

TEA REPORT 21-237
Rev.1

Via Ponte a Piglieri, 8
56122 Pisa

telephone: + 39 050
6396101

telefax: + 39 050
6396110

e-mail: info@tea-group.com
www.tea-group.com



TEASISTEMI
ENERGY AND ENVIRONMENT TECHNOLOGIES



Mod. 8.2.2.01-Rev0

M. Bonizzi
A. Fani

Studio numerico della gittata di una pala eolica

Impianto eolico 34MWp – Porto
Torres – Eni New Energy



PROGETTO PROJECT	O21TEL1B07 (Gittata pala eolica)				
DISTRIBUZIONE DISTRIBUTION	Eni new energy				
TITOLO TITLE	Modello numerico per il computo della gittata pala eolica				
SOMMARIO ABSTRACT	L'analisi è relativa al calcolo della gittata massima di una pala eolica in caso di eventuale rottura e conseguente distacco. Una mappa di probabilità di ricaduta al suolo è ottenuta con un metodo Montecarlo.				
PAROLE CHIAVE KEY WORDS	Gittata, profilo alare, energia eolica, metodo Montecarlo				
NOTE REMARKS					
3					
2					
1	23/04/201	Emesso per Commenti	M. Bonizzi <i>Bonizzi Mano</i>	A. Fani <i>Andrea Fani</i>	
0	14/04/2021	Emesso per Commenti	M. Bonizzi	A. Fani	
REV. REV.	DATA DATE	DESCRIZIONE DESCRIPTION	REDATTO PREPARED	CONTROLLATO CHECKED	APPROVATO APPROVED

File :TEA REPORT 21-237-GittataPalaEolica_revCM

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
2	METODOLOGIA	5
3	DATI DI BASE	11
3.1	DATI GEOMETRICI	11
3.2	DATI AMBIENTALI	11
3.3	CONDIZIONI OPERATIVE	12
4	RISULTATI	13
5	CONCLUSIONI	17
6	BIBLIOGRAFIA	18

1 INTRODUZIONE

Nel presente documento sono riportati i risultati ottenuti da un modello numerico relativo al calcolo della gittata massima in funzione delle condizioni del vento, inerzia e geometria della pala, e forze aereodinamiche.

Lo studio è stato sviluppato secondo le seguenti fasi:

- Raccolta ed analisi di materiale bibliografico
- Definizione del modello matematico basato su un sistema di ODE (equazioni differenziali ordinarie)
- Scrittura di un codice di calcolo in C++ per il calcolo della gittata
- Scrittura di un codice di postprocessing in Python

Nei paragrafi seguenti viene mostrata la metodologia e le assunzioni utilizzate nelle valutazioni richieste e i risultati ottenuti.

2 METODOLOGIA

Il modello numerico e' basato sull'integrazione numerica delle equazioni governanti la dinamica della pala eolica tenendo conto delle forze aerodinamiche agenti sulla stessa, seguendo la procedura descritta in "Sarlak, H, and J. N. Sørensen. "Analysis of throw distances of detached objects from horizontal-axis wind turbines." *Wind Energy* 19.1 (2016): 151-166."

L'assunzione principale per simulare la traiettoria seguita dalla pala e' basata sui gradi di liberta' del corpo rigido in movimento: essi sono pari a 6, ed in particolare 3 vettori sono richiesti per determinare la posizione in ogni istante del centro di massa (i.e. baricentro), e 3 per descrivere la rotazione del corpo. Due sistemi di riferimento sono stati considerati : il sistema inerziale, posizionato alla base della torre (con l'asse Y parallelo alla direzione del vento, l'asse Z parallelo alla torre) ed il sistema corpo (indicato con *) che e' centrato nel baricentro della pala (i.e. il corpo rigido). I versori relativi al sistema di riferimento inerziale verranno indicati come I, J e K; i versori relativi al sistema corpo come b_1 , b_2 e b_3 . Figura 1 indica i sistemi di riferimento adottati per lo studio.

