



PROGETTO DI COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN
IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 37,2 MWp DA
REALIZZARSI NEL COMUNE DI GARAGUSO (MT) E SAN
MAURO FORTE (MT) CON LE RELATIVE OPERE DI
CONNESSIONE ELETTRICHE.

CALCOLO GITTA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

Rev. 0.0

Data: 27 Febbraio 2023

WIND15-REL003

Committente:

REPSOL SAN MAURO S.r.l.

via Michele Mercati n. 39
00197 Roma

Incaricato:

Queequeg Renewables, Ltd

Unit 3.21, 1110 Great West Road
TW80GP London (UK)

Company number: 111780524

email: mail@quenter.co.uk

Il progettista:

Ing. Alessandro Zanini



Indice

1	Introduzione	3
2	Descrizione tecnica generale del progetto.....	3
3	Aerogeneratore	3
4	Rischio di rottura accidentale	5
5	Gittata - analisi teorica.....	6
5.1	Traiettoria del frammento	6
5.2	Tempo di volo	6
5.3	Distanza percorsa	7
6	Moto rotazionale complesso	7
7	Calcolo della gittata	8
8	Conclusioni	14

1 Introduzione

La presente relazione tecnica è riferita all'impianto eolico da ubicarsi in Basilicata, nel territorio dei comuni di Garaguso (MT) e San Mauro Forte (MT), denominato "Garaguso", per la valutazione della gittata massima di elementi rotanti in caso di danneggiamento.

2 Descrizione tecnica generale del progetto

L'impianto eolico in oggetto risulta costituito da n. 6 aerogeneratori Gamesa-Siemens modello SG 170 aventi potenza nominale di 6,2 MW/cad per una potenza complessiva di 37,2 MW.

Oltre agli aerogeneratori ed alle opere strettamente necessarie, quali viabilità di accesso e piazzole di montaggio/stoccaggio, il progetto prevede la realizzazione di:

- Elettrodotto interrato di utenza a tensione 36kV;
- Elettrodotto interrato di alta tensione 36 kV di connessione;
- Cabina elettrica di trasformazione MT/AT 30/36 kV;
- Opere di rete comprendenti scomparto di consegna 36 kV in Stazione "Garaguso", come da Soluzione tecnica minima rilasciata dall'ente gestore TERNA S.p.a.

3 Aerogeneratore

Gli aerogeneratori in progetto si compongono dei seguenti elementi: struttura di fondazione; torre di sostegno composta da trami in acciaio, mozzo, tre lame, rotore, moltiplicatore di giri, generatore, sistemi di controllo ed orientamento, navicella, trasformatore, componentistica elettrica, impianto di messa a terra.

La torre di sostegno è del tipo tubolare a cinque trami con unioni bullonate, idoneamente ancorata alla struttura di fondazione.

All'estremità superiore sarà collegata, tramite idonea bullonatura, la navicella contenete gli elementi tecnologici necessaria alla conversione dell'energia, il rotore (collegato all'albero di trasmissione) e le lame (o pale) per la captazione del vento.

In ogni aerogeneratore, all'interno della navicella e della torre di sostegno, sono contenute tutte le apparecchiature di bassa tensione (raddrizzatori, inverter, quadro di comando e controllo aerogeneratore) e di media tensione (trasformatore BT/MT, quadro MT di sezionamento e protezione). Dal generatore elettrico posto all'interno della navicella, i cavi eserciti a 690 V trasportano l'energia elettrica prodotta al trasformatore (MT) in cui avviene l'elevazione ad una tensione di 36 kV.

Di qui l'energia viene immessa nei cavi interrati al fine di trasportarla verso la cabina di parallelo AT/AT 36/36 kV che sarà posta nelle vicinanze della nuova stazione RTN 380/150/36 kV da realizzarsi in entra-esce sulla linea 380 kV "Melfi 380 – Genzano 380".

