

# AUTORIZZAZIONE UNICA EX D. LGS. N. 387/2003



## PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO COLOBRARO TURSI

Titolo elaborato:

### ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

LT	GD	WPD	EMISSIONE	24/11/21	0	0
REDATTO	CONTR.	APPROV.	DESCRIZIONE REVISIONE DOCUMENTO	DATA	REV	

#### PROPONENTE



**WPD MURGE S.R.L.**  
CORSO D'ITALIA 83  
00198 ROMA

#### CONSULENZA



**GE.CO.D'ORS.R.L.**  
VIA P. AMEDEO N. 32  
75021 COLOBRARO (MT)

#### PROGETTISTA

ING. GAETANO D'ORONZIO  
VIA GOITO 14 – COLOBRARO (MT)

Codice  
RSRR061

Formato  
A4

Scala  
/

Foglio  
1 di 16

## Sommarìo

1.	PREMESSA	3
2.	AEROGENERATORE DI PROGETTO	4
3.	STORICO DEGLI INCIDENTI	5
4.	RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE	5
5.	GITTATA-ANALISI TEORICA	6
5.1.	TRAIETTORIA DEL FRAMMENTO	7
5.2.	TEMPO DI VOLO	7
5.3.	DISTANZA PERCORSA	8
6.	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO	8
7.	CALCOLO DELLA GITTATA	11
8.	FRAMMENTO DI PALA	15

## 1. PREMESSA

La relazione si riferisce al parco eolico caratterizzato da una potenza nominale totale pari a 96 MWp, costituito da n. 21 aerogeneratori SG 6.0-170 50/60 Hz di potenza nominale pari a 4.57 MWp e interessa prevalentemente i Comuni di Colobrarò e Tursi, ove ricadono rispettivamente 14 e 7 aerogeneratori ed il Comune di Sant'Arcangelo, dove verrà realizzata la Sottostazione RTN Terna 150kV.

Ciascuno degli aerogeneratori è installato su torre di altezza pari a 165 m e presenta un diametro del rotore di 170 m; il collegamento tra essi avviene mediante un cavidotto interrato in media tensione che convoglia l'elettricità presso una sottostazione di trasformazione MT/AT al fine di collegarsi alla Rete di Distribuzione Nazionale (RTN) Terna attraverso un cavidotto in alta tensione.

Scopo di tale relazione è condurre un'analisi probabilistica nel caso di rottura dell'organo rotante che possa provocare il distacco della pala o di parte della stessa.

Precedenti studi hanno dimostrato che una buona approssimazione della situazione reale è condurre l'analisi in questione tenendo conto unicamente degli effetti gravitazionali.

In particolare, si valuta il calcolo della gittata di una pala o di un suo frammento e del suo valore massimo, dipendente dal prodotto del raggio della pala e della velocità di rotazione.

Lo studio in oggetto dipende da una serie di variabili legate al momento dell'eventuale distacco ed alle modalità dello stesso.

A tale proposito, in presenza di forte vento, il tempo di volo di un corpo lanciato in aria potrebbe aumentare, in dipendenza da effetti quali la portanza, mentre l'effetto viscoso dell'aria si opporrebbe al moto del corpo stesso.

Tutte queste considerazioni implicano che l'analisi in questione è alquanto complessa e trattabile da un punto di vista statistico.

Relativamente alla combinazione dei carichi, ai materiali usati ed alla valutazione delle conseguenze in caso di rottura l'analisi fa riferimento alla norma CEI EN61400-1.

## 2. AEROGENERATORE DI PROGETTO

Nella seguente figura sono riportati i dati specifici dell'impianto costituito da 21 aerogeneratori.

Nello specifico ogni aerogeneratore è tripala ad asse orizzontale ed è costituito da una torre tubolare metallica di altezza 165 m, al di sopra della quale è posta una navicella, collegata al rotore, di diametro pari a 170 m; l'altezza totale massima del sistema torre – pala è di 250 m.