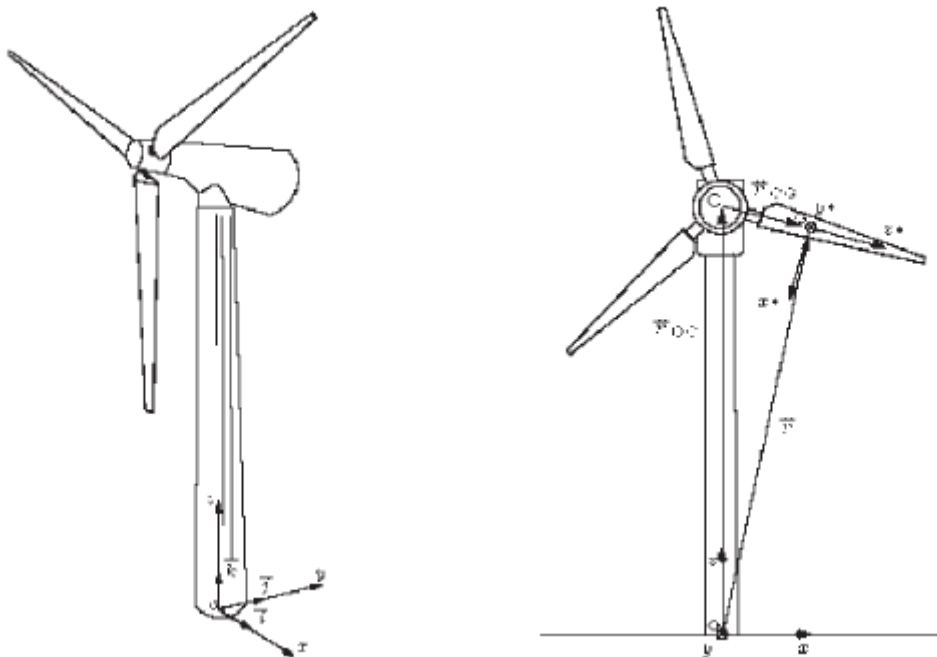


Figura 1: sistemi di riferimento inerziale e corpo

Per poter passare dal sistema di riferimento corpo a quello inerziale si introduce la matrice di rotazione **R**:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

La matrice (1) permette, dato un vettore con componenti relative al sistema corpo, di calcolare le componenti del vettore rispetto al sistema di riferimento inerziale. In particolare il vettore velocità angolare relativo al sistema inerziale verrà di conseguenza calcolato in base alla seguente equazione:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{R}\boldsymbol{\omega}^* = \begin{bmatrix} b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^* \\ b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^* \\ b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

Le equazioni definite in (2) permettono di esprimere l'istantanea posizione di ciascuno dei tre versori del sistema corpo relativa al sistema inerziale:

$$\frac{d\mathbf{b}_i}{dt} = \boldsymbol{\omega} \wedge \mathbf{b}_i = \mathbf{R}\boldsymbol{\omega}^* \wedge \mathbf{b}_i \quad (3)$$

Nell'equazione (3) il pedice i si intende riferito a ciascuno dei 3 versori e l'operatore \wedge denota prodotto vettoriale; espandendo il prodotto vettoriale si ottengono le seguenti 9 equazioni differenziali, che faranno parte del set di ODEs risolte numericamente:

$$\frac{db_{11}}{dt} = (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{31} - (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{21} \quad (4)$$

$$\frac{db_{21}}{dt} = (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{11} - (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{31} \quad (5)$$

$$\frac{db_{31}}{dt} = (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{21} - (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{11} \quad (6)$$

$$\frac{db_{12}}{dt} = (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{32} - (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{22} \quad (7)$$

$$\frac{db_{22}}{dt} = (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{12} - (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{32} \quad (8)$$

$$\frac{db_{32}}{dt} = (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{22} - (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{12} \quad (9)$$

$$\frac{db_{13}}{dt} = (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{32} - (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{22} \quad (10)$$

$$\frac{db_{23}}{dt} = (b_{31}\omega_x^* + b_{32}\omega_y^* + b_{33}\omega_z^*)b_{13} - (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{33} \quad (11)$$

$$\frac{db_{33}}{dt} = (b_{11}\omega_x^* + b_{12}\omega_y^* + b_{13}\omega_z^*)b_{23} - (b_{21}\omega_x^* + b_{22}\omega_y^* + b_{23}\omega_z^*)b_{13} \quad (12)$$

Le forze agenti sulla pala, a parte la forza gravitazionale, sono le forze dovute all'aerodinamica del profilo. Si indichino con \mathbf{x}_G ed \mathbf{u}_G la posizione e velocità, entrambe relative al sistema di

riferimento inerziale, del baricentro della pala; inoltre, si indichi con x_p^* la posizione, relativa al sistema corpo, del centro di pressione (i.e. univocamente determinato dal profilo alare della pala): tramite la matrice di rotazione e' possibile calcolare la posizione del centro di pressione nel sistema di riferimento inerziale:

$$x_p = x_G + R x_p^* \quad (13)$$

L'equazione (13) viene usata per calcolare la velocita' del vento alla quota del centro di pressione; data la velocita' del vento all'altezza della torre (la si denoti come U_w), si assume un profilo turbolento dato dall'equazione:

$$u_w = \begin{bmatrix} 0 \\ U_w (x_{p,3}/H)^{0.13} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

