

COMUNI DI BORGIA E SAN FLORO
PROVINCIA CATANZARO



PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "E90"

Elaborato: E90_CIV_R10

Scala:-

Data: 19/05/2023

**RELAZIONE DI CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA
DEGLI ORGANI ROTANTI**

COMMITTENTE:

ENERGIA LEVANTE s.r.l.
Via Luca Gaurico – Regus Eur - Cap 00143 ROMA
P.IVA 10240591007 - REA RM1219825 - energialevantesrl@legalmail.it
SOCIETA' DEL GRUPPO



www.sserenewables.com Tel +39 0654832107

PROFESSIONISTA:

Ing. Rosario Mattace



Rosario Mattace

N°REVISIONE	DATA REVISIONE	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO	NOTE
	19/05/2023			Ing. Mercurio	

E' vietata la copia anche parziale del presente elaborato

INDICE

1 PREMESSA	3
2 GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	5
3 EQUAZIONI DEL MOTO.....	12
4 CONCLUSIONI	17

1 PREMESSA

Nell'ambito della progettazione definitiva dell'intervento, si è ritenuto di procedere con la "dimostrazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale."

La Relazione sulla rottura accidentale degli organi rotanti affronta un tema di particolare rilevanza per la sicurezza e per l'incolumità delle persone e delle cose che si trovano nel contesto ravvicinato dell'area di progetto.

Il progetto prevede la realizzazione di dieci aerogeneratori della potenza di 6,2MW e delle opere connesse necessarie al suo funzionamento.

Le caratteristiche della turbina sono le seguenti:

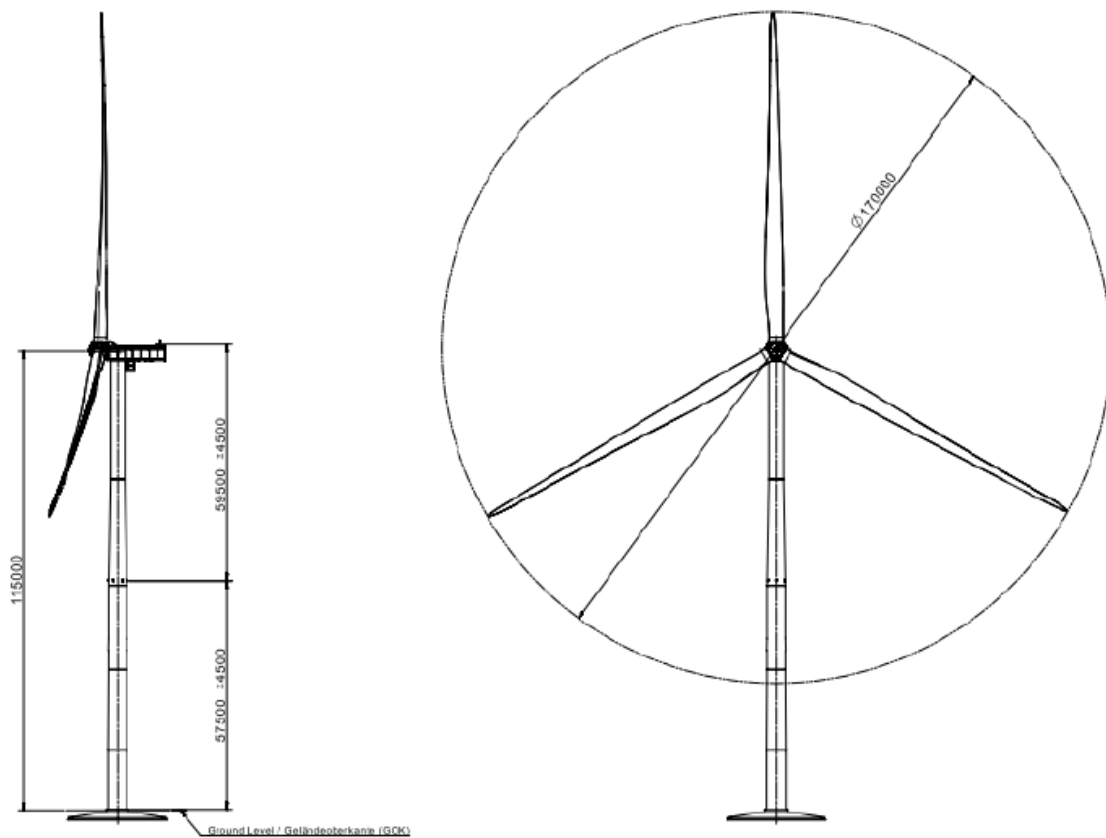


Fig. 1- Tipico Aerogeneratore

Aerogeneratore in progetto hub 115,0m	
Diametro rotore	170m
Area spazzata	22'698m ²
Lunghezza lame	83,5m
Massima larghezza lame	4,5m
Altezza hub	115,0m
Diametro tubolare di base	4,70m
Altezza complessiva massima fuori terra dell'aerogeneratore	200m

