

	REGIONE BASILICATA		PROVINCIA DI POTENZA
	COMUNE DI MONTEMILONE		COMUNE DI VENOSA

IMPIANTO EOLICO "PERILLO SOPRANO"



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA, DELLE OPERE CONNESSE E DELLE STRUTTURE INDISPENSABILI, AI SENSI DEL D.LGS. N. 387 DEL 2003, COMPOSTO DA N° 10 AEROGENERATORI PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 56 MW, SITO NEI COMUNI DI MONTEMILONE-VENOSA (PZ)

COD REG	DESCRIZIONE
PERSOP001	A.7_Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti.
SCALA DI RAPP.	

PROPONENTE	CONSULENTE	
MILLEK SRL, VIA TADINO N. 52 20124 MILANO P.IVA 09702620965 MAIL : info@millek.it PEC : postmaster@pec.millek.it		 renova progetti Corso Cornelio Tacito n.111 - 05100 Terni (TR) - P.Iva 01640650550 PEC: renovaprogetti@pec.it Ing. Daniele Cavallo Ordine degli Ingegneri della Provincia di Brindisi N.1220

REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
Ing. Giovanni Maria Perez	Ing. Daniele Cavallo	RENOVA PROGETTI

REV	REV	REV
001	002	
DATA	DATA	
16/06/2020	02/09/2020	



INDICE

A.1.a. INTRODUZIONE	2
A.1.b. TIPOLOGIA DI ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI	2
A.1.b.1. DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE	2
A.1.b.2. ROTTURA DELL'ESTREMITÀ DELLA PALA	3
A.1.b.3. CALCOLI NUMERICI PER DISTACCO PALA	9
➤ <i>Calcolo del baricentro r_G</i>	9
➤ <i>Calcolo della velocità periferica del baricentro V_G</i>	9
➤ <i>Calcolo di h_G</i>	10
A.1.c. CONCLUSIONI	11



A.1.a. INTRODUZIONE

La Società Proponente Millek srl ha in progetto un intervento di costruzione di una centrale eolica da 56,0 MWp, denominata “Pelillo Soprano”, che prevede l’installazione da n.10 aerogeneratori tipo Vestas V150 di potenza elettrica unitaria pari a 5,6 MW.

Con il presente studio si intende determinare la massima distanza (**gittata**) che viene raggiunta da una pala dell’aerogeneratore nel caso eccezionale di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione, oppure nel caso di rottura di un frammento della pala.

Lo scopo è quello di individuare il franco di sicurezza da garantire nell’intorno degli aerogeneratori, nel caso di distacco accidentale di una pala ovvero di una rottura accidentale di un suo frammento.

Il calcolo è stato eseguito su aerogeneratore tipo VESTAS V150, le cui caratteristiche sono di seguito elencate:

Potenza nominale	5600 kW
Sistema di controllo	Pitch
Diametro rotore	150 m
Numero pale	3
Lunghezza pale	73,65 m
Velocità del vento di attivazione	3,0 m/s
Velocità del vento di bloccaggio	25,0 m/s
Altezza del mozzo (hub)	125 m

A.1.b. TIPOLOGIA DI ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Gli esempi statistici di rottura di organi rotanti riguardano essenzialmente due tipologie:

- distacco di una delle pale dal mozzo
- rottura di un frammento di pala

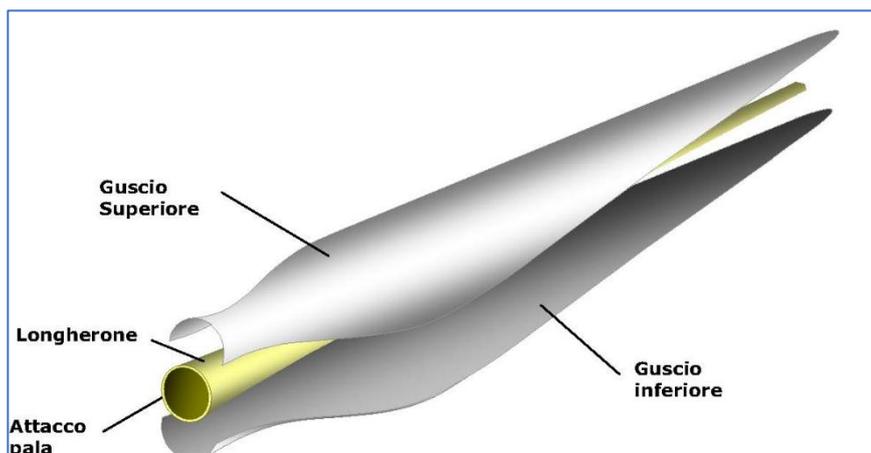
di seguito viene fornita una descrizione qualitativa del fenomeno.