L'equazione (14) indica che la componente del vento e' nella direzione Y del sistema inerziale, ed e' in funzione della quota del centro di pressione; il termine H denota l'altezza della torre. La velocita' aereodinamica puo' essere finalmente ottenuta dall'equazione seguente:

$$u_p^* = R^{-1}(u_w - u_G) - \omega^* \wedge x_p^* \quad (15)$$

L'angolo di attacco aereodinamico e la velocita' aereodinamica (che sara' utilizzata per il computo della resistenza e della portanza) seguono come da equazioni (16) e (17):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{u_{p,2}}{u_{p,1}} \right) \quad (16)$$

$$u_{aer} = \sqrt{u_{p,2}^2 + u_{p,1}^2} \quad (17)$$

Il lag tra stallo dinamico e statico e' calcolato con la seguente equazione:

$$\frac{df_{dyn}}{dt} = \frac{f_s - f_{dyn}}{T_f} \quad (18)$$

Lo stallo statico e' calcolato in funzione di un coefficiente (C_{Ls}) che e' calcolato in funzione dell'angolo di attacco come indicato in Figura 2. Nell'equazione 18, T_f corrisponde ad un tempo caratteristico, tipicamente funzione della velocita' aereodinamica e della lunghezza di corda. Come indicato da Sørensen (1984) ed Oye (1981), il coefficiente di portanza viene calcolato utilizzando il risultato dell'equazione differenziale ordinaria (18), e coefficienti che tengono conto del caso di flusso non-separato e totalmente separato:

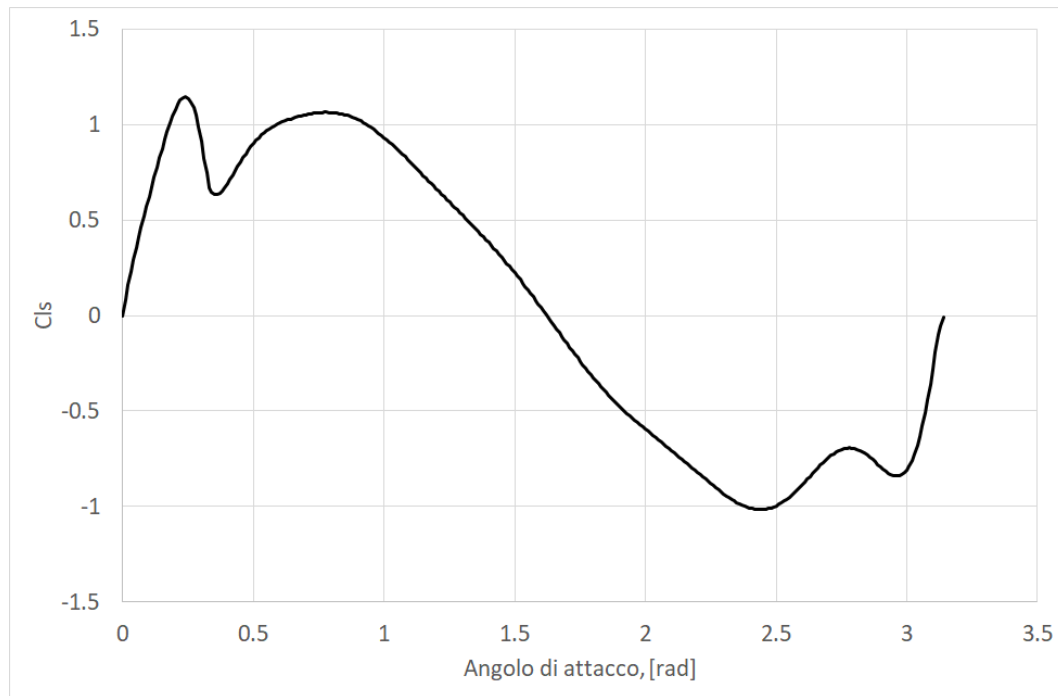


Figura 2: funzione interpolante utilizzata per il computo del coefficiente di portanza statico. NACA0012

$$C_L = f_s C_{L0}(\alpha) + (1 - f_s) C_{L1}(\alpha) \quad (19)$$

La portanza viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$L = \frac{1}{2} \rho u_{aer}^2 C_L LC \quad (20)$$

