

“IR MELISSA STRONGOLI”

Integrale ricostruzione dei Parchi Eolici Melissa Strongoli e Melissa San Francesco (KR) - Intervento di Repowering con sostituzione degli aerogeneratori esistenti e relativa riduzione del numero delle macchine

Comuni di Melissa e Strongoli (KR)

COMMITTENTE



Edison Rinnovabili S.p.A.

Foro Buonaparte n.31 - Milano (MI)
P.IVA: 12921540154

PROGETTAZIONE



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy

Progettisti: Ing. Mariano Galbo

Studio di Impatto Ambientale



Appendice I

Relazione della gittata massima in caso di rottura

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	Dicembre 2022	Andrea Fani Gemma Falcone Matteo Profeti Maurizio Florio	Marco Compagnino	Marco Compagnino
Codice commessa: P0032385-1-H10		Codifica documento: MEL-SIA-REL-0000_09			

INDICE

	Pag.
LISTA DELLE TABELLE	2
LISTA DELLE FIGURE	2
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	3
1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	4
2 INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	7
3 STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE	9
3.1 METODOLOGIA	9
3.1.1 Modello numerico	9
3.1.2 Studio probabilistico	14
3.2 DATI DI BASE	15
3.3 DATI AMBIENTALI	15
3.4 CONDIZIONI OPERATIVE	16
3.5 RISULTATI	16
4 CONCLUSIONI	20
REFERENZE	21

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 2.1:	Risultati ottenuti da Vestas per condizioni di assenza di attrito dell'aria	7
Tabella 3.1:	Dati geometrici dell'aerogeneratore Siemens Gamesa SG 6.6-155	15

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1-1:	Localizzazione area di progetto	4
Figura 1-2:	Prospetto dell'aerogeneratore.	6
Figura 3-1:	Sistemi di riferimento inerziale e corpo	9
Figura 3-2:	Funzione interpolante utilizzata per il computo del coefficiente di portanza statico NACA0012	12
Figura 3-3:	Coefficiente di resistenza in funzione dell'angolo di attacco. NACA0012	13
Figura 3-4:	Esempi di posizione di atterraggio di pale eoliche	14
Figura 3-5:	Ricostruzione della pala eolica sulla griglia di calcolo per il calcolo di probabilità	15
Figura 3-6:	Rosa dei venti	16
Figura 3-7:	Distribuzione di Weibull per velocità	16
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).	17
Figura 3-9:	Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 100000	18
Figura 3-10:	Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 500000	19

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 nei territori comunale di Melissa e Strongoli in provincia di Crotona, in Calabria. L'inquadramento è illustrato in Figura 1-1.

