



REGIONE BASILICATA



PROVINCIA DI MATERA



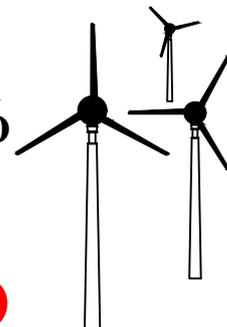
COMUNE DI SALANDRA



COMUNE DI FERRANDINA

PROGETTO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN IMPIANTO EOLICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA, DELLE OPERE E DELLE INFRASTRUTTURE CONNESSE, DENOMINATO "TORRICELLI"

DA REALIZZARSI NEI COMUNI DI SALANDRA (MT) E FERRANDINA (MT), DI POTENZA PARI A 31 MW ACCOPPIATO AD UN SISTEMA DI ACCUMULO PARI A 8 MW



PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE:



EDPR BASILICATA S.R.L.

SVILUPPO:



enerplus s.r.l. tel. 0971 991428
Via Orefici, 18 enerplus@tiscali.it
85055 Picerno (PZ) P.Iva 01679060762

PROGETTISTI:



PD

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO:

RELAZIONE SPECIALISTICA - ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Tavola:

SAL-PDEF-REL- 009

Filename:

Data 1° emissione:

Redatto:

Verificato:

Approvato:

Scala:

Protocollo

n° revisione

1
2
3
4

Indice generale

<u>A.7.a Gittata massima degli elementi rotanti</u>	1
A.7.a.1 Caso 1: Moto irrotazionale	3
A.7.a.2 Caso 2: Moto irrotazionale	3
A.7.a.3 Caso 3: Moto rotazionale complesso	3
<u>A.7.b Equazioni del moto</u>	8
A.7.b.3 Aerogeneratore SIEMENS Gamesa SG 6.2 MW 170 – 115	12
<u>A.7.c Conclusioni</u>	15

Indice delle figure

Figura A.7.a.1: Sistema di coordinate usato per la pala YY (Flapwise); XX (Pitchwise); ZZ (Edgewise).7

Figura A.7.a.2: Schema di turbina che evidenzia l'altezza al mozzo (H), la lunghezza della pala (L), raggio baricentrico (r_g), l'angolo di gittata (θ) e la velocità angolare (ω). 8

Indice delle tabelle

Tabella A.7.a.1: Caratteristiche delle pale.	2
Tabella A.7.a.2: Caso 1.	4
Tabella A.7.a.3: Caso 2b.	5
Tabella A.7.a.4: Caso 2c.	5
Tabella A.7.a.5: Caso 3a.	5
Tabella A.7.a.6: Caso 3b.	6
Tabella A.7.a.7: Caso 3c.	6
Tabella A.7.b.2: Valori di gittata SIEMENS Gamesa SG 6.2 MW 170-115 per $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	14

A.7.a Gittata massima degli elementi rotanti

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

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 pala 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 pala 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 pala 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 viscosse;
- la seconda include le forze viscosse;
- la terza considera il moto della pala completo.

Da un punto di vista teorico se non si considerano le forze aerodinamiche, la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° (135° in posizione azimutale). Le forze di resistenza che agiscono sulla pala 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 (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per la 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; per la

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

La velocità di distacco della pala 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 pala, le ipotesi fatte nello studio considerato prendono in esame il caso peggiore: esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale (cioè 135° azimuth). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala 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 pala. Questo include anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise* agenti al momento del distacco. Quindi la pala, 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 (m ²)	plan area Plane XZ (m ²)	plan area Plane YZ (m ²)	mass (kg)
Tipologia 1	39	81.46	22.80	2.38	6300
Tipologia 2	44	87.84	25.69	2.37	6200

Tabella A.7.a.1: 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:

A.7.a.1 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.

A.7.a.2 Caso 2: Moto irrotazionale

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala 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 pala, 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.

A.7.a.3 Caso 3: Moto rotazionale complesso

In questo caso si studia il moto della pala 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 pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causata dalla conservazione

del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento *out-of-plane* sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente *out-of-plane* sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala 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 pala pari all'area della pala 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: Cd (in plane e out-of-plane) = 0.5

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

Caso 3c: Cd (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 pala 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

Tabella A.7.a.2: 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.

