

Parco eolico “SCOLPITO”
Comune di Comune di Brindisi (BR)

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA
DEGLI ORGANI ROTANTI

Ing. Alberto Voltolina

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	CALCOLO GITTATA	5
2.1	Ipotesi di Calcolo	5
2.2	Formulazione Analitica	6
2.3	Calcolo della Gittata	8

In letteratura si riportano pochissimi casi di danni causati dal distacco delle pale (o di frammenti di esse), in caso di rottura accidentale. Anche se trattandosi di un evento eccezionale ed accidentale, come ogni attività umana, esistono dei rischi connessi, che vanno valutati. La presente relazione stima la gittata massima che un frammento (o la pala intera) staccandosi dall'aerogeneratore. Tutte le analisi considerano, a favore di sicurezza:

- Si trascurano effetti dovuti all'attrito viscoso dell'aria sulla pala;
- Si trascurano fenomeni di avvvitamento del corpo durante il volo;
- Si trascura la dissipazione di energia al momento del distacco, quindi con la conservazione totale della quantità di moto;
- Il frammento è rappresentato dal suo centro di massa (punto materiale);
- Si trascurano effetti dei rimbalzi delle pale, una volta impattate a terra;
- La velocità del vento è costante rispetto tutta l'altezza dell'aerogeneratore.

Da esperienze sperimentali, e da modelli fluidodinamici è emerso che trascurare tali fenomeni, porta ad una sovrastima la gittata di circa un 20% rispetto a modelli più sofisticati (ed aderenti alla realtà). Inoltre, secondo "WindFarm Safety in Australia, May 2004", la gittata dipende ovviamente dall'altezza del mozzo da terra, ma comunque non supera i 300m.

La possibilità che parti della turbina, o frammenti di ghiaccio, formatisi su di essa, cadano entro un raggio di 210 metri è pari a 1:10.000.000, valore paragonabile alla possibilità della caduta di un fulmine (Taylor and Rand, 1991)

Gli aerogeneratori che si utilizzeranno sono provvisti di sistemi di sicurezza che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica.

2 CALCOLO GITTATA

2.1 Ipotesi di Calcolo

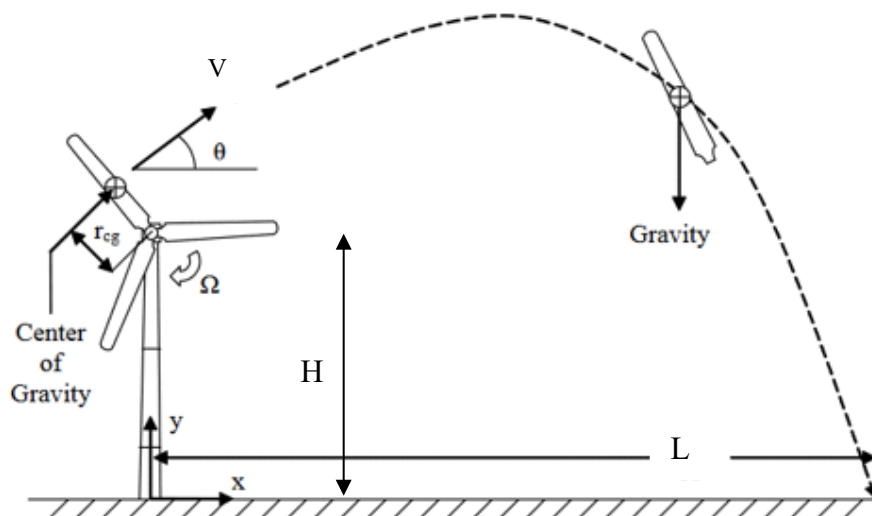
Per il problema oggetto di studio, sono possibili 3 configurazioni di volo:

- **Caso 1:** secondo la teoria del moto dei proiettili, in assenza di attriti con l'aria, avvitamenti e moti rotazionali del frammento attorno a qualsiasi asse. Traiettoria del proiettile complanare al piano del rotore;
- **Caso 2:** secondo la teoria del moto dei proiettili, in assenza di attriti con l'aria, avvitamenti e moti rotazionali del frammento attorno a qualsiasi asse. Traiettoria del proiettile complanare al piano del rotore ma frammento di pala ortogonale rispetto al piano del rotore;
- **Caso 3:** secondo la teoria del moto dei proiettili, in assenza di attriti con l'aria, considerando avvitamenti e moti rotazionali del frammento attorno a qualsiasi asse (molto probabile che si verifichi con la conservazione del momento angolare) . Traiettoria del proiettile complanare al piano del rotore ma frammento di pala ortogonale rispetto al piano del rotore.