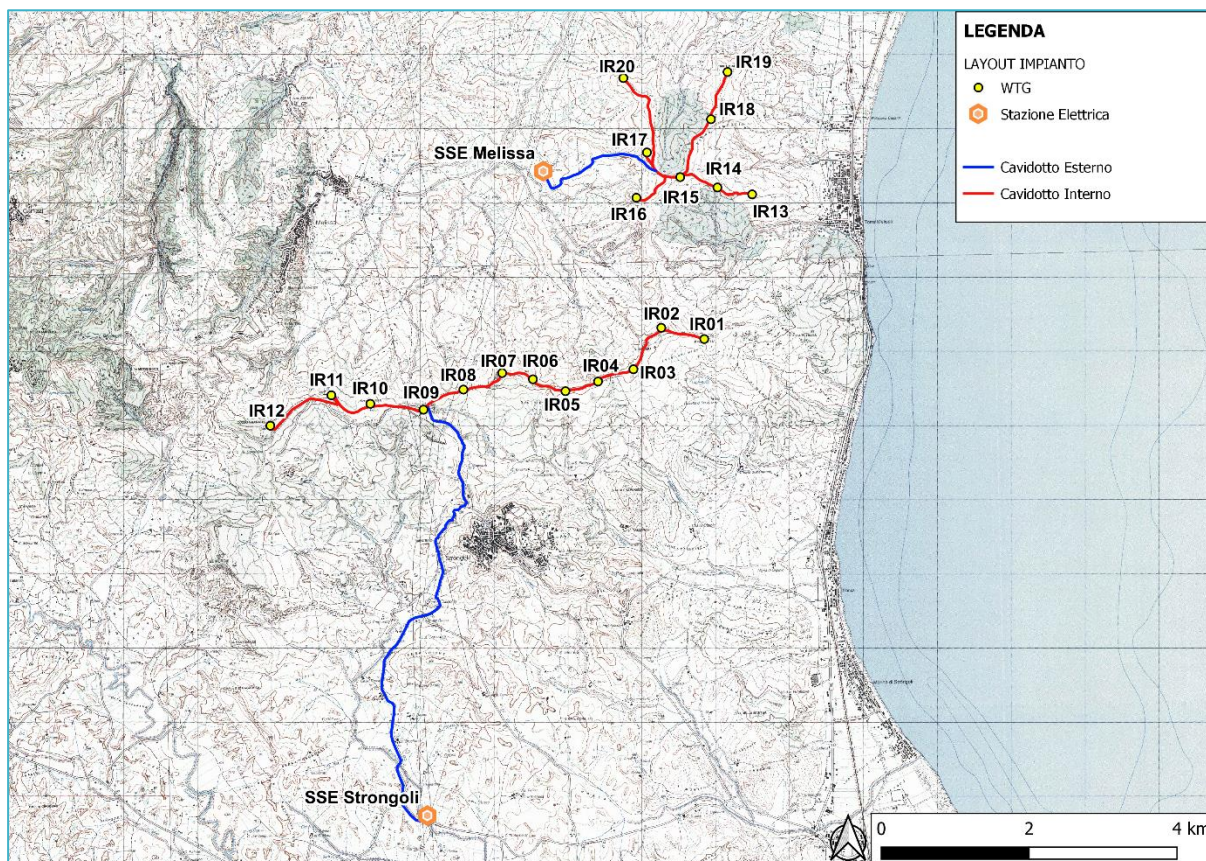


Figura 1-1: Localizzazione area di progetto

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

Lo studio si riferisce al progetto di *repowering* (ripotenziamento con integrale ricostruzione) di due parchi eolici esistenti:

- ✓ Parco eolico Melissa-Strongoli, realizzato tra gli anni 2006 e 2009, nei Comuni di Melissa e Strongoli, situato in provincia di Crotona in Calabria. In particolare, il parco eolico attuale è costituito da un impianto denominato Strongoli-Melissa 1, da 13 aerogeneratori di taglia 2 MW ciascuno per 26 MW complessivi, e uno denominato Strongoli-Melissa 2, da 12 aerogeneratori di taglia 2 MW ciascuno per 24 MW complessivi. Il Parco eolico Melissa Strongoli presenta in totale 25 aerogeneratori per una potenza del parco di 50 MW;
- ✓ Parco eolico San Francesco, realizzato tra gli anni 2006 e 2010, nel Comune di Melissa. Il parco eolico attuale è costituito da 13 aerogeneratori da 2 MW ciascuno per 26 MW del parco.

Il repowering proposto consta nell'utilizzo del sito di crinale già oggetto di installazione di impianti eolici, con la sostituzione di torri e aerogeneratori di tecnologia più avanzata, per un incremento di potenza unitaria e complessiva del sito in grado di determinare una consistente riduzione del numero di aerogeneratori e delle relative piazzole, cabine di macchina e stradine di accesso alle piazzole.

Il progetto prevede lavori di "ripotenziamento" dei due parchi eolici mediante:

Appendice I

- ✓ lo smantellamento di 25 aerogeneratori del Parco eolico Melissa Strongoli e di 13 aerogeneratori del Parco eolico San Francesco, per un totale di 76 MW, localizzati nei comuni di Melissa e Strongoli;
- ✓ l'installazione di 12 nuovi aerogeneratori della potenza di 6.6 MW cadauno nel Parco eolico Melissa Strongoli, per una potenza del parco pari a 79.2 MW, e l'installazione di 8 nuovi aerogeneratori della potenza di 6.6 MW cadauno nel Parco eolico San Francesco, per una potenza del parco pari a 52.8 MW. Complessivamente, la potenza dei due parchi sarà pari a 132 MW.
- ✓ Complessivamente, saranno dunque installati 20 nuovi aerogeneratori, con un incremento di potenza nel sito di progetto pari a 56 MW.

