

PARCO EOLICO SV6 - BRIC DEI MORI

Il Committente: **Duferco**
Sviluppo

Sede Legale DUFERCO Sviluppo S.p.A. :
via Armando Diaz n. 248
25010, San Zeno Naviglio (BS)
P.IVA e C.F. 03594850178

Oggetto:
RELAZIONE SPECIALISTICA

Titolo:
**RELAZIONE DI ANALISI DEGLI EFFETTI DI
ROTTURA DI ORGANI ROTANTI**

Il Progettista


Dott. Ing.
SILVIO MARIO
BAUDUCCO
n. 7141 L.

Ing. Silvio Mario Bauducco

Data	Emis.	Aggiornamento	Data	Contr.	Data	Autor.
06/2024	MB	Emissione	06/2024	MP	06/2024	SMB

SCALA: N.A.

FORMATO: A4

GIUGNO 2024

Commessa	Tip. impianto	Fase Progetto	Disciplina	Tip. Doc	Titolo	N. Elab	REV
23099	EO	DE	GN	R	09	0008	A

RICERCA, SVILUPPO E COORDINAMENTO IMPIANTI EOLICI E FOTOVOLTAICI A CURA DI:


EMME CONSULTING S.r.l.s.

Sede Amministrativa e Operativa
via Benessia, 14 12100 Cuneo (CU)
tel 335.6012098
e-mail: emmecsrts@gmail.com

Geom. Domenico Bresciano

PROGETTAZIONE EDILE, AMBIENTALE, STRUTTURALE ED IMPIANTISTICA A CURA DI:


BAUTEL S.R.L.

Sede Amministrativa via Maroncelli, 23 10024 Moncalieri (TO)
tel 011.6052113 - 011.6059915 e-mail: amministrazione@bautel.it
Sede Operativa Torino - via Maroncelli, 23 10024 Moncalieri (TO)
Sede Operativa Genova - via Banderali, 2/4 16121 Genova (GE)

I Tecnici:

Coord. gruppo di progettazione
Ing. Silvio Mario Bauducco

Collaboratori

Geom. Benzoni Manuel
Per. Ind. Biasin Emanuele
Ing. Occhiuto Felice
Arch. Ostino Paolo
Arch. Pelleri Martina

File: testalini relazioni.dwg

TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI - Questo documento è di proprietà esclusiva del progettista ivi indicato sul quale si riserva ogni diritto. Pertanto questo documento non può essere copiato, riprodotto, comunicato o divulgato ad altri o usato in qualsiasi maniera, nemmeno per fini sperimentali, senza autorizzazione scritta dallo stesso progettista.

Regione Liguria
Provincia di Savona

**COMUNI DI PONTIVREA E
CAIRO MONTENOTTE**

**PARCO EOLICO
“SV6 – BRIC DEI MORI ”**

**RELAZIONE DI ANALISI DEGLI
EFFETTI DI ROTTURA
DI ORGANI ROTANTI**

DATA: 27.06.2024



IL PROGETTISTA

Ing. Silvio Mario Bauducco

INDICE

1. Premessa	4
2. Introduzione.....	5
3. Equazioni cinematiche.....	5
3.1. Dati geometrici e cinematici degli aerogeneratori.....	5
3.2. Ipotesi di calcolo.....	6
3.3. Considerazioni sulle ipotesi di calcolo.....	7
3.4. Moto di un proiettile	8
3.5. Moto di una pala.....	10
4. Risultati	12
5. Applicazione dello studio al progetto in esame	15
6. Conclusioni.....	16

1. Premessa

Il presente progetto definitivo tratta la realizzazione di un parco eolico costituito da 7 aerogeneratori da 6.2 MW ciascuno, per una potenza totale pari a 43.4 MW. L'installazione degli aerogeneratori e' prevista nei comuni di Pontinvrea e Cairo Montenotte, in provincia di Savona (SV).

