



Regione Emilia-Romagna
Provincia di Bologna
Comune di Camugnano
Comune di Castiglione dei Pepoli

PROGETTO DEFINITIVO

Nome progetto

"Eolico Camugnano"

Oggetto

Progetto per la realizzazione di un impianto eolico da 30 MW con sistema di accumulo da 8 MW e relative opere di connessione, da ubicarsi nei Comuni di Camugnano (BO) e Castiglione dei Pepoli (BO).

Titolo

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.R.L.
Via della Chimica 103
85100 Potenza (PZ)

Progettista:



SYNERGY S.R.L.
Via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 - Castel Maggiore (BO)

Il professionista:
Ing. Pierpaolo Semproli
(c/o Teleios srl - progettista opere civili)

7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0	08/03/2024	EMISSIONE	Ing. G. Fiorini	Ing. P. Semproli	Ing. L. Malservisi
Rev.	Data	Motivo Revisione	Eseguito	Verificato	Approvato

Tipologia: RELAZIONE	Formato: A4	Foglio: -
Scala: -	File: SYN036.PD.RC.001_00	Tavola: N° SYN036.PD.RC.001

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

**Relazione analisi degli effetti di
rottura degli organi rotanti**



Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE.....	2
2	IPOTESI DI CALCOLO	3
3	CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE DI PROGETTO	4
3.1	CARATTERISTICHE TORRE TS180-03 - TRIPALA.....	4
3.2	CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO	4
4	CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO DELLA PALA	5
4.1	CALCOLO DELLA POSIZIONE DEL BARICENTRO	6
4.2	CALCOLO DELLA VELOCITA' PERIFERICA	7
4.3	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA	7
5	CONCLUSIONI	10

Progettazione:  via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)	Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti	Committente:  ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)
---	--	---

1 INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la relazione di analisi dei possibili effetti causati da una rottura degli organi rotanti degli aerogeneratori tripala la cui installazione è prevista nell'ambito del progetto per la realizzazione di un impianto eolico onshore e relative opere di connessione, da ubicarsi nel Comune di Camugnano e Castiglione dei Pepoli (BO).

Il fine della relazione è quello di valutare, in fase preliminare, la gittata massima della pala dell'aerogeneratore nel caso di improvviso e accidentale distacco dal rotore dell'aerogeneratore di progetto. Nel calcolo si è considerata l'ipotesi di distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento meccanico. Lo studio prende in considerazione il calcolo della gittata nell'ipotesi di rottura dell'intera pala considerando un angolo di lancio variabile. Con riferimento alla rottura della pala e all'angolo per cui si ha la maggiore gittata, si riporteranno i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore massimo ottenuto.

Il calcolo è stato effettuato in accordo con quanto previsto nelle "Nuove Norme Tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17/01/2018 e relativa Circolare Ministeriale 21/01/2019 n.7.

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

2 IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati ampiamente cautelativi.

Per il calcolo della gittata massima si sono fatte le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo θ_s
- la velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

Verrà, inoltre, preso in considerazione il caso che riguarda il solo distacco della pala integra all'aerogeneratore, quindi senza che essa subisca una rottura parziale. Questo tipo di approccio semplifica moderatamente il problema ma garantisce una buona verosimiglianza del calcolo, poiché non potendo prevedere la forma né le dimensioni del pezzo che potrebbe staccarsi dalla pala ogni ipotesi in merito potrebbe generare scenari non del tutto attendibili. Va, inoltre, tenuto presente che il sistema di controllo della turbina comprende dei sensori che in caso di vibrazioni anomale della pala procede al blocco della turbina stessa, per cui la situazione di rottura parziale della pala è altamente improbabile.

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

3 CARATTERISTICHE DELL'AEROGENERATORE DI PROGETTO

Di seguito si riportano le caratteristiche geometrico-funzionali della torre considerata. Tali valori fanno riferimento a valori tipologici per torri con caratteristiche assimilabili a quelle che si prevede di installare nell'impianto in oggetto

3.1 CARATTERISTICHE TORRE TRIPALA

- Altezza mozzo: 118.0 m
- Diametro: 163.0 m
- Area spazzata: 20867 m²
- Velocità di rotazione massima: 11.6 giri/m
- Numero pale: 3
- Lunghezza pala: 79.7 m
- Posizione del baricentro dalla pala: 1/3 lunghezza pala

3.2 CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO

- Velocità di cut-in: 3.0 m/s
- Velocità di cut-out: 26.0 m/s

4 CALCOLO DELLA LEGGE DEL MOTO DELLA PALA

Nel presente paragrafo viene descritta la legge del moto utilizzata per il calcolo della gittata.

Il moto della pala verrà assimilato a quello di un proiettile. Con lo studio del moto di quest'ultimo si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni che interessano i corpi che vengono lanciati (o ad esempio urtano) 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 non trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto.

