

Appendice I: Relazione della Gittata Massima in Caso di rottura

INDICE

| | Pag. |
|--|-----------|
| LISTA DELLE TABELLE | 2 |
| LISTA DELLE FIGURE | 2 |
| ABBREVIAZIONI E ACRONIMI | 3 |
| 1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO | 4 |
| 2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA | 6 |
| 3 STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE | 8 |
| 3.1 METODOLOGIA | 8 |
| 3.1.1 Modello numerico | 8 |
| 3.1.2 Studio probabilistico | 13 |
| 3.2 DATI DI BASE | 14 |
| 3.3 DATI AMBIENTALI | 15 |
| 3.4 CONDIZIONI OPERATIVE | 15 |
| 3.5 RISULTATI | 16 |
| 4 CONCLUSIONI | 19 |
| REFERENZE | 20 |

LISTA DELLE TABELLE

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabella 2.1: | Risultati ottenuti da Vestas per condizioni di assenza di attrito dell'aria | 6 |
| Tabella 3.1: | Dati geometrici dell'aerogeneratore Vestas V-136 4.5 MW | 14 |
| Tabella 3.2: | Dati di vento per direzione | 15 |

LISTA DELLE FIGURE

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1: | Inquadramento territoriale del progetto | 4 |
| Figura 1.2: | Prospetto dell'aerogeneratore. 1: altezza della torre, pari a 82 m; 2: diametro del rotore, pari a 136 m. | 5 |
| Figura 3.1: | Sistemi di riferimento inerziale e corpo | 8 |
| Figura 3.2: | Funzione interpolante utilizzata per il computo del coefficiente di portanza statico NACA0012 | 11 |
| Figura 3.3: | Coefficiente di resistenza in funzione dell'angolo di attacco. NACA0012 | 12 |
| Figura 3.4: | Esempi di posizione di atterraggio di pale eoliche | 13 |
| Figura 3.5: | Ricostruzione della pala eolica sulla griglia di calcolo per il calcolo di probabilità | 14 |
| Figura 3.6: | Rosa dei venti e distribuzione delle velocità media | 15 |
| Figura 3.8: | Punto di atterraggio del baricentro della pala nel piano xy (sopra) e distanza raggiunta come funzione dell'angolo di distacco θ_0 (sotto). | 16 |
| Figura 3.8: | Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 100000 | 17 |
| Figura 3.9: | Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 500000 | 18 |

ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

| | |
|------------|------------------------------------|
| ODE | Equazioni Differenziali Ordinarie |
| RPM | Rounds Per Minute (giri al minute) |
| WTG | Wind Turbine Generator |

1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Il presente intervento è finalizzato alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, localizzato nel territorio del comune di Montazzoli in provincia di Chieti, in Abruzzo. L'inquadramento è illustrato in Figura 1.1.