Ogni aerogeneratore presenta i seguenti dati geometrici, meccanici ed elettrici.

Modello tipo GAMESA-SIEMENS SG-170	
Altezza mozzo dal piano campagna (Hub)	135 [m]
Lunghezza lame	83,5 [m]
Diametro del rotore	170 [m]
Altezza complessiva dal piano campagna	218,5 [m]
Velocità di cut-off	25 [m/s]
Potenza nominale	6,2 [MW]

In figura 2 si riportano le caratteristiche dell'aerogeneratore SG-170.

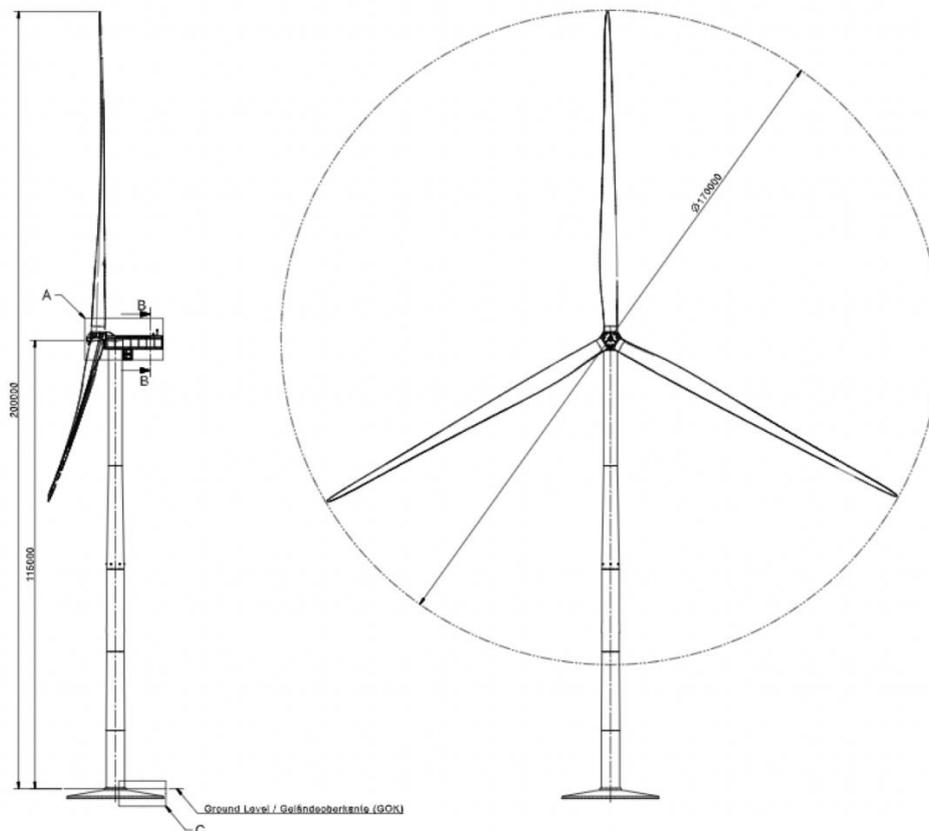


Fig. 2 – Disegno d'assieme SG-170

Il rotore è costituito da tre lame e sarà fissato sul mozzo della navicella a sua volta installata sulla torre in acciaio tubolare.

La potenza in uscita sarà controllata dalla regolazione della domanda di passo e coppia. La velocità del rotore è variabile ed è progettata per massimizzare la potenza erogata.

Le lame sono costituite da infusione di fibra di vetro e stampaggio di componenti in pultruso di carbonio. La struttura della pala utilizza gusci aerodinamici contenenti copri-longheroni incorporati, incollati a due principali nastri di taglio epossi-fibra di vetrobalsa/schiuma.

Il mozzo del rotore è fuso in ghisa sferoidale ed è fissato all'albero a bassa velocità della trasmissione con una connessione a flangia.

