



**Fred Olsen Renewables Italy S.r.l.**

**Progetto di un nuovo Parco Eolico "Energia Sorano"**

**Studio di Impatto Ambientale**

**Allegato E: Relazione di calcolo della gittata massima in caso di rottura accidentale**

**26 luglio 2024**

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## Riferimenti

<b>Titolo</b>	Progetto di un nuovo Parco Eolico "Energia Sorano" – Studio di Impatto Ambientale Allegato E: Relazione di calcolo della gittata massima in caso di rottura accidentale
<b>Cliente</b>	Fred Olsen Renewables Italy S.r.l.
<b>Redatto</b>	Francesca Bruni
<b>Verificato</b>	Lorenzo Magni
<b>Approvato</b>	Omar Retini
<b>Numero di progetto</b>	1669402
<b>Numero di pagine</b>	23
<b>Data</b>	26 luglio 2024


**Ing. OMAR MARCO RETINI**  
ORDINE INGEGNERI della Provincia di PISA  
N° 2234 Sezione A  
INGEGNERE CIVILE E AMBIENTALE  
INDUSTRIALE, DELL'INFORMAZIONE

## Colophon

TAUW Italia S.r.l.  
Galleria Giovan Battista Gerace 14  
56124 Pisa  
T +39 05 05 42 78 0  
E info@tauw.it

Il presente documento è di proprietà del Cliente che ha la possibilità di utilizzarlo unicamente per gli scopi per i quali è stato elaborato, nel rispetto dei diritti legali e della proprietà intellettuale. TAUW Italia detiene il copyright del presente documento. La qualità ed il miglioramento continuo dei prodotti e dei processi sono considerati elementi prioritari da TAUW Italia, che opera mediante un sistema di gestione certificato secondo le norme **UNI EN ISO 9001:2015, UNI EN ISO 14001:2015 e UNI ISO 45001:2018.**



Ai sensi del GDPR n.679/2016 la invitiamo a prendere visione dell'informativa sul Trattamento dei Dati Personali su [www.TAUW.it](http://www.TAUW.it).

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## Indice

1	Introduzione.....	4
2	Ubicazione nuovi aerogeneratori e relativa descrizione.....	5
2.1	Ubicazione degli aerogeneratori in progetto .....	5
2.2	Descrizione aerogeneratori .....	7
3	Normativa .....	9
4	Rischio di incidente letale dovuto alla rottura accidentale di un elemento rotante .....	10
5	Modello di calcolo della gittata.....	12
5.1	Premessa .....	12
5.2	Descrizione del modello numerico .....	12
5.3	Definizione dei dati del modello .....	17
6	Calcolo della gittata massima per il caso in esame.....	18
6.1	Risultati .....	18
7	Localizzazione dei potenziali recettori.....	22
8	Conclusioni.....	23

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## 1 Introduzione

Lo scopo del presente studio è quello di calcolare, nel caso di distacco accidentale durante l'esercizio, la gittata massima degli elementi rotanti (pale eoliche) degli aerogeneratori che verranno installati nell'ambito del progetto per la realizzazione del nuovo parco eolico denominato "Energia Sorano", che la Società Fred Olsen Renewables Italy S.r.l. intende realizzare nel Comune di Sorano (GR) in Regione Toscana.

Il progetto del presente studio prevede la realizzazione dell'impianto eolico con 8 nuovi aerogeneratori (o turbine eoliche denominate "WTG" o "T") della potenza nominale di 6,2 MW ciascuno con relativa viabilità di accesso interna (la viabilità di accesso interna sarà in parte di nuova realizzazione ed in parte saranno adeguate strade esistenti), piazzole per lo stoccaggio dei componenti e per il loro montaggio durante la fase di cantiere, aree temporanee di cantiere esterne dotate di parcheggi e uffici per il personale e zone di stoccaggio per elementi minori. Durante l'esercizio dell'impianto, verranno effettuate regolazioni di potenza sugli aerogeneratori tali da ridurre il valore al di sotto di quello nominale.

Pertanto, tali regolazioni consentiranno di avere una potenza complessiva massima dell'impianto di 43,4MW.

La valutazione è stata effettuata attraverso l'implementazione di un software scritto con linguaggio di programmazione Python.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## 2 Ubicazione nuovi aerogeneratori e relativa descrizione

### 2.1 Ubicazione degli aerogeneratori in progetto

Il Parco Eolico “Energia Sorano” sarà realizzato nella parte più orientale della Regione Toscana, al confine con il Lazio, nel comune di Sorano (GR).

