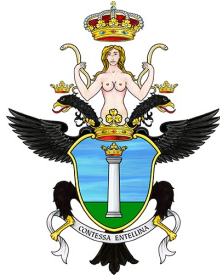




REGIONE  
SICILIANA



COMUNE DI  
CONTESSA ENTELLINA



COMUNE DI SANTA  
MARGHERITA DI BELICE



COMUNE DI  
SAMBUCA DI SICILIA



COMUNE DI  
MENFI



Committente:



CONTESSA ENTELLINA  
ENERGY & INFRASTRUCTURE

CONTESSA ENTELLINA S.R.L.  
P.IVA 1329980960  
VIA DANTE 7 MILANO C.A.P. 20123

Titolo del Progetto:

**Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un parco eolico denominato "Contessa Entellina" di 39,6 MW con sistema di accumulo di 12 MW e le relative opere connesse da svilupparsi nei comuni di Contessa Entellina (PA), Santa Margherita di Belice (AG), Sambuca di Sicilia (AG) e Menfi (AG)**

Documento:

**PROGETTO DEFINITIVO**

N° Tavola:  
REL0016

Elaborato:

**Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti**

SCALA: -  
FOGLIO: 1 di 1  
FORMATO: A4

folder: Relazioni progetto civile\_Specialistiche

Nome File: RS06REL0016A0.pdf

Progettazione:

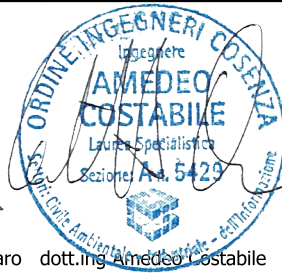


NEW DEVELOPMENTS srl  
piazza Europa, 14 - 87100 Cosenza (CS)

Progettisti:



dott.ing. Giovanni Guzzo Foliaro



dott.ing. Amedeo Costabile



dott. Ing. Francesco Meringolo

Gruppo di lavoro:

dott.ing. Denise Di Cianni  
dott.ing. Diego De Benedittis  
dott.ing. Pasquale Simone Gatto

Rev:	Data Revisione:	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	11/12/2023	PRIMA EMISSIONE	New Dev.	CONTESSA ENTELLINA	CONTESSA ENTELLINA

---

## Sommario

Premessa .....	2
1. Metodo di calcolo .....	3
2. Simulazione .....	6
3. Conclusioni e verifiche .....	7

## Premessa

Lo scopo del presente documento è rappresentato dalla valutazione simulata dei possibili effetti sull'ambiente derivanti dall'eventuale distacco per rottura degli organi rotanti degli aerogeneratori costituenti il parco eolico nel territorio dei Comuni di **Contessa Entellina (PA), Santa Margherita di Belice (AG), Sambuca di Sicilia (AG) e Menfi (AG)**.

Le parti in movimento degli aerogeneratori (lame), azionate dalle azioni aerodinamiche del vento, sono gli elementi oggetto di studio per la valutazione delle problematiche di cui alla presente relazione nelle condizioni di esercizio ed in particolare al raggiungimento della massima velocità di rotazione per azioni del vento ortogonali all'area di impatto (costituita dalla superficie definita dall'evoluzione delle lame nella porzione spaziale circolare) il cui verso è tangenziale alla pala.

Lo studio dei fenomeni di distacco è riconducibile a due categorie:

- 1) Caduta di frammenti di ghiaccio sagomatisi sulle lame in condizioni climatiche specifiche;
- 2) Rottura accidentale di pezzi di lama in rotazione.

Il primo fenomeno è del tutto trascurabile viste le particolari condizioni di microclima presenti nella zona interessata dall'impianto mentre il secondo fenomeno risulta di particolare interesse e pertanto merita un approfondimento finalizzato al raggiungimento delle condizioni di sicurezza per l'ambiente circostante a seguito dell'eventuale manifestazione dell'evento.

Il distacco di organi rotanti è essenzialmente riconducibile a due principali cause:

- Distacco della lama dal rotore (rottura meccanica);
- Rottura di parte della lama.