La trasmissione è un concio di sospensione a 4 punti: albero principale con due cuscinetti principali e cambio con due bracci di reazione montati al telaio principale.

La turbina eolica è montata di serie su una torre tubolare rastremata in acciaio dotata di salita interna e accesso diretto al sistema di imbardata e navicella. La salita è dotata di pedane e illuminazione elettrica interna.

4 Rischio di rottura accidentale

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

- pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che:

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato);
- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente

-
- autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo);

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

5 Gittata - analisi teorica

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavellotto" del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

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 generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

5.3 Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

6 Moto rotazionale complesso

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da escludersi data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento.

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello "Complex Rotational Motion", che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

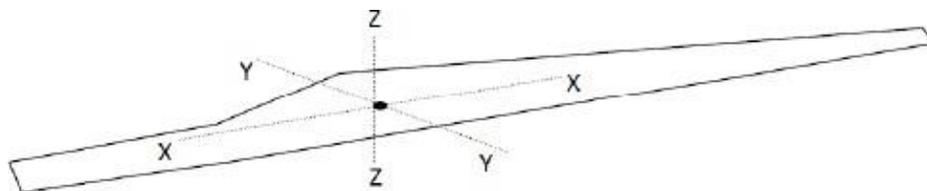


Fig. 3 - Rappresentazione degli assi di rotazione

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano.

La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente *out of plane* sulla pala/sezione di pala. In particolare si genera:

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

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise.

Pertanto il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy.

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Di questi parametri si tiene sostanzialmente conto di studi specifici che prendono in considerazione vari casi e che permettono di concludere che:

- se si effettuassero calcoli che tengano in conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale si ottengono valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

Nel paragrafo vengono effettuati i calcoli della gittata per l'aerogeneratore in progetto, considerando solo parametri geometrici e cinematici e non l'effettivo moto rotazionale complesso, e pertanto otterremo valori della gittata sicuramente superiori rispetto a quelli reali.

7 Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato effettuato considerando soltanto i parametri cinematici e geometrici, in particolare considerando:

Modello tipo GAMESA-SIEMENS SG-170	
Altezza mozzo dal piano campagna (Hub)	135 [m]
Lunghezza lame	83,5 [m]
Diametro del rotore	170 [m]
Altezza complessiva dal piano campagna	218,5 [m]
Velocità di cut-off	25 [m/s]
Massima velocità di rotazione – n	10 [giri/min]
rg^*	27,8 [m]
vg^{**}	29,09 [m/s]
Potenza nominale	6,2 [MW]

* valore ottenuto assumendo che, in relazione alle caratteristiche della pala e la distribuzione dei pesi, il baricentro sia ad 1/3 rispetto alla lunghezza della pala.

** velocità del baricentro della pala, ottenuta dalla formula $vg = (2\pi n/60) rg$

Altre caratteristiche:

- θ è l'angolo, rispetto all'orizzontale a cui avviene il distacco
- $Hg = H + Yg$, dove $Yg = Rg \sin \theta$, indica la distanza (lungo l'asse y) del baricentro della pala rispetto al mozzo al momento del distacco
- $vx0 = vg \cos \theta$, è la velocità lungo l'asse x
- $vy0 = vg \sin \theta$, è la velocità lungo l'asse y