DATI OPERATIVI	
Potenza nominale	4.57 kW
Velocità del vento al cut-in:	3 m/s
Velocità del vento al cut-out:	25 m/s
Classe del vento	IEC61400-1
Minima temperatura ambiente durante il funzionamento	-20°C
Massima temperatura ambiente durante il funzionamento	+35°C
SUONO	
Velocità di 7 m/s	101 dB(A)
Velocità di 8 m/s	104.2 dB(A)
Velocità di 10 m/s	105 dB(A)
Al 95% della potenza nominale	105 dB(A)
ROTORE	
Diametro	170 m
N° pale	3
Area spazzata	22.698 m <sup>2</sup>
Frequenza	50 Hz/ 60 Hz
Tipo convertitore	back to back 4Q
Tipo generatore	DFIG asincrono
Regolazione di velocità	Pitch & torque regulation a velocità variabile
TORRE	
Tipo	Torre in acciaio tubolare
Altezza mozzo	165 m
PALA	
Lunghezza	83
Profilo alare massimo	4.5 m

**Tabella 2.1:** Caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore

### **3. STORICO DEGLI INCIDENTI**

---

Esistono una serie di studi in merito alla probabilità di verificarsi un incidente dovuto al distacco di una pala o di una parte della stessa.

In particolare, un primo studio danese è stato tra il 1998 ed il 1999, ha riguardato 2130 rotorì, le rispettive pale e navicelle per un totale di 18 mesi,  $1,5 \times 2130 = 3195$  anni di funzionamento e produzione complessiva di 540 MW.

In queste condizioni si sono verificati 7 incidenti in 3195 anni cumulati di funzionamento, equivalenti a 1 incidente ogni  $3195/7 = 456$  anni.

Come si evince dallo studio la probabilità è di per sé molto bassa e lo diviene ancor più se si tiene conto della bassissima probabilità di occupazione di un  $m^2$  di terreno da parte di una persona, soprattutto in ambito rurale.

Un ulteriore studio danese conferma l'esito del primo; relativamente ad un periodo di 120 mesi nel decennio 1993 – 2013 e a 1912 rotorì, rispettive pale e navicelle, la probabilità di rottura riguarda 0.00083 impianti all'anno ed in ambito rurale la stessa diventa  $6 \times 10^{-5}$  all'anno.

In generale la frequenza con cui si verificano tali incidenti è ulteriormente diminuita nell'ultimo decennio grazie ad uno sviluppo tecnologico delle macchine ed ai relativi sistemi di sicurezza.

### **4. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE**

---

Nell'ambito della progettazione ed esercizio di un impianto eolico uno degli aspetti da tenere in considerazione è la rottura accidentale di una pala o di parte della stessa; tuttavia eventi di questo genere sono da considerarsi piuttosto rari, in quanto risulta essere bassa sia la probabilità del verificarsi degli stessi che eventuali conseguenze sfavorevoli nel caso dovessero avvenire.

I rischi di rottura dipendono essenzialmente da:

- 1) Masse di ghiaccio che si formano sull'elemento rotante
- 2) Rottura meccanica dell'elemento rotante
- 3) Verificarsi di fulminazioni

Nella presente trattazione la prima causa può essere ritenuta trascurabile, date le condizioni meteorologiche presenti nella zona interessata dagli aerogeneratori del parco eolico in questione.

Per quanto riguarda la seconda causa di malfunzionamento esistono sostanzialmente una serie di motivazioni che la rendono un evento molto raro:

- I. Ogni singolo aerogeneratore è dotato di un sistema di controllo e supervisione delle pale, costituito da un sistema a microprocessori che attua un'architettura multiprocessore in tempo reale ed in grado di gestire in maniera automatica ed a distanza una serie di funzioni quali l'avvio, l'arresto in ogni condizione di emergenza, la produzione.  
Tale sistema è in grado di assicurare la protezione della singola turbina e di funzionare in maniera del tutto autonoma.
- II. Ogni singola pala è connessa al mozzo tramite un collegamento rigido, in modo quasi da azzerare la probabilità di distacco della pala o di parte della stessa.
- III. Le singole pale sono progettate utilizzando materiali in fibra di vetro e carbonio, rivestite con altri materiali quali poliestere o fibre epossidiche, che contribuiscono ad abbassare ulteriormente la probabilità di distacco.
- IV. Un minuzioso programma di manutenzione assicura per la singola pala la verifica di eventuali piccole fratture, in presenza delle quali si opta per la riparazione o eventuale sostituzione del pezzo danneggiato.

