

REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

COMUNI DI

MORES - ITTIREDDU - NUGHEDU SAN NICOLO' - BONORVA



Oggetto: PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE RINNOVABILE - POTENZA DI PICCO 124 MWp DA REALIZZARSI IN LOCALITA' "SA COSTA"

VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE

Committente: **VEN.SAR. s.r.l.**
Arch. Alessandro Reali

Coordinamento e Progettazione generale: **SO.GE.S s.r.l.**
Ing. Piero Del Rio

Tavola:
R.E.03

Elaborato:
Relazione gittata massima

Scala:
Data:
Febbraio 2024

Prog. opere strutturali:
Studio ing. Andrea Massa
Ing. Andrea Massa

Studio Anemologico:
Demoenergia 2050 Srls

Studi Economici:
Dott. Daniele Meloni

Prog. opere civili - elettriche:
Studio Ing. Nicola Curreli
Ing. Nicola Curreli
Collaboratori:
Ing. Silvia Indeo
Ing. Michele Marrocu
Ing. Simona Pisano

Coordinamento V.I.A.:
SIGEA s.r.l.
Dott. Geol. Luigi Maccioni - Valutazione ambientale
Ing. Manuela Maccioni - Paesaggistico
Dott. Agr. Vincenzo Satta - Agronomia, flora, fauna
Dott.ssa Daniela Deriu - specializzata in archeologia
Prof. Geol. Marco Marchi - Georisorse
Dott. Geol. Stefano Demontis - Geologia Tecnica
Dott. Geol. Valentino Demurtas - Georisorse
Ing. Federico Miscali - Acustica
Dott. Ing. Massimiliano Lostia di Santa Sofia - Acustica
Dott. Ing. Michele Barca - Acustica
Dott. Michele Orrù - GIS

PREMESSA

Il progetto di Parco Eolico "SA COSTA" è finalizzato alla realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da 20 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,2 MW per una potenza complessiva di 124 MW, da realizzarsi nel territorio dei comuni di Mores, Ittireddu, Nughedu San Nicolò, Bonorva, in cui insistono gli aerogeneratori e parte dell'elettrodotto interrato, mentre nel territorio comunale di Torralba ricade la restante parte dell'elettrodotto e le opere di connessione alla RTN TERNA.

La presente relazione tecnica ha lo scopo di verificare e calcolare la gittata massima in caso di rottura della pala e/o di un frammento di pala di un aerogeneratore ed ha utilizzato, per cortesia della casa costruttrice VESTAS, i dati ottenuti in via riservata per le "RPM Curves" dell'aerogeneratore V162-6.2MW secondo quanto esposto nel seguente documento:

Restricted

Document no.: 0107-7278 V00

2021-06-28

RPM Curves

EnVentus™

V162-6.2 MW 50/60 Hz

CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Negli aerogeneratori VESTAS Enventus V162-6.2MW il rotore è costituito da 3 pale fissate sul mozzo posto all'estremità dell'albero che tramite un moltiplicatore di giri aziona il generatore di corrente della potenza nominale di 6,2 MW; il mozzo è collegato ad un primo albero di trasmissione, detto albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

L'albero lento è collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce, che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento moltiplicata per il rapporto di trasmissione del rotismo installato.

Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.

Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, nonché il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, che serve ad allineare la macchina rispetto alla direzione del vento.

Si riporta di seguito una figura che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento che causa tale moto.

La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione.

Questa considerazione ci serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto. Mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.



Figura 1: Relazione tra le direzioni del vento ed il verso di rotazione del rotore

ROTTURA DELLA PALA

Il calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'Aerogeneratore segue il principio della balistica applicata ai moto dei proiettili. Si evidenzia che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria.

Nel caso dell'aerogeneratore in esame si suppone che l'eventuale rottura della pala avvenga alle peggiori condizioni possibili ovvero:

1. alla velocità massima del rotore, pari a circa 8,6 giri/minuto
2. nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo = $-\pi/4$
3. con il centro di massa posizionato ad $1/3$ della lunghezza della pala, partendo dal mozzo.

L'aerogeneratore VESTAS V162-6.2MW previsto in progetto ha altezza al mozzo uguale a 119 m, le pale costituenti il rotore sono lunghe 81 metri; si è assunto il "Mode S02" del documento VESTAS.