Nel secondo caso, essendo le lame realizzate tipicamente in fibra di vetro rinforzata con materiali plastici, a seguito di particolari condizioni è possibile che si verifichino danneggiamenti con conseguenti aperture di cricche con propagazione di lesioni che possono provocare, in casi estremi, la frammentazione della lama stessa. Uno dei principali eventi che comporta questo tipo di rottura è rappresentato dalla fulminazione atmosferica anche se le lame sono idoneamente protette contro questi fenomeni mediante ricettori metallici disposti alle estremità delle lame ed idoneamente collegati a terra.

Nel caso di rottura accidentale di un elemento rotante a seguito di distacco, attraverso le leggi della balistica classica è possibile determinare le probabili traiettorie dell'elemento. Infatti, nota la velocità di rotazione e le caratteristiche geometriche si può procedere all'applicazione delle leggi della fisica per addivenire ad una matematica stima delle traiettorie.

Questa stima è chiaramente semplificata vista la complessità del problema e le molte variabili che entrano nel calcolo, soprattutto per ciò che riguarda le azioni aerodinamiche di portanza, resistenza e momento aerodinamico di difficile definizione soprattutto in caso di frammenti irregolari e di geometrie incognite.

In letteratura esistono degli studi condotti relativamente a questa specifica tematica. Uno dei riferimenti è rappresentato dallo studio condotto dalla società Vestas Wind System: *“Vestas V80 – Blade Trow calculation under normal operationing conditions (2001)”*.

Detto studio riporta la stima della traiettoria di una pala eolica in condizioni di normale funzionamento sia per la pala intera che per eventuali frammenti.

Lo studio ipotizza che, in assenza di forze aerodinamiche, la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 135° azimut, considerando quale unica forza inerziale quella di gravità con approccio quindi conservativo e a vantaggio di sicurezza.

Viene quindi calcolato il tempo di volo considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Nota la durata di volo e conoscendo le componenti orizzontali e verticali della velocità è possibile definire la traiettoria dell'elemento.

Nello studio citato la Vestas dichiara che l'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (4.959 unità al giugno 2007) ha mostrato che in caso di distacco di pala o parti di essa il moto è stato di tipo “rotazionale complesso” e le distanze raggiunte sono normalmente risultate inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati che sono stati presentati. Frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (la già citata fulminazione atmosferica ad esempio) o imperizia umana, sarebbero stati ritrovati a circa 40-50 m dalla base dell'aerogeneratore.

## 1. Metodo di calcolo

Lo studio è condotto mediante l'ipotesi di distacco della pala dal rotore nel suo complesso, considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso dovrebbe dare la proiezione più realistica della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (poiché centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti).

Si precisa che lo studio prende in esame simultaneamente i valori massimi di tutti i parametri coinvolti, ovverosia velocità di rotazione massima, velocità del vento massima, forze di spinta. Tale approccio

è decisamente cautelativo, poiché sebbene i singoli valori di picco dei parametri siano realizzabili per quanto poco probabili, è assolutamente improbabile la simultaneità di tali valori. Per questa ragione, la simulazione è da considerarsi altamente improbabile.

Inoltre si trascura l'effetto delle azioni di resistenza aerodinamiche sulla gittata a vantaggio di sicurezza in quanto di difficile valutazione.

Le equazioni del moto che descrivono il problema nell'ipotesi di corpo non puntiforme:

$$\begin{cases} M g = M a_g \\ 0 = I \cdot \frac{d_w}{d_t} \end{cases}$$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa della pala il momento della forza peso è nullo nell'ipotesi in cui si adotti come polo per il calcolo dei momenti lo stesso centro delle masse. In questa ipotesi la seconda equazione del moto ( $0 = I \cdot \frac{d_w}{d_t}$ ) dimostra che durante la traiettoria il corpo effettua rotazione indisturbata intorno al suo asse principale d'inerzia.

La prima equazione ( $M g = M a_g$ ) che risolve il problema del moto descrive un moto parabolico del corpo puntiforme.