L'intervento di Integrale Ricostruzione consente quindi di:

- ✓ ridurre significativamente il numero di aerogeneratori con macchine più moderne e di più grandi dimensioni per sfruttare al meglio la risorsa vento
- ✓ riutilizzare almeno parzialmente le infrastrutture esistenti (accessi, opere elettriche di connessione, etc...)
- ✓ riutilizzare aree già dedicate alla produzione di energia e consolidamento sul territorio del rapporto con le comunità locali

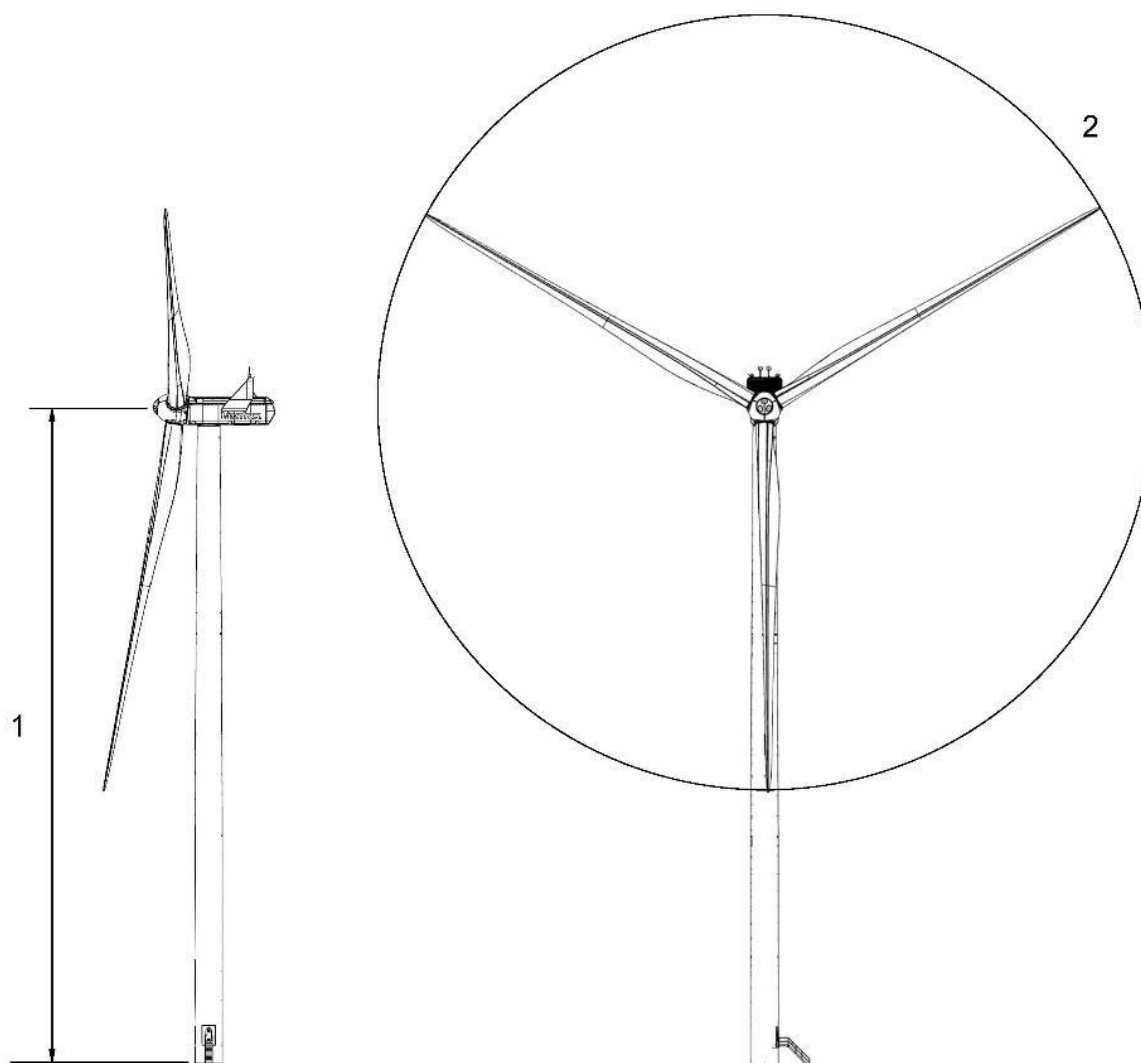


Figura 1-2: Prospetto dell'aerogeneratore.