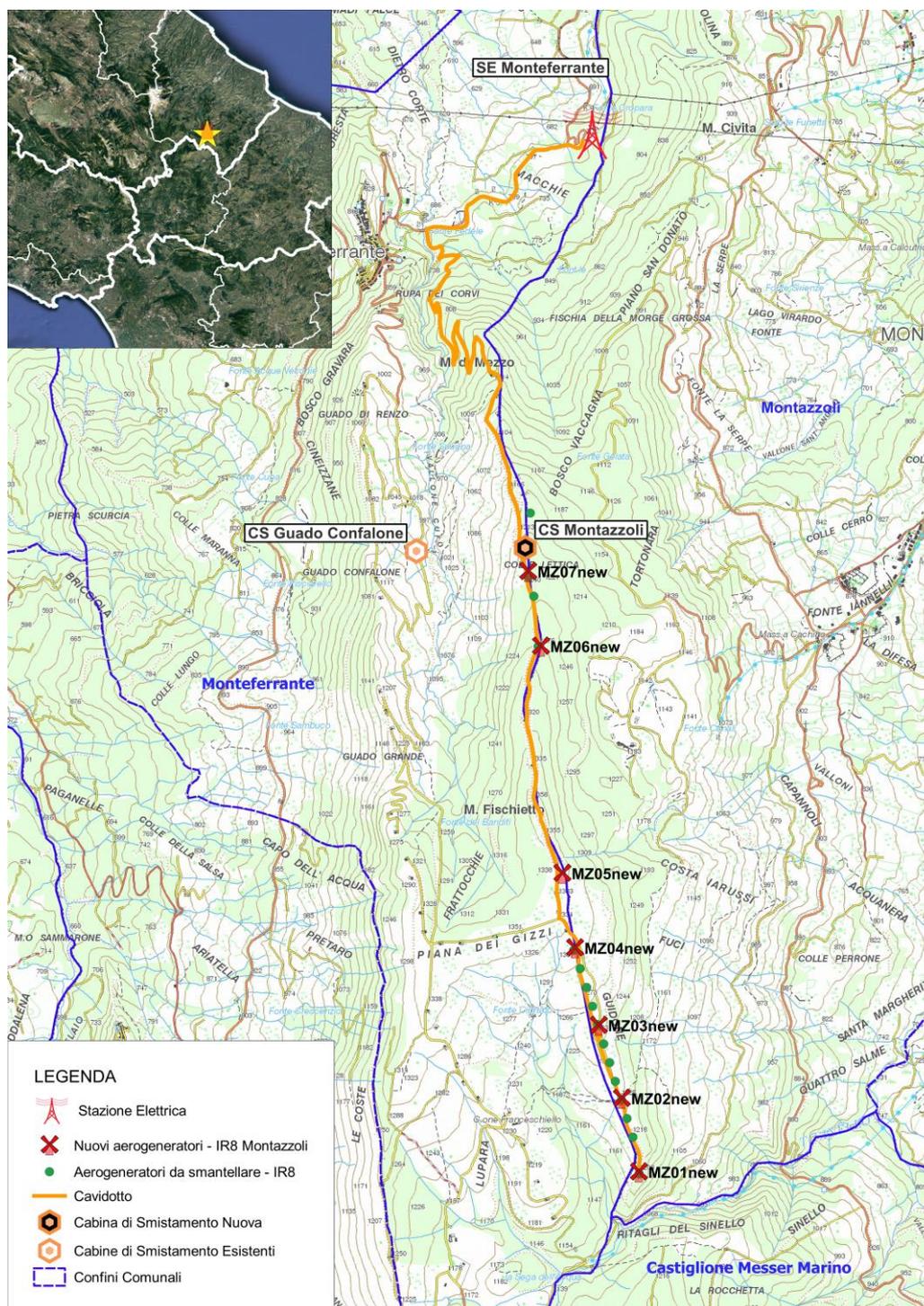


Figura 1.1: Inquadramento territoriale del progetto

L'impianto eolico sarà costituito da 7 aerogeneratori, per una potenza elettrica complessiva pari a 31.5 MW.

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto è il modello Vestas V136 4.5 MW. È costituito da una torre di sostegno tubolare metallica a tronco di cono, di altezza pari a 82 m, sulla cui sommità è installata la navicella. Il rotore presenta un diametro di 136 metri, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 150 m. Il prospetto dell'aerogeneratore è illustrato in Figura 1.2.

Il Layout dell'impianto è schematicamente indicato nella precedente figura, ma meglio dettagliato nelle Tavole di Progetto.

La presente relazione contiene l'analisi della Gittata massima degli elementi rotanti per gli aerogeneratori impiegati nell'impianto eolico in questione.

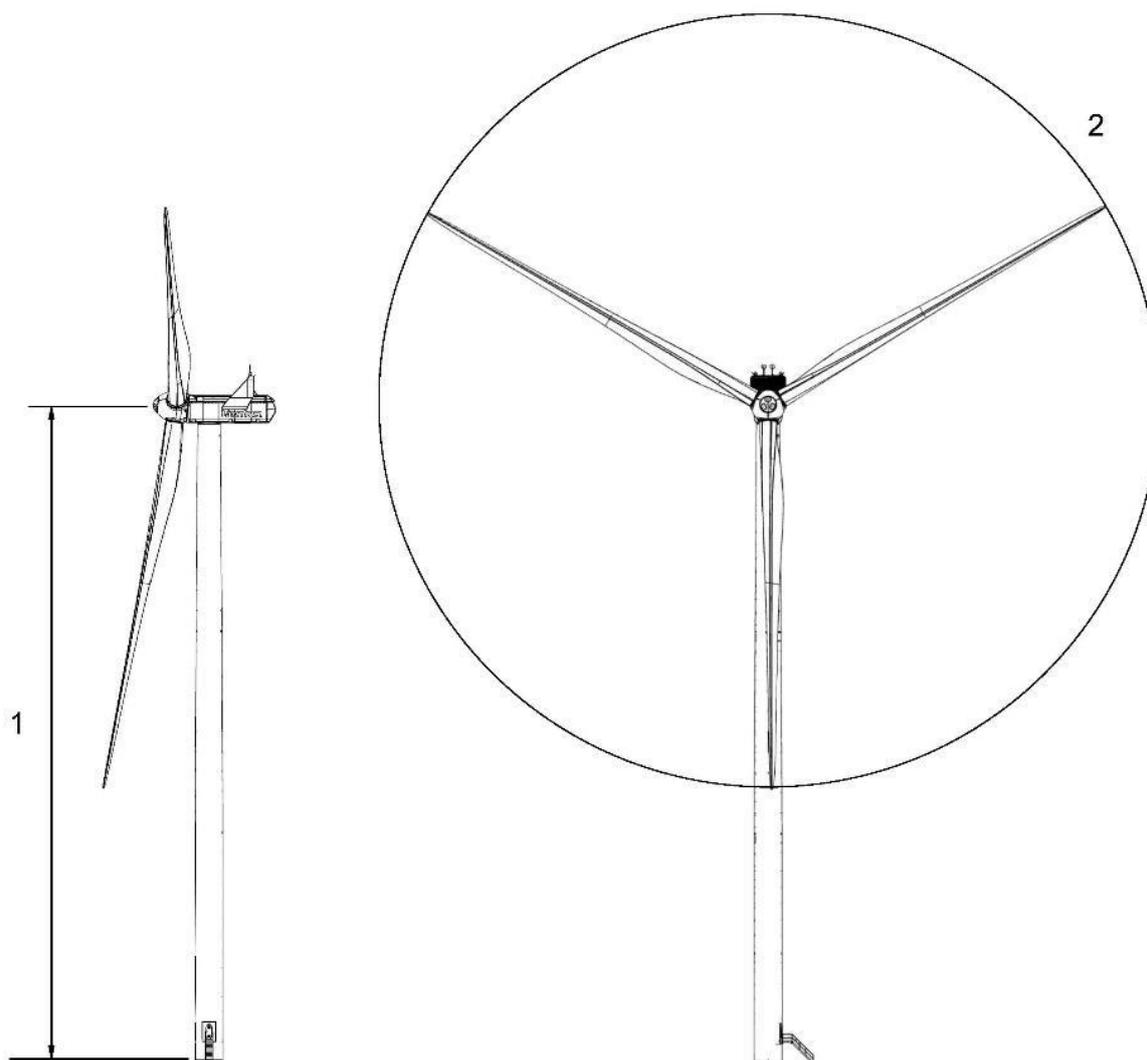


Figura 1.2: Prospetto dell'aerogeneratore. 1: altezza della torre, pari a 82 m; 2: diametro del rotore, pari a 136 m.

