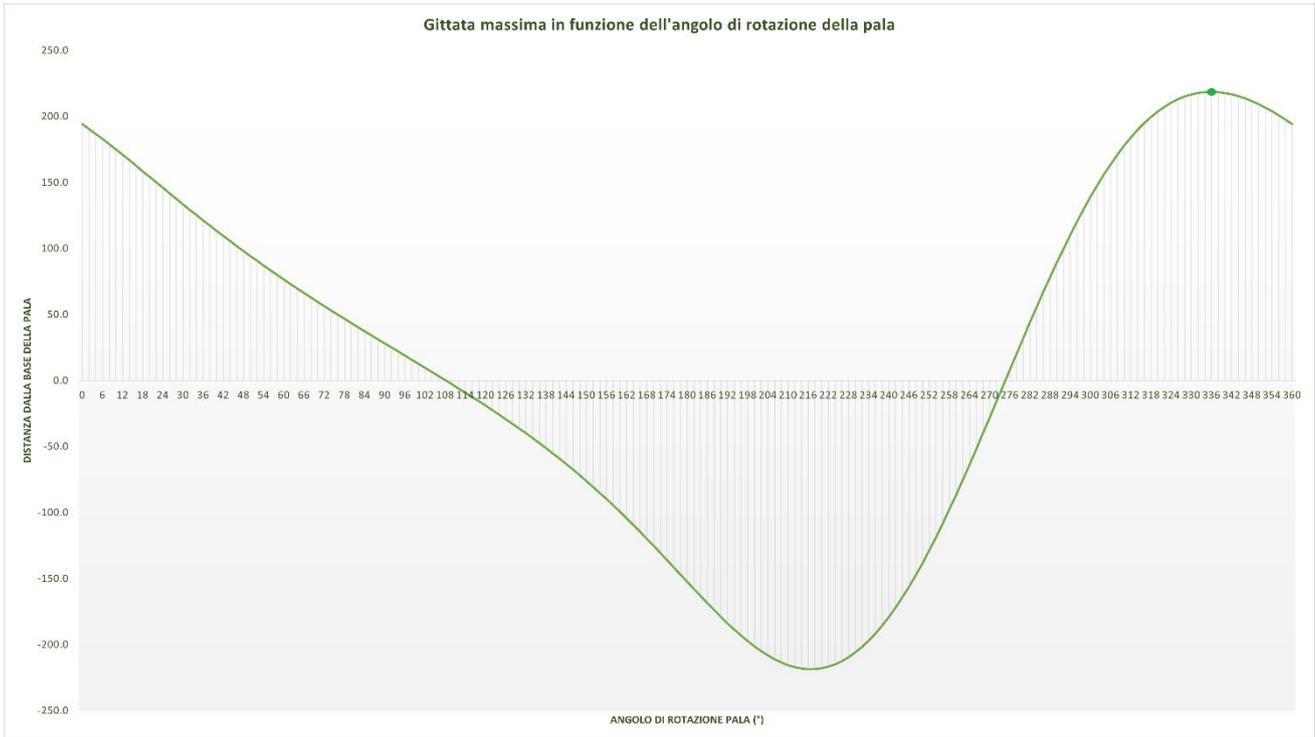


Figura 2 - Rappresentazione grafica della gittata massima della pala in funzione dell'angolo di rotazione della stessa

Si ha quindi che la massima distanza raggiunta dalla pala pari a quasi **219 m**, con un tempo di volo di circa **7 s**, corrispondente ad un angolo di rotazione della stessa pari a **336°**.