Tab. 1-Caratteristiche dimensionali aerogeneratore

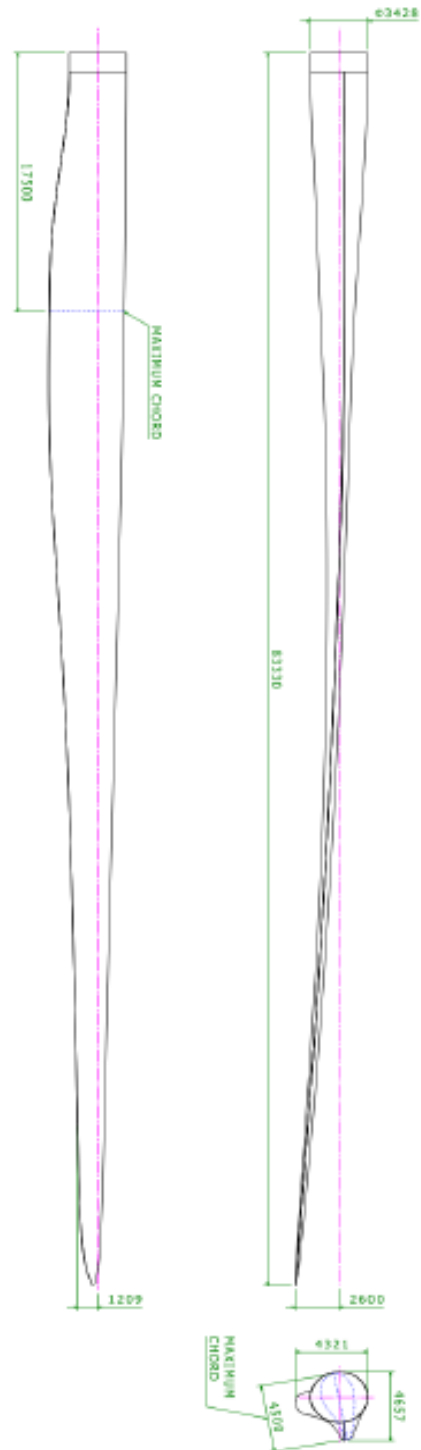


Fig. 2- Tipico Lame

2 GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è molto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, quindi, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, deve necessariamente essere effettuato direttamente dalla casa produttrice, in quanto presuppone conoscenze specifiche spesso coperte anche da brevetti.

Si considerano pertanto casi del tutto generici e si citano studi eseguiti da varie ditte produttrici di turbine eoliche nei quali si analizza la gittata di tre tipi di spezzoni di lama in caso di rottura accidentale, seguendo diverse ipotesi di moto.

E' doveroso, a tal proposito, citare lo studio eseguito dalla *PB Power Ltd.* per conto della società *Vestas Wind System AS* :*"VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions"* (2001) riportato nel Documento del 30/03/2004 *"V80 blade throwaway study Rev2.doc"*.

Tale studio ha preso in considerazione due aerogeneratori, aventi caratteristiche diverse:

- il primo aerogeneratore ha una lama di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 rpm posto su una torre di altezza pari a 67 m
- il secondo aerogeneratore ha una lama di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 rpm posto su una torre di altezza pari a 80 m.

Per la prima tipologia di aerogeneratore è stato fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni:

- la prima più conservativa include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosi;
- la seconda include le forze viscosi;
- la terza considera il moto della lama completo.

Da un punto di vista teorico se non si considerano le forze aerodinamiche, la massima gittata si ottiene quando la lama si distacca dal rotore con un angolo di 45° (135° in posizione azimutale).