Lo studio viene eseguito ipotizzando un sistema cartesiano  $xy$  con origine nel punto in cui il corpo viene lanciato. Lo stesso studio ipotizza trascurabile l'effetto dovuto all'attrito dell'aria a vantaggio di sicurezza.

Considerando un sistema di riferimento con asse  $y$  positivo verso l'alto, l'origine degli assi sia nel punto

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases}$$

le componenti dell'accelerazione saranno

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$$

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

Il vettore velocità  $v$  all'istante  $t=0$  ha le seguenti componenti:

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_{0y} = v_0 \cdot \sin\theta \end{cases}$$

La velocità in funzione del tempo è data dalla Legge:

$$v(t) = v_0 + a \cdot t$$

La componente orizzontale della velocità rimane costante mentre la componente verticale cambia nel tempo vista la presenza dell'accelerazione di gravità costante:

$$\begin{cases} v_x = v_{0x} \\ v_y = v_{0y} - g \cdot t \end{cases}$$

Le leggi del moto sono quindi le seguenti:

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

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo  $T$  tale che  $y(T) = 0$ . Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\alpha$  e dalla velocità tangenziale  $V$  della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{cases} x_0 = -R \cdot \cos \alpha \\ y_0 = H + R \cdot \sin \alpha \\ v_x = V \cdot \sin \alpha \\ v_y = V \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

Dalla Legge del moto è possibile ricavare la distanza dal polo al punto di impatto al suolo (gittata):

$$G = x(T)$$

sostituendo in termini di  $V$  ed  $\alpha$  si ha:

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

$R_g$  rappresenta il raggio del baricentro ed è calcolato considerando le caratteristiche geometriche della pala, e la distribuzione delle masse lungo il profilo della stessa. Si può ritenere accettabile considerare la posizione del baricentro ad una distanza pari ad  $1/3$  della lunghezza della pala.

$V_g$  è invece la velocità periferica del baricentro ed è calcolata a partire dalla velocità di rotazione massima del rotore (Rpm). La velocità angolare  $\omega = 2\pi n/60$ . Nel moto circolare  $V_g = \omega \cdot R_g$ . Per tener conto dell'attrito dell'aria si può considerare una riduzione della velocità periferica dell'ordine del 20% rispetto a quella ideale.

Al fine di considerare la distanza minima di sicurezza a partire dall'aerogeneratore fino al punto di caduta si incrementa il valore di  $G_{max}$  di una ulteriore distanza pari a  $2/3$  della lunghezza della lama. Tale ipotesi considera lo scenario più svantaggioso ossia il caso in cui la lama all'impatto con il suolo si disponga con la parte più lontana dal suo baricentro verso l'esterno.

La distanza minima è pertanto:

$$D = G_{\max} + 2/3 L$$

## 2. Simulazione

Di seguito viene riportata la simulazione eseguita e relativa all'aerogeneratore prescelto per il parco eolico di cui al presente progetto definitivo nell'ipotesi di distacco dell'intera. Si riportano i dati di input:

$H_{\text{Mozzo}}$	<b>135 m</b>
Lunghezza lama	<b>85 m</b>
$R_g$ [1/3 di L]	<b>28.33 m</b>
Velocità max di rotazione	<b>10.6 Rpm</b>
$V_g$	<b>31.43 giri/min</b>

Dalla relazione della gittata massima  $G_{\max} = \frac{V_g \cdot \sin \alpha}{g} \cdot \left[ V_g \cdot \cos \alpha + \left( \sqrt{V_g^2 \cdot \cos^2 \alpha + 2(H + R_g \cdot \sin \alpha)g} \right) \right] - R_g \cdot \cos \alpha$

si ottengono per i diversi valori di  $\alpha$  i corrispondenti valori di  $G_{\max}$  e  $D$