Nell'equazione (20) ρ , L , C denotano rispettivamente la densità dell'aria, lunghezza della pala e della corda. La resistenza aereaodinamica viene calcolata con l'equazione (21) riportata di seguito:

$$D = \frac{1}{2} \rho u_{aer}^2 C_D LC \quad (21)$$

Il coefficiente aereaodinamico di resistenza è calcolato in funzione dell'angolo di attacco usando la funzione indicata in Figura 3. Una volta calcolate le forze aereaodinamiche, le forze agenti sul corpo nel sistema inerziale (lungo gli assi X ed Y) derivano di conseguenza:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} -L \sin \alpha + D \cos \alpha \\ L \cos \alpha + D \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Mg \end{bmatrix} \quad (22)$$

L'equazione (22) indica come alle forze aereaodinamiche venga sommata la forza gravitazionale, che agisce lungo l'asse Z del sistema inerziale (M e g denotano la massa del corpo e l'accelerazione gravitazionale rispettivamente). Il momento delle forze segue dal calcolo delle forze aereaodinamiche e si calcola come indicato nell'equazione (23).

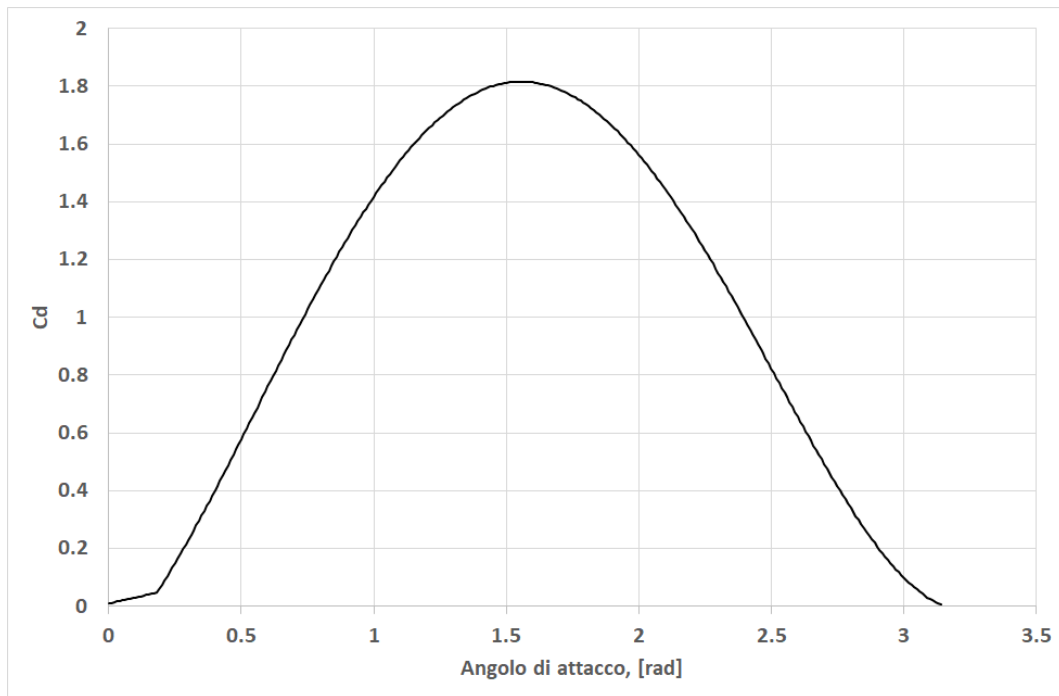


Figura 3: Coefficiente di resistenza in funzione dell'angolo di attacco. NACA0012

$$M^* = x_p^* \wedge \begin{bmatrix} -L \sin \alpha + D \cos \alpha \\ L \cos \alpha + D \sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Le equazioni differenziali ordinarie da aggiungere alle (4)-(12) possono essere finalmente completate, partendo dalle sei equazioni di traslazione:

$$\frac{dx_{G,1}}{dt} = u_{G,1} \quad (24)$$

$$\frac{dx_{G,2}}{dt} = u_{G,2} \quad (25)$$

$$\frac{dx_{G,3}}{dt} = u_{G,3} \quad (26)$$

$$\frac{du_{G,1}}{dt} = \frac{F_x}{M} \quad (27)$$

$$\frac{du_{G,2}}{dt} = \frac{F_y}{M} \quad (28)$$

$$\frac{du_{G,3}}{dt} = \frac{F_z}{M} \quad (29)$$

Infine le tre equazioni di rotazione, risolte nel sistema di riferimento corpo, sono espresse come segue.

$$\frac{d\omega_x^*}{dt} = \frac{M_x^* + (I_y^* - I_z^*)\omega_y^*\omega_z^*}{I_x^*} \quad (30)$$

$$\frac{d\omega_y^*}{dt} = \frac{M_y^* + (I_z^* - I_x^*)\omega_x^*\omega_z^*}{I_y^*} \quad (31)$$

$$\frac{d\omega_z^*}{dt} = \frac{M_z^* + (I_x^* - I_y^*)\omega_x^*\omega_y^*}{I_z^*} \quad (32)$$