A favore di sicurezza si considera il Caso 1, che trascurando attriti e avvitamenti, porta a determinare una distanza a cui può cadere il frammento staccatosi dall'aerogeneratore, maggiore. Si considera il frammento di pala, sottoposto alla teoria del moto dei proiettili, condensando tutte le proprietà dell'oggetto nel suo centro di massa, e considerandolo come corpo rigido. Evidenze sperimentali e di fluidodinamica computazionale, riportano una sovrastima della distanza, trascurando attriti e avvitamenti, di circa il 20% (margine ulteriore di sicurezza).

Il moto dei proiettili considera una traiettoria parabolica, determinata dalla somma di due moti rettilinei contemporanei:

- rettilineo uniforme in direzione X (conservazione dell'energia, della velocità iniziale e totale assenza di attriti)
- rettilineo uniformemente accelerato in direzione Y (grave in caduta libera in totale assenza di attriti)



I parametri che influiscono sulla gittata della pala risultano essere:

- numero di giro del rotore;
- altezza del mozzo del rotore da terra;
- posizione della pala al momento del distacco;
- dimensione del frammento distaccato.

2.2 Formulazione Analitica

Si definiscono le equazioni del moto per il punto materiale, soggetto a forze inerziali gravitazionali:

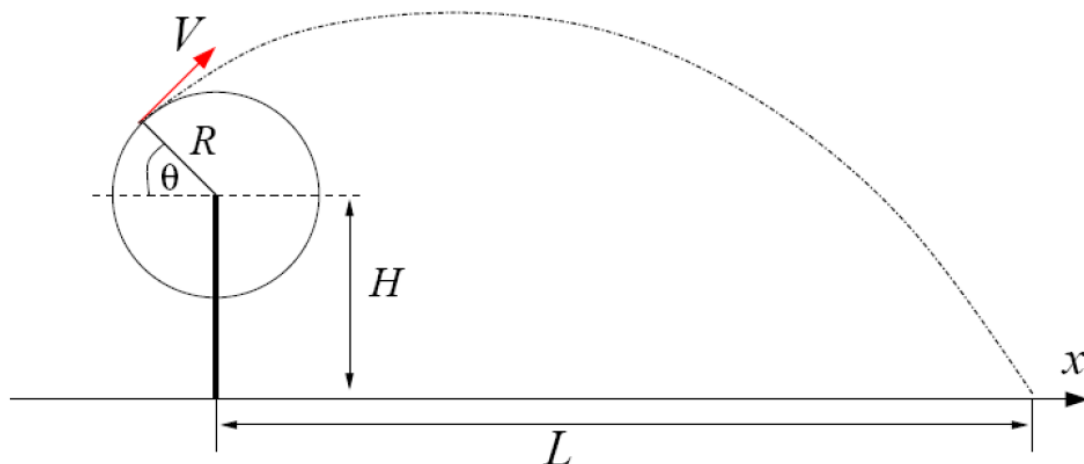
$$\begin{cases} x'' = 0 \\ y'' = -g \end{cases} \quad \left(g = 9.81 \frac{m}{s^2} \right)$$

Sviluppando la legge del moto dei proiettili si ottiene la seguente forma:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_x \cdot t \\ y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

Dove il vettore $(x_0 ; y_0)$ identifica la posizione iniziale del punto materiale, mentre il vettore $(v_x ; v_y)$, la sua velocità in funzione del tempo. Il punto materiale analizzato, nella sua traiettoria, intercetta il suolo ad un tempo t , tale per cui $y(t) = 0$. Con tale condizione al contorno è possibile, sviluppando il sistema, ottenere la seguente espressione:

$$t = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$



Utilizzando come condizioni al contorno, l'angolo θ (rispetto all'orizzontale) al momento del distacco e la sua velocità iniziale V , si perviene al seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} x_0 = -R \cdot \cos(\theta) \\ y_0 = H + R \cdot \sin(\theta) \\ v_x = V \cdot \sin(\theta) \\ v_y = V \cdot \cos(\theta) \end{cases}$$

Dove R è pari alla distanza tra l'asse del mozzo e il baricentro del frammento di pala che si stacca (identificato con un punto materiale).