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono la prima e la seconda equazione della dinamica, che in forma vettoriale si scrivono:

$$M \cdot g = M a_g$$

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

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa G della pala, il momento della forza peso è nullo (avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti). Pertanto, la seconda equazione ci dice che il corpo lungo la traiettoria percorsa gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema è quindi data dalla risoluzione della prima equazione. Questa evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme descrivendo la caratteristica curva parabolica.

Come noto, 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 di modulo g in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita dal corpo ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato il proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

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) si è utilizzato il sistema di riferimento cartesiano xy rappresentato nella figura seguente.

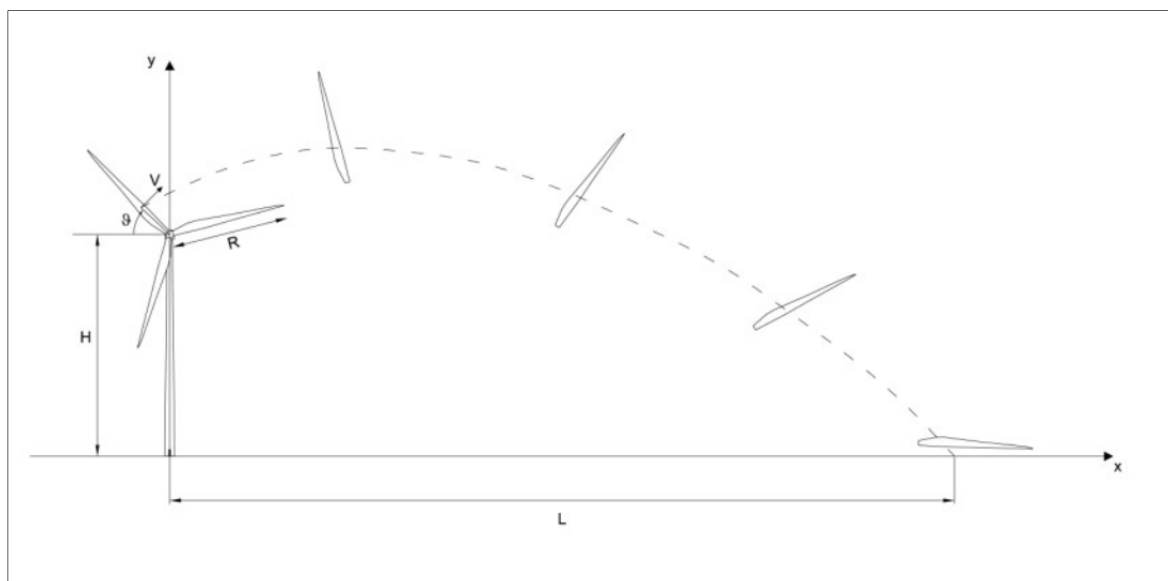


Figura 1

Supponendo, come detto, di concentrare la massa della pala nel baricentro e trascurando il moto rotazionale della pala durante il volo, le equazioni del moto del baricentro sono quelle di un punto materiale soggetto alla sola forza di gravità:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}$$

dove $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto soluzione di queste equazioni è:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2\end{aligned}$$

dove (x_0, y_0) è la posizione iniziale del punto materiale nel sistema di riferimento indicato e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto intercetta il suolo al tempo T per cui si ha $y(T) = 0$.

Dalla legge del moto si ottiene:

$$T(y = 0) = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

Avendo scartato la soluzione corrispondente ai tempi negativi.

La posizione e la velocità sono determinati dall'angolo θ e dalla velocità tangenziale V del baricentro della pala al momento del distacco. Come si vede dalla figura 1, essi sono legati alla posizione e alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned}x_0 &= -R_G \cos\theta \\ y_0 &= H + R_G \sin\theta \\ v_x &= V \sin\theta \\ v_y &= V \cos\theta\end{aligned}$$

avendo indicato con R_G la distanza del baricentro G della pala dal punto di attacco della pala stessa.

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo del baricentro della pala.

Dalla legge di moto otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata L in funzione di V e di θ :

$$L = \frac{V \sin\theta}{g} \left[V \cos\theta + \sqrt{V^2 \cos^2\theta + 2(H + R_G \sin\theta)g} \right] - R_G \cos\theta$$

Prima di effettuare il calcolo della gittata, calcoliamo i parametri che ci serviranno per il prosieguo dello stesso.

4.1 CALCOLO DELLA POSIZIONE DEL BARICENTRO

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 ad $R_G = 1/3 L_{\text{pala}} = 26,6 \text{ m}$ per l'aerogeneratore di progetto (essendo $L_{\text{pala}} = 79,7 \text{ m}$).