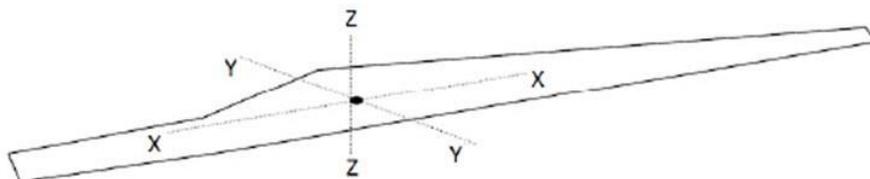


Fig. 4 - Baricentro pala

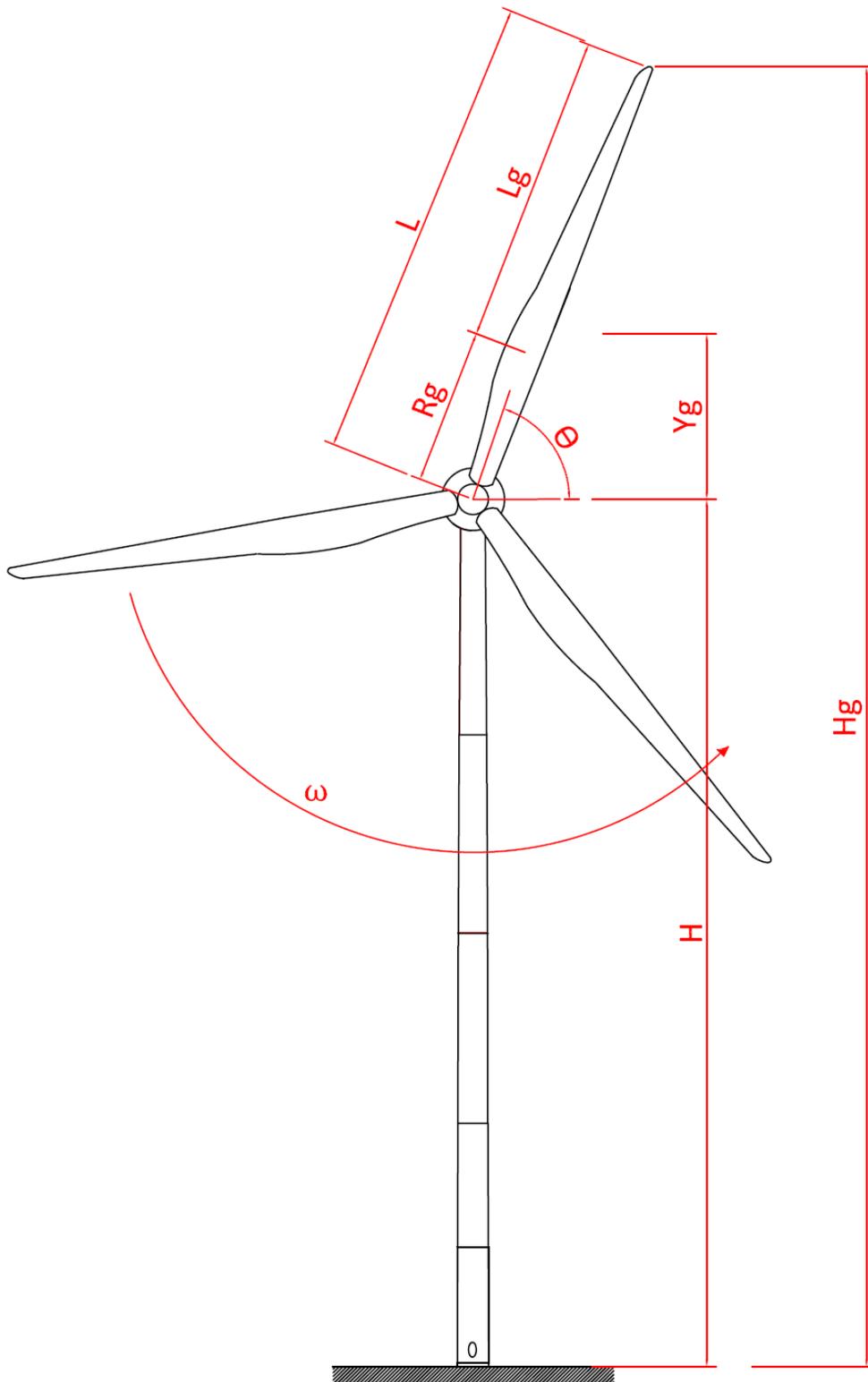


Fig. 5 – Riferimenti geometrici di calcolo

Considerando la tipica traiettoria parabolica di un grave in caduta

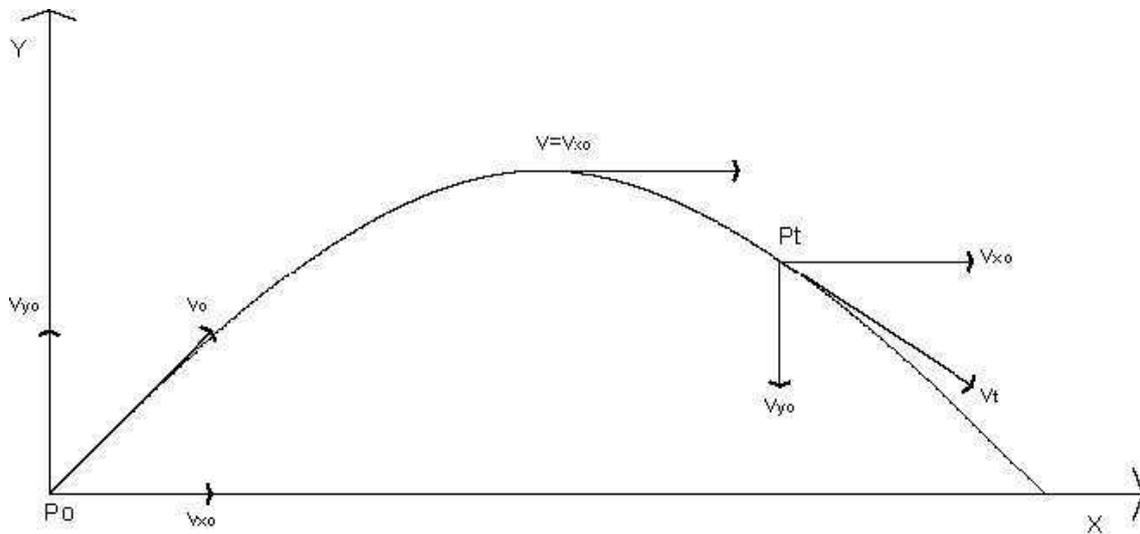


Fig. 6 - Traiettoria di un grave in caduta

e le equazioni del moto corrispondente, considerando che il moto lungo l'asse x è rettilineo uniforme e lungo l'asse y è uniformemente accelerato, abbiamo:

$$V_x = V_{0x} \quad x = x_0 + V_{0x}t \quad V_y = gt + V_{0y} \quad y = 1/2gt^2 + V_{0y}t + y_0$$

dove ovviamente g è l'accelerazione di gravità e t il tempo del moto.

Applicando queste formule e risolvendo l'equazione del moto, con una serie di passaggi si perviene alla formula di calcolo della gittata massima.

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

E' evidente che V_{x0} , V_{y0} ed H_g dipendono dall'angolo θ , a cui avviene il distacco della pala e pertanto tale valore sarà calcolato per valori di θ che variano da 0° (pala in orizzontale) a 90° (pala in verticale, con massima estensione in altezza).

Al valore della gittata calcolato con questa formula andrà sommata la distanza X_g del baricentro della pala rispetto all'asse della torre al momento del distacco ($X_g = rg \cos \theta$) e la distanza del vertice della pala dal baricentro $L_g = 42$ m.