Tabella A.7.a.3: 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.

Tabella A.7.a.4: Caso 2c.

Caso 3a	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.

Tabella A.7.a.5: 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.

Tabella A.7.a.6: 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.

(N.A. = Not Available)

Tabella A.7.a.7: Caso 3c.

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3), la gittata della pala, per la TIPOLOGIA 1, è inferiore a 110 m; mentre nel caso peggiore ma non reale (caso 1), la gittata della pala 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 pala da 39 m (TIPOLOGIA 1) sarà di ca. 130 m, mentre per la pala da 44 m (TIPOLOGIA 2) sarà di ca. 108 m., il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a) per il tempo invece è il 2c.
- Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla pala sarà di ca. 106 m.

Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una pala TIPOLOGIA 1 (39 m di lunghezza) è di ca. 106 m, mentre per la pala TIPOLOGIA 2 (44 m di lunghezza) sarà di ca. 87 m (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1)

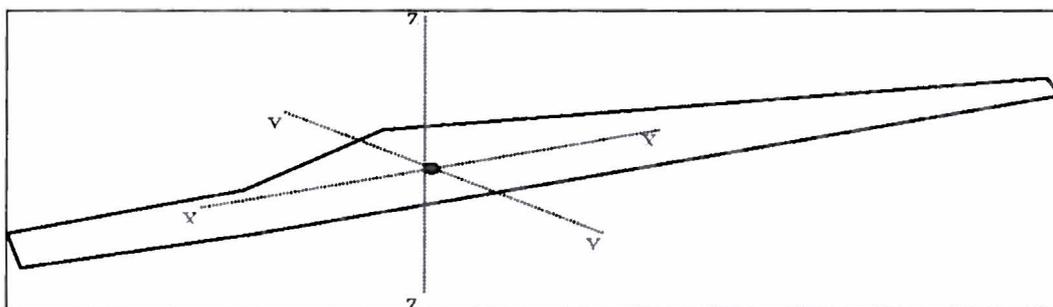


Figura A.7.a.1: Sistema di coordinate usato per la pala YY (Flapwise); XX (Pitchwise); ZZ (Edgewise).

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 il baricentro di un corpo (in questo caso la pala) quando viene lanciato da un'altezza H (altezza del mozzo pari a 100 m) + Yg (variabile secondo la relazione $r_g \sin \theta$ con r_g raggio baricentrico della pala), 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.

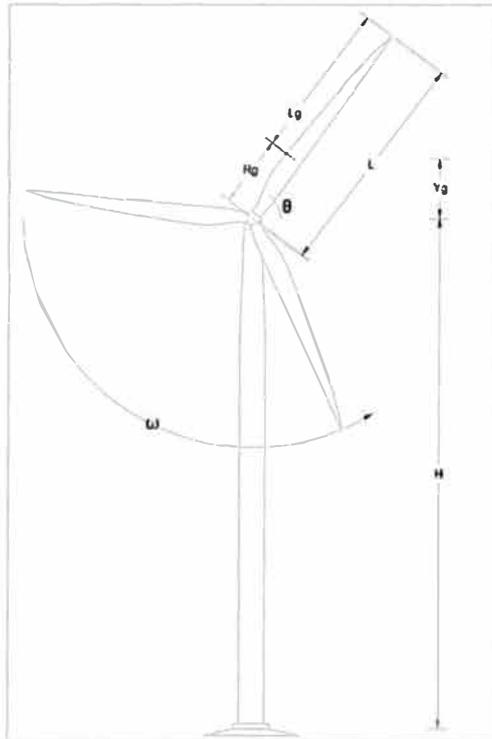


Figura A.7.a.2: Schema di turbina che evidenzia l'altezza al mozzo (H), la lunghezza della pala (L), raggio baricentrico (r_g), l'angolo di gittata (θ) e la velocità angolare (ω).