La società che propone tale iniziativa, al fine di ricavare energia da fonti rinnovabili e all'insegna della transizione ecologica, è la DUFERCO Sviluppo S.p.A., con sede legale a San Zeno Naviglio (BS)– via Armando Diaz n.248, CAP 25010 - P.IVA e C.F. 03594850178.

2. Introduzione

Il presente report tratta la stima della gittata di una pala eolica nel caso di rottura della stessa. Tale situazione, seppur improbabile, è stata analizzata considerando ipotesi cautelative al fine di ottenere risultati conservativi, cioè i più pericolosi.

Nel dettaglio, la pala analizzata appartiene all'aerogeneratore prodotto dalla VESTAS (modello V162 – 6.2MW), con un'altezza da terra del mozzo (rotor HUB) pari a 125 m. Il punto di rottura è stato posto in prossimità dell'incastro delle pale con il rotor HUB, che coincide con il punto di maggiore sollecitazione meccanica dovuta, perlopiù, al momento flettente generato dalle forze aerodinamiche delle pale stesse.

Lo studio è stato condotto ipotizzando un angolo "di lancio" variabile, cioè considerando tutti gli angoli possibili di rottura della pala.

3. Equazioni cinematiche

Nel presente capitolo vengono riportati i dati geometrici e cinematici della pala, le ipotesi e i passaggi matematici necessari alla determinazione della legge del moto, e dunque alla gittata, nel caso di rottura della pala.

3.1. Dati geometrici e cinematici degli aerogeneratori

Gli aerogeneratori del campo eolico del progetto in esame, presentano i seguenti dati geometrici:

Diametro del rotore – D	162 m
Diametro del rotore HUB - d	4.65 m
Lunghezza della pala - l	79.2 m
Altezza da terra del rotore HUB - H	125 m

Tabella 1: Dati geometrici degli aerogeneratori

E i seguenti dati cinematici:

RPM del rotore – min	4.86
RPM del rotore – nom	8.83
RPM del rotore - MAX	12.1

Tabella 2: Dati cinematici degli aerogeneratori

3.2. Ipotesi di calcolo

Le ipotesi che verranno eseguite di seguito saranno cautelative, come già introdotto nell'Introduzione (Capitolo 1); tale scelta condurrà a dei risultati conservativi rispetto al caso reale.

La prima ipotesi che viene effettuata è quella di distacco netto e istantaneo nel punto di incastro della pala al rotor HUB. Tale ipotesi risulta essere particolarmente conservativa in quanto il distacco di un'ala, come di ogni altro elemento meccanico, non avviene mai in maniera netta, bensì si ha una rottura che parte da un lembo (ad esempio bordo d'uscita del profilo alare) e si protrae lungo la sezione fino al lembo opposto (ad esempio bordo d'attacco del profilo alare) in un intervallo di tempo Δt diverso da 0. Al fine di considerare la resistenza che il materiale delle pale esplica durante la rottura (maggiore rispetto al carico critico) e la resistenza aerodinamica della pala durante il suo moto in aria (proporzionale al quadrato della velocità stessa), è possibile ipotizzare una riduzione della velocità tangenziale della pala pari al 30% nel momento della rottura. Inoltre, trascurando la resistenza aerodinamica della pala durante il moto, è possibile approssimare la pala ad un punto posizionato nel baricentro della pala stessa (sistema a 3 gradi di libertà (g.d.l.)); con buona approssimazione, è possibile considerare la posizione del baricentro della pala posto a circa 1/3 della stessa, dunque a una distanza R pari a $R = d\sqrt{2} + l\sqrt{3} = 28.2m$ dal centro di rotazione.

Infine, la velocità di rotazione del rotore considerata sarà quella massima riportata dal costruttore (vedi Tabella 2).

Ricapitolando, le ipotesi effettuate sono le seguenti:

1. Distacco netto e istantaneo della pala nel punto di incastro;
2. Riduzione della velocità tangenziale della pala del 30%;
3. Sistema puntiforme con 3 g.d.l.
4. Concentrazione della massa della pala nel suo baricentro, posto a distanza R dal centro di rotazione;
5. Velocità di rotazione del rotore massima.