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 ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. 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 con 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 della 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

Appendice I

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.

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.

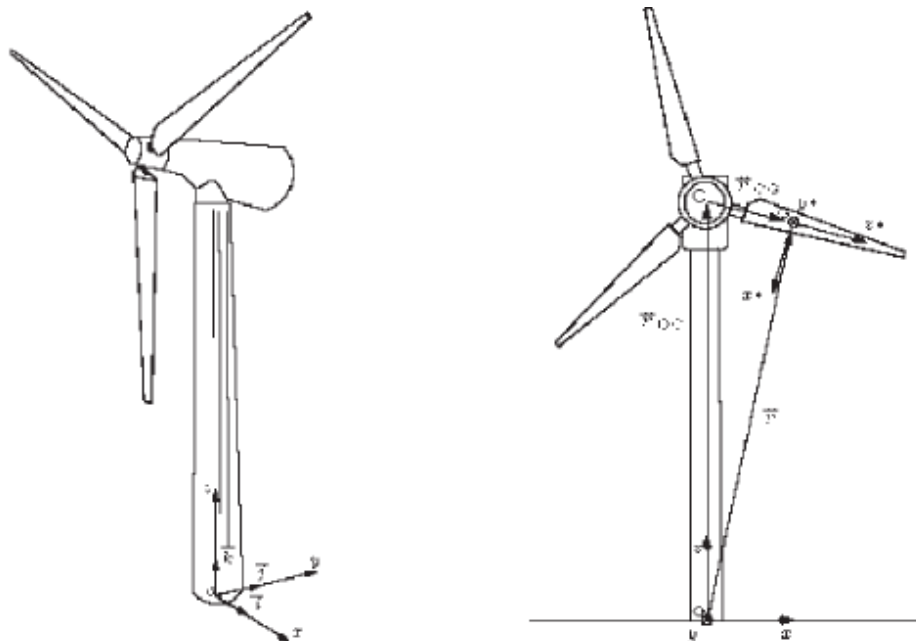


Figura 3-1: Sistemi di riferimento inerziale e corpo

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:

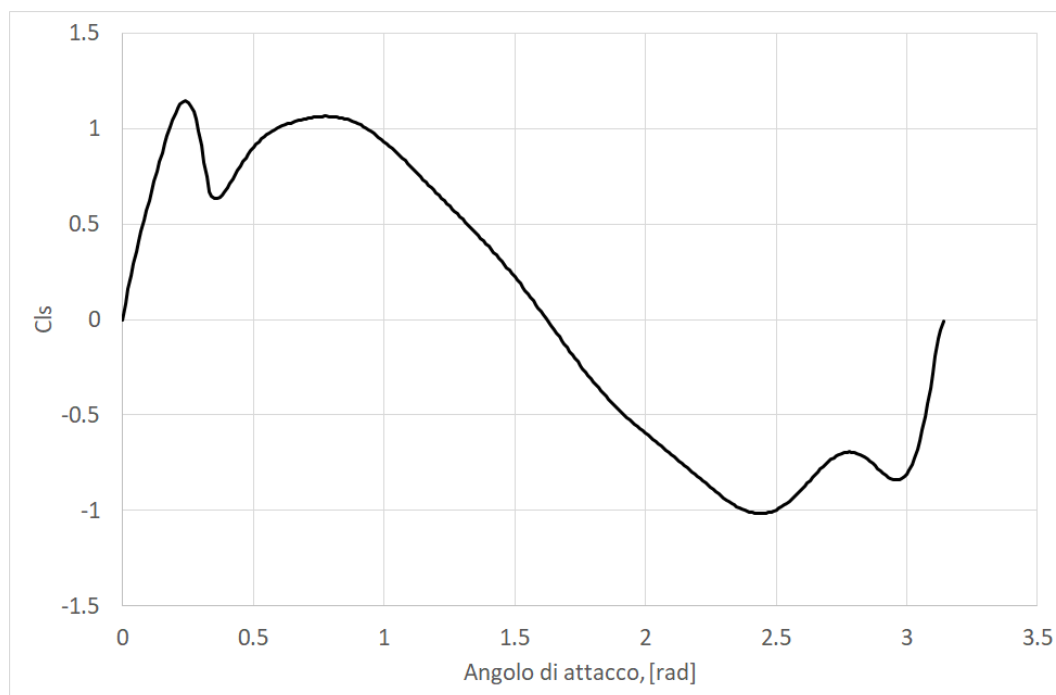


Figura 3-2: Funzione interpolante utilizzata per il computo del coefficiente di portanza statico NACA0012

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

La portanza viene calcolata tramite la seguente equazione:

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

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:

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

Il coefficiente aerodinamico 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 aeree 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 aeree e si calcola come indicato nell'equazione (23).

