

TITOLARE DEL DOCUMENTO:

AREN Green S.r.l.

Società soggetta alla direzione e coordinamento di AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale e amministrativa, Via dell'Arrigoni n. 308 | 47522 Cesena (FC) Ph. +39 0547 415245

Iscritta nel Registro delle Imprese della Romagna – Forlì, Cesena e Rimini | REA 326908 | C.F. / P. Iva 04032170401

COMUNI DI ASCOLI SATRIANO, CASTELLUCCIO DEI SAURI E
DELICETO (FG)
LOCALITÀ “CONCA D’ORO”

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **“CONCA D’ORO”**

REDAZIONE / PROGETTISTA:



AREN Electric Power S.p.A.
Società per Azioni con Unico Socio
Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC)
Ph. +39 0547 415245 - Fax +39 0547 415274
Web: www.aren-ep.com

TIMBRO E FIRMA PROGETTISTA:

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

CODICE ELABORATO:

CDODT_GENR03000_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |
|------|-----------------|------------|----------|--------------|-----------|
| 00 | Prima emissione | 11/03/2024 | P. Amati | F. Piccinini | L. Masini |
| 01 | | | | | |
| 02 | | | | | |
| 03 | | | | | |
| 04 | | | | | |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 1 di 14 |

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Introduzione | 2 |
| 2 | Ipotesi di calcolo | 2 |
| 3 | Calcolo della legge del moto..... | 3 |
| 4 | Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo..... | 5 |
| 4.1 | Schema di calcolo..... | 5 |
| 4.2 | Calcolo del baricentro | 5 |
| 4.3 | Calcolo della velocità periferica | 5 |
| 4.4 | Calcolo di H_g | 6 |
| 4.5 | Calcolo della gittata..... | 6 |
| 5 | Calcolo della gittata nel caso di rottura di un frammento pari a 5 metri..... | 9 |
| 5.1 | Schema di calcolo..... | 9 |
| 5.2 | Calcolo del baricentro | 9 |
| 5.3 | Calcolo della velocità periferica | 9 |
| 5.4 | Calcolo di H_g | 10 |
| 5.5 | Calcolo della gittata..... | 10 |
| 6 | Applicazione dello studio al progetto in esame..... | 13 |
| 7 | Conclusioni..... | 14 |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 2 di 14 |

1 Introduzione

Il progetto in oggetto consiste nella realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, da ubicarsi nei Comuni di Ascoli Satriano, Deliceto e Castelluccio dei Sauri, in Provincia di Foggia, proposto dalla società AREN Green Srl.

L’impianto è costituito da n. 8 aerogeneratori (modello Vestas diametro 150 altezza hub 105 m) localizzati in località Conca d’Oro, di potenza unitaria 6 MW, per una potenza complessiva dell’impianto di 48 MW.

L’intero impianto, pertanto, comprese le opere di connessione, è ubicato all’interno dei Comuni di Ascoli Satriano, Castelluccio dei Sauri e Deliceto.

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del modello Vestas, diametro 150 m, altezza hub 105 m e potenza 6 MW, in caso di rottura; tale calcolo è stato eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone. Nel calcolo si ipotizza il distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Lo studio riporta inoltre il calcolo della gittata nelle seguenti ipotesi:

- Rottura dell’intera pala;
- Rottura del frammento di pala (lunghezza 5 m).

Con riferimento al distacco del frammento e all’angolo di maggiore gittata, si riportano i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore ottenuto.

2 Ipotesi di calcolo

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose e consentono di giungere a risultati cautelativi; si vuole precisare, inoltre, che le probabilità di accadimento di rotture per aerogeneratori industriali di grande taglia sono molto basse.

Il calcolo della gittata massima è stato effettuato considerando una riduzione massima della velocità periferica del 30%, senza ridurre la velocità angolare.

Per il calcolo si effettuano le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- si è considerata la riduzione della velocità periferica pari al 30% per tener conto degli effetti della resistenza dovuta al mezzo in cui si svolge il moto (aria) e per considerare le forze di resistenza che si generano al momento di rottura della pala;
- il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell’angolo θ ;
- la velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo (Figura 2) sono i seguenti:

- Altezza della torre $H = 105$ m
- Diametro del rotore $D = 150$ m
- Lunghezza della pala $R = 73,65$ m
- Altezza massima dell’aerogeneratore $H+R = 178,65$ m

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 3 di 14 |

- Velocità di rotazione $V = 12,6$ giri/min.