Oltre alle due cause discusse, quella che più frequentemente potrebbe verificarsi riguarda le fulminazioni.

Per ovviare a questa problematica il sistema torre tubolare – navicella - rotore viene protetto con parafulmini e, in conformità alla norma CEI 81-1, la classe di protezione è la Classe I, la più alta, che garantisce in termini probabilistici una protezione del 98 %.

Questo implica che solo nel 2 % dei casi si abbiano danni della turbina avvenuta la fulminazione.

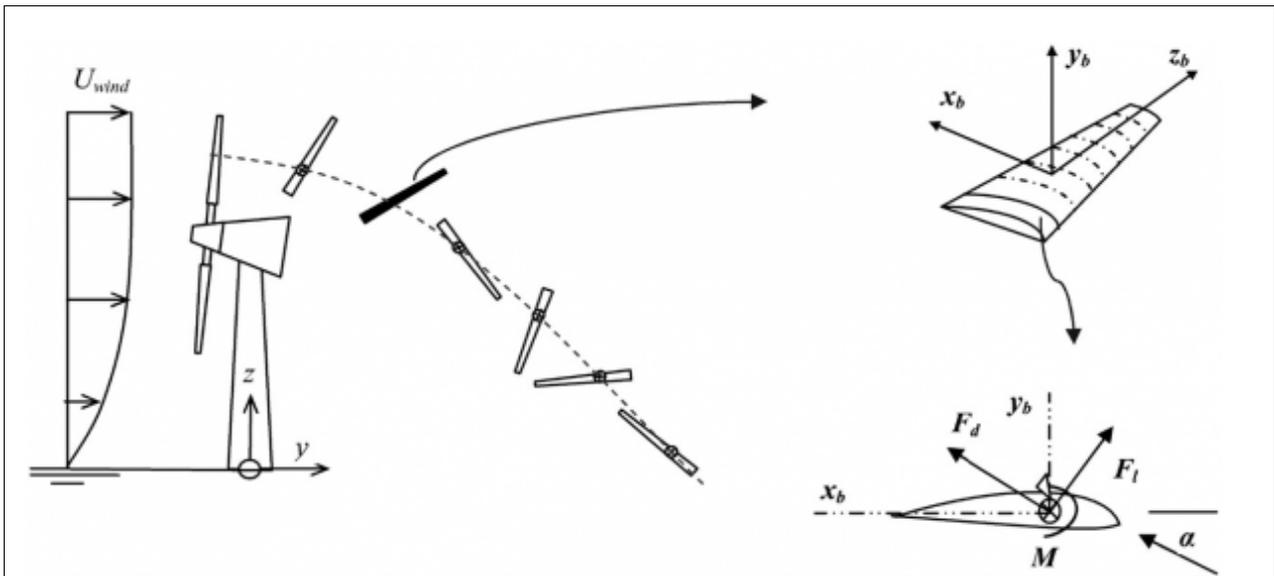
In conseguenza di quanto discusso si può ritenere che la probabilità che si verifichi un danno al sistema è trascurabile.

## **5. GITTATA-ANALISI TEORICA**

Ai fini della valutazione del fattore di rischio dovuto al distacco della pala o di parte di essa, si rende necessario la valutazione della stima della gittata massima dell'oggetto in questione.

Non considerando le caratteristiche aerodinamiche della pala, la condizione di maggiore gittata si verifica quando la stessa assume la posizione di 45° nel caso di distacco.

In tal caso si verifica il moto detto comunemente “a giavellotto”.