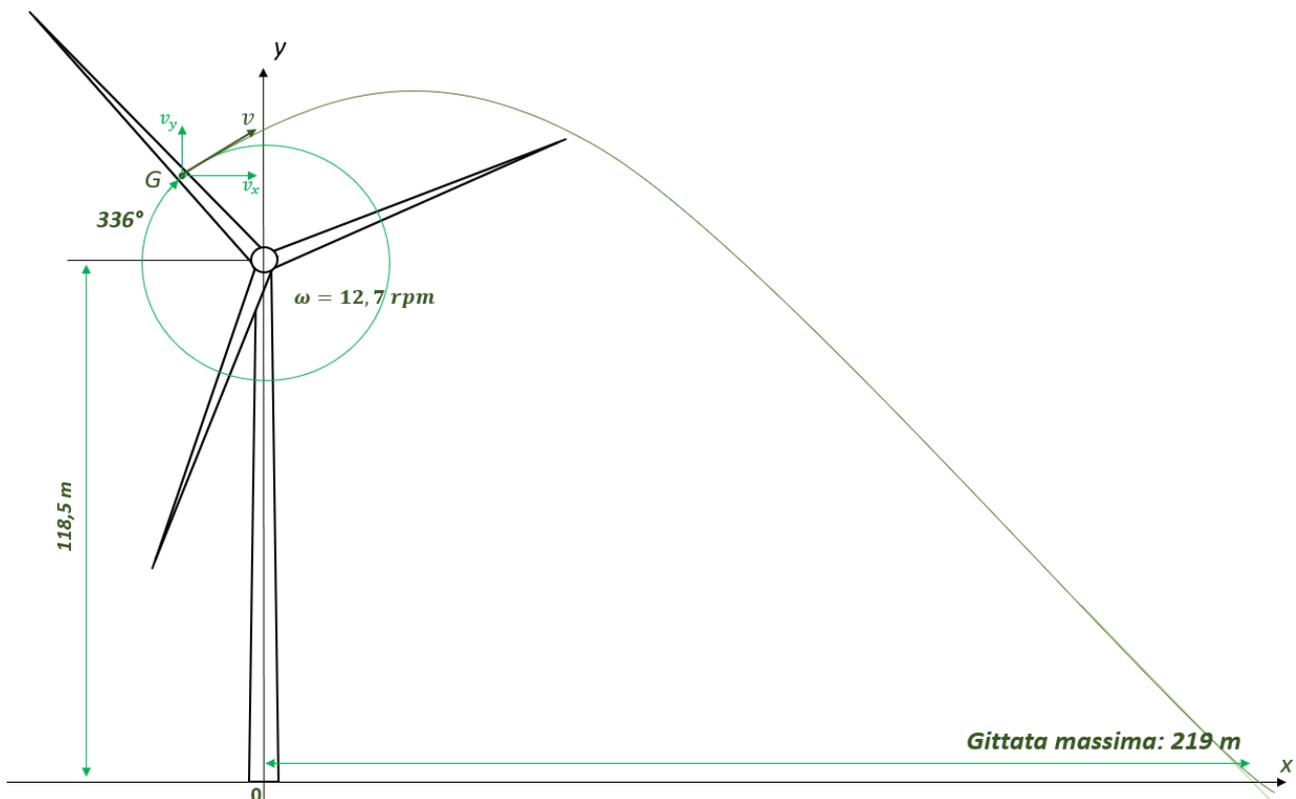


Figura 3 - Rappresentazione della traiettoria della pala

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

La stima di 219 metri calcolata è stata effettuata in condizioni molto cautelative, e quindi corrisponde ad una stima abbondantemente per eccesso, in quanto:

- Non tiene conto della resistenza dell'aria
- Non tiene conto dell'enorme dissipazione di energia che si avrebbe al momento del distacco per vincere la resistenza del vincolo della pala all'aerogeneratore.

4 Rottura di un'estremità di una pala

Come specificato nel capitolo 3, il calcolo delle gittate e traiettorie di residui o frammenti di guscio dovuti ad un evento ceraunico è difficilmente realizzabile, dovendo assumere ipotesi arbitrarie sulla tipologia e sulle dimensioni del pezzo, il cui trasporto sarebbe comunque determinato quasi esclusivamente dal vento.

Per determinare un'appropriata distanza di sicurezza da mantenere nel caso del distacco di un frammento della pala, si farà riferimento allo studio "*Wind turbine rotor fragments: impact probability and setback evaluation*" di Scott Larwood (University of the Pacific) e C.P. van Dam (University of California, Davis) in cui gli autori hanno simulato le traiettorie del frammento di pala per diverse tipologie di aerogeneratori in diverse condizioni di velocità del vento utilizzando un modello aerodinamico.

Secondo i risultati di tale studio, facendo riferimento ad un rischio accettato in sede progettuale pari a $10^{-6}/\text{anno}$ (livello di rischio "improbabile", 1 su un milione di turbine), la gittata massima del frammento di pala per turbine di potenza e dimensioni simili a quelle ipotizzate nel presente progetto, è pari a circa 1,7 volte l'altezza massima dell'aerogeneratore, corrispondente nel caso specifico a $200 \cdot 1,7 = 340$ metri.

In via cautelativa si considera una distanza di **350 metri**.

5 Aree di rischio

Si riportano infine in questo capitolo le "aree di rischio" per ogni impianto, delimitate in rosso per il distacco dell'intera pala ed in giallo per il distacco di un frammento.

Per nessun impianto risultano recettori sensibili all'interno di tali aree.