A.7.b Equazioni del moto

Per il calcolo della gittata di una turbina eolica, lo studio prevede l'analisi della traiettoria del frammento tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e del vento. Si ricava quindi 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_0} = velocità del frammento lungo l'asse y, rispetto al punto y_0 .

Le coordinate del punto di partenza (x_0, y_0) del corpo, non saranno $(0,0)$ coincidenti con l'origine degli assi (condizione per la quale si avrebbe un angolo di gittata massima pari a 45°) ma saranno:

- x_0 = ascissa del punto di partenza, considerando come origine di riferimento la base della torre ($x_0 = 0$);
- y_0 = ordinata del baricentro G della pala, considerando come origine di riferimento la base della torre ($y_0 = H_{tot} = H_{torre} + Y_g$) dove con Y_g viene indicata la distanza del baricentro della pala rispetto al mozzo e varia in funzione dell'angolo di gittata $Y_g = r_g \sin\theta$.

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

$$V_0 = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot r_g$$

Da cui si ricava

$$V_{x0} = V_0 \cdot \cos\theta$$

$$V_{y0} = V_0 \cdot \sin\theta$$

Nell'ipotesi di distacco di una pala 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 $a_x = 0$, $a_y = -g$.

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

$$Gittata = v_{x0} \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}g \cdot H_G\right)}}{g}$$

Al valore di gittata massima andrà aggiunta la distanza X_0 del baricentro rispetto all'asse della torre ($X_g = r_g \cos\theta$) e la distanza del vertice della pala al baricentro (L_v) considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro.

Vengono di seguito riportati i valori di gittata massima calcolati per la seguente tipologia di turbina:

- **SIEMENS Gamesa SG 6.2 MW 170-115**

A.7.b.3 Aerogeneratore SIEMENS Gamesa SG 6.2 MW 170 – 115

Per il calcolo della gittata per il modello di aerogeneratore SG 6.2 MW 170 - 115 della società Gamesa, si è fatto riferimento alle equazioni del moto e alle considerazioni definite nel paragrafo

A.7.b. Si riportano di seguito i dati tecnici dell'aerogeneratore SG 6.2 MW 170 - 115 :

H_{torre} = 115 m (altezza del mozzo);

L = 85 m (lunghezza delle pale);

n = 8,33 giri/min (frequenza di cut-out);

V_{v_0} = 26,19 m/s (velocità tangenziale di cut-out);

r_x = 28,33 m (raggio baricentrico della pala considerato 1/3 della lunghezza totale);

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori dell'angolo di distacco.

Teta [θ]	Teta [θ]	V_{x0} [m/s]	V_{y0} [m/s]	Hg [m]	Gittata [m]	Xg [m]	Lg [m]	Distanza totale [m]	Gittata _{max} [m]
0,00	0	25,00	0,00	115,0	121,051	28,33	56,67	206,051	227,384
0,02	1	25,00	0,44	115,5	122,409	28,33	56,67	207,409	
0,03	2	24,98	0,87	116,0	123,738	28,32	56,68	208,738	
0,05	3	24,97	1,31	116,5	125,036	28,29	56,71	210,036	
0,07	4	24,94	1,74	117,0	126,301	28,26	56,74	211,301	
0,09	5	24,90	2,18	117,5	127,533	28,23	56,77	212,533	
0,10	6	24,86	2,61	118,0	128,728	28,18	56,82	213,728	
0,12	7	24,81	3,05	118,5	129,885	28,12	56,88	214,885	
0,14	8	24,76	3,48	118,9	131,003	28,06	56,94	216,003	
0,16	9	24,69	3,91	119,4	132,079	27,98	57,02	217,079	
0,17	10	24,62	4,34	119,9	133,112	27,90	57,10	218,112	
0,19	11	24,54	4,77	120,4	134,100	27,81	57,19	219,100	
0,21	12	24,45	5,20	120,9	135,041	27,71	57,29	220,041	
0,23	13	24,36	5,62	121,4	135,934	27,61	57,39	220,934	
0,24	14	24,26	6,05	121,9	136,776	27,49	57,51	221,776	
0,26	15	24,15	6,47	122,3	137,566	27,37	57,63	222,566	
0,28	16	24,03	6,89	122,8	138,302	27,24	57,76	223,302	
0,30	17	23,91	7,31	123,3	138,983	27,10	57,90	223,983	
0,31	18	23,78	7,72	123,8	139,606	26,95	58,05	224,606	
0,33	19	23,64	8,14	124,2	140,171	26,79	58,21	225,171	
0,35	20	23,49	8,55	124,7	140,675	26,63	58,37	225,675	
0,37	21	23,34	8,95	125,1	141,117	26,45	58,55	226,117	
0,38	22	23,18	9,36	125,6	141,496	26,27	58,73	226,496	
0,40	23	23,01	9,76	126,1	141,809	26,08	58,92	226,809	
0,42	24	22,84	10,16	126,5	142,056	25,89	59,11	227,056	
0,44	25	22,66	10,56	127,0	142,235	25,68	59,32	227,235	
0,45	26	22,47	10,95	127,4	142,345	25,47	59,53	227,345	
0,47	27	22,28	11,34	127,9	142,384	25,25	59,75	227,384	