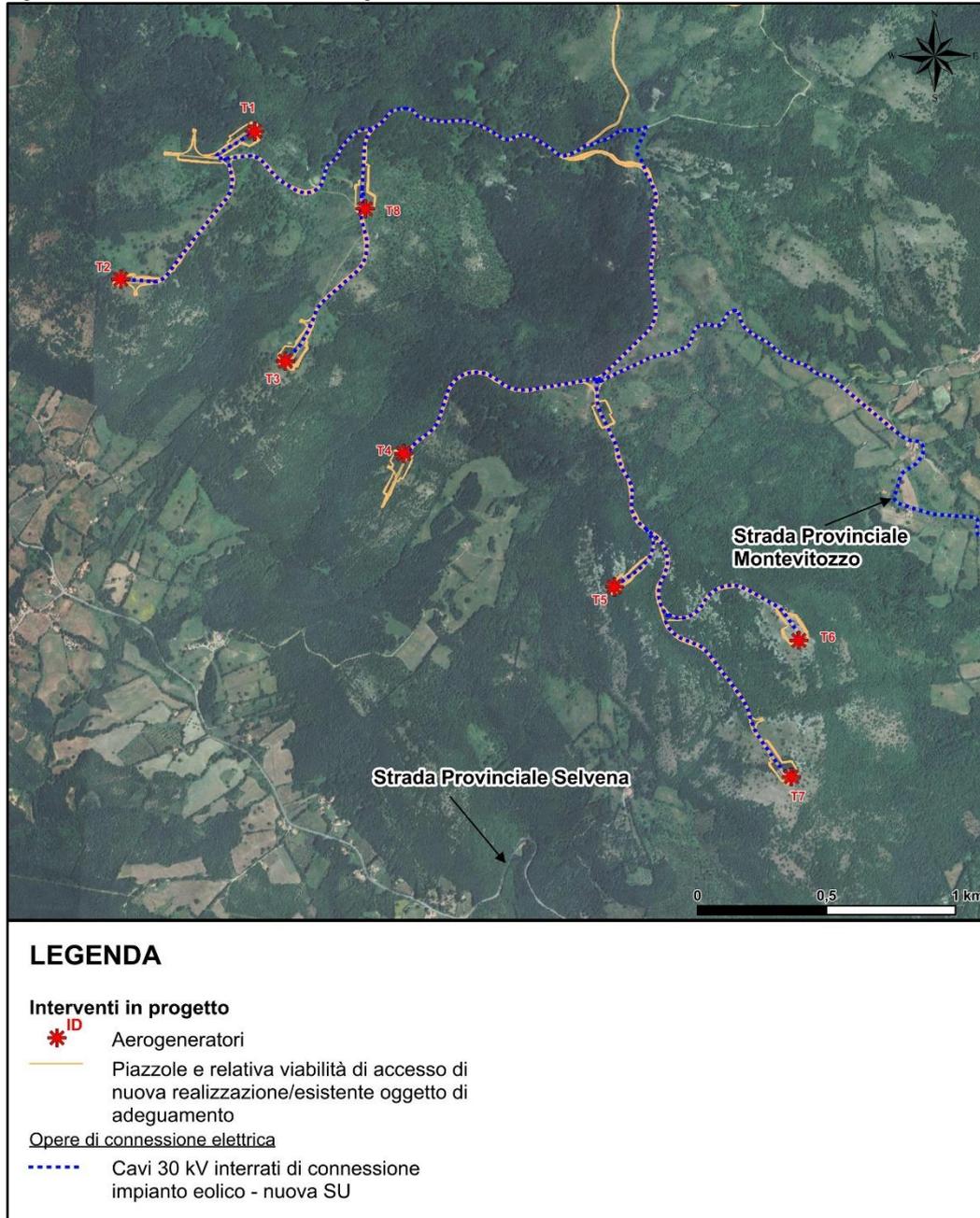
L’area interessata dall’Impianto eolico è di tipo collinare, risulta lontana da centri abitati ed è posta a quote comprese fra 700 m e 950 m s.l.m..

I centri abitati più prossimi all’Impianto eolico sono Elmo (frazione del comune di Sorano), posto a circa 800 m in direzione sud rispetto agli aerogeneratori in progetto, Montevitozzo (frazione del comune di Sorano), ubicato a circa 3 km in direzione est rispetto agli aerogeneratori in progetto, Castell’Azzara localizzato a circa 4,5 km in direzione nord-est rispetto agli aerogeneratori in progetto e Selvena (frazione del comune di Castell’Azzara), distante circa 3,5 km in direzione nord rispetto agli aerogeneratori in progetto.

Nella seguente Figura 2.1a si riporta l’ubicazione degli aerogeneratori su immagine satellitare.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Figura 2.1a Localizzazione aerogeneratori



Di seguito si riportano le coordinate, nel sistema di riferimento UTM WGS 84 fuso 32T, degli 8 nuovi aerogeneratori in progetto e l'indicazione del comune in cui saranno installati.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

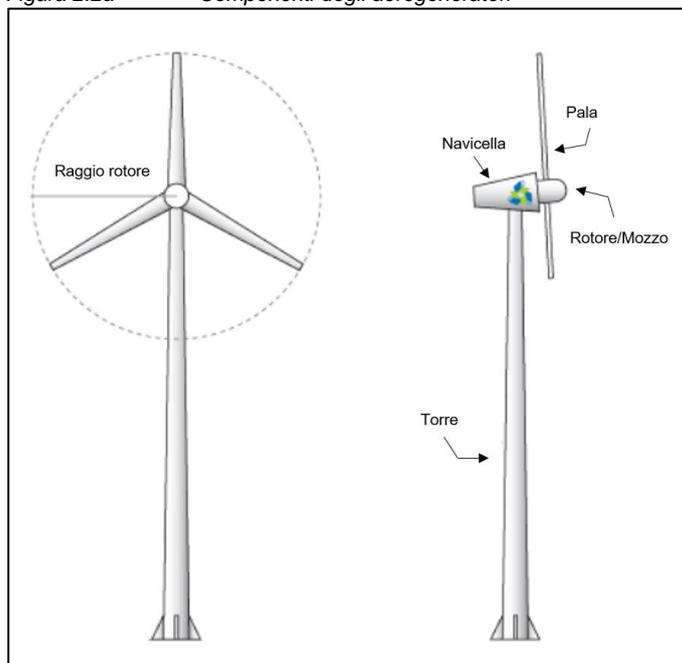
Tabella 2.1a Localizzazione dei nuovi aerogeneratori in progetto