3 Calcolo della legge del moto

Nel presente paragrafo viene descritta la relazione del moto utilizzata per il calcolo della gittata.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico.

Si precisa che la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile. Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono: tale premessa è utile per ritenere non trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (l'aria).

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = M a_g$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa della pala, il momento della forza peso è nullo, (avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti). Pertanto la seconda equazione rivela che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema si ottiene risolvendo allora la prima equazione. Questa dimostra che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme, pertanto compirà il caratteristico moto parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si è utilizzato un sistema di riferimento cartesiano xy in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è lanciato.

Si è scelto un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x_0, y_0), con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

dove $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

Si rappresenta la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di ϑ come in Figura 1:

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 4 di 14 |

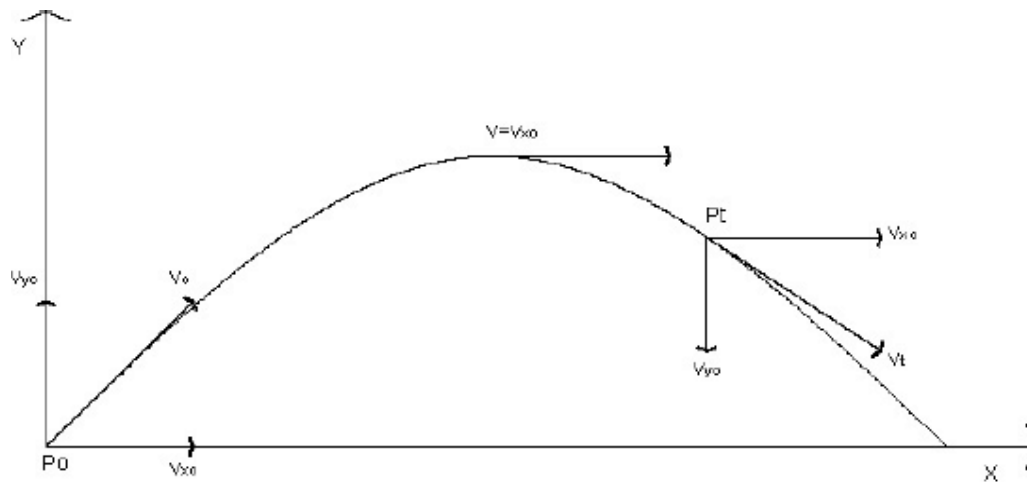


Figura 1: Traiettoria di un grave in caduta

La legge del moto, soluzione delle equazioni indicate in precedenza, è:

$$x(t) = x_0 + v_x \cdot t$$

$$y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

dove (x_0, y_0) è la posizione iniziale del punto materiale e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercutta il suolo al tempo T tale che $y(T) = 0$.

Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot y_0 \cdot g}$$

da cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo ϑ e dalla velocità tangenziale V della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle seguenti relazioni:

$$x_0 = -R \cdot \cos \vartheta$$

$$y_0 = H + R \cdot \sin \vartheta$$

$$v_x = V \cdot \sin \vartheta$$

$$v_y = V \cdot \cos \vartheta$$

Dalla legge del moto otteniamo la gittata: $G = x(t)$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata G in funzione di V e di ϑ :

$$G_{max} = \frac{V_g \cdot \sin \vartheta}{g} \left[V_g \cdot \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cdot \cos^2 \vartheta + 2 \cdot (H + R_g \cdot \sin \vartheta) \cdot g} \right] - R_g \cdot \cos \vartheta$$

Si noti che, fissato un generico angolo ϑ , la gittata aumenta quadraticamente con V , salvo i casi particolari:

$\vartheta = \pm 90^\circ; 0^\circ; 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari ad R .