0,49	28	22,08	11,73	128,3	142,352	25,02	59,98	227,352
0,51	29	21,87	12,11	128,7	142,247	24,78	60,22	227,247
0,52	30	21,65	12,49	129,2	142,068	24,54	60,46	227,068
0,54	31	21,43	12,87	129,6	141,813	24,29	60,71	226,813
0,56	32	21,20	13,24	130,0	141,483	24,03	60,97	226,483
0,58	33	20,97	13,61	130,4	141,076	23,77	61,23	226,076
0,59	34	20,73	13,97	130,8	140,591	23,49	61,51	225,591
0,61	35	20,48	14,33	131,2	140,027	23,21	61,79	225,027
0,63	36	20,23	14,69	131,6	139,384	22,93	62,07	224,384
0,65	37	19,97	15,04	132,0	138,662	22,63	62,37	223,662
0,66	38	19,71	15,38	132,4	137,859	22,33	62,67	222,859
0,68	39	19,43	15,73	132,8	136,975	22,03	62,97	221,975
0,70	40	19,16	16,06	133,2	136,010	21,71	63,29	221,010
0,72	41	18,87	16,39	133,6	134,963	21,39	63,61	219,963
0,73	42	18,58	16,72	134,0	133,835	21,06	63,94	218,835
0,75	43	18,29	17,04	134,3	132,625	20,73	64,27	217,625
0,77	44	17,99	17,36	134,7	131,332	20,39	64,61	216,332
0,79	45	17,68	17,67	135,0	129,958	20,04	64,96	214,958
0,80	46	17,37	17,98	135,4	128,503	19,69	65,31	213,503
0,82	47	17,06	18,28	135,7	126,965	19,33	65,67	211,965
0,84	48	16,74	18,57	136,0	125,347	18,97	66,03	210,347
0,85	49	16,41	18,86	136,4	123,648	18,60	66,40	208,648
0,87	50	16,08	19,14	136,7	121,868	18,22	66,78	206,868
0,89	51	15,74	19,42	137,0	120,008	17,84	67,16	205,008
0,91	52	15,40	19,69	137,3	118,070	17,45	67,55	203,070
0,92	53	15,05	19,96	137,6	116,053	17,06	67,94	201,053
0,94	54	14,70	20,22	137,9	113,958	16,66	68,34	198,958
0,96	55	14,35	20,47	138,2	111,787	16,26	68,74	196,787
0,98	56	13,99	20,72	138,5	109,540	15,86	69,14	194,540
0,99	57	13,63	20,96	138,8	107,219	15,44	69,56	192,219
1,01	58	13,26	21,19	139,0	104,824	15,03	69,97	189,824
1,03	59	12,89	21,42	139,3	102,357	14,61	70,39	187,357
1,05	60	12,51	21,64	139,5	99,819	14,18	70,82	184,819
1,06	61	12,13	21,86	139,8	97,212	13,75	71,25	182,212
1,08	62	11,75	22,07	140,0	94,536	13,32	71,68	179,536
1,10	63	11,36	22,27	140,2	91,795	12,88	72,12	176,795
1,12	64	10,97	22,46	140,5	88,988	12,43	72,57	173,988
1,13	65	10,58	22,65	140,7	86,119	11,99	73,01	171,119
1,15	66	10,18	22,83	140,9	83,188	11,54	73,46	168,188
1,17	67	9,78	23,01	141,1	80,198	11,09	73,91	165,198
1,19	68	9,38	23,17	141,3	77,150	10,63	74,37	162,150
1,20	69	8,97	23,33	141,4	74,047	10,17	74,83	159,047
1,22	70	8,57	23,49	141,6	70,891	9,71	75,29	155,891
1,24	71	8,15	23,63	141,8	67,683	9,24	75,76	152,683
1,26	72	7,74	23,77	141,9	64,426	8,77	76,23	149,426
1,27	73	7,32	23,90	142,1	61,122	8,30	76,70	146,122
1,29	74	6,91	24,03	142,2	57,774	7,83	77,17	142,774
1,31	75	6,49	24,14	142,4	54,383	7,35	77,65	139,383
1,33	76	6,06	24,25	142,5	50,953	6,87	78,13	135,953
1,34	77	5,64	24,36	142,6	47,485	6,39	78,61	132,485
1,36	78	5,21	24,45	142,7	43,982	5,91	79,09	128,982
1,38	79	4,79	24,54	142,8	40,447	5,43	79,57	125,447
1,40	80	4,36	24,62	142,9	36,882	4,94	80,06	121,882