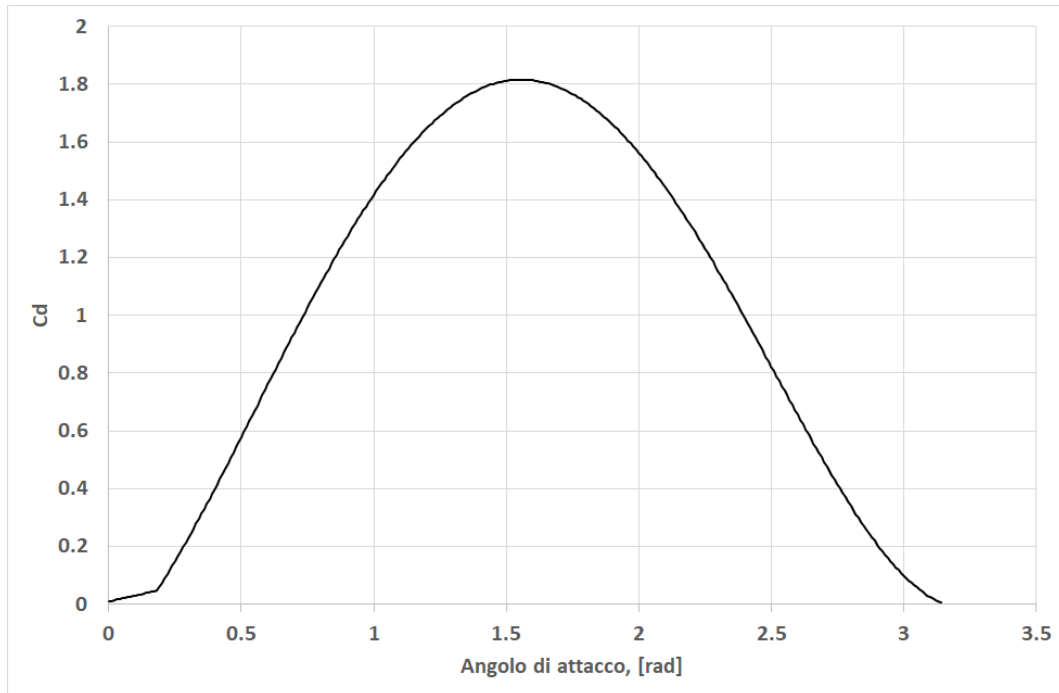


Figura 3-3: Coefficiente di resistenza in funzione dell'angolo di attacco. NACA0012

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

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.

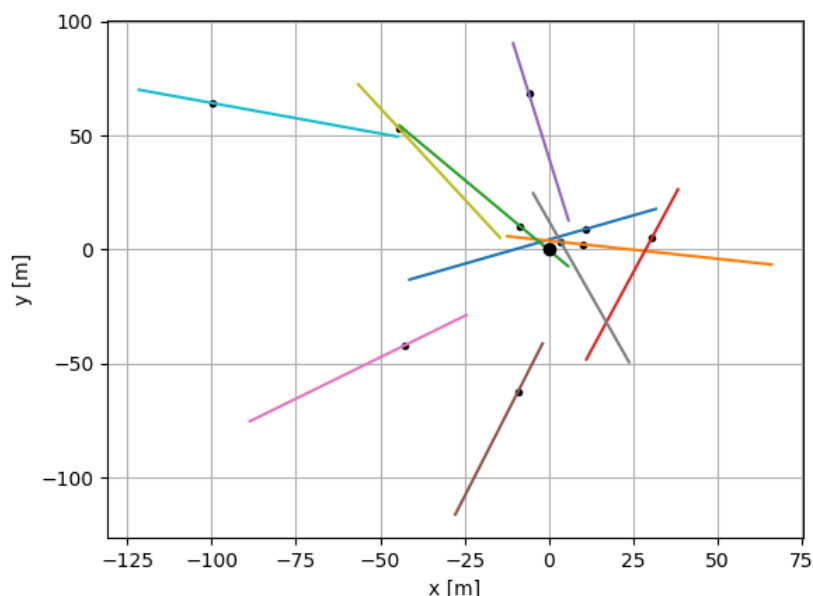


Figura 3-4: Esempi di posizione di atterraggio di pale eoliche

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.