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

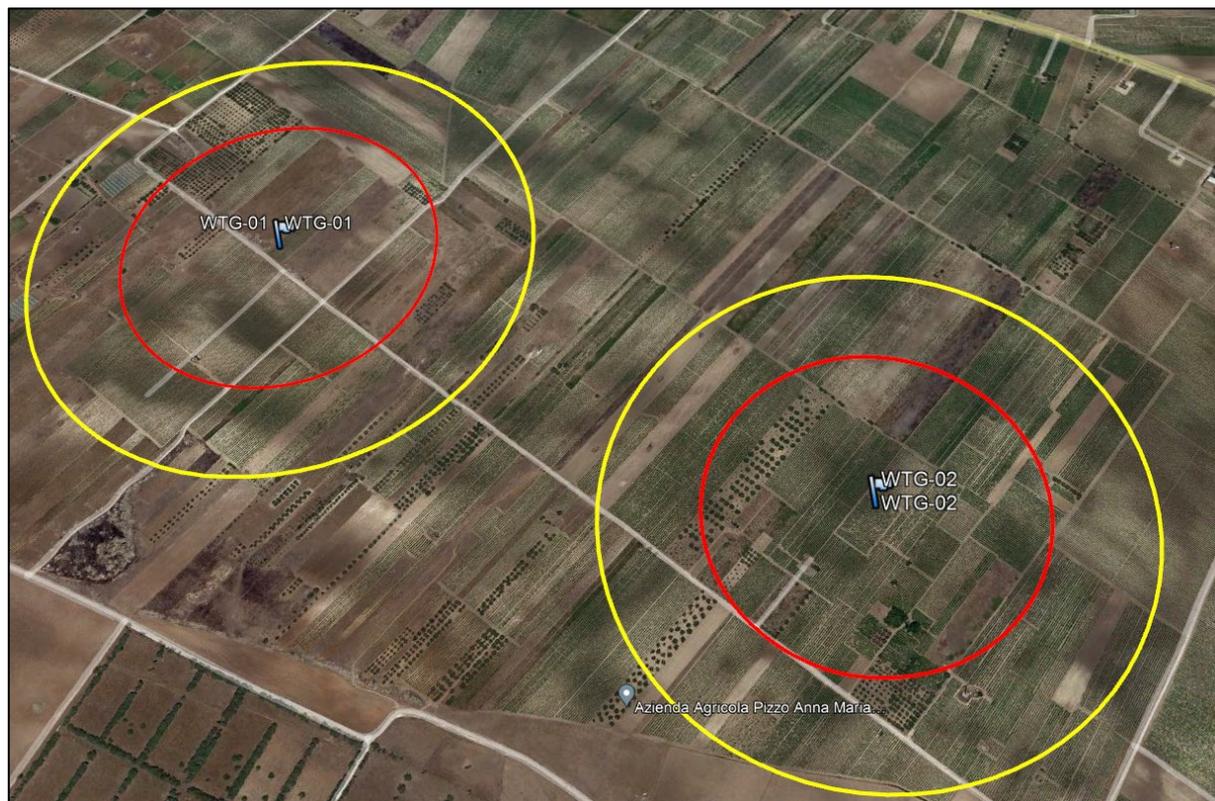


Figura 4 - Aree di rischio impianti WTG1 e WTG2

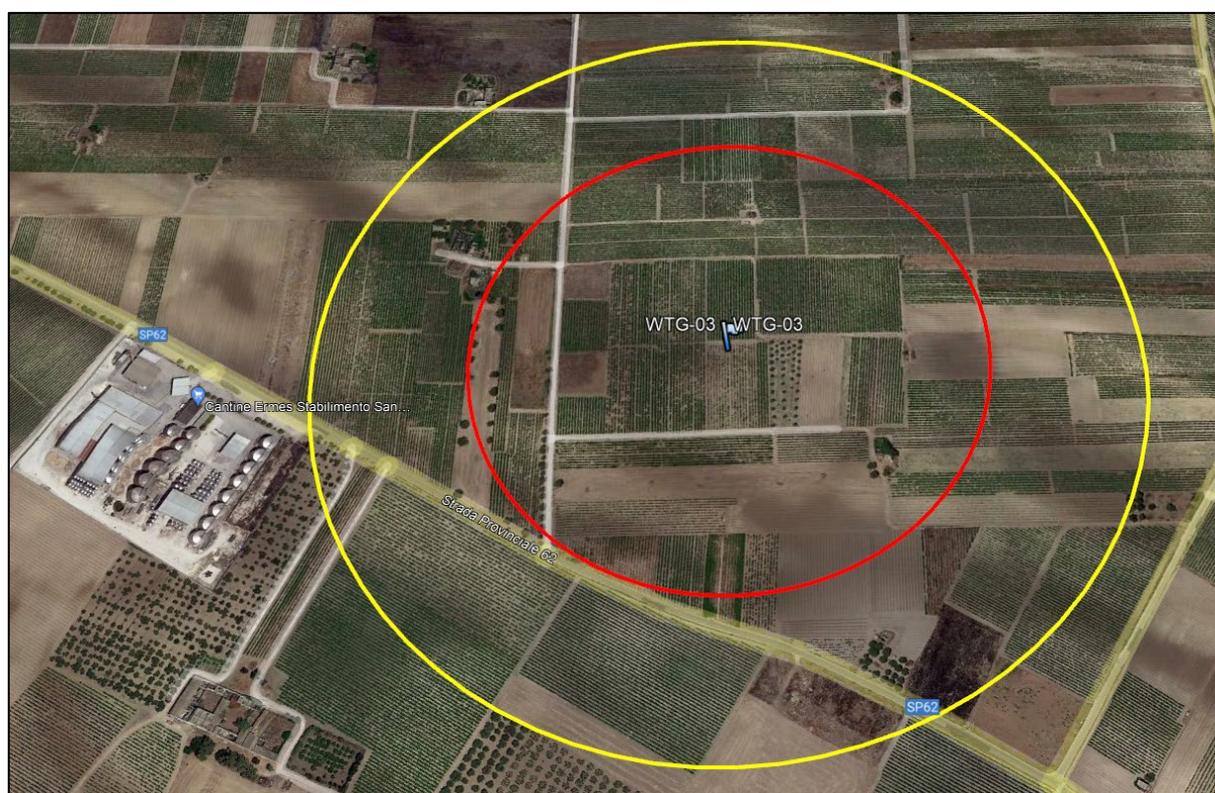


Figura 5 - Area di rischio impianto WTG3

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos



Figura 6 - Area di rischio impianto WTG4



Figura 7 - Aree di rischio impianti WTG5 e WTG6

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos



Figura 8 - Aree di rischio impianto WTG7

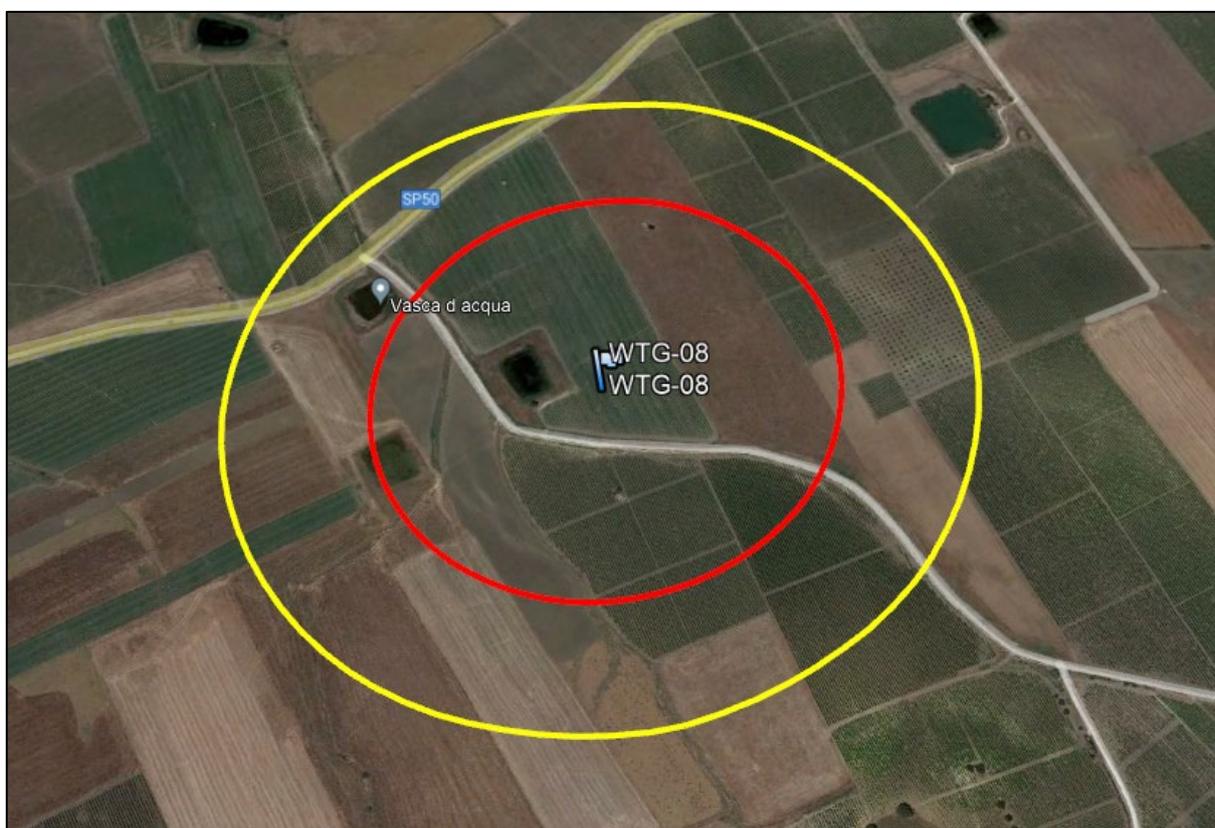


Figura 9 - Area di rischio impianto WTG8