A.1.b.1. DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

Questo tipo d’incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell’aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posta all’interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente la funzione di forma del profilo. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono unite fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con dei bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha



un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

La statistica degli eventi di rottura di cono che queste si manifestano a causa di non corretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore: l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

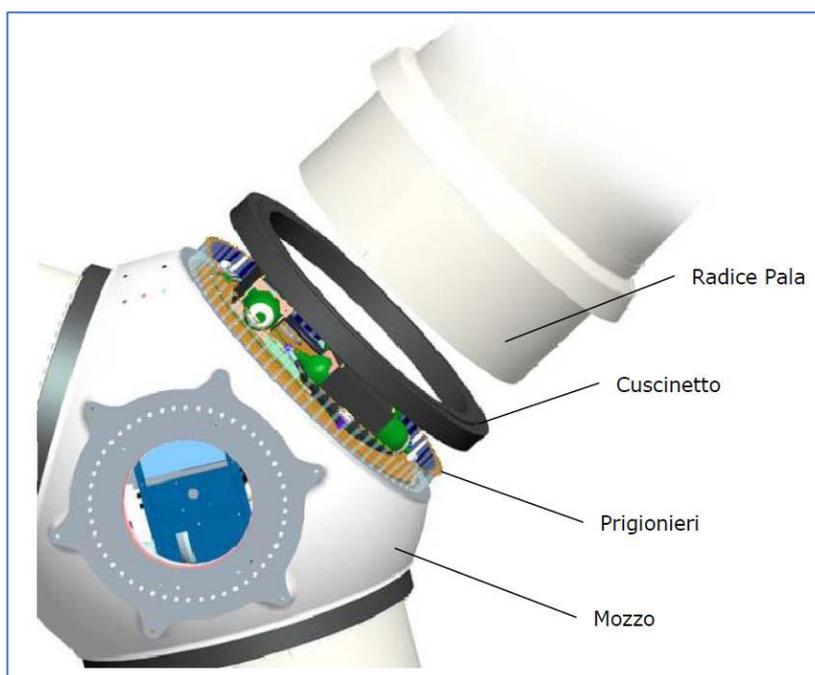


Figure 1_attacco della pala al mozzo

A.1.b.2. ROTTURA DELL'ESTREMITÀ DELLA PALA

Questo tipo d'incidente spesso si manifesta in concomitanza di fulminazioni di natura

atmosferica.

Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituita da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della 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.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala, che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti a un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.



Figure 2_estremità di una pala danneggiata da fulminazione

Esperienze pratiche su parchi eolici esistenti hanno dimostrato che ciò che si verifica in realtà in caso di rottura di parti della pala è un moto rotazionale complesso, e la distanza percorsa è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti attraverso calcoli matematici.

Le parti che hanno subito il distacco a causa di eventi esterni sono state rinvenute a non più di 50-60mt dalla base della torre.

IPOSTESI DI BASE PER IL CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Qualora dovesse verificarsi il distacco della pala dal rotore, il moto della pala è composto da una componente traslatoria del centro di massa e da una componente rotazionale intorno al centro di massa.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala. Queste includono i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco, oltre, per esempio, a forze di tipo impulsivo.