Le forze di resistenza che agiscono sulla lama in realtà rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata. Il moto reale è molto complesso in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e anche dalle condizioni iniziali come rollio, imbarcata e beccheggio della lama. La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della lama è pari a a:

- **TIPOLOGIA 1**, è pari a 20 rpm, anche se in realtà il range di velocità del rotore è tra 16,7 e 19,0 m/s;

- **TIPOLOGIA 2**, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della lama è pari a 16,39 rpm (range reale di velocità pari a 8,8-14,9 m/s).

La velocità di distacco della lama dal rotore è stata aumentata del 5% per la **TIPOLOGIA 1** da 19 a 20 rpm, mentre per la **TIPOLOGIA 2** è stata aumentata del 10% passando così da 14,9 a 16,39 rpm.

Per quanto riguarda le forze agenti sulla traiettoria della lama, le ipotesi fatte nello studio considerato prendono in esame il caso peggiore: esso avviene quando la lama si distacca dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale (cioè 135° azimuth). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla lama a causa di una rottura istantanea, durante il moto rotatorio, è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla lama.

Questo include anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise* agenti al momento del distacco. Quindi, la lama quando inizierà il suo moto, continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità, il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano, infine la gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale e le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionario.

Le caratteristiche delle pale, input della simulazione, sono riportate in tabella.

	(outboard) Section of blade	plan area Plane XY	plan area Plane XZ	plan area Plane YZ	mass (kg)
Tipologia 1	3	81,46	22,80	2	6300
Tipologia 2	4	87,84	25,69	2	6200

Tab. 2-Caratteristiche delle pale

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25 m/s. Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Sono state quindi calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

Caso 1: Moto irrotazionale

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria, l'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- la massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- la resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

Caso 2: Moto irrotazionale

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la lama ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.. In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- la traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla lama, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

A seconda degli effetti della portanza si individuano tre sottocasi:

- **Caso 2a** - L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.;
- **Caso 2b** - L'effetto della portanza sul tempo di volo è diminuito del 5%;
- **Caso 2c** - L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

Caso 3: Moto rotazionale complesso

In questo caso si studia il moto della lama al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una lama. La rotazione della lama intorno all'asse ZZ è causata dalla conservazione

del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento *out-of-plane* sulla lama genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della lama non sono coincidenti). Il vento incidente *out-of-plane* sulla lama genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di lama lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della lama sia *in-plane* che *out-of-plane* è generata dalla rotazione intorno agli XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della lama pari all'area della lama in direzione XY moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°. La portanza *in-plane* è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati analizzati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

Caso 3a: C_d (in plane e out-of-plane) = 0.5

Caso 3b: C_d (in plane e out-of-plane) = 1.5

Caso 3c: C_d (in plane e out-of-plane) = 1.5

Come si evince dai risultati riportati di seguito, la prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla lama fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%.

Per la seconda tipologia, si è fatto uno studio considerando la condizione più conservativa e cioè, considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati ottenuti sono da considerare il 20% maggiori di quelle reali.

Caso 1	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=81.46m ²	For Drag IPA= 2.37 m ² IPCD=OPCD=2 OPA=87.84m ²
Velocità di rotazione (rpm)	20.0	27.5
Tempo di volo	6.27	5.44
Distanza in-plane (m)	104.4	86.37
Distanza out-of-plane (m)	80.1	64.73
Distanza vettoriale (m)	131.6	108.0

Tab.3-Caso 1

Caso 2b	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.49	N.A.
Distanza in-plane (m)	107.6	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	14.2	N.A.
Distanza vettoriale (m)	108.6	N.A.

Tab.4-Caso 2b

Caso 2c	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA= 2.38 m ² IPCD=2 OPCD=0.15 OPA=81.46 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	112.5	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	15.5	N.A.
Distanza vettoriale (m)	113.5	N.A.

Tab.5-Caso 2c

	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA= 40.73 m ² IPCD=0.5 OPCD=0.5 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	103.8	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	24.0	N.A.
Distanza vettoriale (m)	106.5	N.A.

Tab.6-Caso 3a

Caso 3b	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA=40.73m ² IPCD=1 OPCD=1 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	94.6	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	41.0	N.A.
Distanza vettoriale (m)	103.1	N.A.

