



Nuovo impianto per la produzione  
di energia da fonte eolica nel  
comune di Ballao (SU)

ANALISI DELLA ROTTURA DEGLI  
ORGANI ROTANTI

Rev. 1.0

Data: Febbraio 2022

WIND001.REL044

Committente:

**Econergy Project 2 S.r.l.**  
via Alessandro Manzoni n. 30  
20121 MILANO (MI)  
C. F. e P. IVA: 10982660960  
PEC: [econergyproject2@legalmail.it](mailto:econergyproject2@legalmail.it)

Incaricato:

**Queequeg Renewables, Ltd**  
Unit 3.03, 1110 Great West Road  
TW80GP London (UK)  
Company number: 111780524  
email: [mail@quenter.co.uk](mailto:mail@quenter.co.uk)



---

**SOMMARIO**

1. Premessa .....	4
2. Dati di progetto e della componentistica .....	5
2.1. Calcolo della massima gittata .....	5
2.2. Calcolo della velocità periferica.....	6
2.3. Simulazione delle condizioni di lancio .....	7
3. Conclusioni .....	9

## 1. Premessa

La presente relazione è parte integrante del procedimento di **Valutazione d'Impatto Ambientale** ai sensi del Decreto Legislativo numero 152 del 2006, e di **Autorizzazione Unica** Regionale ai sensi dell'articolo 12 del Decreto Legislativo numero 387 del 2003 e del D. G. R. 3/15 del 23 Gennaio 2018.

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica, di potenza nominale pari a 92.4 MW, da localizzarsi su un terreno ricadente nel Comune di Ballao (CA). L'impianto verrà allacciato alla Rete Elettrica Nazionale di Alta Tensione attraverso la stazione elettrica da realizzarsi nel Comune di Ballao.

Scopo del presente documento è l'indagine sulla massima gittata verificabile in caso di rottura di un corpo appartenente al gruppo rotore dei generatori a progetto, nell'ottica di volerne valutare in maniera quanto più possibile completa gli effetti su persone o cose in un senso congruo. Partendo dalla definizione del fenomeno e individuandone i principali e più comuni fattori scatenanti, si intende quindi illustrare una simulazione canonicamente ritenuta attendibile.

La letteratura tecnica pluridecennale sui parchi eolici in esercizio e sulle condizioni ambientali sulle componenti rotanti dei generatori ha permesso di ridurre drasticamente l'evenienza di una rottura delle componenti rotanti che possa causare un fenomeno di lancio del proiettile. Le caratteristiche strutturali delle componenti sono pertanto tali da rendere assai improbabile una rottura dei corpi rotanti.

Inoltre, rispetto ai calcoli di gittata precedentemente modellati in relazioni come la presente, nei rari casi di distacco e proiezione in aria di organi rotanti, ha sempre dato luogo a episodi con conseguenze molto meno incisive di quelle ipotizzate e di gittate inferiori a quelle modellizzate.

## 2. Dati di progetto e della componentistica

### 2.1. Calcolo della massima gittata

Per una valutazione puntuale e comprensiva degli effetti in caso di rottura di un organo rotante, si considerano le concomitanze di tutte le condizioni peggiorative al contorno, così da simulare il *worst case scenario*. Si è pertanto ipotizzato uno studio del moto di un proiettile con una velocità massima pari al numero massimo di giri al minuto verificati secondo l'aerogeneratore utilizzato indicativamente a progetto, ossia il SGRE 170m.

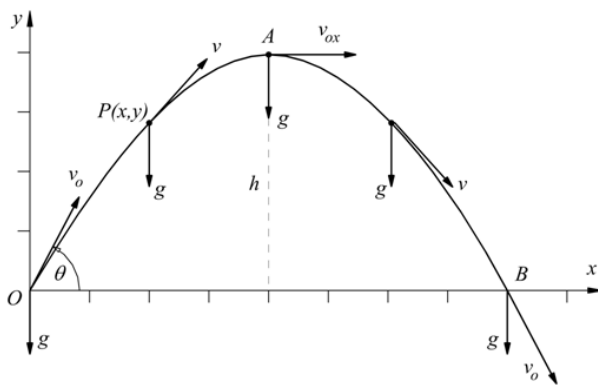


Figura 1 - Rappresentazione del moto di un proiettile

Lungo l'asse delle x il corpo osserverà un moto rettilineo uniforme, mentre lungo l'asse y il corpo seguirà un moto uniformemente accelerato.