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDOdT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 5 di 14 |

4 Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo

4.1 Schema di calcolo

Lo schema adottato per il calcolo della gittata è il seguente:

R = raggio del baricentro

V = velocità periferica del baricentro

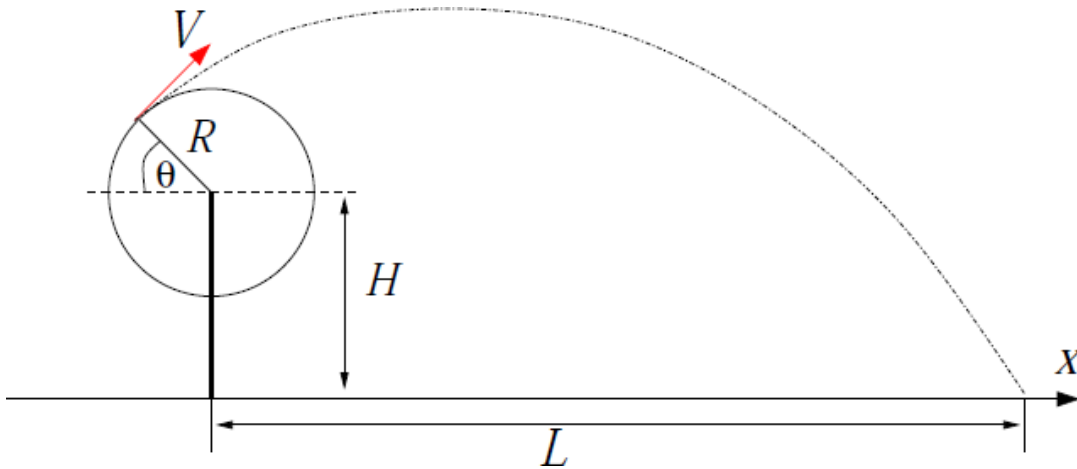


Figura 2: Schema adottato per il calcolo della gittata

Prima di effettuare il calcolo della gittata sono stati calcolati i seguenti parametri.

4.2 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si può ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala.

$$R_g = \frac{1}{3} \cdot L = 24,55 \text{ m}$$

per l'aerogeneratore di progetto (essendo $L = 73,65 \text{ m}$).

4.3 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare e tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, ovvero la velocità angolare ω del corpo in movimento. Il dato di partenza è $n = 12,6$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza $2 \cdot \pi \cdot R$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2 \cdot \pi \cdot R \cdot n$

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDOdT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 6 di 14 |

metri/minuto. Questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore pari a 12,6 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot R_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot R_g = 32,39 \frac{m}{s}$$

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30%, per cui il valore reale è 22,7 m/s.

4.4 Calcolo di H_g

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia $R_g = 24,55$ m, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 73,65 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio (H_g) sarà uguale all'altezza del mozzo più il valore della proiezione di R_g sulla verticale ossia:

$$H_g = H_{hub} + (R_g \cdot \sin \vartheta)$$

dove H_{hub} è l'altezza del mozzo.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

4.5 Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori ottenuti della gittata:

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | H_g | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|-------|-------------------|
| 0 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 105.00 | -24.55 | 49.10 | 24.55 |
| 1 | 0.02 | 0.02 | 1.00 | 105.40 | -21.58 | 49.10 | 27.52 |
| 2 | 0.03 | 0.03 | 1.00 | 105.79 | -18.59 | 49.10 | 30.51 |
| 3 | 0.05 | 0.05 | 1.00 | 106.19 | -15.58 | 49.10 | 33.52 |
| 4 | 0.07 | 0.07 | 1.00 | 106.58 | -12.56 | 49.10 | 36.54 |
| 5 | 0.09 | 0.09 | 1.00 | 106.98 | -9.53 | 49.10 | 39.57 |
| 6 | 0.10 | 0.10 | 0.99 | 107.37 | -6.49 | 49.10 | 42.61 |
| 7 | 0.12 | 0.12 | 0.99 | 107.76 | -3.45 | 49.10 | 45.65 |
| 8 | 0.14 | 0.14 | 0.99 | 108.16 | -0.39 | 49.10 | 48.71 |
| 9 | 0.16 | 0.16 | 0.99 | 108.55 | 2.66 | 49.10 | 51.76 |
| 10 | 0.17 | 0.17 | 0.98 | 108.94 | 5.72 | 49.10 | 54.82 |
| 11 | 0.19 | 0.19 | 0.98 | 109.33 | 8.77 | 49.10 | 57.87 |
| 12 | 0.21 | 0.21 | 0.98 | 109.71 | 11.82 | 49.10 | 60.92 |
| 13 | 0.23 | 0.22 | 0.97 | 110.10 | 14.87 | 49.10 | 63.97 |
| 14 | 0.24 | 0.24 | 0.97 | 110.49 | 17.90 | 49.10 | 67.00 |
| 15 | 0.26 | 0.26 | 0.97 | 110.87 | 20.93 | 49.10 | 70.03 |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDOdT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 7 di 14 |