Tab.7-Caso 3b

Caso 3c	Tipologia 1	Tipologia 2
	For Drag IPA=40.73m ² IPCD=1.5 OPCD=1.5 OPA=40.73 m ²	
Velocità di rotazione (rpm)	20,0	
Tempo di volo	6.74	N.A.
Distanza in-plane (m)	87.3	N.A.
Distanza out-of-plane (m)	53.7	N.A.
Distanza vettoriale (m)	102.5	N.A.

Tab.8-Caso 3b

(N.A. = Not Available)

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3), la gittata della lama, per la **TIPOLOGIA 1**, è inferiore a 110 m; mentre nel caso peggiore ma non reale (caso 1), la gittata della lama è di poco superiore a 130, mentre per TIPOLOGIA 2 è pari a circa 108 m (unico caso studiato quello conservativo ma non reale per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale).

Concludendo, secondo lo studio considerato:

- I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è 'irrotazionale', allora la distanza raggiunta dalla lama da 39 m (TIPOLOGIA 1) sarà di ca. 130 m, mentre per la lama da 44 m (TIPOLOGIA 2) sarà di ca. 108 m., il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a).
- Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla lama sarà di ca. 106 m.
- Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una lama TIPOLOGIA 1 (39 m di lunghezza) è di ca. 106 m, mentre per la lama TIPOLOGIA 2 (44 m di lunghezza) sarà di ca. 87 m (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1)

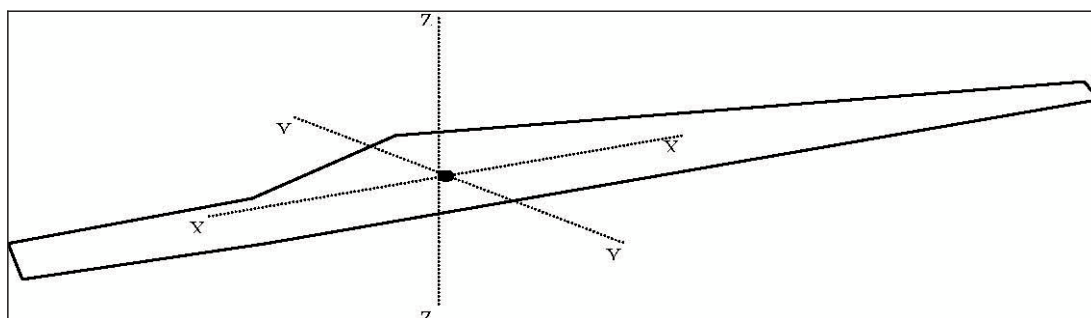


Fig.3: Sistema di coordinate usato per la lama YY (Flapwise); XX (Pitchwise); ZZ (Edgewise).

Oltre alle valutazioni appena illustrate, per verificare direttamente i risultati degli studi citati, si è scelto di calcolare il valore della gittata massima facendo ulteriori ipotesi. Il problema si è risolto andando a valutare la distanza massima che raggiunge un corpo (in questo caso la lama) quando viene lanciato da un'altezza H (altezza del mozzo pari a 100 m) + Yg (si veda figura n.4 seguente), velocità angolare ω e con una direzione che forma un angolo θ con il terreno. La soluzione sarà la massima gittata del baricentro del corpo, in caso di rottura accidentale, durante il funzionamento dell'aerogeneratore a potenza e velocità nominale.

