Regione Liguria	Comune Cairo Montenotte	Comune Savona	Provincia Savona
REGIONE LIGURIA			PAR PARIBVS

Parco eolico
Pian del Melo - 9 MW

Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti

REL. 09

Progetto definitivo
Comuni Cairo Montenotte e Savona
Località Pian del Melo
Rev. 00 - Giugno 2025
Scala

Bissi Marco
04.08.2025
15:45:12
GMT+02:00

IL PROGETTISTA

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI CUNEO
A1949 Dott. Ing. Samuele Viara

BH Wind s.r.l.
Via Zara, 5
23100 SONDRIO
tel. +39.0342.211159
fax. +39.0342.517163

www.bissiholding.com - info@bissiholding.com
C.F. - P.Iva. 01055440141
R.E.A. SO - 79322
Con Unico Socio

Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Bissi Holding S.p.A.

INDICE

1. Caratteristiche aerogeneratori 2

1.1 Sistema di sicurezza - gittata massima 2

1.2 Calcolo della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale 3

1.1.1 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica 5

1.1.2 Gittata Massima 6

1.1.3 Calcolo della velocità periferica 8

2. Calcolo della gittata massima 9

1. Caratteristiche aerogeneratori

Esistono molteplici tipologie di aerogeneratori a seconda della potenza installata e a seconda del costruttore. La scelta sulla macchina che si andrà ad installare verrà effettuata nella fase esecutiva del progetto, per cui dopo aver ottenuto l'autorizzazione unica alla costruzione e alla gestione del parco eolico.

In questa fase progettuale si può affermare che il parco eolico sarà composto da **2 aerogeneratori** di potenza nominale pari a **4,5 MW** ciascuno per un totale di **9 MW** complessivi.

Per quanto riguarda l'aspetto di generazione dell'energia elettrica e della sua immissione in rete si rimanda invece all'allegato **Disciplinare Descrittivo e Prestazionale degli Elementi Tecnici** e **alla STMG accettata** ed allegata al progetto.

1.1 Sistema di sicurezza - gittata massima

Gli aerogeneratori testati nelle simulazioni di producibilità nel presente studio sono tutti di potenza pari a 4 MW di potenza nominale con **diametro del rotore 138 m** e **altezza hub non superiore a 111 m**. **L'altezza complessiva massima di ogni aerogeneratore non sarà comunque superiore a 180 m complessivi sul piano campagna.** In questa fase gli aerogeneratori presi in considerazione sono Enercon E 138 e Vestas V 136. Le caratteristiche dei due modelli sono molto simili e pertanto possono essere considerati mutuamente per quello che è lo scopo del presente report sulla gittata massima in caso di rottura degli organi rotanti.

Pertanto, riportiamo nella presente relazione i casi limite al fine di valutare le condizioni peggiori che si possano verificare in caso di rottura accidentale delle parti rotanti. In particolare, il modello di aerogeneratore testato è:

ENERCON E 138 – 4,5 MW

Nei capitoli che seguono viene indicata la procedura di calcolo utilizzata e tutte le ipotesi semplificative adottate per il calcolo della gittata massima nel caso di rottura accidentale di un elemento rotante.

1.2 Calcolo della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo. Per tale ragione si sono considerati il caso di rottura per distacco di una parte rotante di aerogeneratori dalle seguenti caratteristiche:

Specifiche tecniche dell'aerogeneratore ENERCON E 138 – 4,5 MW con diametro del rotore massimo 138 m:

Diametro rotore [m]	138 m
Altezza del mozzo [m]	111 m
Inclinazione asse rotore [°]	8°
Potenza nominale [MW]	4500 KW
Velocità rotore [rpm]	4 – 10,5 rpm
Velocità di Cut-in [m/s]	3 m/s
Velocità di Cut-out [m/s]	32 m/s
Velocità nominale [m/s]	14 m/s
Controllo della Potenza	Pitch

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale e semplificativo per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile.

Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità (più veloci sono gli oggetti più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono). Tale premessa è utile per ritenere trascurabili, effettuando dunque una scelta conservativa, le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Nel caso notevole di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = Ma_G$$

$$I\frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto nel centro di massa, il momento della forza peso è nullo (rispetto ad un sistema di riferimento centrato nel baricentro G). Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione del problema viene dalla risoluzione della prima equazione; ed evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme e, di conseguenza, ne compirà il caratteristico andamento parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale), ed il punto in cui esso finisce al suolo. Si osservi che all'aumentare dell'angolo a

formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo ***a*** pari a π/4; ad ulteriori incrementi dell'angolo ***a*** il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorquando il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a π/2. Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano **xy** in cui l'origine **O** degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

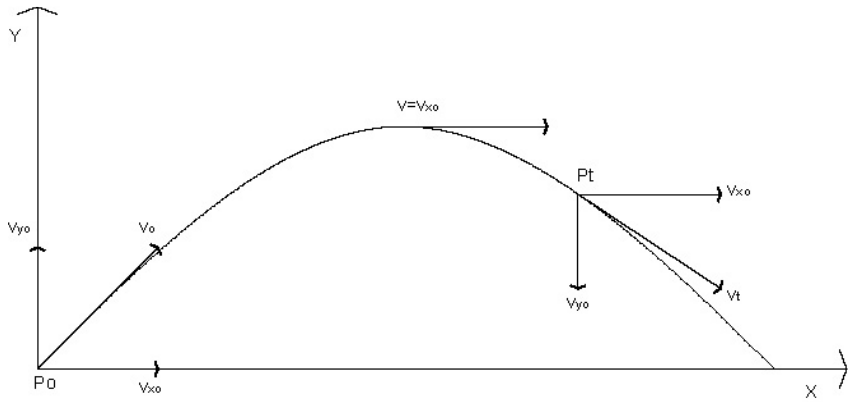
1.1.1 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica

Considereremo il moto bidimensionale di un proiettile, 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.

Sceglieremo un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x0, y0), 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:

$$a_x = 0 \qquad a_y = -g.$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale v0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di un angolo θ come in figura:



Ricordando che:

$a_x = 0 \quad a_y = g$ (dove $g = 9{,}81 m/\sec^2$)

e considerando che:

- Direzione x: il Moto è Rettilineo Uniforme
- Direzione y: il Moto è Uniformemente Accelerato

La velocità v0 ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos\theta$$
$$v_y = v_0 \sin\theta$$

Da cui:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{x0} \\ v_y &= -gt + v_{y0} \end{aligned} \quad \text{e} \quad \begin{aligned} x &= x_0 + v_{x0}t \\ y &= -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 \end{aligned}$$

1.1.2 Gittata Massima

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo y determinando così l'istante t in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota y = 0 sarà:

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

Nell'ipotesi semplificativa che y0 = 0 si ottiene:

$$-\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni: t0 = 0 e $t_1 = +\frac{2v_{y0}}{g} = +\frac{2v_0 \sin\theta}{g}$

t0 corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che y0

= 0); t1 all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo valore nell'equazione $x = x_0 + v_{x0}t$, descrittiva del moto lungo x, si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 + 2\frac{v^2{}_0}{g}\sin\theta\cos\theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = -\frac{v_0{}^2}{g}\sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di θ angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando sin2θ = 1, cioè, 2θ = π/2 ossia θ = π/4.

Nel caso in questione y0 non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia r_g raggio di ciascuna pala.

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

dove:

$$Y_g = \frac{1}{3}r \cdot \sin\theta\,.$$

Ciò implica che la soluzione di t sarà:

$$t = -\left(\frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{yo}{}^2 + 4\left(\frac{1}{2} g y_0\right)}}{g} \right)$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo x, per trovare la gittata massima.

