



REGIONE ATÒNOMA DE SARDIGNA  
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA



Comune di  
Tempio Pausania



Comune di  
Luras



Comune di  
Calangianus

AUTORIZZAZIONE UNICA AI SENSI DEL D.LGS 29/12/2003 N.387 RELATIVA ALLA COSTRUZIONE ED ESERCIZIO DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA DI UN IMPIANTO DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA AVENTE POTENZA IN IMMISSIONE PARI A 42 MW COSTITUITO DA N.7 AEROGENERATORI DI POTENZA PARI A 6 MW CON RELATIVO COLLEGAMENTO ALLA RETE ELETTRICA – IMPIANTO DENOMINATO “TEMPIO PAUSANIA WIND” UBICATO NEL COMUNE DI TEMPIO PAUSANIA (SS)

ELABORATO: ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

COMMITTENTE:

SCS 16 S.r.l.

Via GEN ANTONELLI 3 - MONOPOLI

PROGETTAZIONE



PROGETTAZIONE



### REVISIONI

REV	DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO

**SOMMARIO**

- 1. PREMESSA..... 1
- 2. METODO DI CALCOLO ..... 3
- 3. SIMULAZIONE..... 5
- 4. CONCLUSIONI..... 6

## 1. 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 denominato "TEMPIO PAUSANIA WIND".

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 sono essenzialmente riconducibili 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  $135^\circ$  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.

## 2. 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 sono le seguenti:

descrizioni del moto lungo le direzioni x e z:

$$\begin{cases} z = h + v \cdot t \cdot \sin\theta - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \\ x = v \cdot t \cdot \cos\theta \end{cases}$$

dove:

**h** è l'altezza iniziale del baricentro del corpo;

**v** è la velocità iniziale tangenziale del baricentro del corpo;

**t** è il tempo di volo;

**θ** l'angolo di lancio;

**g** è l'accelerazione di gravità

per  $z = 0$  il corpo tocca terra e pertanto si conclude, pertanto l'equazione di  $z = 0$  è la seguente:

$$h + v \cdot t \cdot \sin\theta - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 = 0$$

da cui si ricava il tempo di volo  $t$  (valore positivo)

$$t = \frac{1}{g} \left( v \cdot \sin\theta + \sqrt{v^2 \cdot \sin^2\theta + 2 \cdot g \cdot h} \right)$$

sostituendo in  $x$  si ottiene la **massima gittata**:

$$x = \frac{v}{g} \cdot \cos\theta \cdot \left( v \cdot \sin\theta + \sqrt{v^2 \cdot \sin^2\theta + 2 \cdot g \cdot h} \right)$$

La relazione tra la velocità angolare e quella tangenziale è definita dalla relazione

$$v = \omega \cdot r_g$$

con  $\omega$  velocità di rotazione ed  $r_g$  distanza tra il centro di rotazione ed il baricentro del corpo.

In funzione dell'aerogeneratore si può esprimere l'altezza iniziale del baricentro del corpo:

$$h = H_{mozzo} + r_g \cdot \cos\theta$$

ottenendo l'espressione della gittata in funzione dell'angolo  $\theta$ :

$$x(\theta) = \frac{\omega^2 \cdot r_g^2 \cdot \sin 2\theta}{2 \cdot g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot g \cdot H_{mozzo} + r_g \cdot \cos\theta}{\omega^2 \cdot r_g^2 \cdot \sin\theta}} \right)$$

Il valore massimo viene cautelativamente incrementato del 20% per ulteriore sicurezza nei confronti di ricettori sensibili quali strade provinciali, comunali e private di accesso alle abitazioni, fabbricati ad uso abitativo e fabbricati ad uso agricolo (D10).

### 3. 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 mozzo	115 m
Lunghezza lama	85 m
Rg (i/3 L)	29 m
$\omega$	12 giri/min

Il valore dell'angolo  $\theta$  tale da indurre la massima gittata  $x$  è pari a  $45^\circ$ .

Pertanto, dall'equazione della gittata massima sopra citata, si calcola il valore massimo di  $x$  che rappresenta la distanza massima teorica alla quale potrebbe atterrare un oggetto, distaccatosi per effetto di rottura degli organi rotanti, pari a 218,94 m a partire dall'asse dell'aerogeneratore.

Qualora la simulazione dovesse tenere in conto anche l'effetto dell'attrito viscoso dell'aria, il valore massimo di gittata calcolato con le relazioni sopra riportate può essere ridotto del 15% (valore di letteratura) e pertanto il valore di  $x(\theta)$  è stimato pari a circa 186 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 del 20%, definendo pertanto il raggio di sicurezza, con centro l'asse dell'aerogeneratore, pari a circa 300 m.

## 4. CONCLUSIONI

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 200 m dall'asse dell'aerogeneratore, calcolata incrementando il valore teorico con un coefficiente di sicurezza pari al 20% per le incertezze di calcolo. Per come meglio riportato nella specifica tavola grafica allegata al presente progetto definitivo (A.16.b.1.d), viene mostrato inoltre il soddisfacimento dei requisiti di sicurezza nei confronti dei ricettori sensibili (distanza di sicurezza di 200 m dal centro torre), oltre all'area di sicurezza definita dalla gittata teorica (166 m) ed inoltre viene riportata l'area di rispetto considerando l'effetto dell'attrito viscoso dell'aria dimostrando che in tale zona non è presente alcun elemento (strade, altri edifici ecc.).

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 (quali appunto Vestas) 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 SCS 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.

Lecce, 20/11/2023

Ing. Emanuele Verdoscia