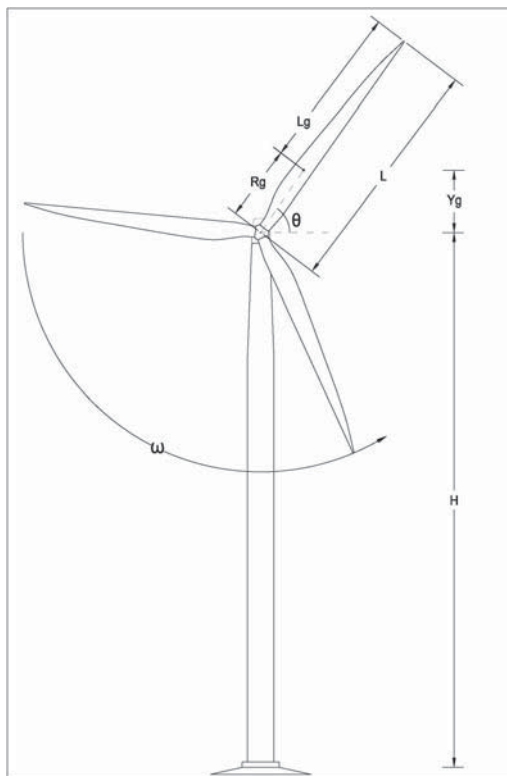


Fig.4: Grandezze di calcolo della gittata massima

3 EQUAZIONI DEL MOTO

Il moto considerato è di tipo rotazionale, cioè quello fisicamente più probabile. Non viene considerata la possibilità, puramente teorica, che il corpo assuma una traiettoria "a giavellotto". Per il calcolo della gittata di una turbina eolica SG 170 con hub a 115m, lo studio prevede l'analisi della traiettoria del frammento da cui si ricava il tempo di percorrenza e la determinazione della velocità periferica del frammento al momento del distacco.

Il primo aspetto è legato allo studio del moto di un proiettile mediante le equazioni della cinematica. Facendo una serie di considerazioni che qui si omettono, si ricava che il tempo di percorrenza è dato da:

$$t = \frac{-v_{y_0} \pm \sqrt{v_{y_0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g}$$

con :

v_y = velocità del frammento, rispetto al punto y_0 ;

y_0 = altezza di lancio, data dalla somma dell'altezza della torre + il valore y della lama nel suo baricentro;

Il secondo aspetto riguarda la velocità periferica del frammento legata alla velocità angolare data da:

$$V_{x_0} = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot r_g$$

Nel caso relativo all'aerogeneratore SG170 si ha che :

Aerogeneratore in progetto hub 115,0m	
Diametro rotore	170m
Area spazzata	22'698m ²
Lunghezza lame	83,5m
Massima larghezza lame	4,5m
Altezza hub	115,0m
Diametro tubolare di base	4,70m
Altezza complessiva massima fuori terra dell'aerogeneratore	200m

Tab.9-Caratteristiche dimensionali aerogeneratore in progetto

Aerogeneratore in progetto hub 115,0m	
H torre	115m
Lunghezza lame	83,5m
Raggio baricentrico lame rg(posizionata ad 1/3)	$rg=1/3(170/2)=28,33m$
Diametro rotore	170,0m
Velocità di rotazione	10,60rpm
Velocità angolare ω	$\omega=2*\pi*n/60=2*3,14*10,6/60=1,11rad/s$
Velocità tangenziale $V_g= \omega*rg$	$V_g=1,11*28,33=31,45m/s$
Altezza di lancio $HG=H_{torre}+Y_g$	
$HG=H_{torre}+rg*\sin\theta$	$HG= 115+28,33* \sin\theta$

Tab.10-Calcolo parametri di gittata

Nell'ipotesi di distacco di una lama nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno $a_x = 0$, $a_y = -g$.

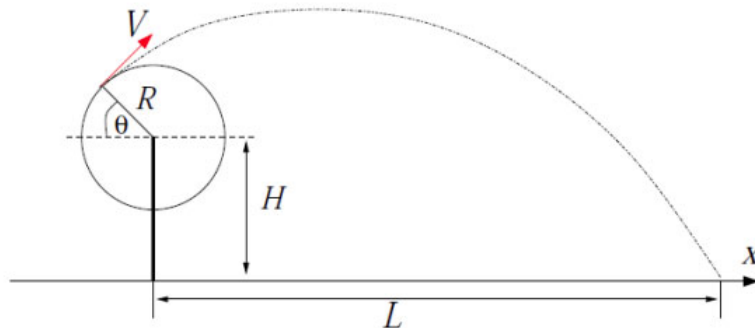


Fig.5

Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma(0,HG=Htorre+Yg) ossia le coordinate del baricentro di una lama.

- Y_g indica la distanza del baricentro della lama rispetto al mozzo e varia in funzione dell'angolo di gittata: $Y_g = r_g \sin \theta$.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$Gittata = v_{x_0} \frac{-v_{y_0} \pm \sqrt{v_{y_0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}g \cdot H_G\right)}}{g}$$

posto: $v_{x_0} = V_g \cdot \sin \vartheta$; $v_{y_0} = V_g \cdot \cos \vartheta$

$$G_{\max} = \frac{V_g \sin \vartheta}{g} \left[V_g \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cos^2 \vartheta + 2(H + R_g \sin(\vartheta))g} \right] - R_g \cos \vartheta$$