Nelle equazioni di rotazione del corpo (30)-(32), i termini I_x^*, I_y^*, I_z^* indicano i momenti di rotazione relativi all'asse corpo X,Y,Z. Il sistema completo delle equazioni differenziali ordinarie da risolvere e' quindi composto dalle 9 equazioni di rotazione dei versori sistema corpo (4)-(12), dall'equazione per il computo dello stallo dinamico (18), dalle 6 equazioni di traslazione (24)-(29) e dalle 3 equazioni relative alle componenti del vettore velocita' angolare relative al sistema corpo. Le equazioni sono state implementate in un codice di calcolo scritto col linguaggio di programmazione C++ 17, e la soluzione numerica e' basata sul metodo del quarto ordine di Runge-Kutta, usando le librerie Boost C++.

3 DATI DI BASE

3.1 DATI GEOMETRICI

La geometria e forma della pala eolica sono stati modellati usando informazioni fornite dai vendor. Un eventuale disclosure dei dati deve essere consentita dagli stessi.

I momenti di inerzia sono stati stimati ipotizzando una distribuzione di massa uniforme e considerando i momenti di inerzia del parallelepipedo equivalente.

L'altezza dell'hub è di 120 metri, altezza alla quale sono anche considerati i dati ambientali.

3.2 DATI AMBIENTALI

I dati meteo della zona sono riportati in Figura 4, in termini di rosa dei venti e frequenze. Per ogni direzione di vento le frequenze associate alle diverse velocità di vento sono rappresentate con una distribuzione di Weibull, i cui parametri sono riportati nella Tabella 1.

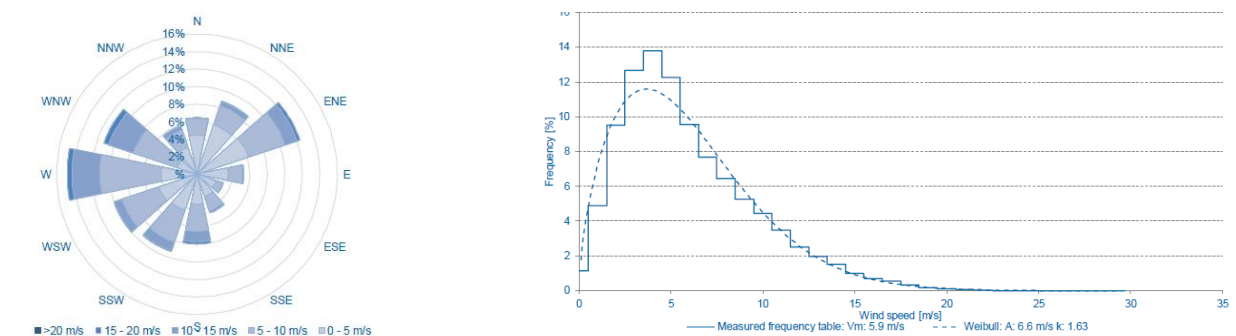


Figura 4 Rosa dei venti e distribuzione delle velocità media

Tabella 1 Dati di vento per direzione

Sector	A parameter	k parameter	frequency	Mean wind speed
Mean	6.776	1.5772	100	6.084
0-N	4.544	1.5926	7.42	4.076
1-NNE	4.335	1.6803	9.199	3.871
2-ENE	5.41	1.2714	10.562	5.02
3-E	4.393	1.6685	4.432	3.925
4-ESE	4.147	1.5821	3.021	3.722
5-SSE	5.386	1.8618	3.885	4.782
6-S	7.981	1.5887	8.068	7.16

7-SSW	6.89	1.8025	9.212	6.127
8-WSW	6.834	1.8211	9.899	6.074
9-W	9.145	2.0963	14.887	8.1
10-WNW	9.978	2.4107	13.098	8.846
11-NNW	5.591	1.7059	6.319	4.988

3.3 CONDIZIONI OPERATIVE

La velocità di rotazione del rotore è funzione della velocità del vento, come mostrato in Figura 5. Per velocità inferiori a 3 m/s la turbina eolica è ferma.