3.3. Considerazioni sulle ipotesi di calcolo

Generalizzando per un attimo il problema, dunque considerando la pala non come un sistema puntiforme, le equazioni del moto che ne determinano la relativa legge sono le seguenti:

$$\begin{cases} M \cdot a = F \\ I \frac{d\omega}{dt} = 0 \end{cases}$$

Equazione 1

Dove:

- M è la massa;
- a è l'accelerazione;
- I è il momento d'inerzia;
- ω è la velocità angolare.

Le equazioni riportate nel sistema dell'Equazione 1, che risultano essere rispettivamente la prima e la seconda legge della dinamica, ci permettono di affermare che:

- Il corpo segue una traiettoria determinata dalla posizione del baricentro e dalle forze agenti sul corpo;
- Il corpo, durante la traiettoria precedentemente determinata, gira indisturbato intorno al suo asse principale d'inerzia con una velocità angolare pari a quella iniziale, non influenzando sulla traiettoria che esso compie.

Tali considerazioni sono state effettuate al fine di garantire la validità dell'approssimazione di sistema puntiforme a 3gdl precedentemente effettuata per il calcolo della gittata.

3.4. Moto di un proiettile

Grazie alle ipotesi effettuate nel Paragrafo 2.2, in particolar modo alla ipotesi di sistema puntiforme con 3 g.d.l., è possibile associare al problema in questione il modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante (a causa della mancanza della resistenza aerodinamica) e che compiono un moto noto con il termine: moto di un proiettile.

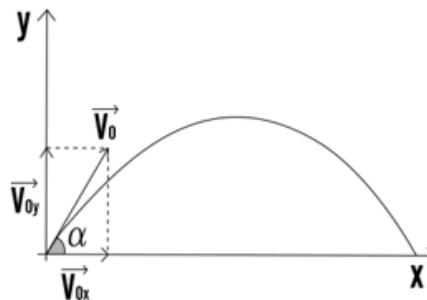


Figura 1

Il moto di un proiettile è dato dalla somma vettoriale di due differenti moti:

- Un moto longitudinale, lungo l'asse x, a velocità costante;
- Un moto trasversale, lungo l'asse z, uniformemente accelerato.

La combinazione di questi due moti fornisce un moto che nel piano X-Z presenta la caratteristica traiettoria parabolica come riportato in figura 1. La gittata è definita come la distanza che separa il punto di lancio del corpo (o proiettile, qualsivoglia) e il punto in cui esso tocca terra.

Considerando dunque un piano cartesiano X-Z ed origine O, è possibile scrivere le seguenti equazioni, che rappresentano le componenti delle accelerazioni lungo gli assi X e Z:

$$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{z} = -g \end{cases}$$

Equazione 2

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità, pari a circa 9.81 m/s^2 .

Per quanto concerne le condizioni al contorno, il corpo è lanciato dall'origine degli assi con una velocità iniziale v_0 , inclinata rispetto all'asse X di un angolo θ , dunque con una componente lungo X e Lungo Z pari rispettivamente a:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_{0z} = v_0 \cdot \sin\theta \end{cases}$$

Equazione 3

A questo punto, integrando l'Eq.2 ed applicando le condizioni al contorno, è possibile ottenere la legge del moto:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0x} \cdot t \\ z(t) = z_0 + v_{0z} \cdot t - 1/2gt^2 \end{cases}$$

Equazione 4

Ponendo $z = 0$ nella seconda dell'Eq.4 e scartando la soluzione negativa, è possibile ricavare il tempo al quale il corpo tocca terra. Sostituendo il tempo così ottenuto nella prima dell'Eq.4 è infine possibile calcolare la gittata G . Nel dettaglio:

$$t|_{z=0} = \frac{v_{0z}}{g} + \frac{\sqrt{v_{0z}^2 + 2 \cdot g \cdot z_0}}{g}$$

Equazione 5

$$G = x_0 + v_{0x} \cdot t|_{z=0}$$

Equazione 6

3.5. Moto di una pala

Note le equazioni del moto di un proiettile, è possibile specificare il problema per il caso in esame:

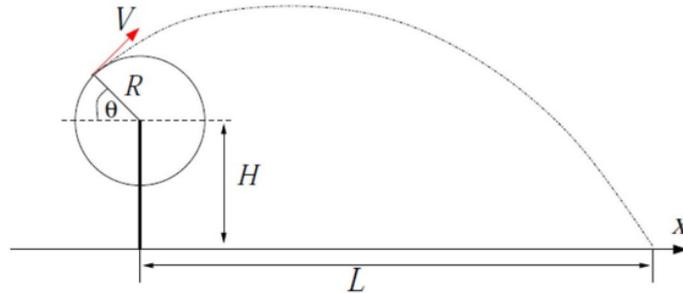


Figura 2

Facendo riferimento allo schema dell'aerogeneratore di Figura 2 e ponendo l'origine degli assi alla base dell'aerogeneratore, si ottengono le seguenti relazioni cinematiche del baricentro della pala prima della rottura della stessa:

$$\begin{aligned} x &= -R \cdot \cos(\omega t) \\ z &= H + R \cdot \sin(\omega t) \end{aligned}$$

Equazione 7

Dove:

- $R = d\sqrt{2} + l\sqrt{3}$ è la distanza del baricentro della pala dal centro di rotazione;
- H è l'altezza del rotor HUB;
- ω è la velocità di rotazione.

Al fine di calcolare la velocità del baricentro della pala prima della rottura, è necessario derivare nel tempo l'Eq.7, ottenendo:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \\ v_z &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \end{aligned}$$

Equazione 8

Imponendo il tempo di rottura $t = \bar{t}$, dunque $\omega t = \omega \bar{t} = \theta$, è possibile calcolare le condizioni iniziali, posizione e velocità, del moto della pala. Nel dettaglio, esse risultano essere eguali a:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= -R \cdot \cos(\theta) \\
 z_0 &= H + R \cdot \sin(\theta) \\
 v_{x_0} &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\theta) \\
 v_{z_0} &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)
 \end{aligned}$$

Equazione 9

Sostituendo le condizioni iniziali ottenute nell'Eq.5, è possibile calcolare il tempo di volo della pala, cioè il tempo che intercorre tra il momento della rottura \bar{t} e il momento in cui tocca terra. Nel dettaglio, risulta essere pari a:

$$t|_{z=0} = \frac{R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)}{g} + \frac{\sqrt{R^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot g(H + R \cdot \sin\theta)}}{g}$$

Equazione 10

Infine, sostituendo $t|_{z=0}$ ricavato nell'Eq.10, all'interno della prima nell'Eq.4, si ricava la gittata della pala G :

$$G = -R \cos(\theta) + R \omega \sin(\theta) \cdot \frac{1}{g} \left[R \omega \cos(\theta) + \sqrt{R^2 \omega^2 \cos^2 \theta + 2g(H + R \sin(\theta))} \right]$$

Equazione 11

L'Equazione 11 ci permette, note le caratteristiche geometriche (R, H) e cinematiche (ω) dell'aerogeneratore di calcolare la gittata della pala. È importante notare che la gittata G è funzione dell'angolo θ che la pala presenta nel momento della rottura. Al fine di determinare quale sia l'angolo θ per il quale la gitta G è massima, si procede con il calcolo dei massimi e dei minimi ponendo a 0 la derivata della gittata rispetto all'angolo θ ; cioè:

$$\frac{d(G)}{d\theta} = 0$$

Equazione 12

Che porta al seguente risultato:

$$\frac{\omega R \cos(\theta)(2gH + 3gR \sin(\theta) - \omega^2 R^2 \sin^2(\theta) + \omega^2 R^2 \cos^2(\theta))}{2\sqrt{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta) + 2g(H + R \sin(\theta))}} + \sin(\theta) \left(R - \frac{\omega^2 R^2 \sin(\theta)}{g} \right) + \frac{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta)}{g} = 0$$