La distanza di impatto al suolo si verifica alla distanza orizzontale L (dall'asse del mozzo), secondo:

$$L = x(t)$$

Sostituendo l'espressione di t , già ricavata prima; e sviluppando l'equazione, si ricava la distanza L , in funzione dei due parametri V e θ :

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

La velocità iniziale, al momento del distacco, è possibile ottenerla con la seguente formulazione:

$$V = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot rpm}{60}$$

Si sono analizzati varie configurazioni di angolo di distacco (36 configurazioni, a step di 10°). La configurazione di rottura (distanza tra mozzo e baricentro della porzione separata), essendo L_P la lunghezza della pala, pari a $\frac{L_P}{3}$.

Condizione derivante dalla costruzione stessa del componente.

Si noti che il centro di massa della pala, considerando anche l'inserto in acciaio all'attacco del rotore, oltre che lo sviluppo del resto della pala in fibra alleggerita, risulta posto ad $\frac{L_P}{3}$.

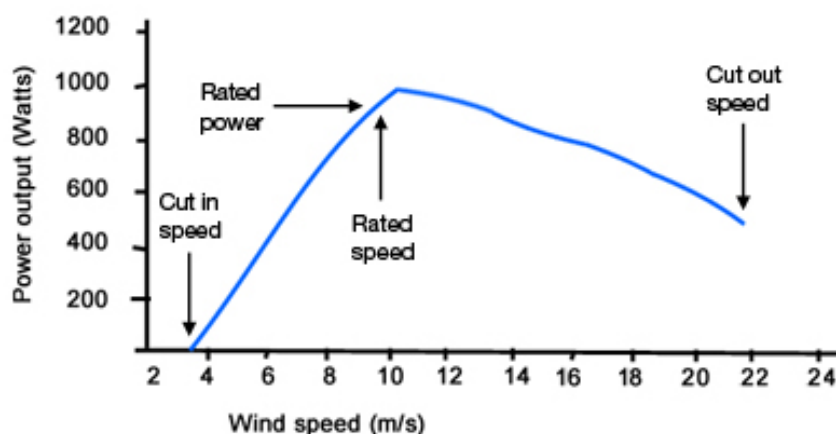
2.3 Calcolo della Gittata

Gli aerogeneratori presentano un sistema di range di vento ottimale, entro il quale funzionare correttamente. Al di sotto di una velocità minima (cut-in), gli attriti della macchina risultano talmente elevati rispetto all'energia prodotta, da preferire non iniziare la messa in rotazione della macchina. Superata la velocità minima, al crescere della velocità del vento, cresce la producibilità dell'aerogeneratore, fino ad una velocità di picco che porta al massimo rendimento (sweet-spot). Ad un ulteriore aumento della velocità del vento, corrisponde una riduzione del rendimento, fino ad una velocità limite (cut-out), oltre la quale l'integrità strutturale dell'aerogeneratore risulta messa in pericolo, e il sistema viene completamente distaccato e frenato.

Tipicamente i valori di queste velocità critiche sono:

- cut-in: 3m/s
- cut-out: 22 m/s

Si analizza quindi la gittata della pala, assoggettata ad una velocità di 22m/s (per la configurazione di rottura $R=L_P/3$). Questo corrisponde ad una velocità di rotazione delle pale, al momento del distacco di 7.98rpm.