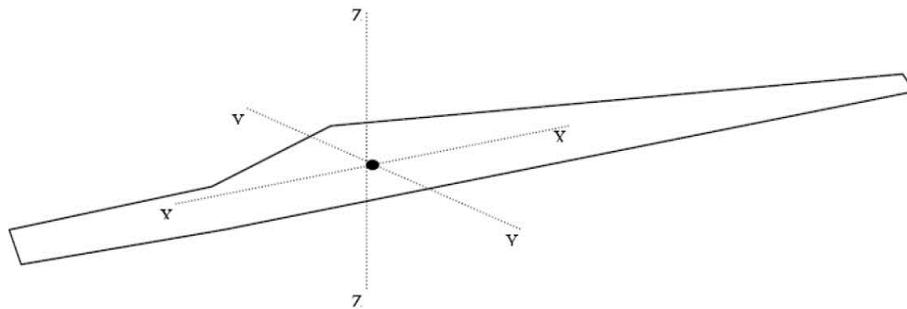


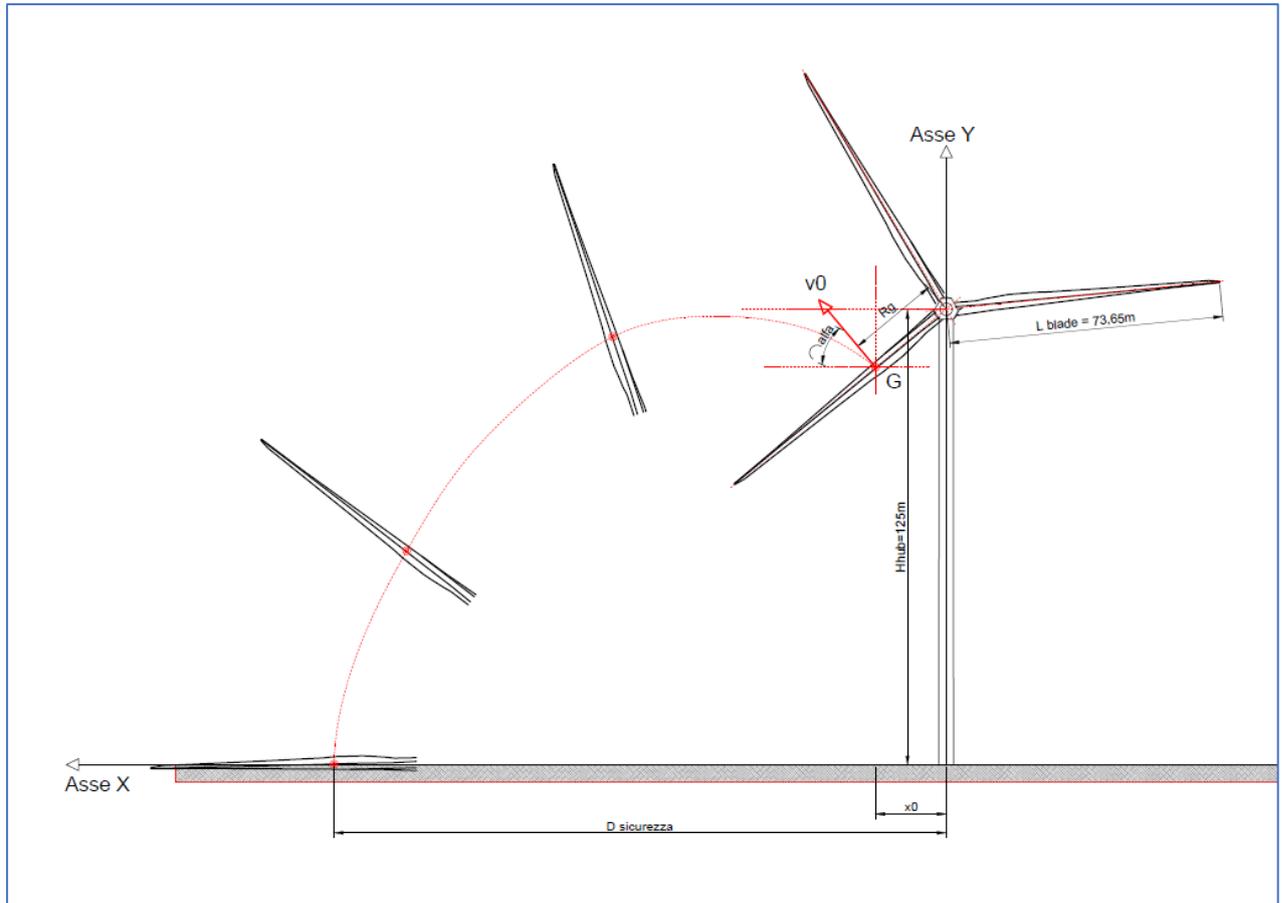
Figure 3_ Sistema di coordinate usato per la pala
(YY – Flapwise; XX – Pitchwise; ZZ – Edgewise)