2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala o un frammento della stessa) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva, ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse e al sistema SCADA che mette subito in fermo la turbina prevenendo il lancio degli elementi frammentati. Tuttavia, ai fini della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzata le fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato), ed i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto dalla fulminazione in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I. Pertanto, possiamo sicuramente affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è del tutto trascurabile.

Il problema del calcolo della gittata di elementi rotanti è stato analizzato principalmente dal costruttore delle pale considerate Vestas [1].

Nello studio citato, Vestas ha determinato la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge in caso di distacco dal mozzo mentre la pala è in rotazione per otto modelli di aerogeneratori, aventi lunghezza delle pale da 25 a 54,6 metri e velocità di rotazione da 26 rpm a 17.7 rpm (ovviamente con gli aerogeneratori aventi pale di maggiore dimensione che funzionano a velocità di rotazione inferiori). Nello studio sono state considerate tre condizioni:

- ✓ moto in assenza di attrito dell'aria;
- ✓ moto in presenza di attrito dell'aria;
- ✓ moto in presenza di attrito dell'aria e di rotazioni intorno agli assi della pala.

Come riportato nello studio, la prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%. I risultati ottenuti per la condizione di assenza di attrito dell'aria sono riportati in Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Risultati ottenuti da Vestas per condizioni di assenza di attrito dell'aria

| Modello | Lunghezza pala [m] | Velocità rotazione [rpm] | Altezza mozzo [h] | Gittata [m] |
|---------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|----------------|
| V52 – 850 kW | 26 | 25 | 75 | 130 |
| V80 – 2 MW | 39 | 19.2 | 80 | 125 |
| V82 – 1.65 MW | 40 | 14.4 | 78 | 103 |
| V90 – 2 MW | 44 | 14.9 | 105 | 118 |
| V90 – 3 MW | 44 | 16.1 | 105 | 77 |
| V100 – 1.8 MW | 49 | 16.6 | 95 | 104 |
| V112 – 3 MW | 54.6 | 17.7 | 119 | 147 |

I risultati dello studio di Vestas mostrano che, sotto ipotesi conservative, la gittata massima per i modelli testati diminuisce sostanzialmente all'aumentare delle dimensioni delle pale e del diminuire del numero di giri. Fa eccezione, come si può notare, il caso della V112 3MW per la quale è stata calcolata una gittata di 147 metri, ma ciò è dovuto al fatto che l'altezza del mozzo è più elevata (119 metri) e che la velocità di rotazione è comunque più elevata rispetto alle V82, V90 e V100.

Nello studio svolto considereremo sia la presenza dell'attrito che il moto di rotazione della pala durante il volo.

3 STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE

Uno studio rigoroso del problema della gittata degli elementi rotanti richiede la conoscenza di elementi progettuali che sono in possesso unicamente del costruttore delle turbine. Tra questi, in particolare, l'evoluzione delle sezioni, dei pesi e dei coefficienti di portanza e resistenza lungo l'aerogeneratore.

Si è reso necessario dunque sviluppare un modello numerico relativo al calcolo della gittata massima in funzione delle condizioni di vento, inerzia e geometria della pala, e forze aerodinamiche.

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.

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Modello numerico

Il modello numerico è 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 "Sarлак, H, and J. N. Sørensen. "Analysis of throw distances of detached objects from horizontal-axis wind turbines." Wind Energy 19.1 (2016): 151-166" [2].

L'assunzione principale per simulare la traiettoria seguita dalla pala è basata sui gradi di libertà 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 è 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 3.1 indica i sistemi di riferimento adottati per lo studio.

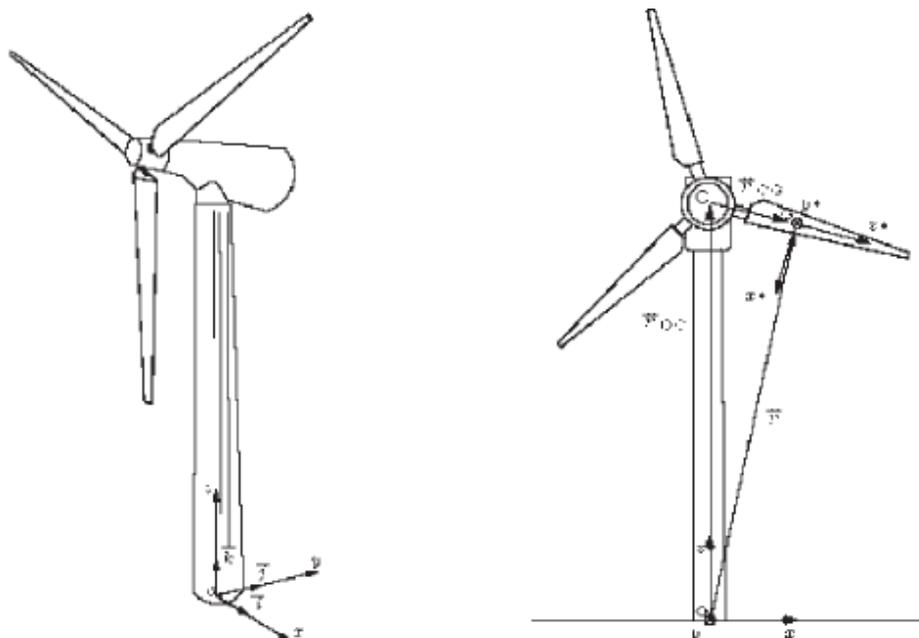


Figura 3.1: Sistemi di riferimento inerziale e corpo

Per poter passare dal sistema di riferimento corpo a quello inerziale si introduce la matrice di rotazione \mathbf{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 ODE.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 \mathbf{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 è possibile calcolare la posizione del centro di pressione nel sistema di riferimento inerziale:

$$\mathbf{x}_P = \mathbf{x}_G + \mathbf{R}\mathbf{x}_P^* \quad (13)$$

L'equazione (13) viene usata per calcolare la velocità del vento alla quota del centro di pressione; data la velocità del vento all'altezza della torre (la si denoti come \mathbf{U}_w), si assume un profilo turbolento dato dall'equazione:

$$\mathbf{u}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ U_w (x_{P,3}/H)^{0.13} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

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

$$\mathbf{u}_P^* = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{u}_w - \mathbf{u}_G) - \boldsymbol{\omega}^* \wedge \mathbf{x}_P^* \quad (15)$$

L'angolo di attacco aerodinamico e la velocità aerodinamica (che sarà 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 è calcolato con la seguente equazione:

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

Lo stallo statico è calcolato in funzione di un coefficiente (CL_s) che è calcolato in funzione dell'angolo di attacco come indicato in Figura 3.2. Nell'equazione 18, T_f corrisponde ad un tempo caratteristico, tipicamente funzione della velocità aerodinamica 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:

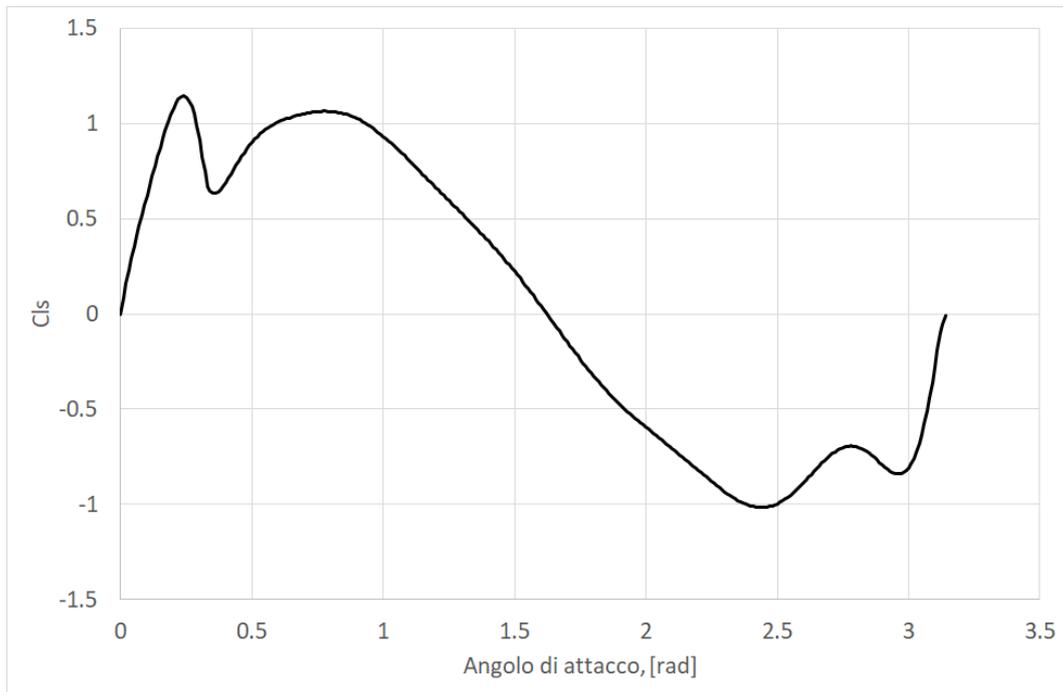


Figura 3.2: Funzione interpolante utilizzata per il computo del coefficiente di portanza statico NACA0012

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

La portanza viene calcolata tramite la seguente equazione:

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

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

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

Il coefficiente aereodinamico di resistenza è calcolato in funzione dell'angolo di attacco usando la funzione indicata in Figura 3.3. Una volta calcolate le forze aerodinamiche, 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 aereodinamiche venga sommata la forza gravitazionale, che agisce lungo l'asse Z del sistema inerziale (M e g denotano rispettivamente la massa del corpo e l'accelerazione gravitazionale). Il momento delle forze segue dal calcolo delle forze aereodinamiche e si calcola come indicato nell'equazione (23).