Nella tabella seguente sono indicati i valori della gittata massima al variare dell'angolo θ .

theta	vx	vy	Hg	Gittata teorica	xg	Lg	Gittata
0	29,15	0,00	135,00	152,91	27,83	55,67	236,41
1	29,14	0,51	135,49	154,68	27,83	55,67	238,18
2	29,13	1,02	135,97	156,42	27,82	55,67	239,90
3	29,11	1,53	136,46	158,12	27,80	55,67	241,58
4	29,08	2,03	136,94	159,78	27,77	55,67	243,21
5	29,04	2,54	137,43	161,40	27,73	55,67	244,79
6	28,99	3,05	137,91	162,97	27,68	55,67	246,32
7	28,93	3,55	138,39	164,50	27,63	55,67	247,79
8	28,86	4,06	138,87	165,98	27,56	55,67	249,21
9	28,79	4,56	139,35	167,41	27,49	55,67	250,57
10	28,70	5,06	139,83	168,78	27,41	55,67	251,86
11	28,61	5,56	140,31	170,10	27,32	55,67	253,09
12	28,51	6,06	140,79	171,37	27,23	55,67	254,26
13	28,40	6,56	141,26	172,57	27,12	55,67	255,35
14	28,28	7,05	141,73	173,71	27,01	55,67	256,38
15	28,15	7,54	142,20	174,78	26,88	55,67	257,33
16	28,02	8,03	142,67	175,78	26,76	55,67	258,21
17	27,87	8,52	143,14	176,72	26,62	55,67	259,00
18	27,72	9,01	143,60	177,58	26,47	55,67	259,72
19	27,56	9,49	144,06	178,37	26,32	55,67	260,36
20	27,39	9,97	144,52	179,09	26,15	55,67	260,91
21	27,21	10,45	144,97	179,72	25,98	55,67	261,37
22	27,02	10,92	145,43	180,27	25,81	55,67	261,75
23	26,83	11,39	145,88	180,74	25,62	55,67	262,03
24	26,63	11,86	146,32	181,13	25,43	55,67	262,22
25	26,42	12,32	146,76	181,42	25,23	55,67	262,32
26	26,20	12,78	147,20	181,63	25,01	55,67	262,31
27	25,97	13,23	147,64	181,75	24,80	55,67	262,22
28	25,74	13,68	148,07	181,78	24,58	55,67	262,02
29	25,49	14,13	148,49	181,71	24,34	55,67	261,72
30	25,24	14,57	148,92	181,55	24,10	55,67	261,32
31	24,98	15,01	149,34	181,29	23,86	55,67	260,81
32	24,72	15,45	149,75	180,93	23,60	55,67	260,20
33	24,44	15,87	150,16	180,47	23,34	55,67	259,48
34	24,16	16,30	150,56	179,92	23,07	55,67	258,66
35	23,88	16,72	150,96	179,25	22,80	55,67	257,72
36	23,58	17,13	151,36	178,49	22,52	55,67	256,68
37	23,28	17,54	151,75	177,62	22,23	55,67	255,52
38	22,97	17,94	152,14	176,65	21,93	55,67	254,25
39	22,65	18,34	152,52	175,57	21,63	55,67	252,87
40	22,33	18,74	152,89	174,39	21,32	55,67	251,38
41	22,00	19,12	153,26	173,10	21,01	55,67	249,77