$\alpha$	$G_{\max}$ (m)	D (m)
0	-28.3	28.33
5	-9.7	46.92
10	8.9	65.59
15	27.3	84.00
20	45.2	101.86
25	62.2	118.88
30	78.1	134.79
35	92.7	149.38
40	105.8	162.46
45	117.2	173.91
50	127.0	183.62
55	134.9	191.56
60	141.1	197.72
65	145.5	202.15
70	148.3	204.92
75	149.5	206.13
80	149.3	205.92
85	147.8	204.42
90	145.1	201.78
95	141.5	198.16
100	137.0	193.71
105	131.9	188.57
110	126.2	182.86
115	120.0	176.71
120	113.6	170.22
125	106.8	163.48
130	99.9	156.56
135	92.8	149.51
140	85.7	142.39
145	78.6	135.22
150	71.4	128.04
155	64.2	120.85
160	57.0	113.68
165	49.8	106.51
170	42.7	99.34
175	35.5	92.18
180	28.3	85.00

Il valore massimo si ottiene per  $\alpha = 75^\circ$  a cui corrisponde un valore di  $G_{\max} = 149.5$  m ed un valore di  $D = 206.13$  m.



In riferimento ai ricettori sensibili sopra definiti, per una maggiore cautela nei riguardi di persone e cose, il valore teorico di gittata, che non tiene conto dell'attrito viscoso dell'aria, viene cautelativamente incrementato di circa il 5%, definendo pertanto il raggio di sicurezza, con centro l'asse dell'aerogeneratore, pari a **217 m**.

### 3. Conclusioni e verifiche

Lo studio analitico del fenomeno ha dimostrato che è opportuno evitare la presenza di ricettori sensibili al probabile distacco di organi rotanti nella circonferenza di raggio 217 m dall'asse dell'aerogeneratore per come graficamente riportato nella specifica tavola grafica allegata al presente progetto definitivo (cfr.rif. EPD0059.pdf - Planimetria degli effetti della rottura degli organi rotanti).

Da quanto esposto appare evidente che il fenomeno di rottura più complesso da stimare analiticamente resta il distacco di un frammento della pala, pertanto si rimanda all'esperienza dei costruttori più esperti i quali indicano detto fenomeno come molto raro e comunque i ritrovamenti dei frammenti a seguito dell'evento non sono mai avvenuti a distanze superiori a 50 metri dall'asse dell'aerogeneratore danneggiato.

Al fine di ridurre il rischio di distacco di frammenti è opportuna una pianificazione e messa in atto di opportune misure di prevenzione e monitoraggio, al fine di poter intervenire in tempo utile per scongiurare l'eventualità di una rottura.

Le azioni di monitoraggio e prevenzione svolte dalla società proponente nei riguardi della tutela dei sistemi rotorici sono i seguenti:

1. Ascolto e osservazione giornaliera e con campagne di indagini visive con lo scopo di evidenziare microalterazioni della superficie delle pale. Le campagne di indagini visive, svolte con telescopi ad alta definizione, servono a certificare periodicamente lo stato delle pale.
2. Monitoraggio strumentale continuo ed automatico di controllo dell'aerogeneratore. Questo, tramite la valutazione di opportuni parametri, è in grado di individuare sbilanciamenti del rotore e, quando diventano significativi, attua il blocco dell'aerogeneratore.

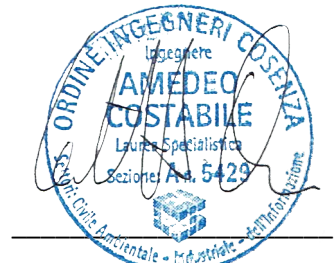


Tali azioni di prevenzione sono dunque volte a mantenere le buone condizioni di uso dei rotori, mentre le azioni di monitoraggio impediscono di mantenere in esercizio operativo dei rotori che non rispondano alle caratteristiche definite dal costruttore.

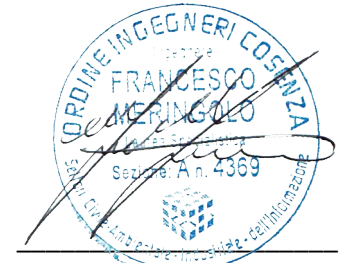
i progettisti:



ing. Giovanni Guzzo Foliaro



ing. Amedeo Costabile



ing. Francesco Meringolo