Pertanto la componente orizzontale della velocità sarà pari a:

$$v_x = v_{x(0)}$$

Il moto lungo l'asse verticale sarà invece disciplinato da:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

La gittata massima ottenibile da un corpo sull'asse orizzontale prima di toccare terra, sarà ottenuta quando il valore lungo l'asse y è uguale a zero, e pertanto:

La resistenza dell'aria è un elemento fondamentale per l'attrito fornito dal fluido al proiettile (che nel nostro caso è rappresentato dalla pala dell'aerogeneratore), che è per definizione dipendente dalla forma e dalla velocità del corpo che viaggia nel fluido. Tuttavia, per amor di semplicità, nella prima parte di questa analisi la trascureremo.

L'organo rotante, ovvero la pala, subisce l'azione costante dell'accelerazione di gravità, mentre l'inerzia dovuta all'energia cinetica iniziale del corpo è esemplificata dall'angolo *theta* rispetto al piano orizzontale. Se ne desume che lungo

$$-\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Le due soluzioni di questa equazione, quando l'altezza di partenza  $Y_0=0$ , sono:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = -2v_{y0}/g = -(2v_0\sin\theta)/g$$

dove  $t_0$  è il momento del distacco del proiettile, mentre  $t_1$  è il momento di impatto al suolo (ipotizzato alla medesima quota del lancio) del corpo. Pertanto, considerando un valore  $x_0 = 0$ , si può riscrivere l'equazione come:

$$x = -(v_0/g) \sin 2\theta$$

Si deduce pertanto che la massima gittata sarà proporzionale all'intensità della velocità iniziale dell'organo rotante e all'angolo  $\theta$ , per questo verrà in seguito effettuato uno studio che analizza la gittata al variare di  $\theta$  tra 0 e 90.

## 2.2. Calcolo della velocità periferica

Posta la velocità di rotazione del rotore pari ad  $\omega$ , e posto  $n$  il numero di giri compiuti dallo stesso nel minuto, avremo quindi una velocità rotazionale espressa in radianti al secondo pari a:

$$\omega = (2\pi n)/60 = 1,26 \text{ rad/s}$$

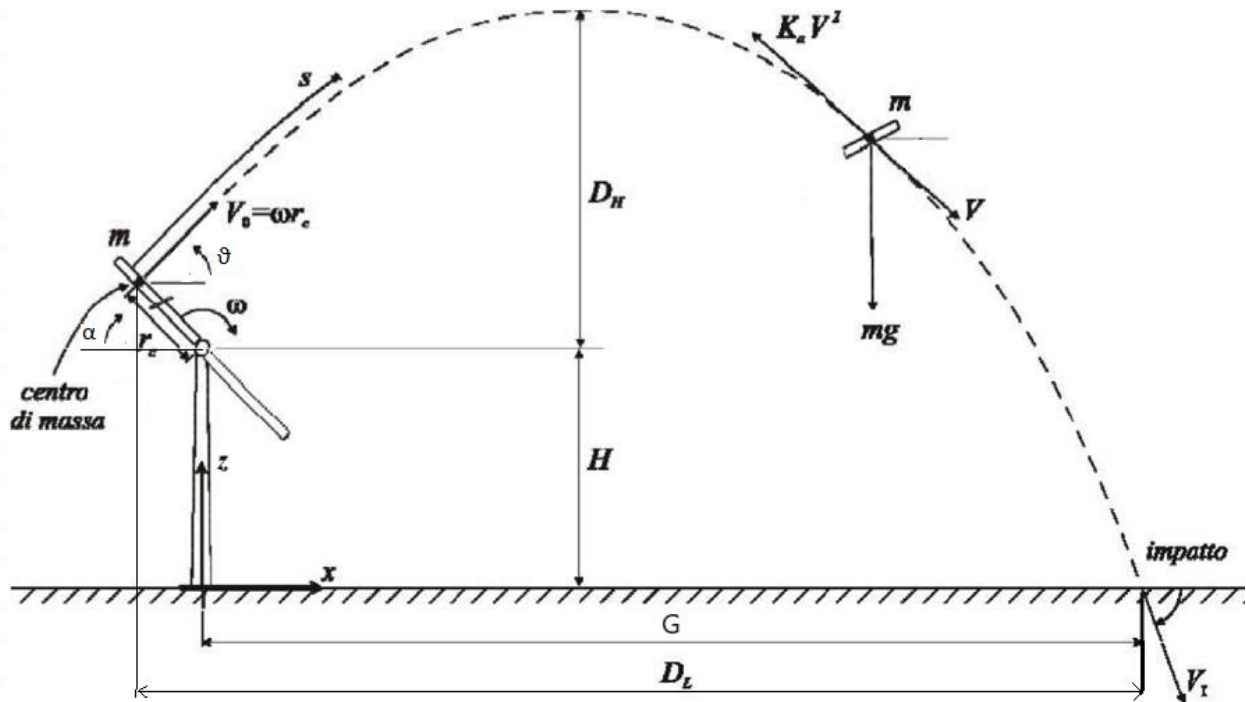
e una velocità lineare del punto estremo  $v_e$  del rotore (con  $n$  pari a 12 giri/minuto, ossia la velocità massima prevista per l'aerogeneratore a progetto), e considerando il raggio dell'aerogeneratore ovvero 85m) pari a:

$$v_e = \omega r = 106,8 \text{ m/s}$$

Considerando che il baricentro della pala è situato a circa 1/3 della lunghezza del longherone, possiamo pertanto dire che la velocità massima iniziale della pala in caso di rottura sarà pertanto:

$$v_b = \omega r = 35,7 \text{ m/s}$$

### 2.3. Simulazione delle condizioni di lancio



Scomponendo il moto della pala sugli assi orizzontale ( $x$ ) e verticale ( $y$ ), abbiamo sulla prima un moto uniforme, e sulla seconda un moto rettilineo uniformemente accelerato dalla gravità:

$$v_{xb} = \sin\theta * v_b$$

$$v_{yb} = \cos\theta * v_b$$

La gittata massima si otterrà con un alzo della traiettoria pari a 25 gradi dal piano campagna, ottenendo pertanto un tempo di caduta che si può ricavare dalla seguente formula:

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{ybt} + y_0$$

Dove  $y_0$  è il punto di quota al momento del distacco, e cioè  $135 \text{ m} + (28,33 * \cos 25^\circ) \text{ m}$ , ossia **160,68 metri**. In definitiva quindi l'equazione si risolve in un tempo di caduta a terra di **7,46 s**.

Sostituendo il dato di cui sopra nell'equazione di moto uniforme lungo l'asse  $x$  del piano campagna, otteniamo la gittata del baricentro  $G_b$  misurata da base torre pari a:

$$G_b = v_{xb}t + x_0 = 32,27 \text{ m/s} * 7,46 \text{ s} - 12,44 \text{ m} = 228,30 \text{ m}$$

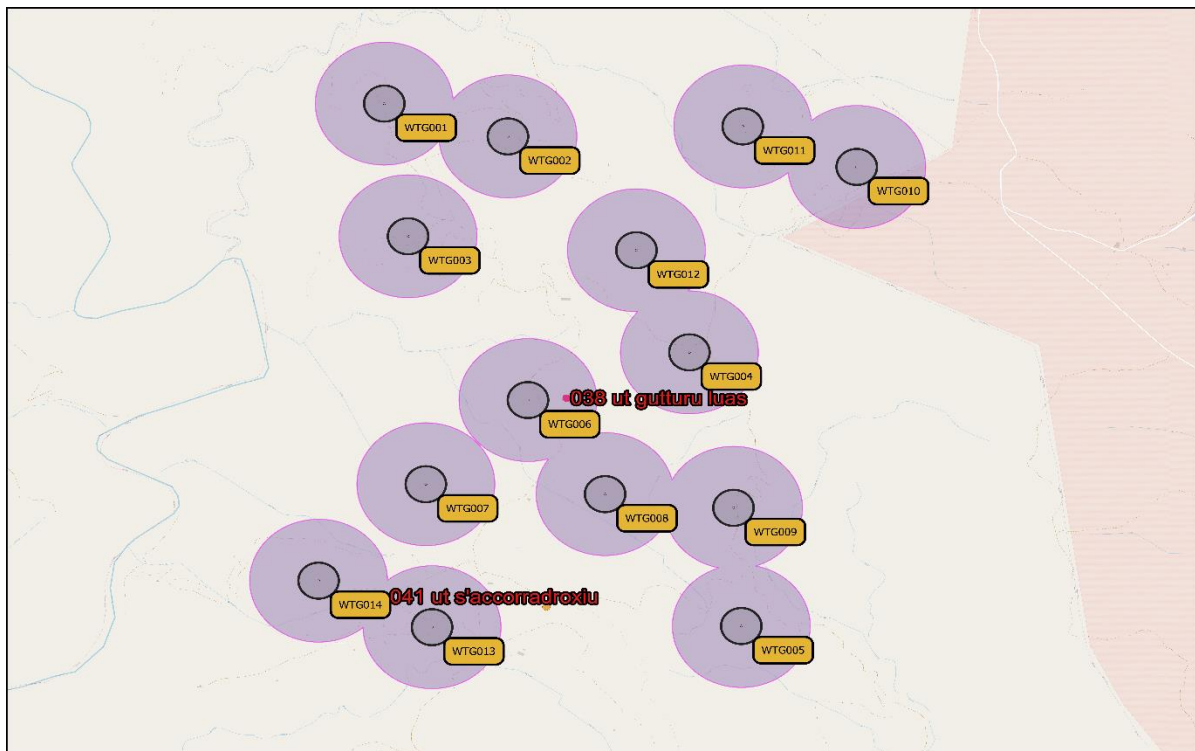
dove  $x_0$  è la distanza alla quale avviene il distacco, negativa rispetto al sistema di riferimento considerato.