ID	Comune	Coordinate UTM 32T - WGS84	
		E [m]	N [m]
WTG1	Sorano	718415	4735044
WTG2	Sorano	717939	4734432
WTG3	Sorano	718598	4734158
WTG4	Sorano	719081	4733830
WTG5	Sorano	719932	4733368
WTG6	Sorano	720661	4733211
WTG7	Sorano	720669	4732676
WTG8	Sorano	718865	4734774

## 2.2 Descrizione aerogeneratori

Al fine di calcolare la gittata massima è opportuno definire la geometria degli aerogeneratori. Come illustrato nella Figura 2.2a, gli aerogeneratori sono caratterizzati essenzialmente da una torre, una navicella e un rotore/mozzo al quale sono collegate 3 pale.

Figura 2.2a Componenti degli aerogeneratori



I modelli di turbina individuati nel progetto sono aerogeneratori con potenza nominale pari a 6,2 MW ciascuno.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

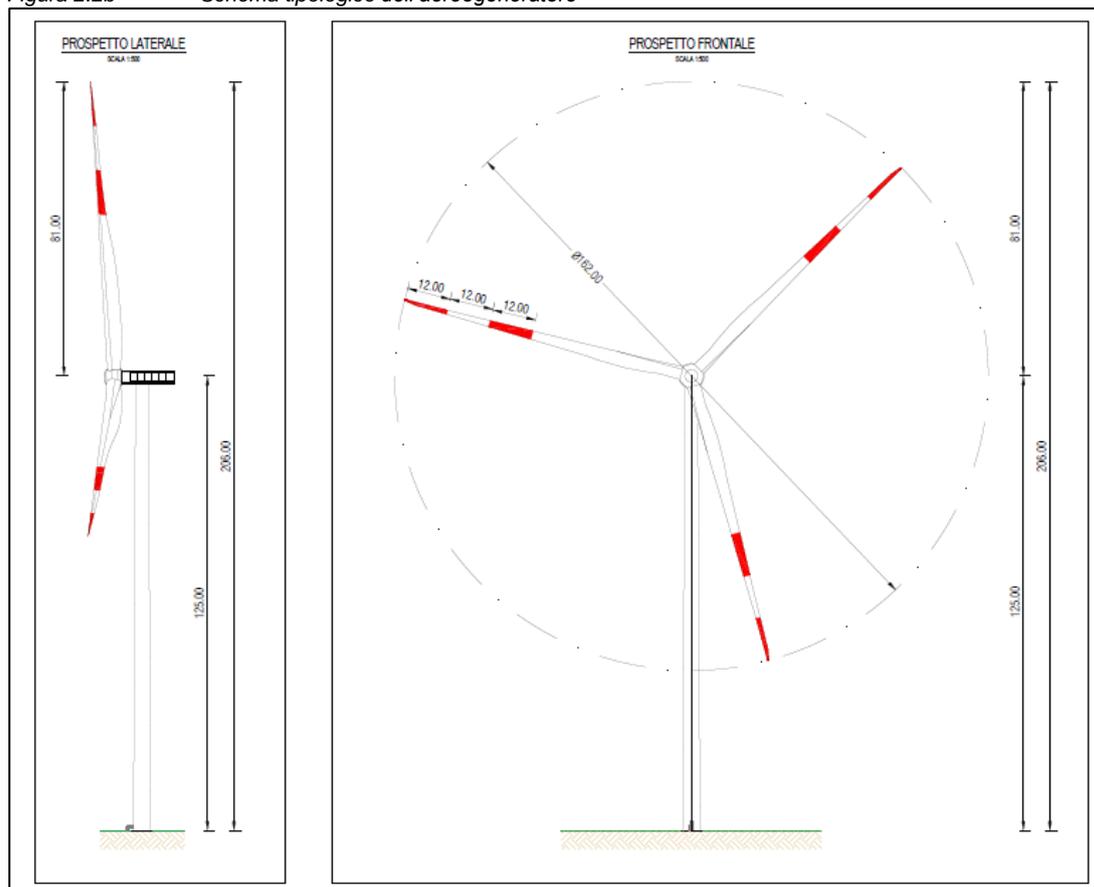
Nella seguente Tabella 2.2a sono riportate le caratteristiche tecniche degli aerogeneratori considerati nell'analisi oggetto del presente studio (dati riferiti ad un aerogeneratore). La tipologia di aerogeneratore sarà definita in fase di gara sulla base delle tecnologie disponibili al momento. Infatti, la tipologia e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati nella fase di procurement e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Tabella 2.2a Caratteristiche tecniche degli aerogeneratori in progetto

Grandezza	Valore	U.d.m.
Altezza mozzo max dal suolo	125	m
Velocità massima del rotore	10	rpm
Lunghezza delle pale	81	m

Nella Figura 2.2b si riporta uno schema tipologico dell'aerogeneratore.