Definizioni

H_m = Altezza al mozzo dell'aerogeneratore = 119 m

L_p = Lunghezza della pala dell'aerogeneratore = 81 m

D_{cm} = Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala = $L_p / 3 = 27$ m

V_{ang} = Max Velocità Angolare Rotore = 8,6 Giri/Minuto = $8.6 * \pi / 60 = 0.90$ Rad/sec

Formule e Calcoli risultanti

L'Ordinata di Massima Velocità O_{mv} al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

- $O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{138,09 m}$

Analogamente l'ascissa di Massima Velocità A_{mv} al momento di rottura:

- $A_{mv} = \text{Ascissa di Massima Velocità} = - D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{-19,09 m}$

La Velocità Lineare al Centro di Massa V_{max} è desunta dalla Velocità Angolare V_{ang}

- $V_{max} = \text{Velocità Lineare al Centro di Massa} = V_{ang} * D_{cm} = \mathbf{24,31 m/sec}$

Le componenti Verticale V_y ed Orizzontale V_x di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:

- $V_y = \text{Componente Verticale Velocità} = V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{17.19 m/sec}$
- $V_x = \text{Componente Orizzontale Velocità} = V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = \mathbf{17.19 m/sec}$

Il tempo necessario T_y perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

- $T_y = \text{Tempo di decelerazione Verticale} = V_y / 9.81 \text{ m/sec}^2 = 1,75 \text{ sec}$

L'altezza Massima H_{\max} si ottiene dalla formula:

- $H_{\max} = 0_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = 153.96 \text{ m}$

Il tempo necessario T_{\max} affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

➤ $T_{\max} = \text{tempo di caduta} = \text{Radice}(153,96/9.81\text{m/sec}^2) = 3.96 \text{ sec}$

La distanza massima DL_{\max} dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{\max} = V_x * (T_{\max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = 133,06 \text{ m}$$

CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE DI UN FRAMMENTO DELLA PALA

Fondamenti di Calcolo della traiettoria reale

La determinazione di una traiettoria reale che tenga conto della resistenza dell'aria, è fattibile con un calcolo iterativo che consideri la traiettoria come una successione di elementi minimi, per ciascuno dei quali sia possibile ricalcolare la distanza, l'altezza, l'inclinazione e la velocità finali. Il calcolo risulta facilitato se la sequenza dei punti è determinata da incrementi di tempo costanti t_e . Passando dal punto **P** a quello successivo gli elementi della traiettoria possono allora essere così ricalcolati:

Tempo totale

$$t_{p+1} = t_p + t_e$$

Ascissa o distanza in piano

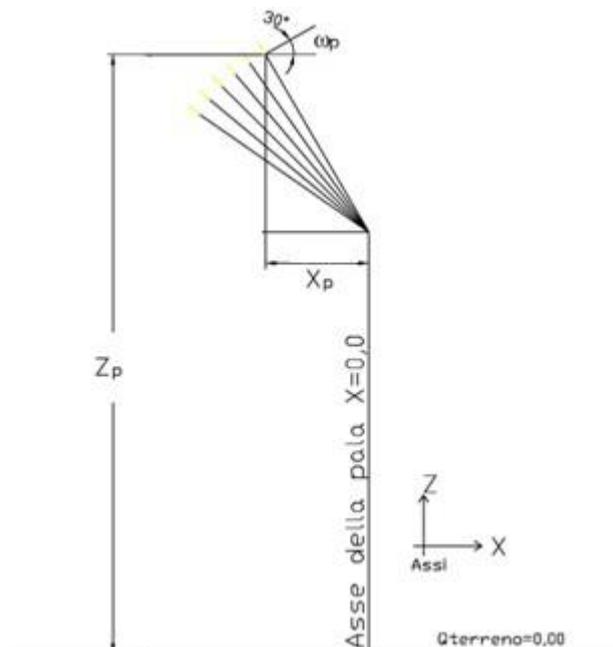
$$X_{p+1} = X_p + \cos\omega_p \times V_p \times t_e$$

Altezza o quota

$$Z_{p+1} = Z_p + \sin\omega_p \times V_p \times t_e - g \times t_e^2 / 2$$

Si precisa che:

1. si assume come origine degli assi la base della torre della turbina ed un sistema di riferimento come illustrato nella figura seguente;
2. X_p e Z_p sono le coordinate di partenza del centro di massa del frammento di pala e variano al variare dell'angolo di partenza;
3. X_p e Z_p sono state ricavare graficamente così come indicato nella seguente immagine:



Inclinazione

$$\omega_{p+1} = \arctan \left[\frac{\tan\omega_p - g \times (X_{p+1} - X_p)}{\cos^2\omega_p \times V_p^2} \right]$$

Velocità

$$V_{p+1} = \left[(V_p^2 - 2g \times (Z_{p+1} - Z_p)) - \sigma_p \times t_e \right]^{1/2}$$

dove σ è la decelerazione (o **ritardazione** come si dice in balistica) causata dalla resistenza dell'aria. Per valutare la **resistenza R** opposta dall'aria, la formula usata nella meccanica dei fluidi è in genere la seguente:

$$R = 1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2$$

dove:

R = resistenza (N)

S = sezione del corpo rispetto al movimento (m²)

V = velocità (m/s)

C_r = coefficiente di forma (adimensionale)

ρ = densità del fluido attraversato (kg/m³)

E' da notare che il **coefficiente di forma C_r** varia esso stesso in funzione della velocità, ma può essere considerato costante per variazioni di velocità che non comportano significativi cambiamenti nei regimi di turbolenza del fluido attraversato. Oggi sono disponibili numerosi modelli di simulazione che consentono di calcolare con buona approssimazione il valore di **C_r**.

Essendo **R** e σ ovviamente correlati dalla massa m_f (kg) del frammento secondo la relazione $R = m_f \times \sigma$, per un regime uniforme di velocità, la ritardazione (m/s²) è così esprimibile:

$$\sigma = (1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2) / m_f$$

ciò significa che a parità di altre condizioni la ritardazione diminuisce con l'aumentare della massa del frammento e aumenta con l'aumentare della sua sezione.

Applicazione del calcolo della traiettoria reale all'Aerogeneratore VESTAS Enventus V162-6.2MW

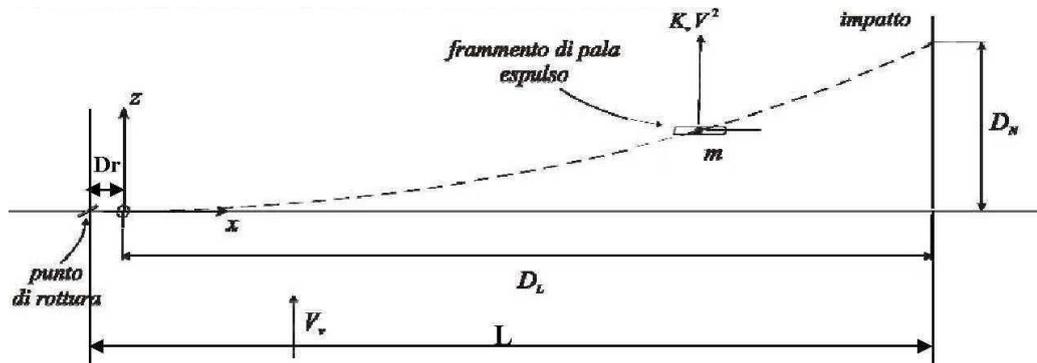
Il calcolo della gittata del frammento di pala è stato condotto considerando i seguenti dati di partenza:

S = 4,0 m² (sezione del corpo rispetto al movimento)

V₀ = 72,04 m/s con centro di massa del frammento a 80 m dal mozzo

Nel Calcolo si considerano le seguenti condizioni:

4. Dal documento VESTAS si evince che la velocità angolare del rotore è massima per velocità del vento comprese tra 12 e 16 m/s, quindi la rottura del frammento potrebbe probabilmente avvenire in questo range di velocità;
5. Inoltre l'azione dinamica del vento, ortogonale al piano che contiene la parabola, riduce ulteriormente lo sviluppo della traiettoria reale rispetto a quella teorica quindi tanto maggiore è la velocità del vento tanto maggiore è la curvatura fuori dal piano;