Il moto della pala al momento della rottura richiede pertanto lo studio di diversi fattori, quali:

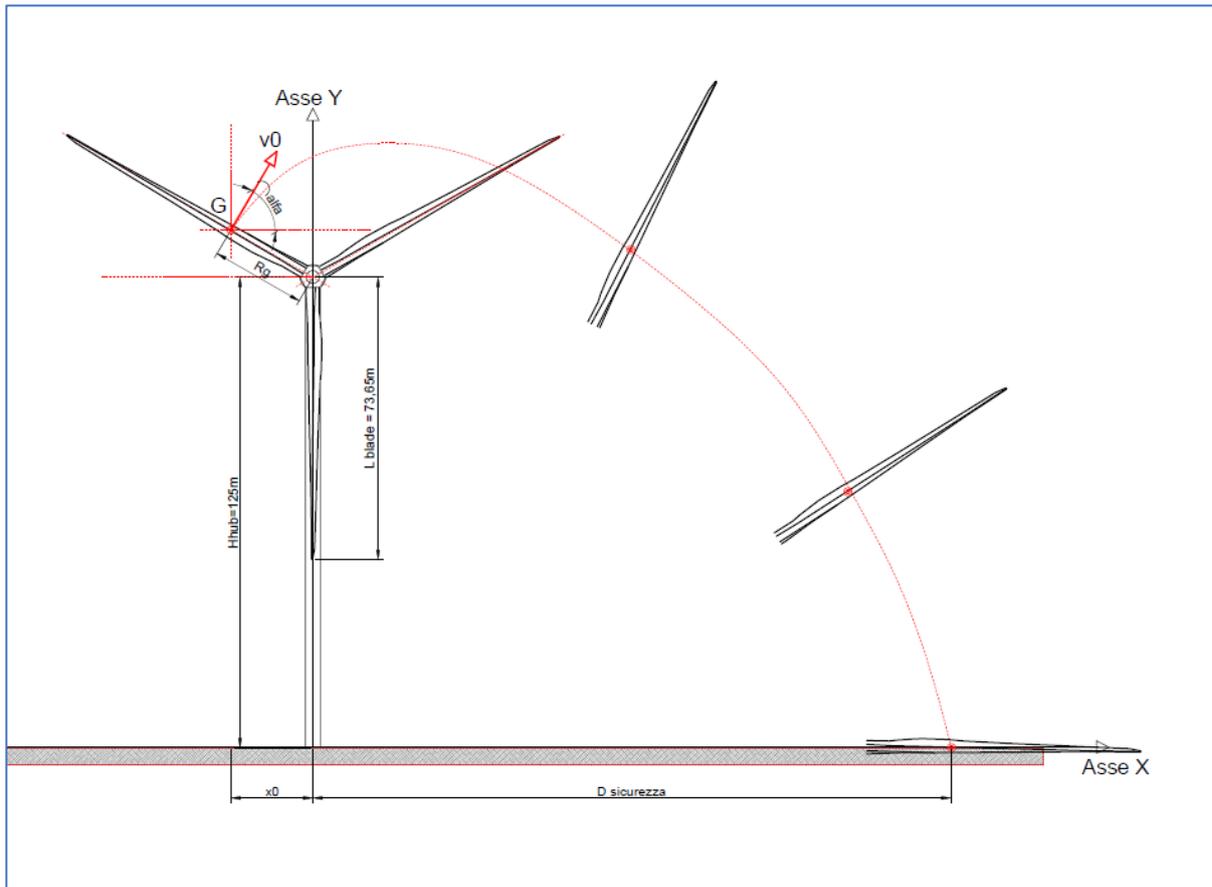
- le forze impulsive indotte dal rotore alla pala al momento del distacco;
- le forze d'inerzia dovute alla conservazione dei momenti angolari (nei piani XX, YY, ZZ);
- le forze viscosse generate dall'attrito dell'aria;