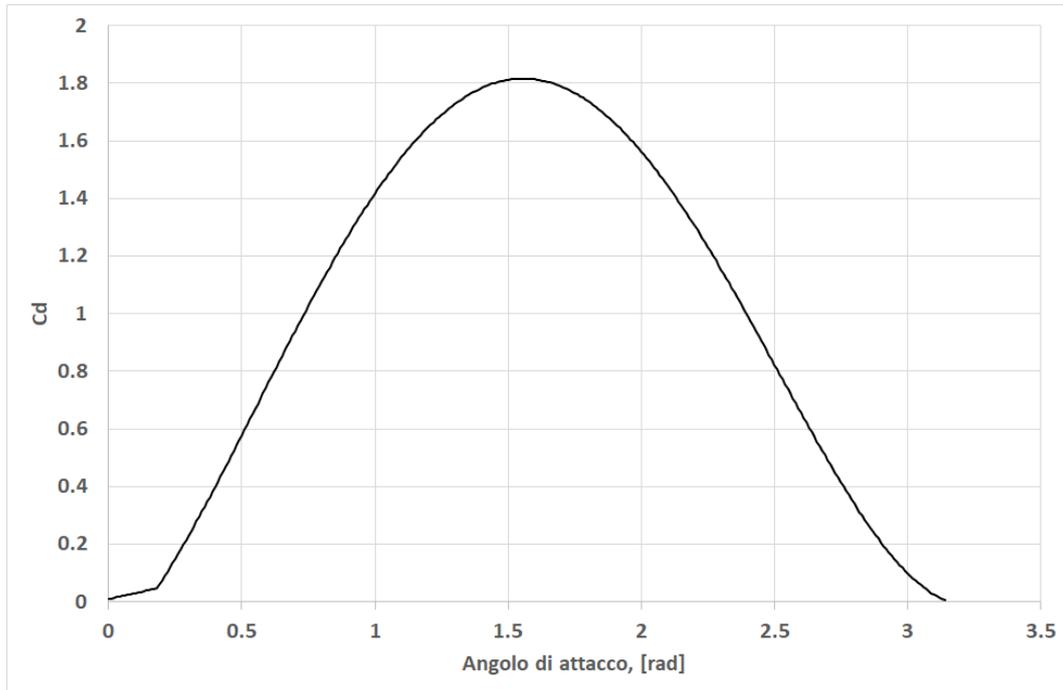


Figura 3.3: Coefficiente di resistenza in funzione dell'angolo di attacco. NACA0012

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

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 è 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 velocità 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 è basata sul metodo del quarto ordine di Runge-Kutta, usando le librerie Boost C++.

3.1.2 Studio probabilistico

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 rosa dei venti;
- ✓ Velocità del vento, scelta casualmente seguendo la distribuzione di Weibull associata.
- ✓ Angolo di distacco theta, scelto in modo random tra 0 e 2π .

In Figura 3.4 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.

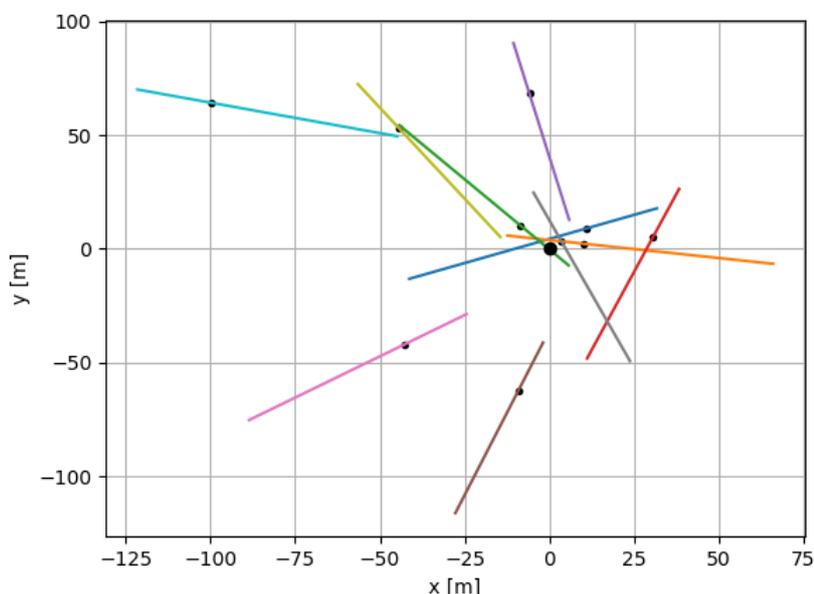


Figura 3.4: Esempi di posizione di atterraggio di pale eoliche

Il codice fornisce la posizione di ricaduta del baricentro, il quale è disposto a due terzi della lunghezza della pala. Al fine di determinare la distanza massima di ricaduta dell'oggetto, si ipotizzerà conservativamente che la pala sia allineata sulla direzione y. In tal modo, la distanza massima sarà data dalla coordinata y di ricaduta del baricentro, fornita dal codice, da sommarsi con i due terzi della lunghezza della pala.

Per poter calcolare la probabilità di ricaduta su un punto generico di coordinate x,y al suolo, l'ingombro della pala è stato discretizzato su una griglia strutturata utilizzando l'algoritmo di Breseham. Un esempio è riportato in Figura 3.5.