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | Hg | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|-------|-------------------|
| 16 | 0.28 | 0.28 | 0.96 | 111.25 | 23.94 | 49.10 | 73.04 |
| 17 | 0.30 | 0.29 | 0.96 | 111.63 | 26.94 | 49.10 | 76.04 |
| 18 | 0.31 | 0.31 | 0.95 | 112.01 | 29.93 | 49.10 | 79.03 |
| 19 | 0.33 | 0.33 | 0.95 | 112.38 | 32.89 | 49.10 | 81.99 |
| 20 | 0.35 | 0.34 | 0.94 | 112.76 | 35.84 | 49.10 | 84.94 |
| 21 | 0.37 | 0.36 | 0.93 | 113.13 | 38.76 | 49.10 | 87.86 |
| 22 | 0.38 | 0.37 | 0.93 | 113.49 | 41.66 | 49.10 | 90.76 |
| 23 | 0.40 | 0.39 | 0.92 | 113.86 | 44.53 | 49.10 | 93.63 |
| 24 | 0.42 | 0.41 | 0.91 | 114.22 | 47.38 | 49.10 | 96.48 |
| 25 | 0.44 | 0.42 | 0.91 | 114.58 | 50.19 | 49.10 | 99.29 |
| 26 | 0.45 | 0.44 | 0.90 | 114.94 | 52.98 | 49.10 | 102.08 |
| 27 | 0.47 | 0.45 | 0.89 | 115.29 | 55.73 | 49.10 | 104.83 |
| 28 | 0.49 | 0.47 | 0.88 | 115.65 | 58.45 | 49.10 | 107.55 |
| 29 | 0.51 | 0.48 | 0.87 | 115.99 | 61.13 | 49.10 | 110.23 |
| 30 | 0.52 | 0.50 | 0.87 | 116.34 | 63.77 | 49.10 | 112.87 |
| 31 | 0.54 | 0.52 | 0.86 | 116.68 | 66.37 | 49.10 | 115.47 |
| 32 | 0.56 | 0.53 | 0.85 | 117.02 | 68.93 | 49.10 | 118.03 |
| 33 | 0.58 | 0.54 | 0.84 | 117.35 | 71.45 | 49.10 | 120.55 |
| 34 | 0.59 | 0.56 | 0.83 | 117.68 | 73.93 | 49.10 | 123.03 |
| 35 | 0.61 | 0.57 | 0.82 | 118.01 | 76.36 | 49.10 | 125.46 |
| 36 | 0.63 | 0.59 | 0.81 | 118.33 | 78.74 | 49.10 | 127.84 |
| 37 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 118.65 | 81.08 | 49.10 | 130.18 |
| 38 | 0.66 | 0.62 | 0.79 | 118.96 | 83.37 | 49.10 | 132.47 |
| 39 | 0.68 | 0.63 | 0.78 | 119.27 | 85.61 | 49.10 | 134.71 |
| 40 | 0.70 | 0.64 | 0.77 | 119.58 | 87.80 | 49.10 | 136.90 |
| 41 | 0.72 | 0.66 | 0.75 | 119.88 | 89.94 | 49.10 | 139.04 |
| 42 | 0.73 | 0.67 | 0.74 | 120.17 | 92.02 | 49.10 | 141.12 |
| 43 | 0.75 | 0.68 | 0.73 | 120.46 | 94.05 | 49.10 | 143.15 |
| 44 | 0.77 | 0.69 | 0.72 | 120.75 | 96.03 | 49.10 | 145.13 |
| 45 | 0.79 | 0.71 | 0.71 | 121.03 | 97.95 | 49.10 | 147.05 |
| 46 | 0.80 | 0.72 | 0.69 | 121.31 | 99.82 | 49.10 | 148.92 |
| 47 | 0.82 | 0.73 | 0.68 | 121.58 | 101.63 | 49.10 | 150.73 |
| 48 | 0.84 | 0.74 | 0.67 | 121.85 | 103.39 | 49.10 | 152.49 |
| 49 | 0.86 | 0.75 | 0.66 | 122.11 | 105.08 | 49.10 | 154.18 |
| 50 | 0.87 | 0.77 | 0.64 | 122.37 | 106.72 | 49.10 | 155.82 |
| 51 | 0.89 | 0.78 | 0.63 | 122.62 | 108.31 | 49.10 | 157.41 |
| 52 | 0.91 | 0.79 | 0.62 | 122.87 | 109.83 | 49.10 | 158.93 |
| 53 | 0.93 | 0.80 | 0.60 | 123.11 | 111.29 | 49.10 | 160.39 |
| 54 | 0.94 | 0.81 | 0.59 | 123.34 | 112.70 | 49.10 | 161.80 |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 8 di 14 |