Si introducono allora alcune ipotesi semplificative del problema, a vantaggio di sicurezza del problema, al fine di poter determinare le equazioni fondamentali del moto, e precisamente:

- Il moto del sistema è di tipo rigido non vincolato; nel momento del distacco, la pala non ruota intorno al proprio baricentro (moto irrotazionale);
- Si ritengono trascurabili le forze resistenti dovute al mezzo in cui si svolge il moto (fluido aria).
- Si suppone che la pala si rompa nel punto di attacco al mozzo; nella posizione tale da avere una velocità periferica inclinata con angolo α rispetto ad un sistema di riferimento orizzontale passante per il baricentro e con asse verticale parallelo all'asse della torre (vedasi figure seguenti);.



Configurazione 1: passaggio della pala da posizione subverticale a suborizzontale



Configurazione 2: passaggio della pala da posizione suborizzontale a subverticale

Fatte tali ipotesi, la traiettoria della pala è calcolabile mediante le equazioni del moto parabolico, che è funzione di alcune variabili:

- Velocità di lancio (v_0): espressa come costante caratteristica dell'aerogeneratore;
- α : Angolo che la velocità di lancio v_0 sottende con il piano orizzontale passante per il baricentro della pala; per motivi geometrici,
- Altezza di lancio (h): funzione dell'altezza della torre al mozzo (H_{hub}) e dell'angolo α .

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale, anche dall'angolo Θ che la pala forma con l'asse verticale al momento del distacco.

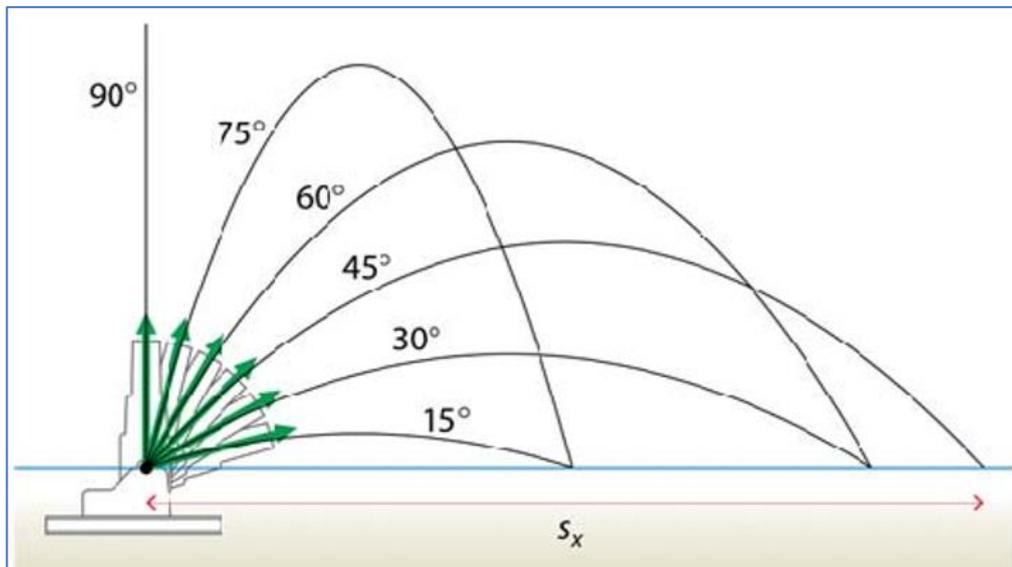
L'angolo Θ , per motivi geometrici, è legato all'angolo α , ed in particolare vale:

- $\Theta = \alpha$ nella configurazione 1, con Θ che varia da 0° a 90° nel passaggio della configurazione della pala da sub verticale a sub orizzontale (con conseguente variazione di α da 90° a 0°)
- $\Theta = \alpha$ nella configurazione 2, con Θ che varia da 90° a 0° nel passaggio della configurazione della pala da sub orizzontale a sub verticale a (con conseguente variazione di α da 0° a 90°)

La gittata L è la massima distanza del punto di impatto al suolo della pala dal baricentro della pala; invece la distanza di sicurezza D è la distanza del punto di impatto al suolo della pala dal centro torre; pertanto la distanza di sicurezza vale

- $D = L + x_0$ nella configurazione 1
- $D = L - x_0$ nella configurazione 2

Dal punto di vista matematico, il moto è descritto dalle equazioni del moto parabolico del proiettile puntiforme che si stacca con angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale di un angolo α .



Il moto del proiettile può essere scomposto nelle due direzioni, orizzontale e verticale, lungo le quali è rispettivamente rettilineo uniforme e rettilineo uniformemente accelerato.

$$x = x_0 + v_{0x}t$$

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

posto $y=0$, si ricava il tempo t di atterraggio al suolo

$$t = \frac{v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2gy_0}}{g}$$

e giungere al valore della **gittata** espresso dalla seguente formula:

$$x = x_0 + v_{0x} * \left(\frac{v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2gy_0}}{g} \right)$$

dove:

x_0, y_0 sono le coordinate al tempo 0 del baricentro G della pala rispetto al centro del mozzo

$x_0 = -R \sin \alpha$ nella configurazione 2

$x_0 = R \sin \alpha$ nella configurazione 1

$y_0 = H_{hub} + R \cos \alpha$ nella configurazione 2

$y_0 = H_{hub} - R \cos \alpha$ nella configurazione 1

mentre

v_{0x}, v_{0y} sono le componenti della velocità sugli assi cartesiani

$v_{0x} = v_0 \cos \alpha$

$v_{0y} = v_0 \sin \alpha$

A.1.b.3. CALCOLI NUMERICI PER DISTACCO PALA

I dati di partenza sui quali è basato il calcolo sono i seguenti:

- Altezza della torre $H = 125$ m
- Diametro del rotore $D = 150$ m
- Lunghezza della pala $L = 73,7$ m
- Massima velocità di rotazione $n = 12$ giri/min

Lo schema adottato per il calcolo della gittata ha come incognite:

- il baricentro della pala r_G
- la velocità periferica del baricentro V_G

➤ *Calcolo del baricentro r_G*

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, possiamo ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, cioè:

$$r_G = L : 3 = 24,57 \text{ m}$$

➤ *Calcolo della velocità periferica del baricentro V_G*

La legge con cui varia la velocità periferica v_G ha un andamento che varia linearmente con il raggio lungo il profilo della pala, per cui la velocità periferica del baricentro sarà data dal prodotto della velocità angolare ω per la distanza del baricentro dal centro del mozzo r_G :

$$v_G = \omega * r_G = 30,86 \text{ m/s}$$

dove

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

➤ *Calcolo di h_G*

La proiezione del baricentro sull'asse verticale viene valutato al variare dell'angolo di distacco α .

Il valore di h_G sarà quindi in funzione dell'altezza dell'intera torre, a cui verrà sottratto il valore della proiezione di r_G sulla verticale ossia:

$$h_G = H - (r_G * \cos \alpha)$$

output di CALCOLO

Per la Configurazione 1

α (°)	(α) rad	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$v_{ox} = v_0 \cos \alpha$	$v_{oy} = v_0 \sin \alpha$	$x_0 = R \sin \alpha$	$y_0 = H - R \cos \alpha$	t (sec)	Gittata x (m)
0	0,00	0,00	1,00	30,86	0,00	0,00	100,43	4,53	139,62
15	0,26	0,26	0,97	29,80	7,99	6,36	101,27	5,43	168,20
30	0,52	0,50	0,87	26,72	15,43	12,28	103,72	6,43	184,18
45	0,79	0,71	0,71	21,82	21,82	17,37	107,63	7,41	179,04
60	1,05	0,87	0,50	15,43	26,72	21,28	112,72	8,24	148,36
75	1,31	0,97	0,26	7,99	29,80	23,73	118,64	8,82	94,16
90	1,57	1,00	0,00	0,00	30,86	24,57	125,00	9,09	24,57