Figura 2.2b Schema tipologico dell'aerogeneratore



Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

### 3 Normativa

Attualmente nel nostro paese non sono state emanate specifiche norme o linee guida che regolamentino il valore della gittata massima da rispettare al fine di progettare e installare degli aerogeneratori nel territorio nazionale perché non si abbiano impatti sulla salute umana.

L'unica normativa emanata in merito è costituita dal D.M. n.219 del 10/09/2010 *“Linee Guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili”* che, nell'Allegato 4 al §7.1, relativo agli incidenti, prevede di *“prendere in esame l'idoneità delle caratteristiche delle macchine, in relazione alle condizioni meteorologiche estreme del sito. In tal senso: [...] - andrebbe valutata la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale [...]”*.

## **4 Rischio di incidente letale dovuto alla rottura accidentale di un elemento rotante**

La rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore è un evento raro, pertanto, esistono pochi casi in letteratura che possano stimare l'entità del rischio derivante da tale incidente.

Per stimare il rischio dell'evento accidentale del presente studio è stato considerato lo studio del 2005 della University of California, Berkeley "*Analysis of potential safety risks of the EcogenPrattsburgh-Italy wind farm project*" che presenta una valutazione preliminare dei rischi potenziali ambientali e sociali connessi ad eventi di rottura degli aerogeneratori previsti nel progetto di un parco eolico in località Prattsburgh-Italy (New York), quantificando tali rischi e confrontandoli con altre categorie di rischi comuni.

Nello studio si affronta un caso base e si conclude che un essere vivente, posizionato a 100 m da un aerogeneratore, con permanenza continuativa per l'intero periodo di un anno, ha una probabilità di 1:1.000.000 di avere un impatto letale con un elemento rotante che si distacchi da un aerogeneratore. A titolo di esempio si riporta in tabella seguente, la comparazione tra l'evento descritto e le probabilità di incidente letale, rapportate alla durata annuale, di altri possibili eventi.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Tabella 4a *Rischi annuali di morte per categorie di attività – Fonte: University of California, Berkeley*

Causa	Rischio di incidente letale / Anno	Rischio di incidente letale / Anno
<b>Aerogeneratore</b>	1 su 1 milione	$1 \times 10^{-6}$
Influenza	1 su 5,000	$2 \times 10^{-4}$
Leucemia	1 su 12,500	$8 \times 10^{-5}$
Bicicletta (Stati Uniti)	1 su 333,000	$3 \times 10^{-6}$
Incidente stradale (Stati Uniti)	1 su 6,250	$1.6 \times 10^{-4}$
Colpito da un'automobile (Stati Uniti)	1 su 20,000	$5 \times 10^{-5}$
Investimento (Stati Uniti)	1 su 250,000	$4 \times 10^{-6}$
Alluvione (Stati Uniti)	1 su 455,000	$2 \times 10^{-6}$
Tornado (Stati Uniti Centro-Occidentali)	1 su 455,000	$2 \times 10^{-6}$
Terremoto (California)	1 su 588,000	$2 \times 10^{-6}$
Fulminazione (Regno Unito)	1 su 10 milioni	$1 \times 10^{-7}$
Meteorite	1 su 10 miliardi	$1 \times 10^{-10}$

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## 5 Modello di calcolo della gittata

### 5.1 Premessa

La rottura accidentale di un elemento rotante (pala eolica) di un aerogeneratore può essere considerata, come detto nel §4, un evento raro. Tuttavia, il calcolo della gittata massima di una pala è un fattore importante da analizzare sia ai fini della progettazione sia per la localizzazione dell'impianto eolico.

La rottura, seppure con bassissima probabilità, potrebbe avvenire in corrispondenza del punto di discontinuità corrispondente al giunto di collegamento tra mozzo e pala, causato da precedenti danneggiamenti o da fenomeni di fatica.

Lo studio in oggetto ha lo scopo di analizzare, nell'eventualità che si verifichi il distacco di una pala, il moto di caduta da essa percorso.