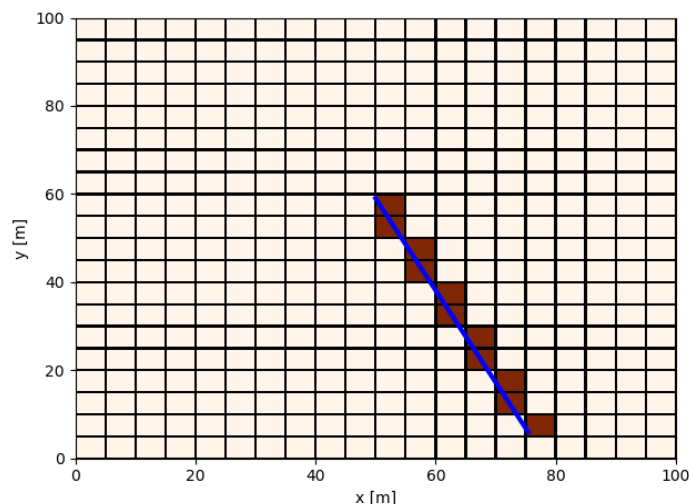


Figura 3-5: Ricostruzione della pala eolica sulla griglia di calcolo per il calcolo di probabilità

3.2 DATI DI BASE

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

Tabella 3.1: Dati geometrici dell'aerogeneratore Siemens Gamesa SG 6.6-155

V136 – 4.2 MW	
Altezza massima tipo	200 m
Lunghezza pale	76 m
Lunghezza max corda	4.5 m
Lunghezza corda al 90% della pala	1.2 m
Profilo aerodinamico ipotizzato	Profilo NACA0012
Massa della pala	23 t

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. 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. Per ogni direzione di vento le frequenze associate alle diverse velocità di vento sono rappresentate con una distribuzione di Weibull, mante Un esempio della curva di Weibull identificata per la direzione

Nord è riportato nella medesima figura. In Figura 3-7 sono riportati i dati di vento per direzione; si specifica che i dati per velocità maggiori di 13 m/s non sono reperibili.

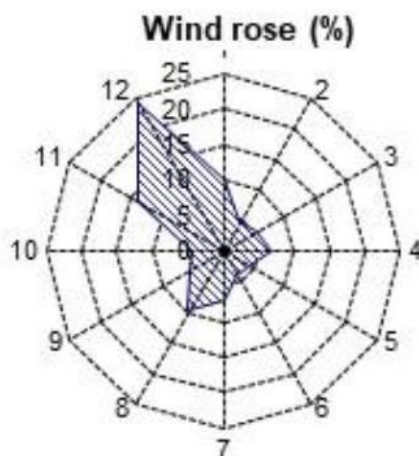


Figura 3-6: Rosa dei venti

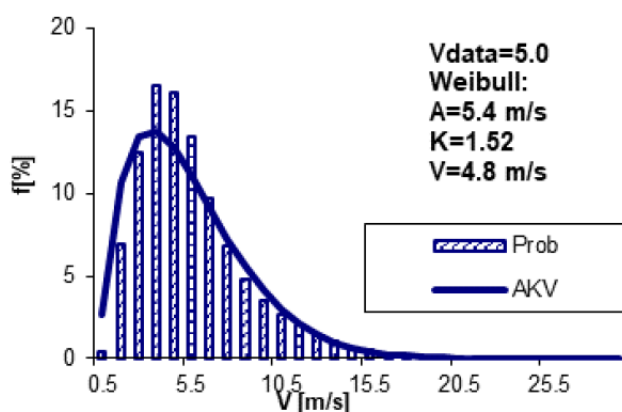


Figura 3-7 Distribuzione di Weibull per velocità

3.4 CONDIZIONI OPERATIVE

Il rotore presenta velocità di cut-in pari a 3 m/s, e velocità di cut-off pari a 27 m/s. La velocità di rotazione incrementerà all'interno di questo range, ma per essere conservativi, una velocità di rotazione pari a 11.6 rpm è stata considerata.