V_0 viene ricavato dalla seguente formula:

$$V_0 = V_r \times 2\pi / 60 \times R_f$$

Dove

V_r è la velocità di rotazione

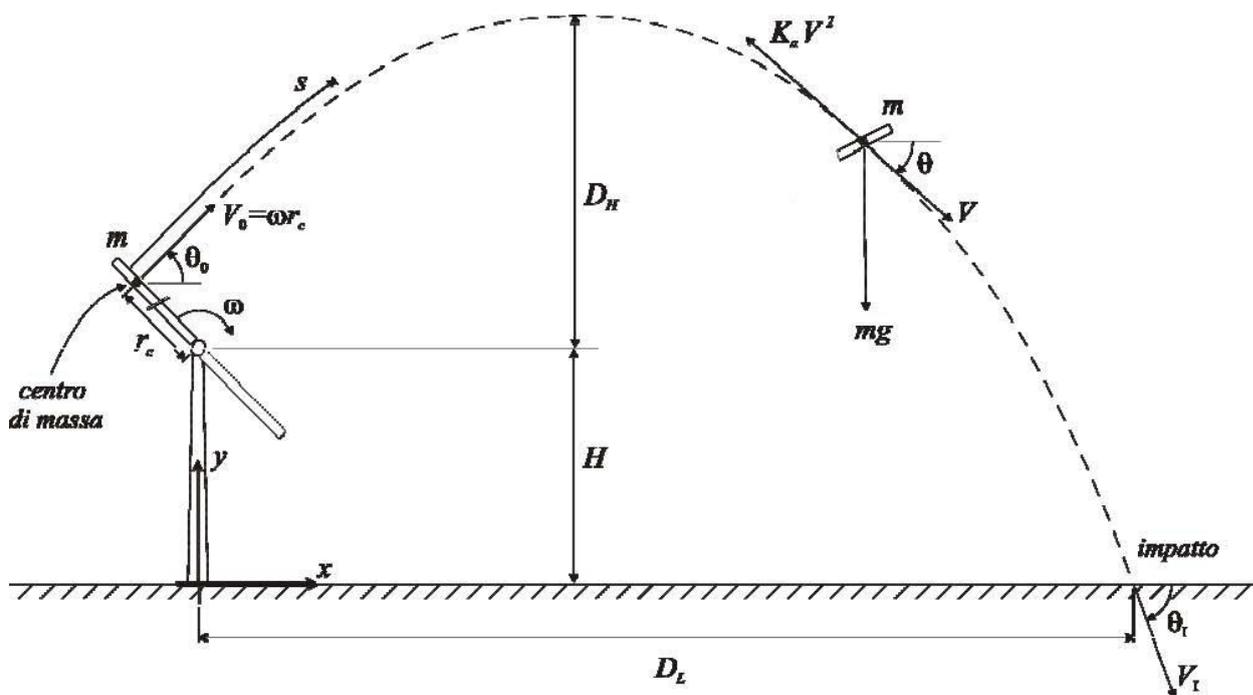
R_f è il raggio del frammento di pala (dall'asse navicella al centro di massa del frammento)

$$V_0 = 72,04 \text{ m/s}$$

$C_r = 1,5$ [coefficiente di forma (adimensionale)]

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (densità media dell'aria)

$m_f = 600 \text{ kg}$ (massa ipotizzata del frammento)



Vista frontale dell'aerogeneratore e della traiettoria di un frammento di pala espulso

Deve essere evidenziato che i dati riportati sono molto cautelativi perché l'aerogeneratore di progetto, modello V162-6.2MW della VESTAS, ha un diametro di 162 m ed è anche prodotto con tecnologie di avanguardia che consentono di avere pesi ridotti della pala ed inoltre ha tutta una serie di dispositivi di protezione contro le sovra-velocità di rotazione atti ad evitare incidenti. Considerando pertanto tutti i risultati riportati nella presente relazione si ha un sovradimensionamento rispetto alla reale gittata della pala o del frammento-di-pala in caso di distacco. Comunque, volendo calcolare dei possibili risultati ancor più realistici per le condizioni operative dell'aerogeneratore VESTAS Enventus V162-6.2MW scelto per il progetto di Parco Eolico "SA COSTA", sono stati eseguiti i calcoli che vengono trasposti come grafici delle traiettorie calcolate al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