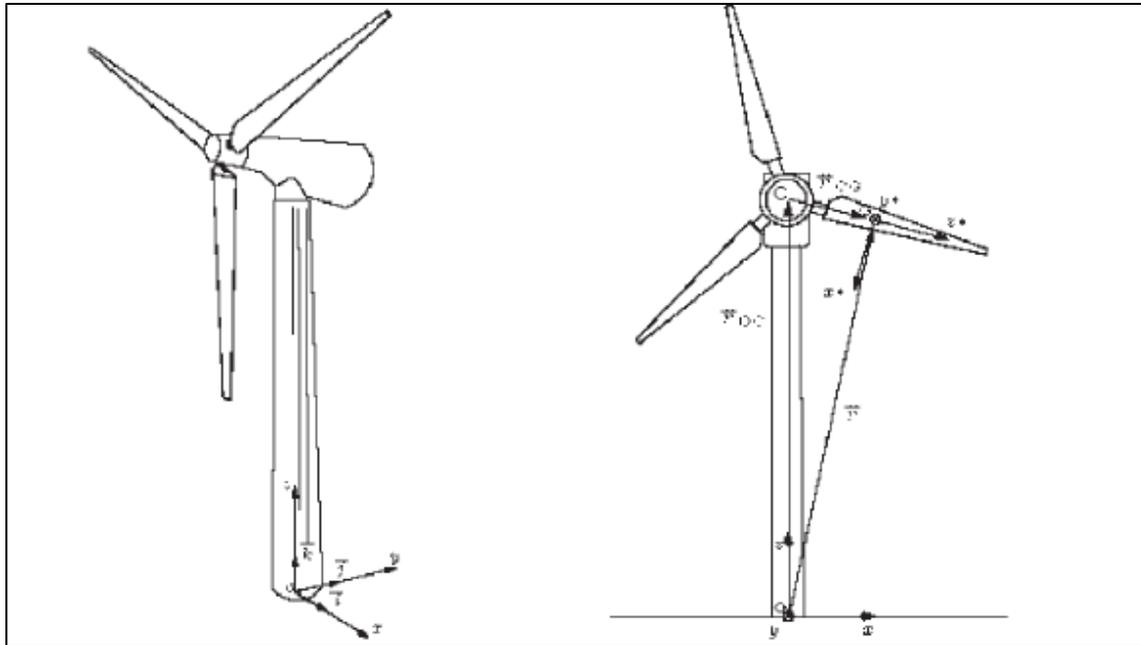
### 5.2 Descrizione del modello numerico

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 "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 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 b1, b2 e b3. Figura 5.2a indica i sistemi di riferimento adottati per lo studio.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Figura 5.2a 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:

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

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.

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

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

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

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

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

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

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

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

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

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

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):

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

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

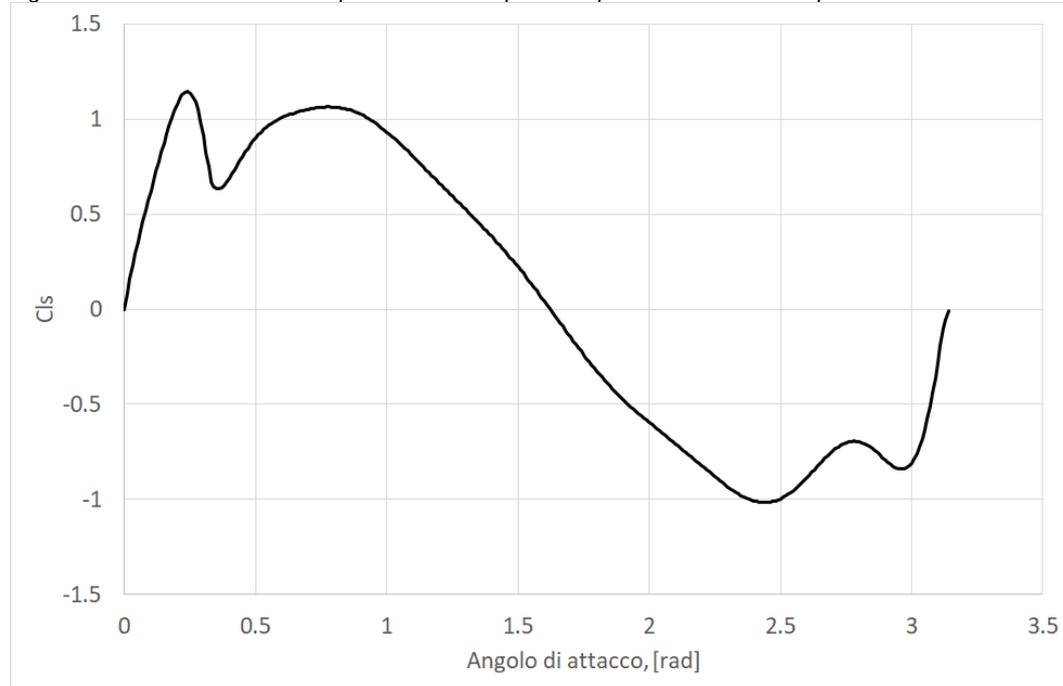
Il lag tra stallo dinamico e statico è calcolato con la seguente equazione:

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

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

Lo stallo statico è calcolato in funzione di un coefficiente ( $CL_s$ ) che è calcolato in funzione dell'angolo di attacco come indicato nel grafico di Figura 5.2b. 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 5.2b 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)  $\rho$ ,  $L$ ,  $C$  denotano rispettivamente la densità dell'aria, lunghezza della pala e della corda. La resistenza aerea viene calcolata con l'equazione (21) riportata di seguito:

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

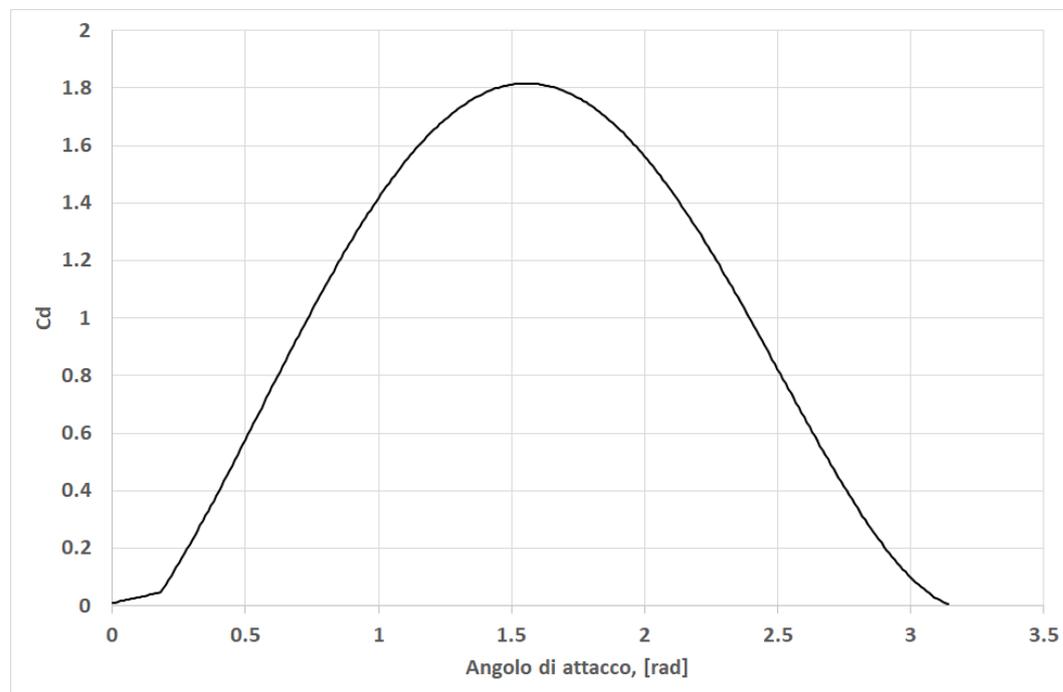
Il coefficiente aerodinamico di resistenza è calcolato in funzione dell'angolo di attacco usando la funzione indicata nel grafico di Figura 5.2c. Una volta calcolate le forze aerodinamiche, le forze agenti sul corpo nel sistema inerziale (lungo gli assi X e Y) derivano di conseguenza:

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

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

L'equazione (22) indica come alle forze aereeodinamiche 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 aereeodinamiche e si calcola come indicato nell'equazione (23).

Figura 5.2c 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:

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

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

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

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

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

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

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

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++.

A corredo è stato sviluppato un codice python per la fase di generazione degli input e per l'analisi dei risultati.

### 5.3 Definizione dei dati del modello

Il modello numerico necessita dei seguenti dati di input:

- Dati geometrici pala eolica [m];
- Massa della pala eolica [kg];
- Velocità del vento [m/s];
- Altezza hub [m];
- Velocità di rotazione [rpm].

In sintesi, sono riportati di seguito i dati di input:

Tabella 5.3a *Dati di input per l'analisi di gittata*

Altezza hub [m]	125
Diametro rotore [m]	162
Massa pala [Kg]	24799
rpm max	10

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Per quanto riguarda la velocità del vento considerata si fa riferimento a quanto riportato nella relazione anemologica “Indicative Wind Resource Assessment” emesso da Fred. Olsen Renewables Italy S.R.L.”, in particolare si fa riferimento alla tabella seguente.

Tabella 5.3b Velocità medie del vento a 100m e a 125 m dal pc relative alle postazioni delle diverse turbine.

Turbine ID	100 m wind speed	125 m wind speed
T1	7.0	7.1
T2	6.7	6.9
T3	6.1	6.3
T4	6.0	6.3
T5	7.4	7.5
T6	7.3	7.4
T7	7.5	7.5

Pertanto, per il presente studio, sono state considerate due velocità del vento: quella massima di cutoff prevista dal modello di aerogeneratore (24 m/s) e quella riportata nel report come massima velocità media della zona (7.5 m/s).