▪ **Calcolo della gittata al variare di ϑ**

Angolo ϑ	Radiani	sen ϑ	cos ϑ	Gittata	maggiorazione 2/3 della lunghezza della lama
0	0	0,087112	1	-12,7033	68,36992484
5	0,087222	0,173561	0,996199	6,308269	61,9749355
10	0,174444	0,258691	0,984823	25,17406	80,84072387
15	0,261667	0,341854	0,96596	43,38897	99,05563479
20	0,348889	0,422418	0,939753	60,48758	116,1542463
25	0,436111	0,49977	0,906401	76,05799	131,724652
30	0,523333	0,573323	0,866158	89,75408	145,4207473
35	0,610556	0,642516	0,81933	101,3059	156,9725205
40	0,697778	0,706825	0,766272	110,5272	166,1939059
45	0,785	0,76576	0,707388	117,3211	172,9877886
50	0,872222	0,818873	0,643126	121,6811	177,3477703
55	0,959444	0,86576	0,573975	123,6897	179,356319
60	1,046667	0,906065	0,50046	123,5123	179,1789518
65	1,133889	0,939481	0,423139	121,3875	177,054166
70	1,221111	0,965754	0,342602	117,6123	173,2790127
75	1,308333	0,984685	0,25946	112,5239	168,1905726
80	1,395556	0,996129	0,174345	106,4775	162,1442127
85	1,482778	1	0,087905	99,82367	155,4903341
90	1,57	0,996268	0,000796	92,88548	148,5521509
95	1,657222	0,984961	-0,08632	85,94079	141,6074538
100	1,744444	0,966166	-0,17278	79,21025	134,8769135
105	1,831667	0,940025	-0,25792	72,85351	128,5201725
110	1,918889	0,906737	-0,34111	66,97254	122,6392043
115	2,006111	0,866556	-0,4217	61,62025	117,2869154
120	2,093333	0,819786	-0,49908	56,81165	112,4783161
125	2,180556	0,766783	-0,57267	52,53518	108,2018426
130	2,267778	0,707951	-0,64191	48,76256	104,4292298
135	2,355	0,643736	-0,70626	45,45655	101,12322
140	2,442222	0,574627	-0,76525	42,5764	98,24307073
145	2,529444	0,501149	-0,81842	40,08152	95,74819089
150	2,616667	0,423861	-0,86536	37,9337	93,60036342
155	2,703889	0,34335	-0,90573	36,09833	91,76499358
160	2,791111	0,260229	-0,93921	34,54508	90,21174394
165	2,878333	0,175129	-0,96555	33,24816	88,91482846
170	2,965556	0,088698	-0,98455	32,1865	87,85316532
175	3,052778	0,001593	-0,99606	31,34387	87,01053847
180	3,14	0	-1	31,44996	87,11662678

Tab.11-Calcolo della gittata massima

Al valore di gittata massima, nella tabella n.11 è stata aggiunta nell'ultima colonna la distanza del vertice della lama considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro, ossia a $Lg = 2 \cdot 83,5/3 = 55,67$ m.

In rosso in tabella 11 è riportato il valore massimo teorico della gittata.

Si sottolinea che i valori precedentemente calcolati vanno considerati solo in prima approssimazione.

Infatti, teoricamente e non tenendo conto delle caratteristiche aerodinamiche della lama, se il distacco di un frammento avviene quando la lama è a 45 gradi dalla verticale percorrerà la traiettoria più lunga. La presenza dell'aria, però, genera comunque delle forze di resistenza viscosa che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza.

A questa azione vanno aggiunte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di lama in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della lama stessa, tale portanza potrebbe addirittura prolungare il volo e allungare la distanza percorsa. Tale possibilità è correlata, tra l'altro, al rollio, all'imbardata ed all'impennarsi della lama durante il volo. L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione % della forza peso.

4 CONCLUSIONI

Dalle analisi effettuate si può assumere che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile per il distacco intero della lama.

Gli standard attuali di progettazione e costruzione degli aerogeneratori rispondono a riconosciute buone pratiche internazionali. Pertanto la possibilità di rottura delle pale e/o delle parti delle pale è da ritenersi altamente improbabile.

Il progetto di impianto eolico, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una lama nel punto di serraggio al mozzo.

Si può concludere che, avendo posizionato l'aerogeneratore a distanza superiore o al più pari a 500 m dalle abitazioni , in caso di rottura accidentale non vi sono condizioni di pericolo per cose o persone.