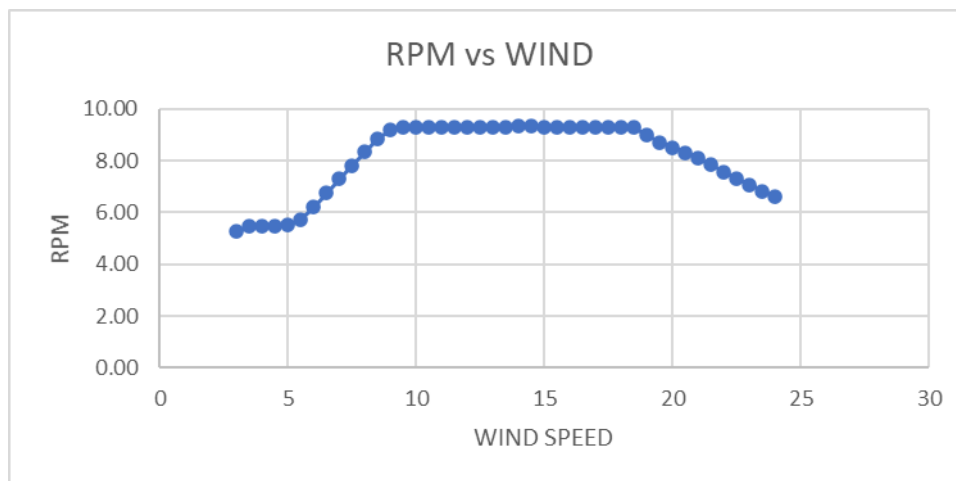


Figura 5 Velocità di rotazione del rotore in funzione della velocità del vento

4 RISULTATI

Per poter testare il modello numerico sono state inizialmente effettuate delle simulazioni dove solo alcuni parametri venivano modificati. In particolare in Figura 6 sono riportati i risultati di una serie di simulazioni dove l'unico parametro libero era l'angolo di rilascio θ_0 , dove $\theta_0=0$ corrisponde ad un rilascio con l'asse della pala posto verticalmente nel punto più vicino al suolo. Nelle simulazioni la velocità del vento è fissata a 15 m/s con direzione proveniente da sud. Sono stati testati tre diversi settaggi del modello:

- ideal: solo la forza peso viene considerata, assimilabile al moto di un grave
- aero_nolift: viene considerata anche la forza di resistenza aerodinamica
- aero_full: viene considerata sia la resistenza che la portanza

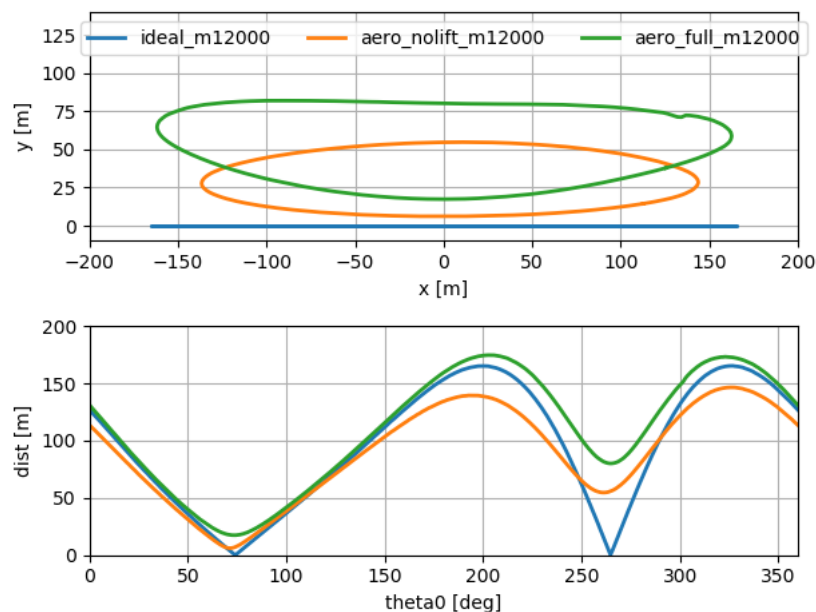


Figura 6 Punto di atterraggio del baricentro della pala nel piano xy (sopra) e distanza raggiunta come funzione dell'angolo di distacco θ_0 (sotto).

Nella figura superiore sono riportati i punti di atterraggio nel piano xy, dove la turbina si trova nell'origine (0,0). Si può notare come nel caso ideale la traiettoria della pala si sviluppa solo nel piano $y=0$, mentre la presenza delle forze aerodinamiche determina anche uno spostamento lungo la direzione del vento. Nel secondo grafico di Figura 6 è invece riportata la distanza raggiunta per i diversi valori dell'angolo di distacco θ_0 .

Per poter determinare il rischio associato alla caduta della pala in una determinata area è stata effettuata un'analisi probabilistica.