**Figura 5.1:** Traiettoria teorica pala in caso di rottura

Tuttavia, la situazione appena descritta è solo teorica e con probabilità di verificarsi quasi nulla; infatti, in situazioni reali subentrano alcune forze, quale quella di resistenza viscosa, quella di resistenza del vento, che si oppongono al moto della pala o di un frammento della stessa, riducendo la distanza di volo ed il tempo di volo.

Di seguito si discute appunto del tempo e della distanza di volo e di alcune relative considerazioni in quanto necessarie ai fini del calcolo della gittata massima.

### 5.1. 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 e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/ sezione di pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

### 5.2. TEMPO DI VOLO

Il tempo di volo è il tempo intercorso dal distacco della pala o di parte della stessa al suo successivo impatto.

Esso dipende prevalentemente da:

- I. Dalla posizione della pala o di parte della stessa rispetto al suolo
- II. Dalla componente verticale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco

- III. Dall'accelerazione verticale della pala o di parte della stessa
- IV. Le forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

### 5.3. DISTANZA PERCORSA

La distanza percorsa dalla pala o di parte della stessa è la distanza orizzontale durante il tempo di volo. Esso dipende prevalentemente da:

- I. La velocità del vento nel momento del distacco
- II. Componente orizzontale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco
- III. Tempo di volo
- IV. Le forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

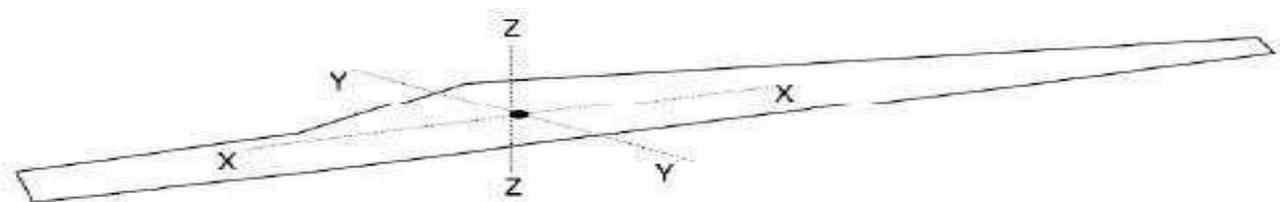
## 6. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Come precedentemente accennato il caso di moto "a giavellotto" in seguito a rottura della pala o di parte della stessa risulta essere meramente teorico con probabilità trascurabile di verificarsi, data la complessità aerodinamica della pala, il suo peso (superiore a 2 t) ed a causa di fattori esterni quali l'azione del vento.

Inoltre, il moto reale da tenere in considerazione dipende anche dalle condizioni iniziali esistenti al momento dell'eventuale distacco quali rollio, l'imbarcata ed il beccheggio della pala.

Sulla scorta di tali considerazioni, il modello che meglio approssima la situazione reale del moto della pala o di un suo frammento è il **Complex Rotational Motion**, che permette di tenere in considerazione i moti di rotazione intorno agli assi cartesiani  $xx$ ,  $yy$ ,  $zz$ .

La seguente figura fornisce una rappresentazione basata su una terna cartesiana di assi  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , con origine sull'asse lungo la pala



**Figura 6.1:** Assi di rotazione  $xx$ ,  $yy$ ,  $zz$

Nel caso di rottura, per il principio della conservazione della quantità di moto, l'elemento distaccato tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al piano della pala, ovvero intorno all'asse  $zz$ .

Le azioni indotte dal vento incidente sulla parte distaccata out of plane determinano la rotazione intorno agli altri assi; più in dettaglio tali azioni generano:

- ✓ Un momento intorno all'asse xx: centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.
- ✓ Un momento intorno all'asse yy: centro di massa e centro aerodinamico della pala/ sezione di pala non coincidono

Inoltre, l'angolo di distacco e le forze inerziali agenti sulla pala o sul frammento della stessa determinano la traiettoria iniziale.