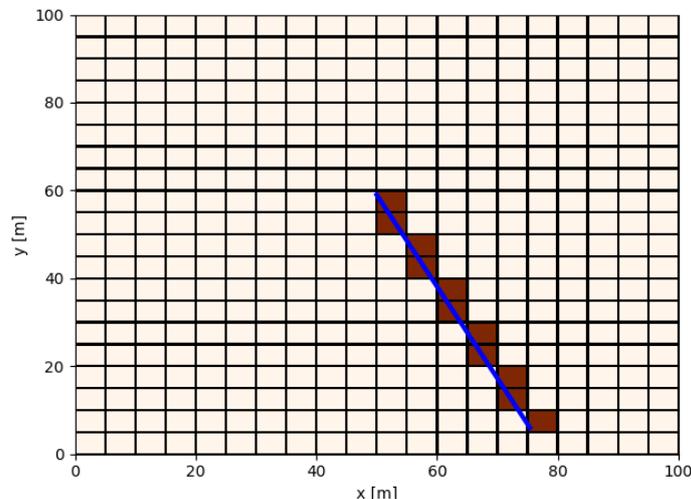


Figura 3.5: Ricostruzione della pala eolica sulla griglia di calcolo per il calcolo di probabilità

3.2 DATI DI BASE

La geometria e la forma della pala eolica sono stati modellati usando le informazioni fornite dal costruttore [5], riassunte in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Dati geometrici dell'aerogeneratore Vestas V-136 4.5 MW

| V136 – 4.5 MW | |
|---|------------------|
| Altezza torre | 82 m |
| Diametro | 136 m |
| Lunghezza pale | 66.8 m |
| Lunghezza corda alla radice | 4.1 m |
| Lunghezza corda al 90% della pala | 1.2 m |
| Lunghezza media della corda considerata | 2.65 m |
| Profilo aerodinamico ipotizzato | Profilo NACA0012 |
| Massa della pala | 15701 kg |

Si evidenzia che, non essendo noti il profilo di svergolamento della pala e il profilo aerodinamico, si è assunto un valore di corda costante lungo tutto il profilo, di tipologia NACA0012 [6]. I momenti di inerzia sono stati stimati ipotizzando una distribuzione di massa uniforme e considerando i momenti di inerzia del parallelepipedo equivalente.

3.3 DATI AMBIENTALI

I dati meteo della zona sono riportati in Figura 3.6, in termini di rosa dei venti e frequenze. I dati ambientali sono riferiti all'altezza dell'hub, pari a 82 m. Per ogni direzione di vento le frequenze associate alle diverse velocità di vento sono rappresentate con una distribuzione di Weibull. Un esempio della curva di Weibull identificata per la direzione Nord è riportato nella medesima figura. In Tabella 3.2 sono riportati i dati di vento per direzione; si specifica che i dati per velocità maggiori di 13 m/s non sono reperibili.

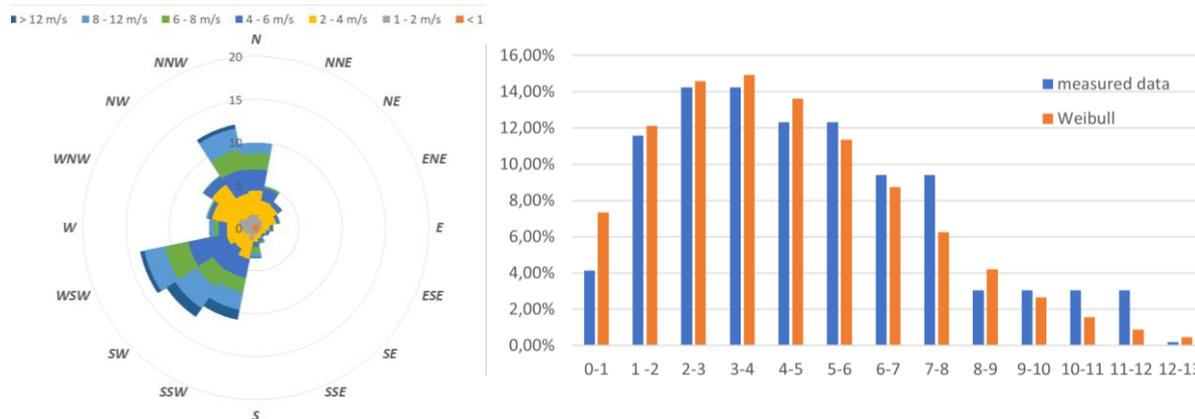


Figura 3.6: Rosa dei venti e distribuzione delle velocità media

Tabella 3.2: Dati di vento per direzione

| Direzione | Parametro α | Parametro k | Frequenza [%] | Velocità media [m/s] |
|-----------|--------------------|-------------|---------------|----------------------|
| N | 5.49 | 1.88 | 9.94 | 5.34 |
| N-NE | 3.45 | 2.09 | 4.98 | 3.94 |
| NE | 3.28 | 2.34 | 3.68 | 3.33 |
| E-NE | 3.34 | 2.3 | 2.87 | 3.36 |
| E | 3.43 | 2.08 | 2.06 | 3.40 |
| E-SE | 3.26 | 2.1 | 1.66 | 3.22 |
| SE | 3.09 | 1.65 | 1.35 | 3.13 |
| S-SE | 3.78 | 1.54 | 1.91 | 3.79 |
| S | 5.74 | 1.72 | 3.53 | 5.48 |
| S-SW | 6.92 | 1.8 | 10.91 | 6.67 |
| SW | 7.51 | 2.09 | 12.47 | 7.18 |
| W-SW | 6.47 | 1.94 | 13.65 | 6.37 |
| W | 4.14 | 1.34 | 5.42 | 4.43 |
| W-NW | 3.16 | 1.67 | 5.85 | 3.28 |
| NW | 3.42 | 2.39 | 7.39 | 3.51 |
| N-NW | 6.57 | 1.94 | 12.3 | 6.29 |

3.4 CONDIZIONI OPERATIVE

Il rotore presenta velocità di cut-in pari a 3 m/s, e velocità di cut-out pari a 27 m/s. All'interno di tale intervallo di velocità del vento, il rotore ha velocità di rotazione variabile tra 5.6 e 14.0 rpm, in funzione della velocità del vento. Ai fini del presente studio, è stata considerata la massima velocità di rotazione possibile, pari a 14.0 rpm, al fine di effettuare una stima conservativa della gittata massima.