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | Hg | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|-------|-------------------|
| 55 | 0.96 | 0.82 | 0.57 | 123.57 | 114.05 | 49.10 | 163.15 |
| 56 | 0.98 | 0.83 | 0.56 | 123.80 | 115.34 | 49.10 | 164.44 |
| 57 | 0.99 | 0.84 | 0.54 | 124.02 | 116.56 | 49.10 | 165.66 |
| 58 | 1.01 | 0.85 | 0.53 | 124.23 | 117.73 | 49.10 | 166.83 |
| 59 | 1.03 | 0.86 | 0.52 | 124.44 | 118.84 | 49.10 | 167.94 |
| 60 | 1.05 | 0.87 | 0.50 | 124.64 | 119.90 | 49.10 | 169.00 |
| 61 | 1.06 | 0.87 | 0.48 | 124.83 | 120.89 | 49.10 | 169.99 |
| 62 | 1.08 | 0.88 | 0.47 | 125.02 | 121.82 | 49.10 | 170.92 |
| 63 | 1.10 | 0.89 | 0.45 | 125.20 | 122.70 | 49.10 | 171.80 |
| 64 | 1.12 | 0.90 | 0.44 | 125.38 | 123.52 | 49.10 | 172.62 |
| 65 | 1.13 | 0.91 | 0.42 | 125.55 | 124.28 | 49.10 | 173.38 |
| 66 | 1.15 | 0.91 | 0.41 | 125.71 | 124.98 | 49.10 | 174.08 |
| 67 | 1.17 | 0.92 | 0.39 | 125.87 | 125.63 | 49.10 | 174.73 |
| 68 | 1.19 | 0.93 | 0.37 | 126.02 | 126.22 | 49.10 | 175.32 |
| 69 | 1.20 | 0.93 | 0.36 | 126.17 | 126.76 | 49.10 | 175.86 |
| 70 | 1.22 | 0.94 | 0.34 | 126.31 | 127.23 | 49.10 | 176.33 |
| 71 | 1.24 | 0.95 | 0.33 | 126.44 | 127.66 | 49.10 | 176.76 |
| 72 | 1.26 | 0.95 | 0.31 | 126.57 | 128.03 | 49.10 | 177.13 |
| 73 | 1.27 | 0.96 | 0.29 | 126.68 | 128.35 | 49.10 | 177.45 |
| 74 | 1.29 | 0.96 | 0.28 | 126.80 | 128.61 | 49.10 | 177.71 |
| 75 | 1.31 | 0.97 | 0.26 | 126.90 | 128.82 | 49.10 | 177.92 |
| 76 | 1.33 | 0.97 | 0.24 | 127.00 | 128.98 | 49.10 | 178.08 |
| 77 | 1.34 | 0.97 | 0.22 | 127.09 | 129.09 | 49.10 | 178.19 |
| 78 | 1.36 | 0.98 | 0.21 | 127.18 | 129.16 | 49.10 | 178.26 |
| 79 | 1.38 | 0.98 | 0.19 | 127.26 | 129.17 | 49.10 | 178.27 |
| 80 | 1.40 | 0.98 | 0.17 | 127.33 | 129.13 | 49.10 | 178.23 |
| 81 | 1.41 | 0.99 | 0.16 | 127.40 | 129.05 | 49.10 | 178.15 |
| 82 | 1.43 | 0.99 | 0.14 | 127.45 | 128.92 | 49.10 | 178.02 |
| 83 | 1.45 | 0.99 | 0.12 | 127.51 | 128.74 | 49.10 | 177.84 |
| 84 | 1.47 | 0.99 | 0.10 | 127.55 | 128.52 | 49.10 | 177.62 |
| 85 | 1.48 | 1.00 | 0.09 | 127.59 | 128.26 | 49.10 | 177.36 |
| 86 | 1.50 | 1.00 | 0.07 | 127.62 | 127.95 | 49.10 | 177.05 |
| 87 | 1.52 | 1.00 | 0.05 | 127.64 | 127.60 | 49.10 | 176.70 |
| 88 | 1.54 | 1.00 | 0.03 | 127.66 | 127.22 | 49.10 | 176.32 |
| 89 | 1.55 | 1.00 | 0.02 | 127.67 | 126.79 | 49.10 | 175.89 |
| 90 | 1.57 | 1.00 | 0.00 | 127.68 | 126.32 | 49.10 | 175.42 |