1,41	81	3,93	24,69	143,0	33,289	4,45	80,55	118,289
1,43	82	3,50	24,75	143,1	29,672	3,96	81,04	114,672
1,45	83	3,06	24,81	143,1	26,033	3,47	81,53	111,033
1,47	84	2,63	24,86	143,2	22,374	2,98	82,02	107,374
1,48	85	2,20	24,90	143,2	18,699	2,49	82,51	103,699
1,50	86	1,76	24,94	143,3	15,010	2,00	83,00	100,010
1,52	87	1,33	24,96	143,3	11,310	1,50	83,50	96,310
1,54	88	0,89	24,98	143,3	7,601	1,01	83,99	92,601
1,55	89	0,46	25,00	143,3	3,887	0,52	84,48	88,887
1,57	90	0,02	25,00	143,3	0,170	0,02	84,98	85,170

Tabella A.7.b.3: Valori di gittata SIEMENS Gamesa SG 6.2 MW 170 –115 per $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

Dal calcolo eseguito si evidenzia che si ottiene un angolo di gittata massima θ_g di 27° corrispondente ad un valore di gittata baricentrica massima pari a **227,38 m**.

Avendo calcolato la gittata massima della pala eolica come il moto bidimensionale di un proiettile puntiforme, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici (forze di attrito dell'aria e del vento), i risultati ottenuti sono da considerarsi a **vantaggio di sicurezza** e quindi sovrastimati. Infatti, più il corpo è grande e più la resistenza dell'aria influisce sulle variabili di moto (gittata, altezza massima e tempo di caduta).

Il valore ottenuto è sicuramente compatibile con quelli desunti dagli studi forniti dalle ditte produttrici, per caratteristiche geometriche diverse (altezza mozzo, diametro rotore e velocità angolare) e calcolati seguendo modelli matematici realistici.

Si rappresenta, inoltre, che la frequenza di rotazione in base alla quale si calcola la velocità di rotazione delle pale e che quindi determina il valore della gittata massima dei frammenti in caso di rottura in genere varia con il modello di aerogeneratore da installare.

A.7.c Conclusioni

Si sottolinea che i valori precedentemente calcolati vanno considerati solo in prima approssimazione. La presenza dell'aria, però, genera comunque delle forze di resistenza viscosse 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 pala in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala 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 pala durante il volo. L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione % della forza peso.

Si può concludere che, avendo posizionato l'aerogeneratore a distanza superiore ai 300 m dalle abitazioni, in caso di rottura accidentale, non vi sono condizioni di pericolo per cose o persone.