In questa configurazione, il valore della gittata massima, si verifica con valore di α pari a **30°**, al quale corrisponde un valore dell'angolo Θ pari a 30° rispetto alla configurazione verticale. In tale ipotesi la distanza del baricentro pala, valutata a partire dalla base torre, è pari a **184,18 m**.

La punta della pala si troverà dunque ad una distanza rispetto al centro torre pari a **233,31m**

Per la Configurazione 2

α (°)	(α) rad	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$v_{ox} = v_0 \cos \alpha$	$v_{oy} = v_0 \sin \alpha$	$x_0 = -R \sin \alpha$	$y_0 = H + R \cos \alpha$	t (sec)	Gittata x
0	0,00	0,00	1,00	30,86	0,00	0,00	149,57	5,52	170,39
15	0,26	0,26	0,97	29,80	7,99	-6,36	148,73	6,38	183,81
30	0,52	0,50	0,87	26,72	15,43	-12,28	146,28	7,26	181,60
45	0,79	0,71	0,71	21,82	21,82	-17,37	142,37	8,05	158,32
60	1,05	0,87	0,50	15,43	26,72	-21,28	137,28	8,67	112,55
75	1,31	0,97	0,26	7,99	29,80	-23,73	131,36	9,04	48,46
90	1,57	1,00	0,00	0,00	30,86	-24,57	125,00	9,09	-24,57

In questa configurazione, il valore della gittata massima, si verifica con valore di α pari a **15°**, al quale corrisponde un valore dell'angolo Θ pari a 75° rispetto alla configurazione orizzontale. In tale ipotesi la distanza del baricentro pala, valutata a partire dalla base torre, è pari a **183,81 m**.

La punta della pala si troverà dunque ad una distanza rispetto al centro torre pari a **232,94m**

Supponendo di prendere in considerazione sempre la configurazione più pericolosa, e nel caso in cui la pala si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si dovrà garantire un franco di sicurezza pari a **235m**.



A.1.c. CONCLUSIONI

Si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. Mentre l'effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso un collegamento bullonato.

Nel corso della presente relazione è stata valutata la massima distanza (gittata) che una pala dell'aerogeneratore Vestas V150 – 5,6 MW con H hub pari a 125 m e rotore pari a 150 m potrebbe compiere, nell'ipotesi di improvviso distacco dal punto di serraggio sul mozzo.

Nei calcoli, il moto del sistema è stato assimilato ad un moto di tipo irrotazionale, ipotizzando che tutto il peso della pala sia concentrato nel suo centro di massa.

Sono stati trascurati gli effetti del vento e l'attrito dell'aria, considerando a favore di sicurezza, le sole forze inerziali, per cui i risultati ottenuti sono da considerare maggiorati di un 20% rispetto a quelli reali.

Si è ipotizzato che il distacco della pala dal rotore avvenga alla velocità di rotazione massima del "Dynamic Operazioni Range" della macchina.

Sulla base di queste ipotesi teoriche è stato determinato un valore della gittata massima del baricentro pari a **184,18 m**

Nota la posizione di quest'ultimo, si è calcolato il punto in cui cadrà il vertice della pala stessa, ovvero ad una distanza dall'asse della turbina pari a **233,31 m**.

Approssimando il risultato a favore di sicurezza si considera la distanza dall'asse torre pari a **235m**

Di tanto si è tenuto conto nel posizionamento degli aerogeneratori rispetto alle prescrizioni circa i requisiti di sicurezza inderogabili fissati dal P.I.E.A.R., in relazione alla distanza da abitazioni, edifici, strade statali, provinciali, di accesso alle abitazioni.

Si rimanda alla planimetria allegata la rappresentazione dei buffers sopra calcolati.