1.1.3 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media w è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo 2πn radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare w al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} rad / \sec .$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio r percorre la circonferenza 2 π r ; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà 2πrn metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sul baricentro di ciascuna delle tre pale del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = (0{,}1046666 * r_g * n) m / \sec$$

2. Calcolo della gittata massima

Quindi, in generale, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione, 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 ax = 0, ay = -g.
- la velocità periferica v0 varia in funzione del modello considerato.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma $(0, H_G = H_{torre} + Y_g)$ ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

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

$$Gittata_{\max} = v_{X0} \frac{+v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 4\left(\frac{1}{2} g \cdot H_G\right)}}{g}$$

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

Nelle tabelle che seguono si sono indicati i valori della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta nel seguente caso:

a. Condizione più gravosa in senso assoluto

Nell'ordine verranno effettuate simulazioni sul seguente modello – si sono prese le condizioni estreme per essere conservativi:

1) **ENERCON E 138 4500 KW :**
   - hub = 111 metri
   - diametro = 138 m
   - rpm = 10,5 (alla massima potenza)

ANGOLO	GITTATA MASSIMA [m]	GITTATA COMPLESSIVA [m]	ANGOLO	GITTATA MASSIMA [m]	GITTATA COMPLESSIVA [m]	ANGOLO	GITTATA MASSIMA [m]	GITTATA COMPLESSIVA [m]
0	120.31	189.31	31	141.02	206.74	62	94.14	150.93
1	121.65	190.64	32	140.70	206.21	63	91.41	147.85
2	122.96	191.95	33	140.31	205.60	64	88.61	144.69
3	124.25	193.21	34	139.83	204.90	65	85.75	141.47
4	125.50	194.44	35	139.28	204.12	66	82.83	138.18
5	126.72	195.63	36	138.65	203.26	67	79.85	134.84
6	127.90	196.78	37	137.94	202.31	68	76.81	131.43
7	129.05	197.88	38	137.15	201.27	69	73.72	127.96
8	130.16	198.94	39	136.28	200.15	70	70.57	124.44
9	131.23	199.95	40	135.33	198.95	71	67.37	120.86
10	132.25	200.91	41	134.29	197.65	72	64.12	117.23
11	133.24	201.81	42	133.18	196.27	73	60.83	113.55
12	134.17	202.67	43	131.98	194.80	74	57.49	109.83
13	135.06	203.47	44	130.70	193.25	75	54.10	106.06
14	135.90	204.22	45	129.34	191.61	76	50.68	102.25
15	136.69	204.91	46	127.90	189.88	77	47.22	98.40
16	137.42	205.53	47	126.38	188.06	78	43.73	94.51
17	138.11	206.10	48	124.77	186.16	79	40.20	90.59
18	138.73	206.60	49	123.09	184.18	80	36.64	86.63
19	139.30	207.04	50	121.32	182.11	81	33.05	82.65
20	139.80	207.42	51	119.48	179.95	82	29.44	78.65
21	140.25	207.72	52	117.55	177.71	83	25.81	74.62
22	140.63	207.96	53	115.55	175.39	84	22.16	70.57
23	140.95	208.12	54	113.46	172.98	85	18.49	66.50
24	141.20	208.22	55	111.31	170.50	86	14.81	62.42
25	**141.39**	**208.23**	56	109.07	167.93	87	11.12	58.32
26	141.51	208.18	57	106.76	165.29	88	7.42	54.22
27	141.55	208.05	58	104.38	162.57	89	3.71	50.11
28	141.53	207.84	59	101.92	159.77	90	0.00	46.00
29	141.43	207.55	60	99.40	156.90			
30	141.27	207.18	61	96.80	153.95			

In conclusione, si riportano in tabella i risultati delle simulazioni effettuate:

Modello Aerogeneratore	Altezza Mozzo [m]	Gittata Complessiva [m]
ENERCON E138 – 4,5 MW	111	**208,23**

Come si vede dai risultati riportati in Tabella, la gittata massima complessiva è in tutti i casi inferiore alla distanza da qualsiasi recettore, senza considerare che il calcolo è conservativo perché non tiene conto della resistenza dell'aria e senza considerare che in realtà, dato che la rosa dei venti è fortemente orientata in due sole direzioni, nell'eventuale malaugurata ipotesi della rottura di una pala, non tutte le direzioni hanno la stessa probabilità di lancio, anzi questo, sostanzialmente può avvenire o verso Nord Est o Sud Ovest.