theta	vx	vy	Hg	Gittata teorica	xg	Lg	Gittata
42	21,66	19,50	153,62	171,71	20,68	55,67	248,06
43	21,32	19,88	153,98	170,20	20,36	55,67	246,22
44	20,97	20,25	154,33	168,59	20,02	55,67	244,28
45	20,61	20,61	154,68	166,87	19,68	55,67	242,22
46	20,25	20,97	155,02	165,05	19,33	55,67	240,05
47	19,88	21,32	155,36	163,12	18,98	55,67	237,76
48	19,50	21,66	155,68	161,08	18,62	55,67	235,37
49	19,12	22,00	156,01	158,93	18,26	55,67	232,86
50	18,74	22,33	156,32	156,68	17,89	55,67	230,24
51	18,34	22,65	156,63	154,33	17,52	55,67	227,51
52	17,94	22,97	156,93	151,87	17,14	55,67	224,67
53	17,54	23,28	157,23	149,30	16,75	55,67	221,72
54	17,13	23,58	157,52	146,64	16,36	55,67	218,67
55	16,72	23,88	157,80	143,87	15,96	55,67	215,51
56	16,30	24,16	158,07	141,01	15,56	55,67	212,24
57	15,87	24,44	158,34	138,04	15,16	55,67	208,87
58	15,45	24,72	158,60	134,98	14,75	55,67	205,40
59	15,01	24,98	158,86	131,83	14,34	55,67	201,83
60	14,57	25,24	159,10	128,58	13,92	55,67	198,16
61	14,13	25,49	159,34	125,24	13,49	55,67	194,40
62	13,68	25,74	159,58	121,81	13,07	55,67	190,54
63	13,23	25,97	159,80	118,29	12,64	55,67	186,59
64	12,78	26,20	160,02	114,68	12,20	55,67	182,55
65	12,32	26,42	160,23	110,99	11,76	55,67	178,42
66	11,86	26,63	160,43	107,23	11,32	55,67	174,21
67	11,39	26,83	160,62	103,38	10,88	55,67	169,92
68	10,92	27,02	160,81	99,46	10,43	55,67	165,55
69	10,45	27,21	160,98	95,46	9,97	55,67	161,10
70	9,97	27,39	161,15	91,39	9,52	55,67	156,58
71	9,49	27,56	161,32	87,26	9,06	55,67	151,98
72	9,01	27,72	161,47	83,06	8,60	55,67	147,32
73	8,52	27,87	161,62	78,79	8,14	55,67	142,60
74	8,03	28,02	161,76	74,47	7,67	55,67	137,81
75	7,54	28,15	161,88	70,10	7,20	55,67	132,97
76	7,05	28,28	162,01	65,67	6,73	55,67	128,07
77	6,56	28,40	162,12	61,19	6,26	55,67	123,11
78	6,06	28,51	162,23	56,66	5,79	55,67	118,11
79	5,56	28,61	162,32	52,09	5,31	55,67	113,07
80	5,06	28,70	162,41	47,48	4,83	55,67	107,98
81	4,56	28,79	162,49	42,84	4,35	55,67	102,86
82	4,06	28,86	162,56	38,16	3,87	55,67	97,70
83	3,55	28,93	162,63	33,45	3,39	55,67	92,51

theta	vx	vy	Hg	Gittata teorica	xg	Lg	Gittata
84	3,05	28,99	162,68	28,72	2,91	55,67	87,30
85	2,54	29,04	162,73	23,97	2,43	55,67	82,06
86	2,03	29,08	162,77	19,20	1,94	55,67	76,81
87	1,53	29,11	162,80	14,41	1,46	55,67	71,53
88	1,02	29,13	162,82	9,61	0,97	55,67	66,25
89	0,51	29,14	162,83	4,81	0,49	55,67	60,96
90	0,00	29,15	162,83	0,00	0,00	55,67	55,67

8 Conclusioni

Nella presente relazione è stata esposta la descrizione tecnica complessiva del calcolo del rischio gittata in merito al progetto della centrale eolica sita nel territorio dei Comuni di Garaguso e San Mauro Forte, in provincia di Matera.

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo $\theta = 25^\circ$, per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa 263 m dal centro della torre tubolare. Sottolineiamo ancora che questo valore è teorico ed altamente conservativo, poiché non tiene in conto le forze di attrito viscoso e la complessità del moto rotazionale, ovvero la rotazione della pala durante il moto di caduta, condizioni reali che attenuano i valori della gittata massima.

Questi dati e queste considerazioni teoriche, peraltro sembrano suffragata dall'esperienza reale:

- il distacco della pala è un evento che si è verificato molto raramente;
- nel caso in cui si sono verificati distacchi è stato verificato che il moto è di tipo rotazionale complesso e la distanza di volo è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti dai calcoli matematici;
- le parti che hanno subito subito distacchi a causa di eventi estremi, come fulminazioni, sono state rinvenute a non più di 40-50 m dalla base della torre eolica per aerogeneratori con diametro del rotore pari a 80m.