3.5 RISULTATI

Per poter testare il modello numerico, sono state inizialmente effettuate delle simulazioni dove solo alcuni parametri venivano modificati. In particolare, in Figura 3.8 sono riportati i risultati di una serie di simulazioni dove l'unico parametro libero è l'angolo di rilascio θ_0 , che identifica l'angolo di rotazione al quale la pala si rompe e si distacca. $\theta_0=0$ corrisponde ad un rilascio con l'asse della pala allineato nella direzione +x. L'angolo θ_0 ha verso antiorario. Nelle simulazioni la velocità del vento in corrispondenza dell'hub dell'aerogeneratore è fissata a 17 m/s, pari alla velocità limite rilevata nell'area, con direzione proveniente da -y. Sono stati testati tre diversi settaggi del modello:

- ✓ no lift, no drag: solo la forza peso viene considerata, assimilabile al moto di un grave;
- ✓ no lift: viene considerata anche la forza di resistenza aerodinamica;
- ✓ full: vengono considerate sia la resistenza che la portanza.

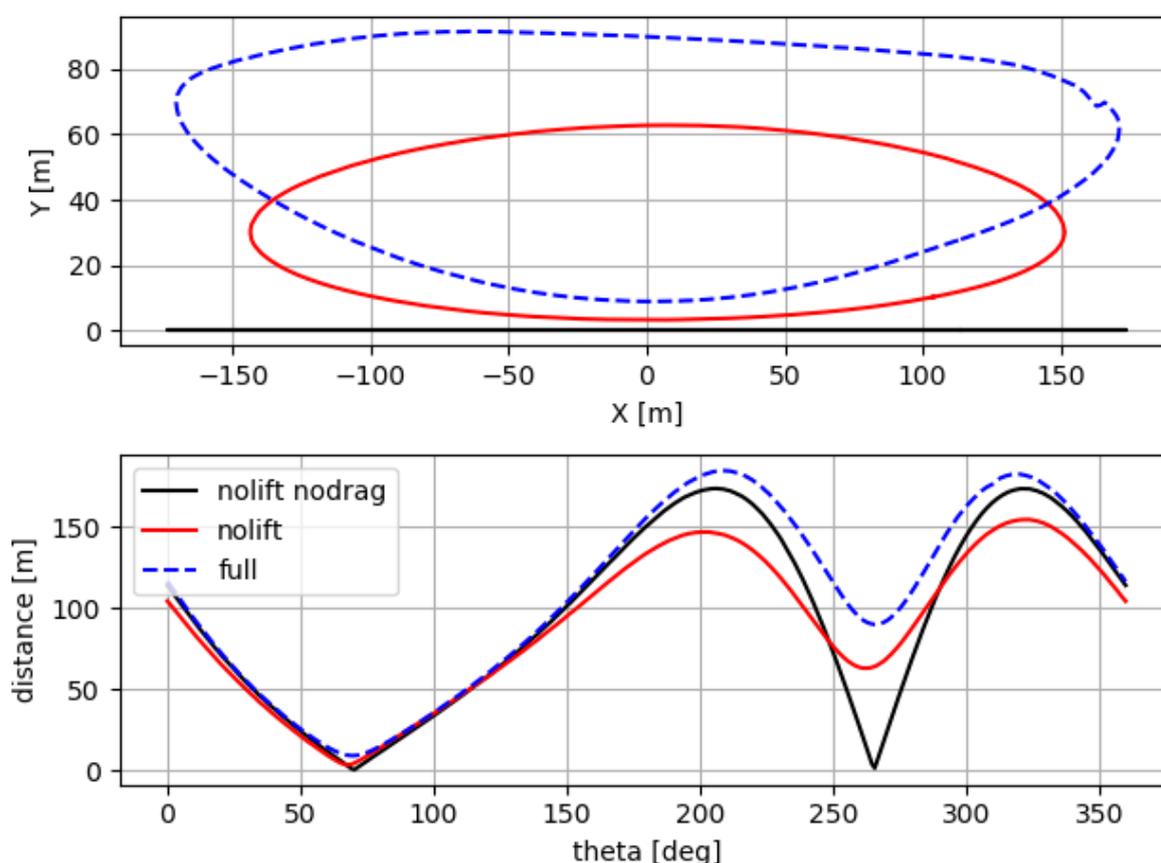


Figura 3.7: Punto di atterraggio del baricentro della pala nel piano xy (sopra) e distanza raggiunta come funzione dell'angolo di distacco θ_0 (sotto).

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. Le forze di portanza, inoltre, determinano un aumento della distanza di ricaduta dell'oggetto rispetto al caso con sola forza di resistenza. Nel secondo grafico è invece riportata la distanza raggiunta per i diversi valori dell'angolo di distacco θ_0 .

In Figura 3.8 e Figura 3.9 si mostrano le mappe di probabilità di ricaduta ottenute, nel caso in cui avvenga la rottura della pala, considerando rispettivamente 100000 e 500000 simulazioni. Si ricorda che 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) e che quindi la probabilità di ricaduta può essere calcolato con la regola della probabilità condizionata moltiplicando il valore della mappa per $10e-4$.