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 ha verso antiorario. Nelle simulazioni la velocità del vento in corrispondenza dell'hub dell'aerogeneratore è fissata a 15 m/s, pari alla velocità limite rilevata nell'area, usando la direzione di vento prevalente nell'area. 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, e distribuzione delle velocità media

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 perpendicolare alla direzione del vento, 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 .

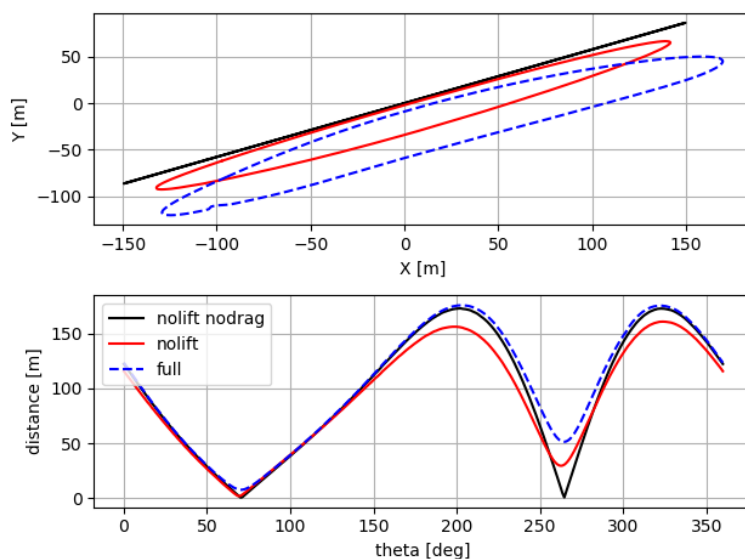


Figura 3-8 Punto di atterraggio del baricentro della pala nel piano xy (sopra) e distanza raggiunta come funzione dell'angolo di distacco θ_0 (sotto).

In Figura 3-9 e Figura 3-10 sono riportate le mappe di probabilità di ricaduta ottenuta considerando 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).