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

4.2 CALCOLO DELLA VELOCITA' PERIFERICA

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Indicando con n il numero di giri al minuto compiuti dal corpo in movimento circolare e tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω al minuto del corpo in movimento. Il dato di partenza è $n = 11,6$ giri/min (vedere par. 3), che corrisponde ad una velocità angolare:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,21 \frac{rad}{s}$$

La velocità V del baricentro G si ricaverà quindi dalla relazione:

$$V = \omega \cdot R_G$$

Cioè:

$$V = \omega \cdot R_G = \frac{2\pi n}{60} R_G = 32,26 \frac{m}{s}$$

4.3 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Sostituendo allora nella (1) i valori di R_G e V sopra determinati e l'altezza del mozzo $H = 118$ m, possiamo riportare in una tabella i valori della gittata L in funzione dell'angolo θ . Si ottiene così la Tabella 1:

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

$\theta[^\circ]$	$\theta[\text{rad}]$	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$L[\text{m}]$
0	0	0	1	-26.57
5	0.087	0.087	0.996	-0.56
10	0.175	0.174	0.985	25.34
15	0.262	0.259	0.966	50.63
20	0.349	0.342	0.940	74.81
25	0.436	0.423	0.906	97.45
30	0.524	0.500	0.866	118.16
35	0.611	0.574	0.819	136.61
40	0.698	0.643	0.766	152.56
45	0.785	0.707	0.707	165.84
50	0.873	0.766	0.643	176.38
55	0.960	0.819	0.574	184.18
60	1.047	0.866	0.500	189.30
65	1.134	0.906	0.423	191.89
66	1.152	0.914	0.407	192.12
67	1.169	0.921	0.391	192.26
68	1.187	0.927	0.375	192.31
69	1.204	0.934	0.358	192.27
70	1.222	0.940	0.342	192.15
71	1.239	0.946	0.326	191.94
72	1.257	0.951	0.309	191.66
73	1.274	0.956	0.292	191.29
74	1.292	0.961	0.276	190.84
75	1.309	0.966	0.259	190.33
80	1.396	0.985	0.174	186.69
85	1.484	0.996	0.087	181.52
90	1.571	1.000	0.000	175.11
95	1.658	0.996	-0.087	167.74
100	1.745	0.985	-0.174	159.64
105	1.833	0.966	-0.259	151.05
110	1.920	0.940	-0.342	142.15
115	2.007	0.906	-0.423	133.10
120	2.094	0.866	-0.500	124.02
125	2.182	0.819	-0.574	114.99
130	2.269	0.766	-0.643	106.09
135	2.356	0.707	-0.707	97.36
140	2.443	0.643	-0.766	88.82
145	2.531	0.574	-0.819	80.47
150	2.618	0.500	-0.866	72.32
155	2.705	0.423	-0.906	64.36
160	2.793	0.342	-0.940	56.57
165	2.880	0.259	-0.966	48.92
170	2.967	0.174	-0.985	41.39
175	3.054	0.087	-0.996	33.95
180	3.142	0.000	-1.000	26.57

Tabella 1

Progettazione:



via Clodoveo Bonazzi, 2
40013 Castel Maggiore (BO)

Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti

Committente:



ENERGIA PULITA TRE S.r.l.
via della Chimica, 103
85100 Potenza (PZ)

La gittata massima si ottiene per $\theta = 68^\circ$ ed il relativo valore è pari a 192,31 m; questo valore rappresenta il valore della gittata massima per il distacco della pala in corrispondenza del mozzo.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari a un valore massimo di gittata incrementato dei 2/3 della lunghezza della pala, ovvero:



Distanza punto massima caduta: $192,31 \text{ m} + 53,13 \text{ m} = 245,44 \text{ m}$

Questo valore sopra calcolato è il valore di gittata massima ed è calcolato nel caso in cui l'intera pala si separi dal mozzo alla sua radice.

Si rimanda all'ortofoto di cui alla seguente figura 2 che mostra la rappresentazione grafica della superficie a terra all'interno della quale si ottiene il punto di caduta nel caso in cui la pala si separi alla radice per un cedimento della giunzione meccanica mentre il rotore ha una velocità di rotazione di 11.6 RPM (in rosso).



Figura 2

<p>Progettazione:</p>  <p>via Clodoveo Bonazzi, 2 40013 Castel Maggiore (BO)</p>	<p>Relazione analisi degli effetti di rottura degli organi rotanti</p>	<p>Committente:</p>  <p>ENERGIA PULITA TRE S.r.l. via della Chimica, 103 85100 Potenza (PZ)</p>
--	---	---

5 CONCLUSIONI

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, considerando i gradi di sicurezza degli aerogeneratori in progetto e i sistemi di prevenzione e di sicurezza, nonché i sistemi di arresto in caso di condizioni di funzionamento non sicure, non si evidenziano particolari pericolosità dovuti al rischio di distaccamento di organi rotanti degli aerogeneratori.