## 6 Calcolo della gittata massima per il caso in esame

### 6.1 Risultati

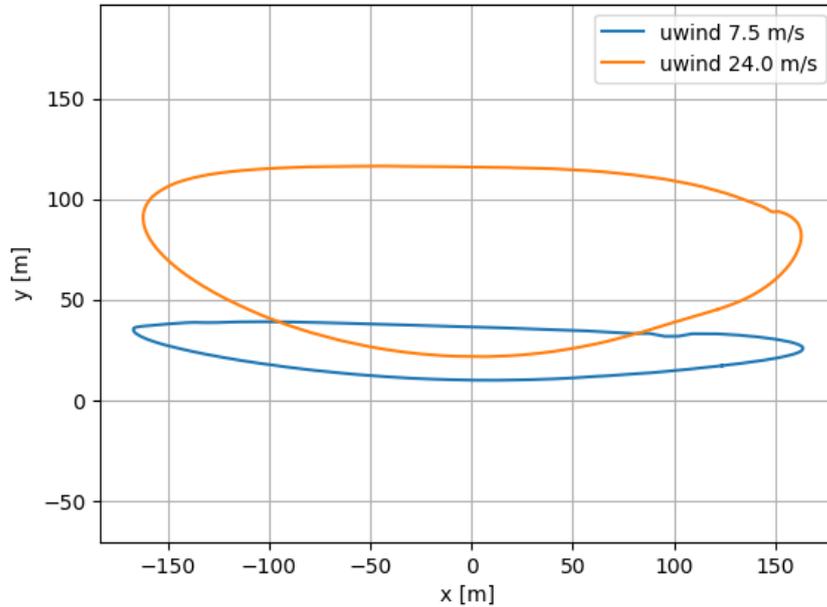
Sulla base delle caratteristiche degli aerogeneratori in progetto e di quanto descritto nel §5, è stato simulato il caso di studio tramite l'applicazione del software implementato in Python considerando i dati di input relativi ad aerogeneratori tipo considerati ai fini dello sviluppo del progetto riportati nella Tabella 5.3b.

Il vento è modellato come un profilo di legge di potenza usando il valore di 24 m/s o di 7.5 m/s misurato all'altezza dell'hub e l'esponente alpha uguale a 0,143. La pala può staccarsi in un qualsiasi momento della sua rotazione; quindi, sono state effettuate varie simulazioni campionando l'angolo theta in cui avviene la rottura.

Figura 6.1a mostra i punti di atterraggio del baricentro della pala in funzione dell'angolo theta di rottura per le due velocità di vento considerate.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Figura 6.1a Punti di atterraggio (baricentro) per diversi valori dell'angolo di rilascio theta per le due velocità di vento



Ipotizzando che il baricentro della pala si trovi ad un terzo della sua lunghezza, la gittata massima può essere calcolata sommando alla distanza del baricentro i 2/3 della lunghezza della pala.

Figura 6.1b mostra la gittata in funzione dell'angolo di rilascio theta, mentre la gittata massima è riportata nella tabella seguente.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Figura 6.1b Distanza massima raggiungibile dall'estremità della pala per due velocità del vento