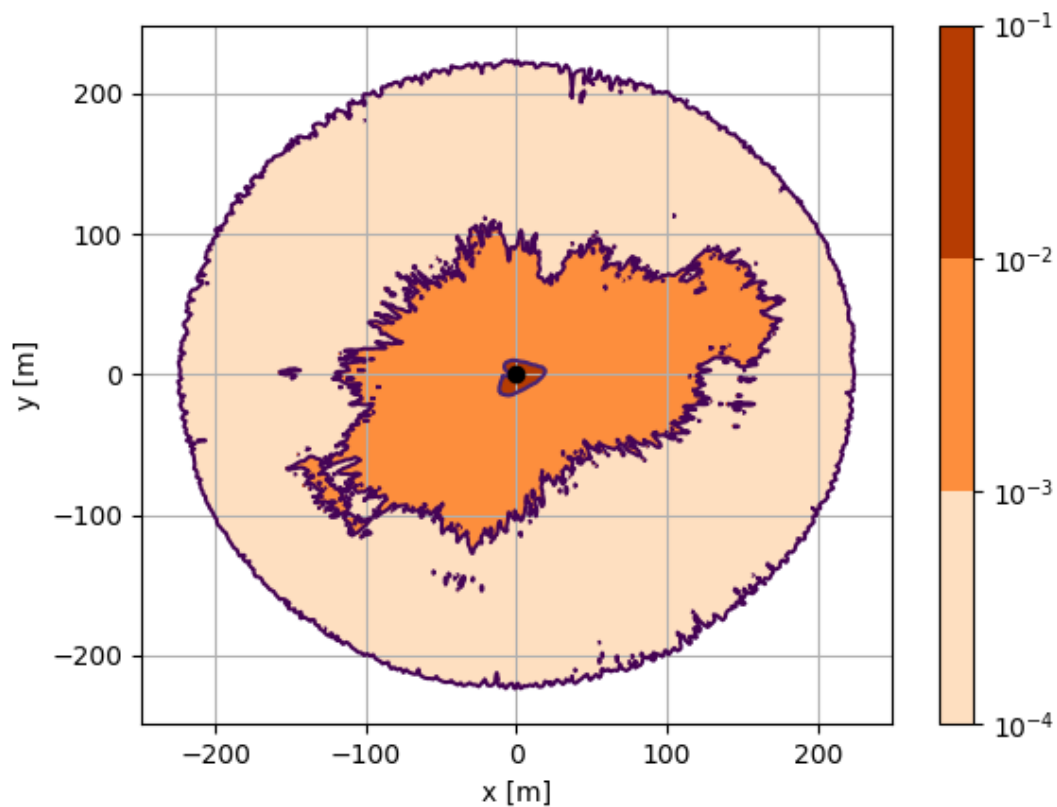


Figura 3-9 Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 100000

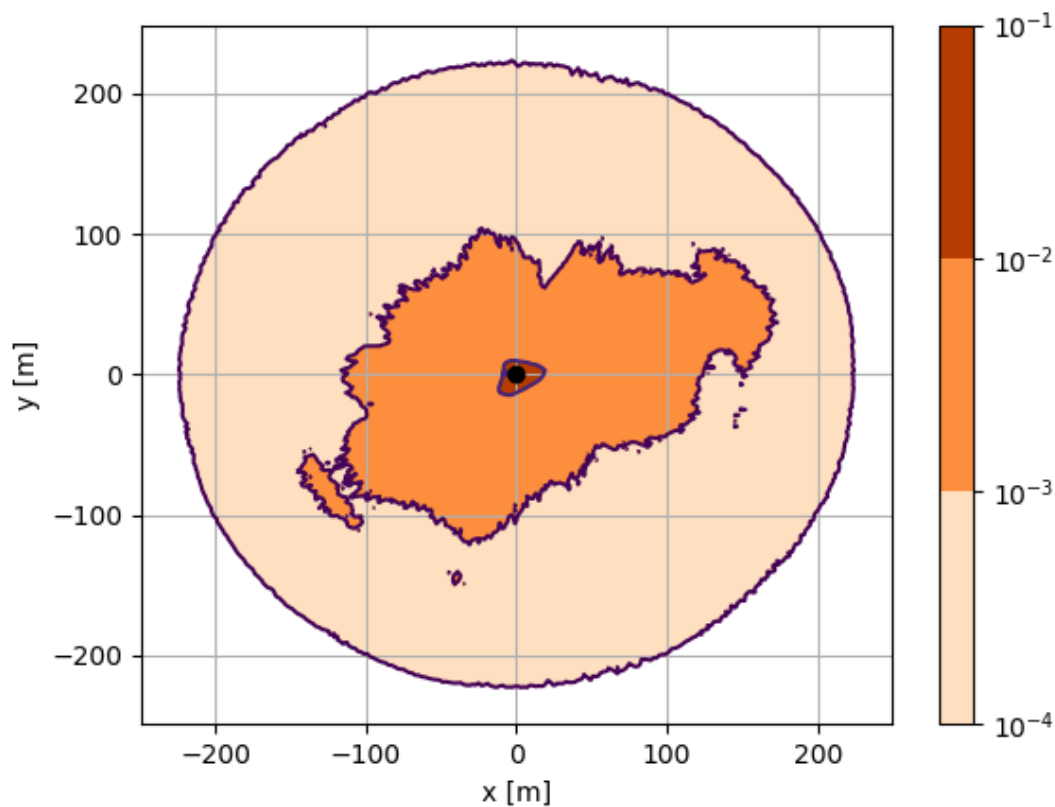


Figura 3-10: Mappa di probabilità di ricaduta. Numero simulazioni: 500000

Il valore massimo della distanza raggiunta dalla pala risulta di 237 m.

Considerando una distanza di 237 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 Siemens Gamesa SG 6.6-155. 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 500000, 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 237 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 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.



RINA Consulting S.p.A. | Società soggetta a direzione e coordinamento amministrativo e finanziario del socio unico RINA S.p.A.
Via Cecchi, 6 - 16129 GENOVA | P. +39 010 31961 | rinaconsulting@rina.org | www.rina.org
C.F./P. IVA/R.I. Genova N. 03476550102 | Cap. Soc. € 20.000.000,00 i.v.