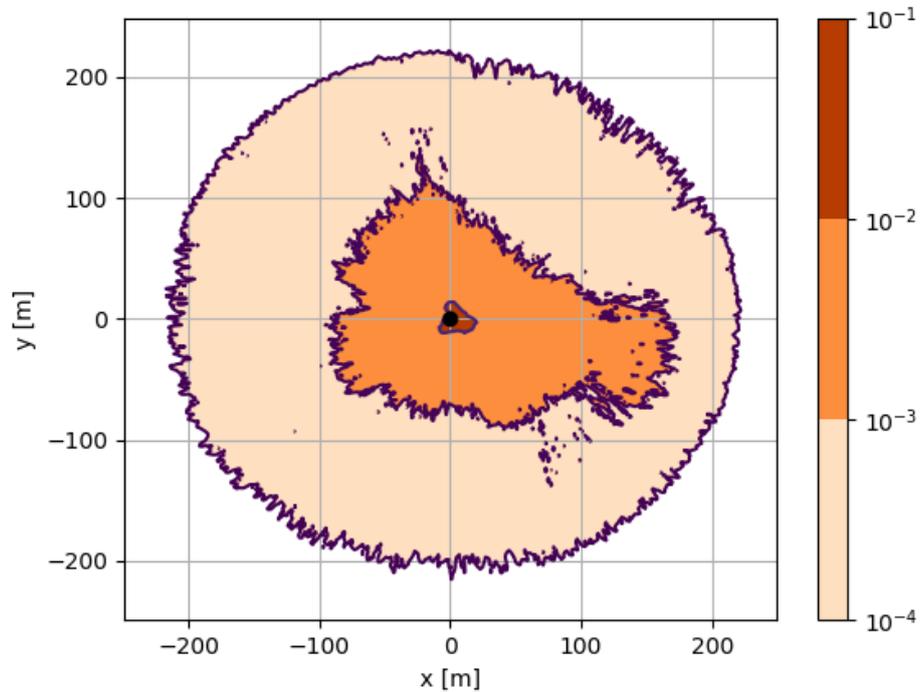


Figura 3.8: Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 100000

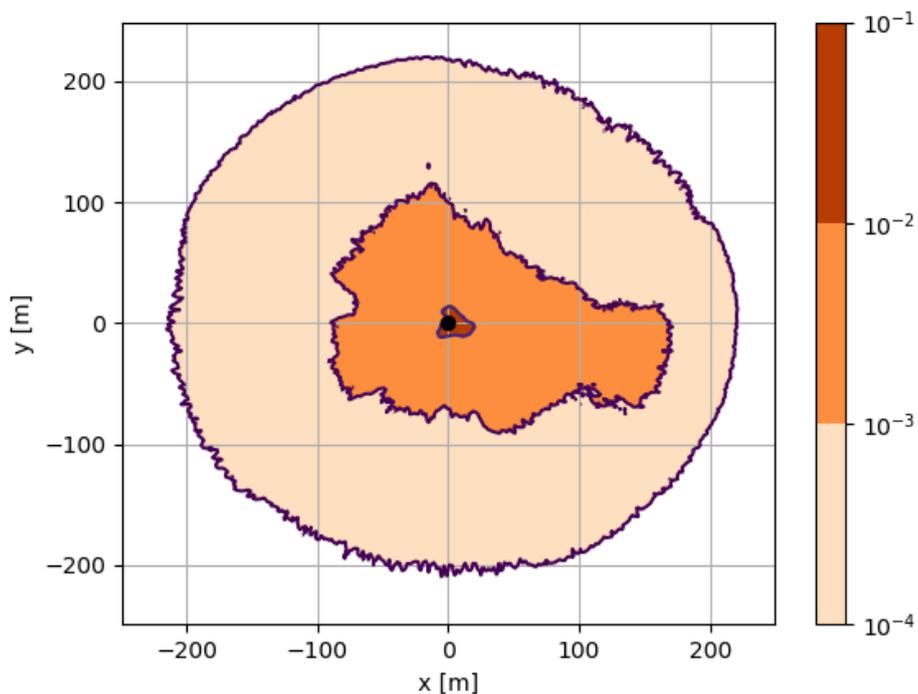


Figura 3.9: Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 500000

Le due mappe presentano un eccellente accordo per le frequenze più basse di $10e-3$, mentre la mappa con il minor numero di simulazioni appare più frastagliata per gli eventi a bassa frequenza.

Il valore massimo della distanza raggiunta dal baricentro della pala risulta pari a 184 m, dunque la massima distanza raggiungibile dalla pala, tenendo conto dei $2/3$ della lunghezza della stessa, quest'ultima pari a 66.7 m, risulta di 228 m.

Considerando una distanza di 228 metri da ciascun aerogeneratore, nessun edificio cade all'interno di tale area.

4 CONCLUSIONI

È stata svolta un'analisi probabilistica per poter determinare le frequenze di ricaduta in caso di rottura di una pala eolica dell'aerogeneratore Vestas V136 da 4.5 MW. 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, si evince che con una probabilità pari a 10^{-4} si ha una distanza massima raggiungibile (intesa come la distanza raggiunta dall'estremità della pala) pari a circa 228 metri, mentre per una probabilità pari a 10^{-1} la distanza massima raggiunta è inferiore a 20 metri.

Gli aerogeneratori di progetto sono situati a distanze ben maggiori da elementi sensibili.

REFERENZE

- [1] Vestas – Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento
- [2] 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)
- [3] J.N. Sørensen "On the calculation of Trajectories for blades detaches from horizontal axis wind turbines". *Wind engineering*, Vol. 8.3 (1984)
- [4] 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.
- [5] Vestas. (2019). 0067-7060_V02 - General Description 4MW Platform
- [6] NACA0012 Airfoil, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>