CALCOLO GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Progetto di realizzazione di un impianto eolico e opere connesse
nei Comuni di Mazara del Vallo (TP), Salemi (TP) e Santa Ninfa (TP), denominato Anemos

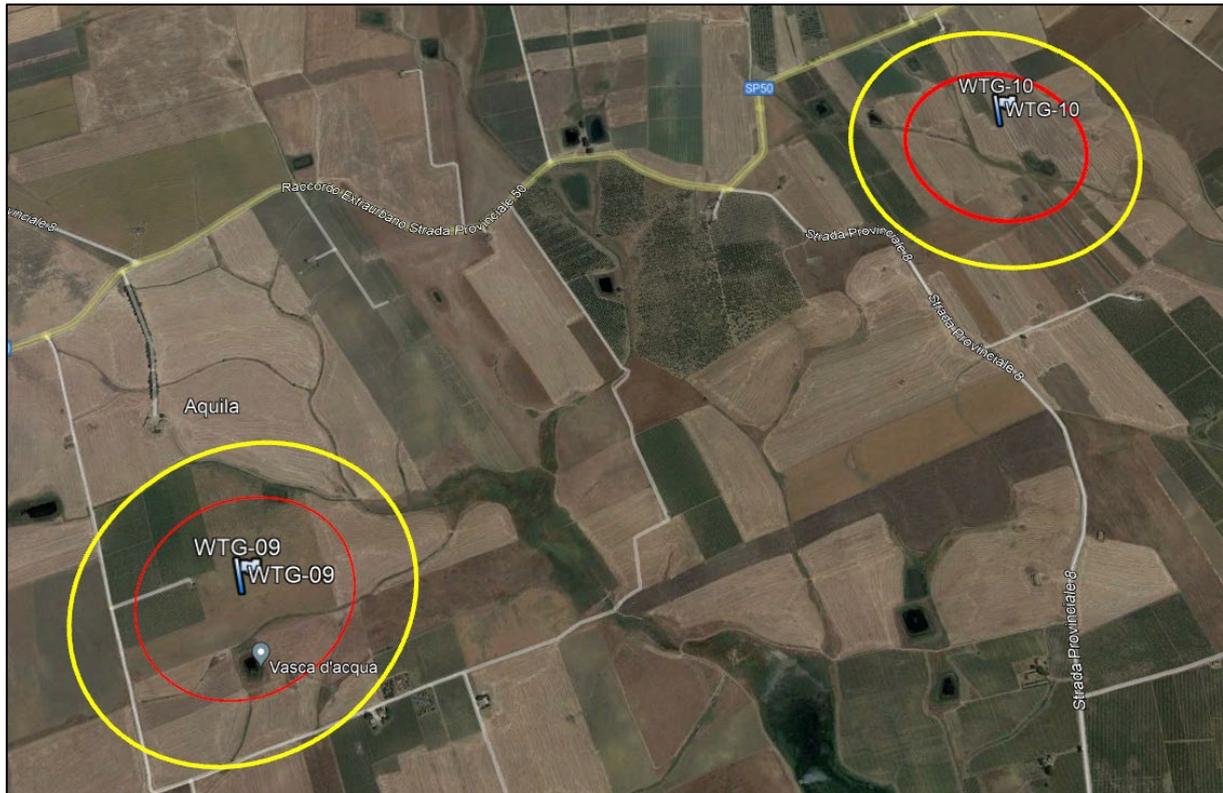


Figura 10 - Aree di rischio impianti WTG9 e WTG10