Le rotazioni intorno agli assi xx e yy determinano la resistenza della pala o di un suo frammento al moto della stessa sia in plane che out plane.

Sulla base di tali considerazioni il moto della parte distaccata è **rotazionale complesso**, ovvero per la sua descrizione è necessario tener in conto sia le forze di inerzia che quelle viscosive unitamente alla forza di gravità.

A tale proposito è stato condotto uno studio da parte della Pb Power Ltd, per conto della società Vestas Wind System, finalizzato all'analisi ed al conseguente calcolo della gittata dell'oggetto distaccato in tre diverse ipotesi relative al moto in questione:

1. Si prendono in considerazione le forze di inerzia, trascurando quelle viscosive
2. Si prendono in considerazione le forze viscosive, trascurando quelle di inerzia
3. Si prendono in considerazione le forze di inerzia e viscosive (moto rotazionale complesso)

Lo studio è stato condotto prendendo in esame due aerogeneratori, caratterizzati da una diversa lunghezza della pala, velocità di rotazione massima a regime, altezza della torre.

Questa distinzione avviene in quanto la massima gittata della pala o di un suo frammento dipende da:

- Posizione dell'oggetto al momento del distacco
- Velocità periferica dell'oggetto al momento del distacco, conseguenza del numero di giri del rotore
- Profilo aerodinamico della pala o di una sua parte
- Peso del frammento
- Dimensione del frammento

Per esempio, minore è il peso di un frammento più le forze di attrito viscoso limitano il moto dello stesso.

Il primo tipo di aerogeneratore indagato è caratterizzato da un'altezza della torre di 67 m, lunghezza della pala di 39 m, velocità di rotazione massima a regime di 19.2 rpm (revolutions per minute), il secondo da un'altezza della torre di 80 m, lunghezza della pala di 44 m, velocità di rotazione massima a regime di 14.9 rpm.

Per il primo tipo di aerogeneratore, per cui è stata valutata la velocità di rotazione del rotore al momento della rottura della pala di 20 giri al minuto, si è ottenuto il seguente risultato:

1. la gittata calcolata è pari a 131.6 m nell'ipotesi 1
2. la gittata calcolata è pari a 113 m nell'ipotesi 2
3. la gittata calcolata è pari a 110 m nell'ipotesi 3

Per il secondo tipo di aerogeneratore, per cui è stata valutata la velocità di rotazione del rotore al momento della rottura della pala di 16.39 giri al minuto, si è ottenuto il seguente risultato:

1. la gittata calcolata è pari a 108 m nell'ipotesi 1.

Pertanto, i risultati ottenuti impongono due considerazioni in merito al valore della gittata calcolato:

- I. Il valore della gittata, indipendentemente dall'ipotesi effettuata sul moto della pala o di un suo frammento, dipende dalla velocità di rotazione massima a regime in maniera più marcata rispetto alla sua dipendenza dalle dimensioni, dall'altezza della torre.

Infatti, per il secondo tipo di aerogeneratore, caratterizzato da un'altezza della torre e lunghezza della pala superiore rispetto al primo, la gittata calcolata è inferiore, essendo tale grandezza fortemente influenzata dalla più bassa velocità di rotazione massima a regime.

- II. Nell'ipotesi di moto rotazionale complesso, il valore ottenuto della gittata è superiore rispetto a quello che si ottiene nell'ipotesi di non considerare il moto come rotazionale complesso, ma di condurre un'analisi di moto dipendente solo da valori cinematici e geometrici.

Quindi tutto ciò porta alla valutazione della gittata nel caso di moto dipendente solo da valori cinematici e geometrici, essendo tale grandezza inferiore rispetto all'ipotesi di moto rotazionale complesso.

## 7. CALCOLO DELLA GITTATA

In questa parte di trattazione si intende valutare la gittata massima di una pala distaccata considerando solo parametri cinematici e geometrici per l'aerogeneratore di progetto.

Inizialmente si analizza il moto bidimensionale di un proiettile, considerato come il moto di un punto materiale, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Successivamente si allargherà l'analisi al caso della pala dell'aerogeneratore di progetto sotto opportune ipotesi.