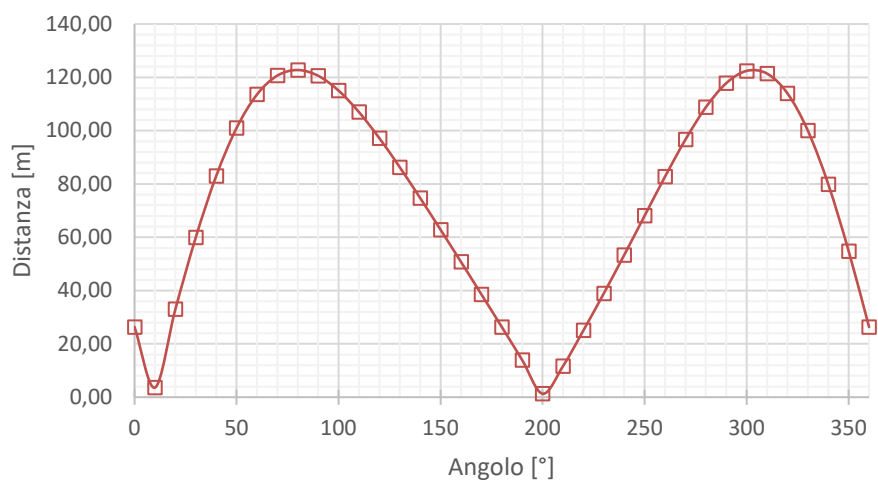


rpm **7.98**
 H [m] **121**
 L_p [m] **79**

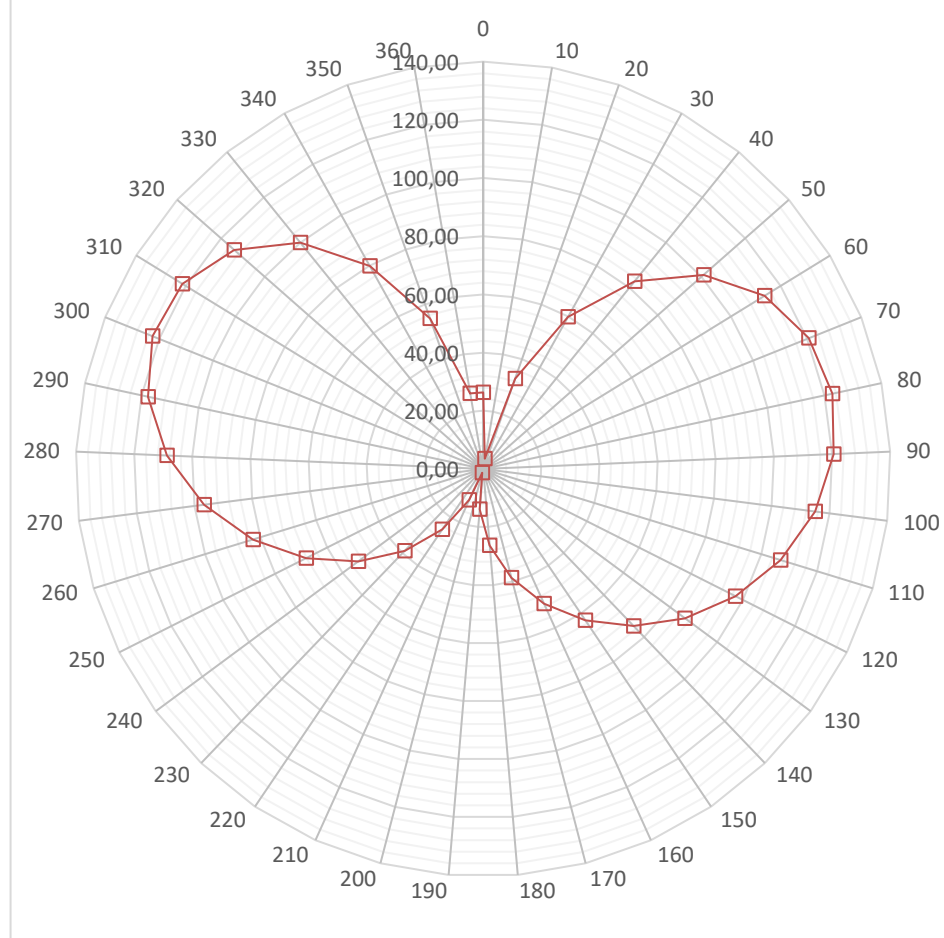
R = L_p/3 [m]
 26.33
 V [m/s]
22.00

g [m]	L [m]
0	26.33
10	3.59
20	32.97
30	59.93
40	82.95
50	100.99
60	113.55
70	120.65
80	122.75
90	120.57
100	115.02
110	106.95
120	97.15
130	86.25
140	74.70
150	62.81
160	50.75
170	38.59
180	26.33
190	13.94
200	1.31
210	11.66
220	25.06
230	38.96
240	53.35
250	68.08
260	82.75
270	96.65
280	108.76
290	117.81
300	122.41
310	121.40
320	113.99
330	99.99
340	79.90
350	54.81
360	26.33

Volo Frammento Pala



Volo Frammento Pala



Si può notare come la massima distanza di gittata prevista sia di 122.75m, considerando il distacco totale della pala, e considerando il centro di massa della pala in ad un terzo della lunghezza.

Considerando una riduzione del 20% della gittata per attrito è possibile avere una stima più accurata della gittata.

Caso Analizzato	Gittata [m]	0.8*Gittata [m]
$L_P/3 - v = 22.0 \text{ m/s}$	122.75	98.20

Si nota come la gittata considerata, nel suo caso, considerando un 20% di attrito ed un frammento distaccato con una distanza tra i baricentri pari a $L_P/3$, porta ad una gittata pari a **98.20m**. Il buffer di rispetto predisposto attorno ad ogni aerogeneratore risulta comunque superiore alla massima gittata prevista.

Non si ravvisano nel raggio di 200m abitazioni ad uso continuativo o strade che portino ad abitazioni ad uso continuativo.