A questa andremo a sommare la massima lunghezza della pala oltre al baricentro, ossia 83.33 m \* 2/3, per ottenere infine una gittata totale del corpo pala di **283,8 metri**.

Di seguito si riporta l'analisi effettuata al variare dell'angolo  $\Theta$  da 0 a 90 gradi, tramite la quale si è giunti alla conclusione che l'angolo di 25 genera la gittata maggiore.

Angolo $\Theta$ (°)	Altezza mozzo H [m]	Rotazione [rpm]	Velocità angolare [rad/s]	Raggio rotore [m]	Lunghezza pala [m]	Rg raggio baricentro [m]	Velocità baricentro (VO) [m/s]	Vxb [m/s]	Vyb [m/s]	Altezza al momento del distacco [m]	tempo [s]	DL [m]	G [m]	Gittata finale
0	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	35.604717	0	163.3333333	5.770559	205.459129	205.4591286	261.0124619
5	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	35.46923	3.103156	163.2255164	6.093647	216.13695	213.5705041	269.1238374
10	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	35.063801	6.182694	162.9028863	6.427554	225.374483	220.2611228	275.8144561
15	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	34.391515	9.215179	162.3678984	6.769026	232.797057	225.1756986	280.729032
20	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	33.45749	12.17753	161.6246243	7.11432	238.027295	227.9559421	283.5092754
25	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	32.268832	15.0472	160.6787206	7.459308	240.70315	228.2584513	283.8117846
30	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	30.834589	17.80236	159.5373864	7.799584	240.496972	225.7736386	281.326972
35	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	29.165677	20.42203	158.2093079	8.130591	237.134197	220.2442834	275.7976167
40	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	27.274795	22.88627	156.7045926	8.447739	230.41034	211.4823875	267.0357208
45	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	25.176337	25.17634	155.0346921	8.746514	220.205173	199.3832352	254.9365685
50	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	22.886271	27.2748	153.2123156	9.022584	206.493302	183.935847	239.4891803
55	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	20.422027	29.16568	151.2513324	9.271882	189.350622	165.2293247	220.7826581
60	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	17.802358	30.83459	149.1666667	9.490677	168.956426	143.4548642	199.0081976
65	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	15.047203	32.26883	146.9741841	9.675631	145.591192	118.9034486	174.456782
70	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	12.17753	33.45749	144.6905707	9.823851	119.630241	91.95942526	147.5127586
75	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	9.2151788	34.39152	142.3332063	9.932918	91.5336124	63.09031661	118.6436499
80	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	6.1826942	35.0638	139.9200317	10.00092	61.8326343	32.8332866	88.3866199
85	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	3.1031555	35.46923	137.4694127	10.02648	31.1137176	1.779104353	57.33243769
90	135	12	1.256637061	85	83.33	29.44666667	35.60471674	2.181E-15	35.60472	135	10.00875	2.183E-14	-29.44666667	26.10666667

Ne deriva che i manufatti presenti nelle aree limitrofe alle turbine si trovano fuori dal raggio di gittata calcolato, ad esclusione del UT-Gutturu Luas nei pressi della WTG001, come riportato nell'immagine sottostante.





### 3. Conclusioni

Scegliendo pertanto di modellizzare un distacco della pala con le seguenti ipotesi:

- Moto rigido non vincolato, e pertanto **conservativa**;
- Assenza di resistenza del fluido, e pertanto **conservativa**;
- Assenza di portanza;
- Urto sul terreno completamente anelastico;
- Quota di partenza del proiettile pari alla quota del mozzo dell'aerogeneratore (135 metri);
- Baricentro della pala pari a un terzo del corpo rigido a partire dalla radice di allaccio al rotore.

si deduce la gittata massima raggiunta dalla pala inteso come corpo rigido sarà di 283,8 metri misurati da base torre e che questa lunghezza sia inferiore alla distanza dei generatori a progetto dai manufatti o dai corpi possibilmente frequentati non rappresentando pertanto elemento di pericolo in caso di distacco degli elementi rotanti dal generatore.