Equazione 13

4. Risultati

Sostituendo i dati a nostra disposizione, riportati nel paragrafo 2.1, nella Equazione 13, è possibile ottenere i seguenti risultati:

$\Theta G_{\max} =$	65°	per Θ positivi
$\Theta G_{\max} =$	305°	per Θ negativi

Sostituendo gli angoli così ottenuti nella Equazione 11, si ottengono le gittate massime sia per i Θ positivi che per i Θ negativi:

$G_{\max} (\Theta G_{\max} = 65^\circ)$	= 223.88m
$G_{\max} (\Theta G_{\max} = 305^\circ)$	= -223.82m

Per completezza si riporta la tabella in cui sono presenti i dati ricavati dalla seguente analisi:

Θ - gradi	Θ - radianti	Seno di Θ	Coseno di Θ	Gittata (m)
0	0	0	1	-28.2
5	0.087266463	0.087155743	0.996194698	2.651838544
10	0.174532925	0.173648178	0.984807753	33.32483184
15	0.261799388	0.258819045	0.965925826	63.19023901
20	0.34906585	0.342020143	0.939692621	91.6550043
25	0.436332313	0.422618262	0.906307787	118.180354
30	0.523598776	0.5	0.866025404	142.2982378
35	0.610865238	0.573576436	0.819152044	163.6249981
40	0.698131701	0.64278761	0.766044443	181.8717099
45	0.785398163	0.707106781	0.707106781	196.8507121
50	0.872664626	0.766044443	0.64278761	208.4779622
55	0.959931089	0.819152044	0.573576436	216.7709871
60	1.047197551	0.866025404	0.5	221.8423905
65	1.134464014	0.906307787	0.422618262	223.8891204

70	1.221730476	0.939692621	0.342020143	223.1779905
75	1.308996939	0.965925826	0.258819045	220.0282729
80	1.396263402	0.984807753	0.173648178	214.7925056
85	1.483529864	0.996194698	0.087155743	207.8369032
90	1.570796327	1	6.12574E-17	199.5228735
95	1.658062789	0.996194698	-0.087155743	190.1910453
100	1.745329252	0.984807753	-0.173648178	180.1488972
105	1.832595715	0.965925826	-0.258819045	169.6625844
110	1.919862177	0.939692621	-0.342020143	158.9529973
115	2.00712864	0.906307787	-0.422618262	148.1955735
120	2.094395102	0.866025404	-0.5	137.5230307
125	2.181661565	0.819152044	-0.573576436	127.0300394
130	2.268928028	0.766044443	-0.64278761	116.7788885
135	2.35619449	0.707106781	-0.707106781	106.8053693
140	2.443460953	0.64278761	-0.766044443	97.12432163
145	2.530727415	0.573576436	-0.819152044	87.73451468
150	2.617993878	0.5	-0.866025404	78.62271078
155	2.705260341	0.422618262	-0.906307787	69.76689624
160	2.792526803	0.342020143	-0.939692621	61.1387389
165	2.879793266	0.258819045	-0.965925826	52.70537297
170	2.967059728	0.173648178	-0.984807753	44.43062344
175	3.054326191	0.087155743	-0.996194698	36.27577768
180	3.141592654	1.22515E-16	-1	28.2
185	3.228859116	-0.087155743	-0.996194698	20.16047043
190	3.316125579	-0.173648178	-0.984807753	12.11231726
195	3.403392041	-0.258819045	-0.965925826	4.008404851
200	3.490658504	-0.342020143	-0.939692621	-4.200962208
205	3.577924967	-0.422618262	-0.906307787	-12.56834941
210	3.665191429	-0.5	-0.866025404	-21.14942772
215	3.752457892	-0.573576436	-0.819152044	-30.00300919
220	3.839724354	-0.64278761	-0.766044443	-39.19070374
225	3.926990817	-0.707106781	-0.707106781	-48.7759421
230	4.01425728	-0.766044443	-0.64278761	-58.82201594
235	4.101523742	-0.819152044	-0.573576436	-69.38868511
240	4.188790205	-0.866025404	-0.5	-80.52682931
245	4.276056667	-0.906307787	-0.422618262	-92.27063796
250	4.36332313	-0.939692621	-0.342020143	-104.6270335
255	4.450589593	-0.965925826	-0.258819045	-117.5625124
260	4.537856055	-0.984807753	-0.173648178	-130.9884165
265	4.625122518	-0.996194698	-0.087155743	-144.7466991
270	4.71238898	-1	-1.83772E-16	-158.599198
275	4.799655443	-0.996194698	0.087155743	-172.2237249