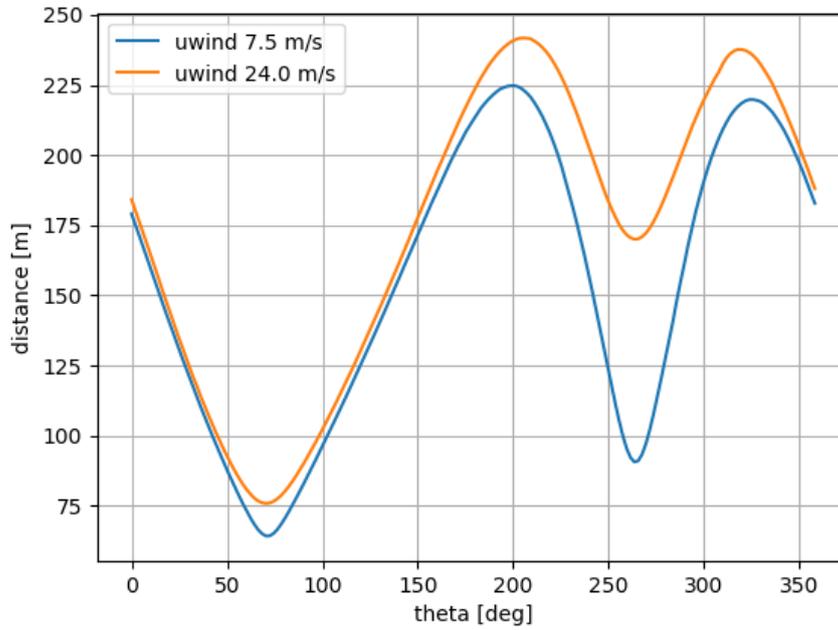


Tabella 6.1a Gittata massima per le due velocità di vento considerate

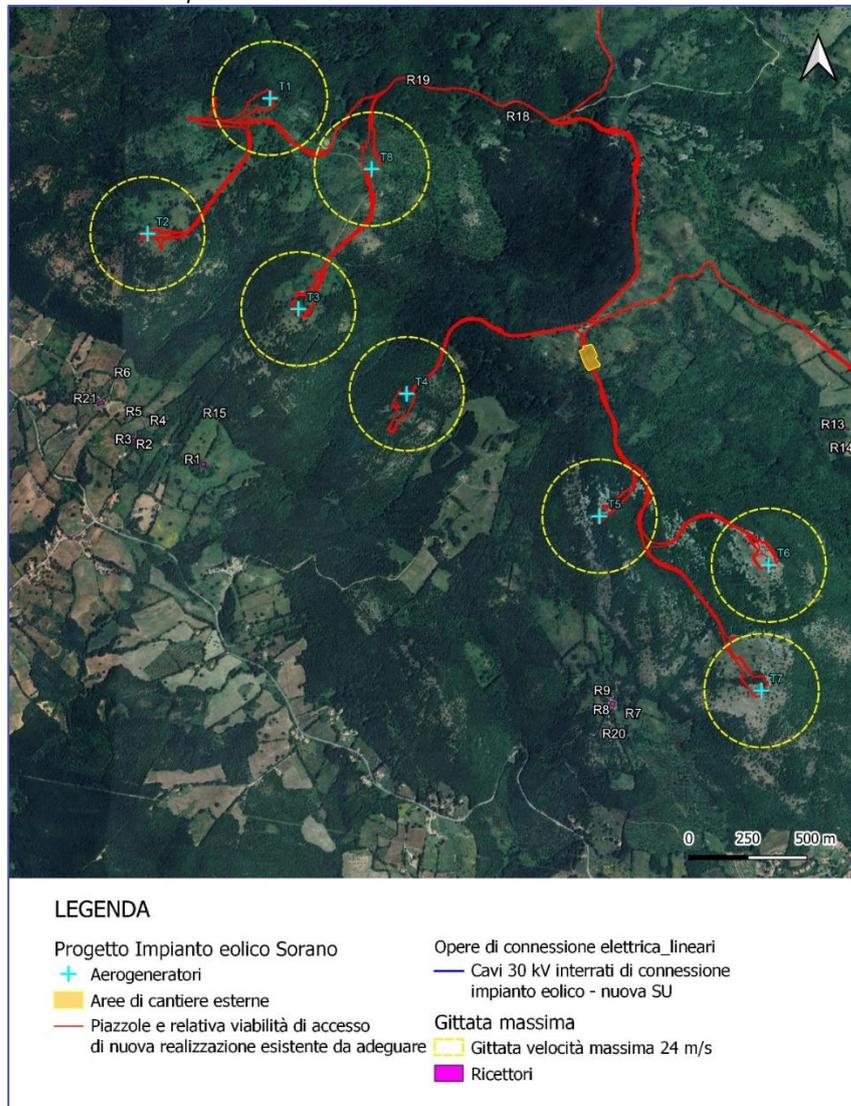
Velocità vento [m/s]	Gittata max [m]
7.5	225
24	242

Nella Figura 6.1c seguente è riportata la rappresentazione della massima ampiezza delle aree potenzialmente interessate da ricaduta in caso di rottura degli organi rotanti; la figura rappresenta anche la localizzazione dei potenziali ricettori.

Le aree circolari attorno agli aerogeneratori si riferiscono alla massima velocità di progetto pari a 24 m/s e hanno raggio di 242 m.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

Figura 6.1c Rappresentazione su foto aerea della gittata massima in caso di rottura e dei ricettori presenti nelle vicinanze del parco eolico.



Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## 7 Localizzazione dei potenziali recettori

Sulla base dei calcoli riportati al §6, la distanza massima raggiungibile dagli elementi rotanti, in caso di distacco accidentale dagli aerogeneratori in progetto nelle condizioni ambientali considerate, è risultata pari a 225 m nel caso di considerazione della velocità di vento media della zona di Sorano e 242 m nel caso di considerazione della velocità massima per il funzionamento del generatore.

Allo scopo di valutare l'eventuale impatto indotto dal distacco accidentale di una pala da un aerogeneratore dell'impianto eolico in progetto, sono stati individuati i recettori presenti entro l'area di indagine della gittata massima, definita, per ogni singolo aerogeneratore, come superficie circolare centrata sulla torre di raggio pari alla massima gittata massima calcolata, cioè 242 m. In Figura 6.1c è riportata l'area di indagine della gittata massima per ciascun aerogeneratore in progetto.

Come si nota dall'analisi della figura, all'interno dell'area della gittata massima per ogni aerogeneratore non è presente alcun ricettore.

Inoltre si nota che non sono state individuate strade (ad eccezione di porzioni di quelle di accesso agli aerogeneratori in progetto) all'interno dell'area della gittata massima.

Ns rif. 1669402\_SOR\_075 – All.E

## 8 Conclusioni

Nel presente studio è stata calcolata la gittata massima, a seguito del distacco accidentale durante l'esercizio, degli elementi rotanti (pale eoliche) degli aerogeneratori che verranno installati nell'ambito del progetto per la realizzazione del nuovo parco eolico denominato "Energia Sorano", che la Società Fred Olsen Renewables Italy S.r.l. intende realizzare nel Comune di Sorano (GR) in Regione Toscana.

Il valore della gittata massima ottenuto è pari a 242,0 m.

Dal momento che:

- come riportato nella Tabella 4a, il rischio di incidente letale legato all'accidentale rottura della pala è molto basso in rapporto ad altri possibili eventi letali;
- le ipotesi di calcolo, esplicitate nel §5 sono a favore di sicurezza e generano un risultato conservativo rispetto al caso reale;
- non sono state individuate strade (ad eccezione di porzioni di quelle di accesso agli aerogeneratori in progetto) all'interno dell'area della gittata massima dell'elemento rotante dell'aerogeneratore;
- non sono stati individuati ricettori all'interno dell'area della gittata massima dell'elemento rotante degli aerogeneratori,

si può concludere che, sulla base dell'analisi condotta, il rischio di incidente legato al distacco dell'elemento rotante di un aerogeneratore in progetto risulta trascurabile.