Fissato un sistema di riferimento con l'origine degli assi  $O$  centrata nel punto di partenza del corpo ( $x_0, y_0$ ), con l'asse delle  $Y$  positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle  $X$  nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile, le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0$$

$$a_y = -g$$

La figura rappresenta la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\alpha$ :

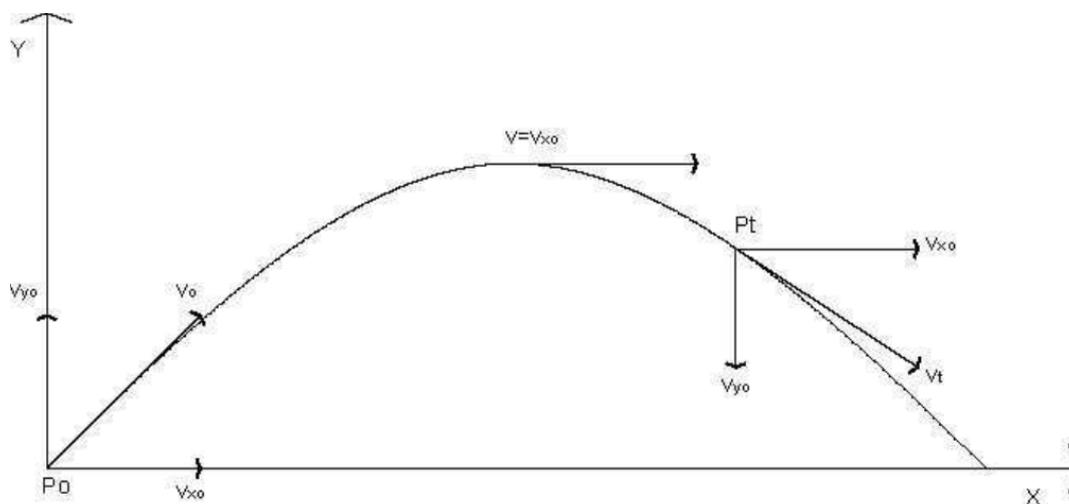


Figura 7.1: Traiettoria seguita da un grave

tenendo conto che:

$$a_x = 0$$

$$a_y = -g$$

$$\text{essendo } g = -9.81 \text{ m/s}^2$$

e assumendo che il moto lungo x sia rettilineo uniforme e che lungo y sia uniformemente accelerato

Le componenti della velocità  $v_0$  lungo x e y valgono rispettivamente:

$$v_x = v_0 \cos\alpha$$

$$v_y = v_0 \sin\alpha$$

Per le ipotesi fatte

$$v_x = v_{x0}$$

$$x = x_0 + v_{x0} t$$

$$v_y = g t + v_{y0}$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 + v_{y0} t + y_0 \quad (1)$$

imponendo  $y = 0$  nella (1) si ottiene la gittata, ovvero la distanza percorsa dal proiettile prima dell'impatto a terra

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

Assumendo per semplicità di trattazione  $y_0 = 0$ , si ottengono le due soluzioni

- $t_0 = 0$  istante di lancio del proiettile
- $t_1 = -2 v_{y0} / g = -2 v_0 \sin\alpha / g$  istante di impatto del proiettile

sostituendo nell'espressione di x il valore di  $t_1$  si ottiene

- $x = x_0 - 2 v_0^2 / g \sin\alpha \cos\alpha$

tenendo presente che  $2 \sin\alpha \cos\alpha = \sin(2\alpha)$  e assumendo che  $x_0 = 0$

si ottiene:

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

da cui deriva che la gittata massima per il proiettile, nelle ipotesi fatte, dipende dalla velocità iniziale, dall'angolo di inclinazione della gittata e dalle coordinate iniziali di lancio.