Sono state effettuate un numero N di simulazioni, dove sono stati variati i seguenti parametri:

- Direzione del vento, scelto casualmente con una funzione di probabilità che rispettasse le frequenze della rose dei venti
- Velocità del vento, scelta casualmente seguendo la distribuzione dei Weibull associata. Da notare che la velocità del vento determina anche la velocità di rotazione del rotore.
- Angolo di distacco theta, scelto in modo random tra 0 e 2π .

In Figura 7 sono mostrate le posizioni di atterraggio della pala per alcuni lanci. Il codice restituisce la posizione finale del baricentro della pala e il suo orientamento.

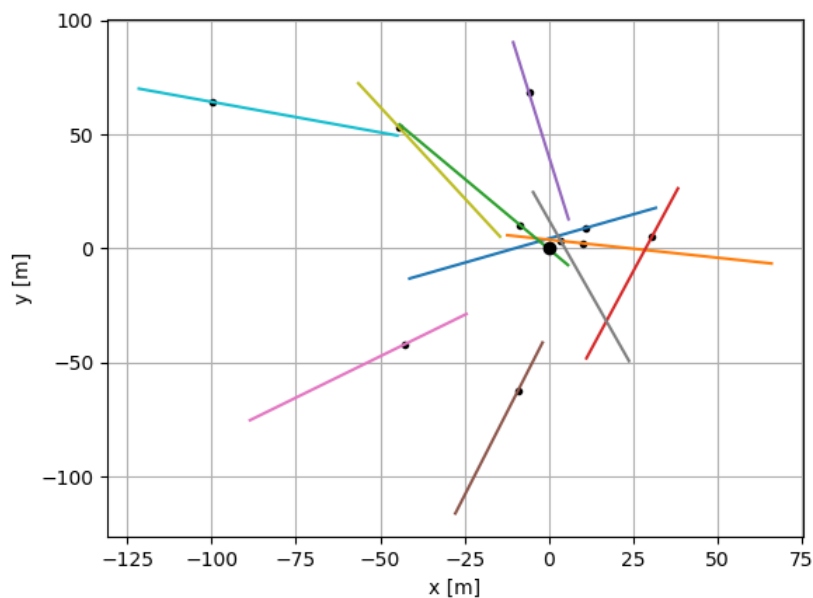


Figura 7 Esempio di posizione di atterraggio di pale eoliche

Per poter calcolare la probabilità di ricaduta su un punto generico (x,y) al suolo l'ingombro della pala è stato discretizzato su una griglia strutturata utilizzando l'algoritmo di Breseham (vedi Figura 8 per un esempio).

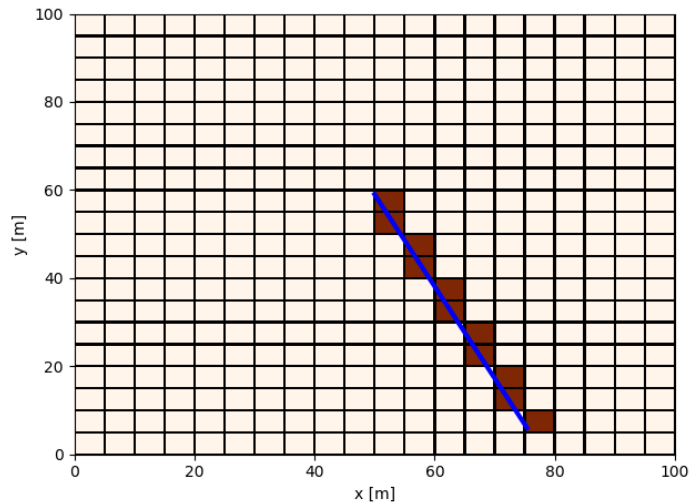


Figura 8 Ricostruzione della pala eolica sulla griglia di calcolo per il calcolo di probabilità

La Figura 9 e la Figura 10 mostrano le mappe di probabilità di ricaduta ottenute considerando rispettivamente 150000 e 500000 simulazioni. Da notare che stiamo considerando la probabilità condizionata, dove la probabilità di rottura della pala è stimata avere una frequenza pari a 10^{-4} eventi/turbina/anno (dato derivante dalla letteratura tecnica consultata - riferimento temporale 2000-2010).

Le due mappe presentano un eccellente accordo per le frequenze più alte di $10e-7$, mentre la mappa con il minor numero di simulazioni appare più frastagliata per gli eventi a bassa frequenza.