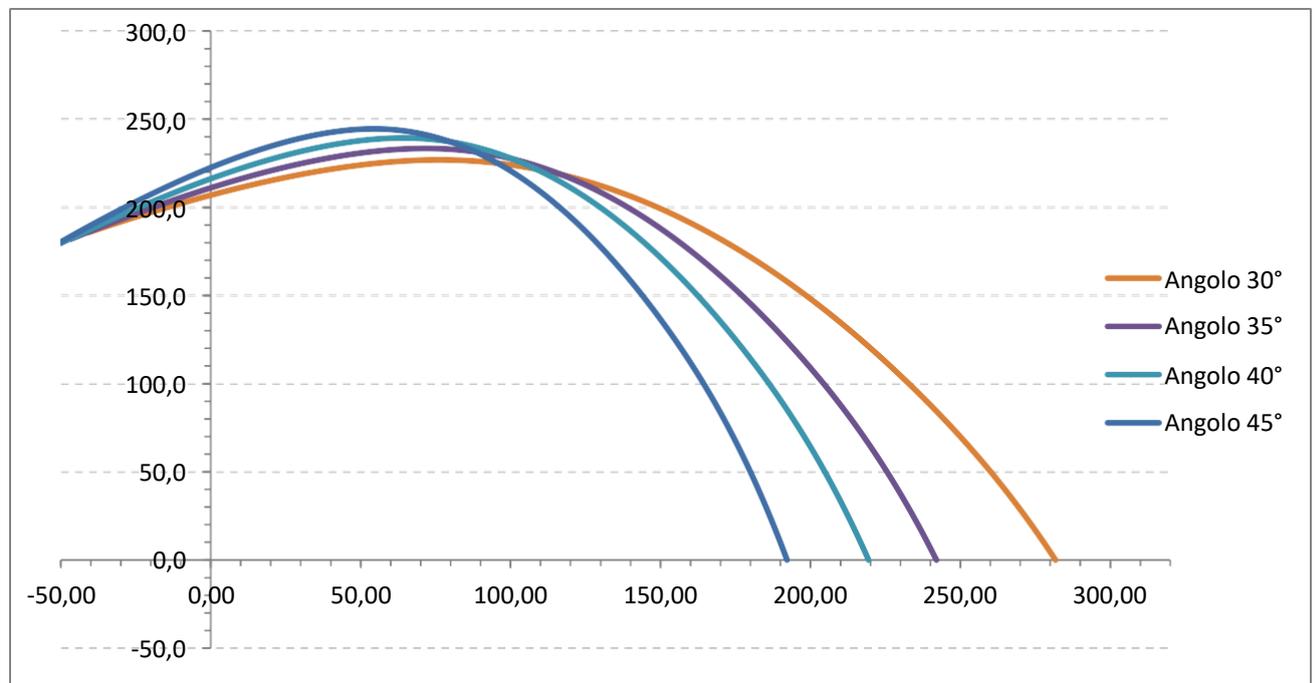


Grafico della traiettoria di un frammento di pala

CONCLUSIONE

Pur ponendosi nelle peggiori condizioni operative ed ipotizzando che un frammento terminale o l'intera pala si possano staccare dal mozzo, si è dimostrato che l'impatto avverrebbe a distanze contenute.

Infatti nel caso si staccasse l'intera pala il valore massimo di gittata è di **133** metri.

Va tenuto anche presente che in tale calcolo è stato trascurato l'attrito dell'aria.

Nel caso di rottura di un frammento di pala, per il quale vigono solo calcoli di tipo probabilistico, si ha un valore di gittata massima, come si evince dai calcoli, pari a circa **281** metri per un frammento terminale della superficie di 4 m² lanciato con angolo di 30°.

Si tenga infine presente che tale valore nella realtà risulterebbe sicuramente inferiore; difatti è stata considerata l'azione simultanea delle condizioni peggiori di velocità del vento, angolo di lancio, velocità di rotazione ed azione di portanza sul profilo alare dopo il distacco; ma le possibili cause che porterebbero ad un eventuale distacco della pala o di un frammento di essa sono rappresentate da un colpo di fulmine o da un urto accidentale di notevole intensità agente sulla torre.

La probabilità che possano accadere tali fenomeni porta a determinare valori di rischio molto bassi, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità. Si tenga anche conto che tutti gli aerogeneratori sono dotati di un complesso sistema parafulmine, e per quanto riguarda l'urto non è pensabile potersi tutelare da un incidente nel caso in cui un velivolo, o altro, impatti sul rotore o sulla torre dell'aerogeneratore.