280	4.886921906	-0.984807753	0.173648178	-185.2195393
285	4.974188368	-0.965925826	0.258819045	-197.1229892
290	5.061454831	-0.939692621	0.342020143	-207.4318988
295	5.148721293	-0.906307787	0.422618262	-215.6355249
300	5.235987756	-0.866025404	0.5	-221.2461891
305	5.323254219	-0.819152044	0.573576436	-223.8290549
310	5.410520681	-0.766044443	0.64278761	-223.027532
315	5.497787144	-0.707106781	0.707106781	-218.5829298
320	5.585053606	-0.64278761	0.766044443	-210.3479052
325	5.672320069	-0.573576436	0.819152044	-198.2938433
330	5.759586532	-0.5	0.866025404	-182.5126202
335	5.846852994	-0.422618262	0.906307787	-163.2133255
340	5.934119457	-0.342020143	0.939692621	-140.7145552
345	6.021385919	-0.258819045	0.965925826	-115.4328944
350	6.108652382	-0.173648178	0.984807753	-87.86820568
355	6.195918845	-0.087155743	0.996194698	-58.58635237
360	6.283185307	-2.4503E-16	1	-28.2

Tabella 1: calcoli di gittata

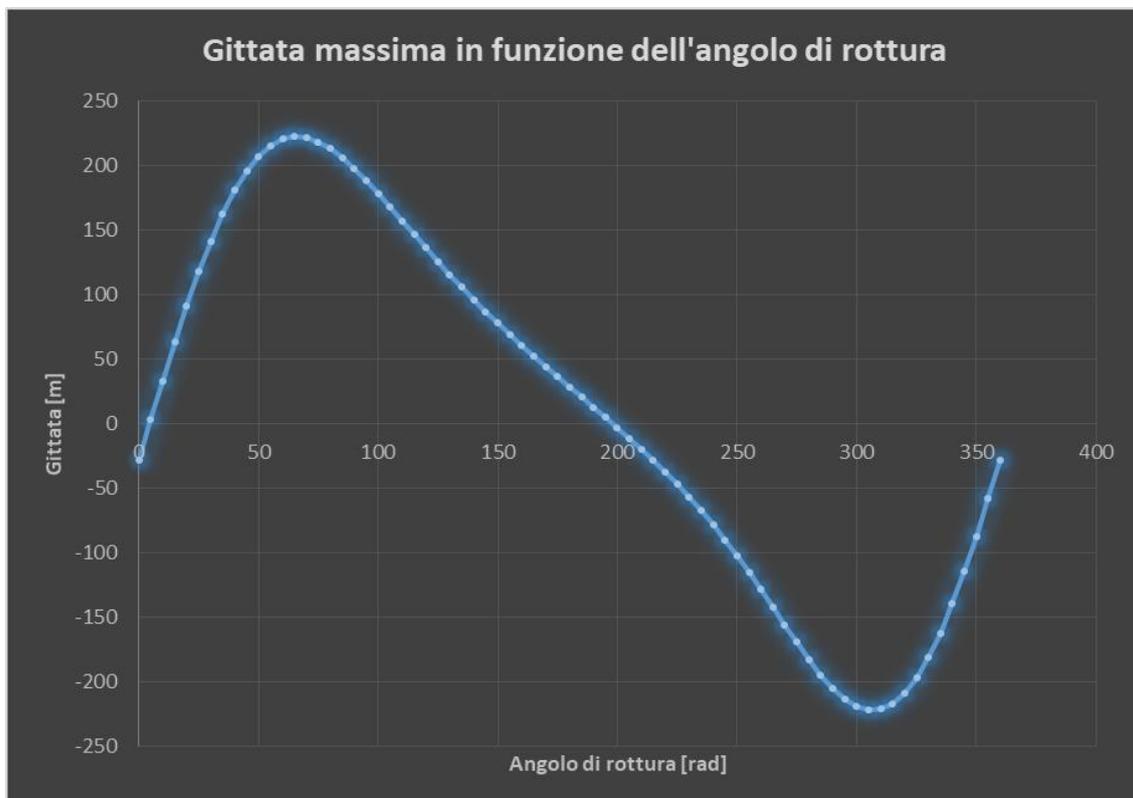


Figura 3

Si ricorda che i valori della gittata presentati sono stati determinati effettuando una riduzione del 30% della velocità della pala nel momento della rottura, al fine di tener

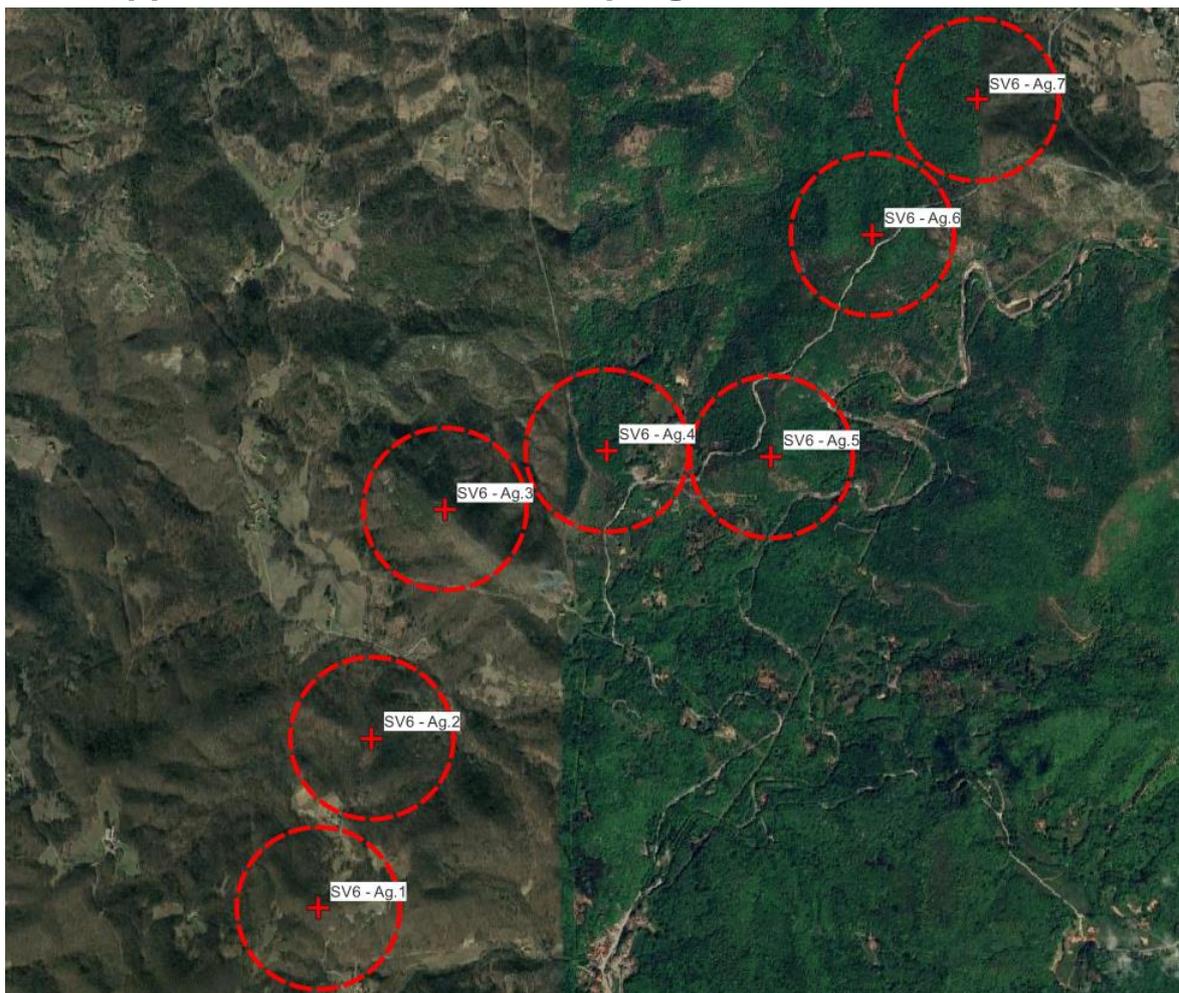
conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noti i valori di gittata massimi, il cui modulo coincide, date le caratteristiche geometriche della pala, presentate precedentemente, è possibile calcolare il punto in cui cade l'estremità della pala stessa.