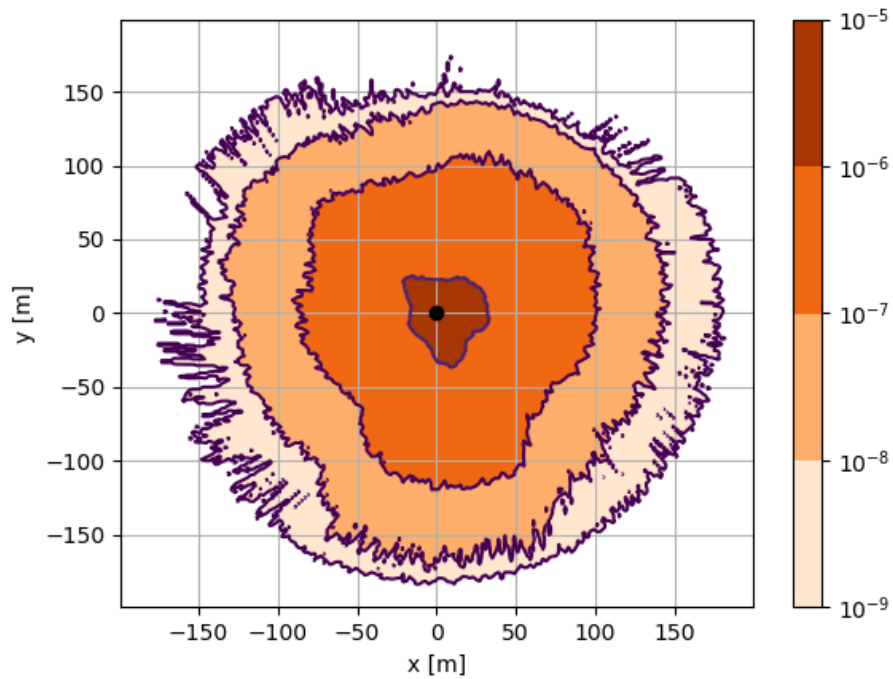


Figura 9 Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 150000

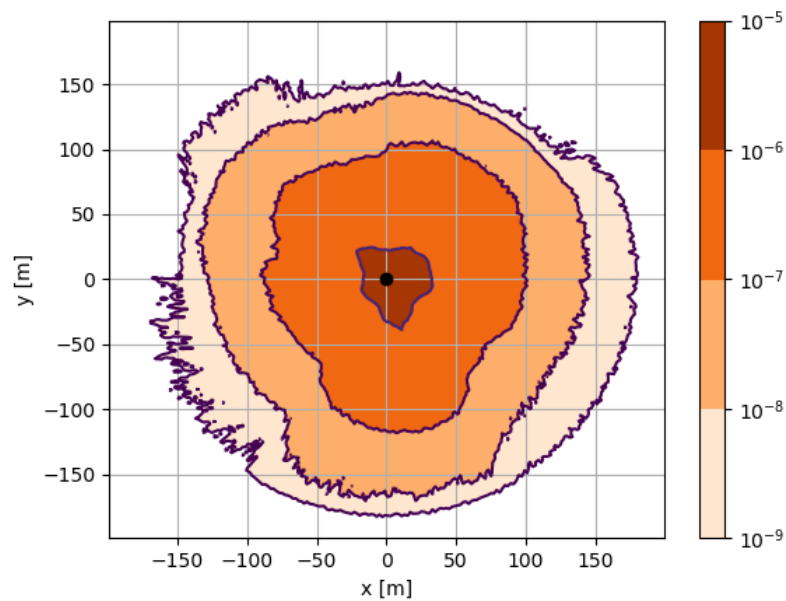


Figura 10 Mappa di probabilità di ricaduta. Numero di simulazioni: 500000

5 CONCLUSIONI

E' stata svolta un'analisi probabilistica per poter determinare le frequenze di ricaduta in caso di rottura della pala eolica. Sono state create delle mappe che determinano la probabilità di ricaduta della pala su un generico settore di terra x,y.

Considerando la mappa derivante da un numero di simulazioni pari a 500.000 (Figura 11), si evince che con una probabilità condizionata pari a 10^{-9} si ha una distanza massima raggiungibile (intesa come la distanza raggiunta dall' estremità della pala) inferiore ai 175metri, mentre per una probabilità condizionata pari a 10^{-6} la distanza massima raggiunta è inferiore a 50 metri.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Sarlak, H, and J. N. Sørensen. "Analysis of throw distances of detached objects from horizontal-axis wind turbines." *Wind Energy* 19.1 (2016): 151-166Phast 8.2 DNV (Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd)
- [2] J.N. Sørensen “On the calculation of Trajectories for blades detaches from horizontal axis wind turbines”. *Wind engineering*, Vol. 8.3 (1984)
- [3] S. Oye “Dynamic stall simulated as time lag of stall”, *Proc. Of the Fourth IEA Symposium on the Aerodynamics of Wind Turbines*, Paper 6, Ed. K.F. McAnulty, ETSU, Harwell Laboratory.