Generalizzando l'analisi al caso di una pala, le caratteristiche geometriche della stessa e la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, consentono con buona approssimazione di ritenere che il baricentro sia posizionato ad  $1/3$  rispetto alla lunghezza della pala, ovvero

$$r_b = L / 3 = 85 / 3 \text{ m} = 28.33 \text{ m} \text{ essendo } L = 85 \text{ m}$$

conseguentemente l'altezza di lancio vale:

- $y_0 = H + H_g$

dove  $H = 165 \text{ m}$  (altezza mozzo) e  $H_g = R_g \sin\alpha = 1/3 r_b \sin\alpha$  (distanza lungo  $y$  del baricentro della pala rispetto al mozzo al momento del distacco).

Nelle ipotesi semplificative fatte, imponendo  $y = 0$  nella (1) si ottiene:

- $t = \{-v_{0y} \pm [v_{0y}^2 - 4(1/2 g y_0)]^{0.5}\} / g$

Detto  $n$  il numero di giri al minuto compiuti dal corpo in movimento circolare, considerato che, ad ogni giro, l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$ , per  $n$  giri si hanno  $2\pi n$  radianti al minuto, ottenendo così la velocità angolare al minuto del corpo in movimento.

La velocità angolare in radianti al secondo è:

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

Dall'ipotesi di moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio; dopo  $n$  giri al minuto lo spazio percorso vale  $2\pi r n$  metri/minuto.

Pertanto, la velocità periferica in metri al secondo del baricentro della pala corrisponde a:

- $v_0 = \omega r_b = (2\pi n/60) r_b = 32.64 \text{ m/s}$

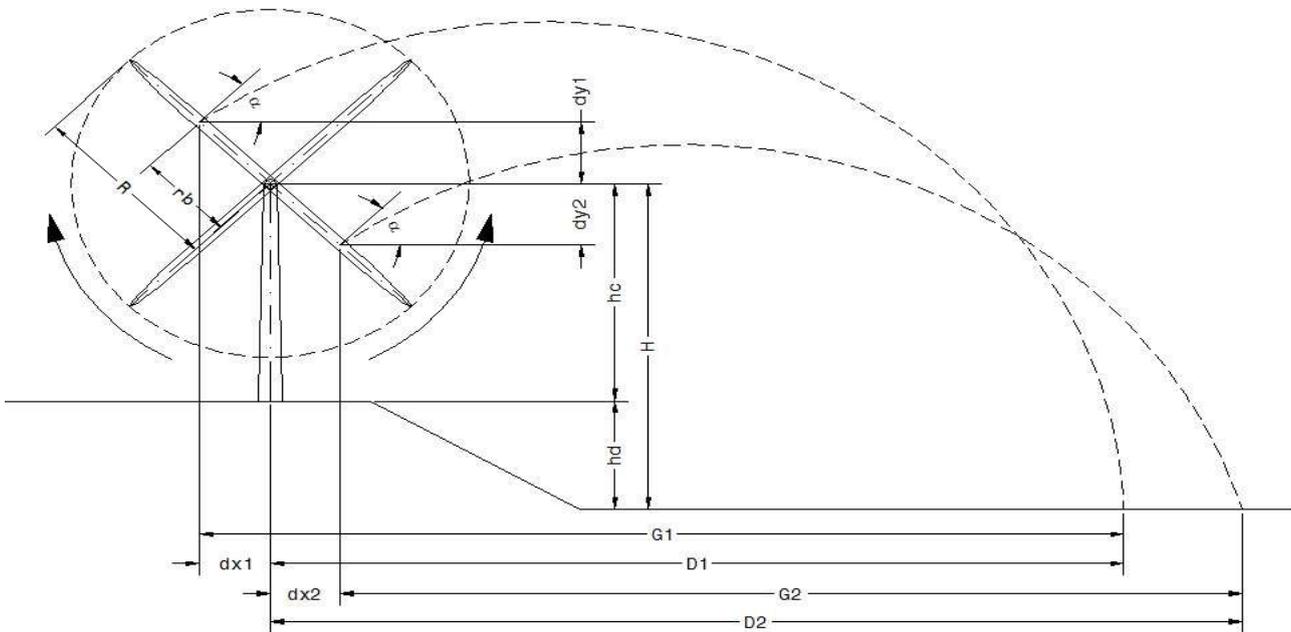
essendo la velocità la velocità di rotazione massima  $n = 11 \text{ giri/min}$  nel caso in questione.