Prendendo in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con il l'estremità alare nella direzione del moto, dunque con la parte più lontana del baricentro verso l'esterno, si ottiene:

$$\text{Punto massima caduta} = G_{MAX} + 2/3 l = 276.50m$$

5. Applicazione dello studio al progetto in esame



6. Conclusioni

Dai risultati riportati nel seguente report è possibile dedurre che la progettazione dell'impianto eolico ha tenuto in debita considerazione i rischi derivanti dall'eventualità, seppure remota, della rottura di una pala.

I risultati riportano che la gittata massima raggiunta dalla pala in caso di rottura in prossimità del mozzo corrisponde a **277 metri**. Tali valori sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30 %, al fine di considerare le forze resistenti del materiale e dell'attrito dell'aria.

La distanza minima degli aerogeneratori del progetto da eventuali ricettori risulta essere in ogni caso maggiori rispetto ai valori della gittata. È dunque possibile concludere che nell'ipotesi di rottura di una pala di un aerogeneratore si è in completa sicurezza.

Si tende a sottolineare come il calcolo di gittata di frammenti o porzioni di guscio della pala, risulta essere privo di basi computazionali, in quanto la determinazione delle dimensioni del reale pezzo di ala che si possa distaccare è del tutto aleatorio e non dipende da una causa specifica riconducibili ad una discontinuità, un difetto di progettazione o di realizzazione della pala. Al fine di oltrepassare questo problema si potrebbe condurre un'analisi del rischio che è un indice funzione della probabilità di occorrenza di una specifica rottura e la gravità delle sue conseguenze. L'attuazione di questa analisi sarebbe possibile soltanto se tutte le informazioni riguardanti questo tipo di eventi fossero disponibili e se la popolazione statistica, cioè il numero di eventi di cui si hanno questo tipo di informazioni, sia notevolmente ampia, cosa che non è verificata nella realtà.

Dalle analisi effettuate è possibile dedurre che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile e che per effetto degli agenti atmosferici, la fulminazione accidentale, è possibile ritrovare frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, a non più di 40-50 metri dalla base della stessa. Inoltre, secondo lo studio della DEWI OCC le percentuali di guasti annuali degli aerogeneratori, relativi alla rottura delle pale e/o a parti di esse, hanno una probabilità di verificarsi pari a $4.2 \cdot 10^{-4}$; tale valore risulta essere particolarmente cautelativo: infatti, lo studio statistico è stato condotto su un parco eolico con installazioni molto datate, anche prima del 1984, e considera le innumerevoli rotture causate dalle fulminazioni, dunque di lieve entità e bassissima pericolosità. Inoltre,

negli ultimi decenni, i metodi di progettazione e costruzioni, nonché la qualità dei materiali, sono notevolmente migliorati e rispondono a riconosciuti standard internazionali. Pertanto, la possibilità di rottura delle pale e/o di parte di esse è da ritenersi altamente improbabile e dunque i risultati a cui si è giunti sono altamente cautelativi.