In definitiva, nelle seguenti ipotesi:

- Moto del sistema di tipo rigido non vincolato
- $a_x = 0$  e  $a_y = -g$
- le forze di resistenza dell'aria sono trascurate
- $v_0 = 32.64 \text{ m/s}$ ,  $r_b = 28.3 \text{ m}$ ,  $n = 11 \text{ giri/min}$
- $H = 165 \text{ m}$ ,  $L = 85 \text{ m}$
- $x_0 = 0$  e  $y_0 = H + 1/3 r_b \text{ sen}\alpha$

detto  $\alpha$  l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale, si ottiene, nell'ipotesi di distacco, la gittata massima

$$G_{MAX} = v_{x0} \left\{ -v_{y0} \pm \left[ v_{y0}^2 - 4 \left( \frac{1}{2} g (H + 1/3 r_b \text{ sen}\alpha) \right)^{0.5} \right] / 2 g \right.$$



**Figura 7.2:** Rappresentazione gittata di una pala dopo il distacco

Il foglio di calcolo seguente fornisce il dato finale dell'elaborazione condotta in riferimento alla normativa svizzera [D(SIA)]

g	V. pale	R	rb	hc	hd			
[m/s <sup>2</sup> ]	[giri/min]	[m]	[m]	[m]	[m]			
9,81	11,00	83,00	28,33	165,00	0,00			
Vo	H						H + rb	D (SIA)
[m/s]	[m]						[m]	[m]
32,63	165,00						193,33	204,88
$\alpha$	Vox	Voy	dx1	dy1	H1	t1	G1	D1
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
29,85	28,30	16,24	24,57	14,10	179,10	7,92	224,20	199,63
$\alpha$	Vox	Voy	dx2	dy2	H2	t2	G2	D2
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]
22,50	30,15	12,49	26,17	10,84	154,16	7,02	211,71	237,88

**Tabella 7.1:** calcolo gittata massima

Nel caso di distacco in corrispondenza di  $\alpha = 22.5^\circ$  la pala raggiungerebbe la sua gittata massima pari a 237.91 m dal centro della torre.

Tutto ciò è stato ottenuto in base alle ipotesi viste, non considerando il moto rotazionale complesso della pala nel caso di eventuale distacco; tuttavia, come discusso in precedenza, il valore della gittata massima nel caso teorico è superiore rispetto a quello che si otterrebbe nel caso in cui si prendessero in considerazione le forze di attrito viscoso (in questo caso si otterrebbe una gittata massima di 116.5 m a parità di simili caratteristiche dell'aerogeneratore).

## 8. FRAMMENTO DI PALA

La rottura di un frammento di pala risulta verificarsi con una probabilità inferiore rispetto al distacco della pala e, nel caso si verificarsi, nella quasi totalità l'evento avviene progressivamente in seguito ad una iniziale flessione della struttura e successivo inevitabile urto con la torre.

Solitamente la causa prevalente di tale fenomeno è dovuta a fulminazioni di natura atmosferica.

La previsione di eventuali traiettorie di tali frammenti non è prevedibile utilizzando particolari modelli matematici ma solo da un punto di vista statistico.

Inoltre, per ovviare a queste situazioni i costruttori dotano gli aerogeneratori di un sistema di convogliamento della corrente di fulminazione costituito da recettori metallici posti lungo la 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.

Nel caso in cui dovessero staccarsi frammenti si tratterebbe comunque di oggetti di piccole dimensioni, il cui moto sarebbe ostacolato dalla prevalente resistenza dell'aria.

Facendo riferimento allo studio *“Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan”*, la probabilità che un frammento di pala staccatosi dalla turbina vada oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di  $2 \times 10^{-5}$ .