Tabella 1: Calcolo della gittata teorica, in funzione dei diversi valori dell'angolo θ , nel caso di distacco dell'intera pala nel punto di attacco del mozzo.

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 9 di 14 |

La gittata massima si ottiene per $\vartheta=79^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **129,17 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima teorica per il distacco in corrispondenza del mozzo.

Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità periferica in modo da tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noto il valore di gittata massima teorica e date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare la gittata massima effettiva.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più gravosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene che la gittata massima effettiva è pari al valore massimo di gittata teorica + i 2/3 della lunghezza della pala ovvero:

- Punto massima caduta: $129,17 + 49,10 = \mathbf{178,27\ m}$

5 Calcolo della gittata nel caso di rottura di un frammento pari a 5 metri

5.1 Schema di calcolo

Lo schema adottato per il calcolo della gittata nel caso di rottura del frammento di 5 m di una pala è simile a quello adottato per il distacco nel punto di attacco del mozzo.

Si individuano le seguenti grandezze:

- R = raggio del baricentro del frammento (ovvero distanza del baricentro dal mozzo);
- V = velocità periferica del baricentro.

Prima di effettuare il calcolo della gittata sono stati calcolati i seguenti parametri.

5.2 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala e del frammento, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo del frammento, si può ritenere con buona approssimazione che il baricentro del frammento sia determinato dalla seguente relazione:

$$R_g = L - \frac{2}{3} \text{lunghezza frammento} = 70,32\ m$$

essendo L = 73,65 m e il frammento lungo 5 m.

5.3 Calcolo della velocità periferica

Le modalità con le quali vengono calcolate la velocità periferica e la velocità angolare seguono quanto descritto nel paragrafo 3.2.

La velocità angolare media ω , che rappresenta l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo, è funzione del numero di giri a minuto (nel caso in esame $n = 12,6$ giri/min) ed è pari a:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio e alla velocità angolare, e corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot R_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot R_g = 92,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDOdT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 10 di 14 |

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30%, per cui il valore reale è 64,95 m/s.

5.4 Calcolo di H_g

Il raggio del baricentro del frammento è pari a 70,32 m.

L'altezza di lancio (H_g) sarà uguale all'altezza del mozzo sommata al valore della proiezione di R_g sulla verticale ossia:

$$H_g = H_{hub} + (R_g \cdot \sin \vartheta)$$

dove H_{hub} è l'altezza del mozzo.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

5.5 Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori della gittata massima teorica.

La gittata massima teorica del frammento di 5 m si ottiene per $\vartheta=60^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **576,39 m**. Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità dovuto all'attrito dell'aria e delle forze resistenti che si generano al momento della rottura del frammento.

Noto il valore di gittata massima teorica, date le caratteristiche geometriche del frammento si può calcolare la gittata massima effettiva. Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più gravosa, ossia quella in cui il frammento cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene che il punto più lontano di caduta è pari al valore massimo di gittata teorica + i 2/3 della lunghezza del frammento ovvero:

Gittata massima effettiva: $576,39 + 3,33 = \mathbf{579,73 \text{ m}}$

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | H_g | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|------|-------------------|
| 0 | 0.00 | 0.00 | 1.00 | 105.00 | -70.32 | 3.33 | -66.98 |
| 1 | 0.02 | 0.02 | 1.00 | 106.23 | -53.61 | 3.33 | -50.28 |
| 2 | 0.03 | 0.03 | 1.00 | 107.45 | -36.84 | 3.33 | -33.50 |
| 3 | 0.05 | 0.05 | 1.00 | 108.68 | -20.01 | 3.33 | -16.67 |
| 4 | 0.07 | 0.07 | 1.00 | 109.91 | -3.14 | 3.33 | 0.20 |
| 5 | 0.09 | 0.09 | 1.00 | 111.13 | 13.75 | 3.33 | 17.09 |
| 6 | 0.10 | 0.10 | 0.99 | 112.35 | 30.65 | 3.33 | 33.98 |
| 7 | 0.12 | 0.12 | 0.99 | 113.57 | 47.52 | 3.33 | 50.86 |
| 8 | 0.14 | 0.14 | 0.99 | 114.79 | 64.37 | 3.33 | 67.70 |
| 9 | 0.16 | 0.16 | 0.99 | 116.00 | 81.16 | 3.33 | 84.50 |
| 10 | 0.17 | 0.17 | 0.98 | 117.21 | 97.89 | 3.33 | 101.22 |
| 11 | 0.19 | 0.19 | 0.98 | 118.42 | 114.53 | 3.33 | 117.87 |
| 12 | 0.21 | 0.21 | 0.98 | 119.62 | 131.07 | 3.33 | 134.41 |
| 13 | 0.23 | 0.22 | 0.97 | 120.82 | 147.50 | 3.33 | 150.83 |
| 14 | 0.24 | 0.24 | 0.97 | 122.01 | 163.79 | 3.33 | 167.12 |
| 15 | 0.26 | 0.26 | 0.97 | 123.20 | 179.93 | 3.33 | 183.26 |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 11 di 14 |

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | Hg | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|------|-------------------|
| 16 | 0.28 | 0.28 | 0.96 | 124.38 | 195.91 | 3.33 | 199.24 |
| 17 | 0.30 | 0.29 | 0.96 | 125.56 | 211.70 | 3.33 | 215.03 |
| 18 | 0.31 | 0.31 | 0.95 | 126.73 | 227.30 | 3.33 | 230.63 |
| 19 | 0.33 | 0.33 | 0.95 | 127.89 | 242.69 | 3.33 | 246.02 |
| 20 | 0.35 | 0.34 | 0.94 | 129.05 | 257.85 | 3.33 | 261.18 |
| 21 | 0.37 | 0.36 | 0.93 | 130.20 | 272.78 | 3.33 | 276.11 |
| 22 | 0.38 | 0.37 | 0.93 | 131.34 | 287.45 | 3.33 | 290.78 |
| 23 | 0.40 | 0.39 | 0.92 | 132.47 | 301.86 | 3.33 | 305.19 |
| 24 | 0.42 | 0.41 | 0.91 | 133.60 | 315.98 | 3.33 | 319.32 |
| 25 | 0.44 | 0.42 | 0.91 | 134.72 | 329.82 | 3.33 | 333.16 |
| 26 | 0.45 | 0.44 | 0.90 | 135.82 | 343.36 | 3.33 | 346.70 |
| 27 | 0.47 | 0.45 | 0.89 | 136.92 | 356.59 | 3.33 | 359.92 |
| 28 | 0.49 | 0.47 | 0.88 | 138.01 | 369.49 | 3.33 | 372.82 |
| 29 | 0.51 | 0.48 | 0.87 | 139.09 | 382.05 | 3.33 | 385.39 |
| 30 | 0.52 | 0.50 | 0.87 | 140.16 | 394.28 | 3.33 | 397.61 |
| 31 | 0.54 | 0.52 | 0.86 | 141.22 | 406.15 | 3.33 | 409.48 |
| 32 | 0.56 | 0.53 | 0.85 | 142.26 | 417.66 | 3.33 | 420.99 |
| 33 | 0.58 | 0.54 | 0.84 | 143.30 | 428.80 | 3.33 | 432.13 |
| 34 | 0.59 | 0.56 | 0.83 | 144.32 | 439.56 | 3.33 | 442.89 |
| 35 | 0.61 | 0.57 | 0.82 | 145.33 | 449.94 | 3.33 | 453.27 |
| 36 | 0.63 | 0.59 | 0.81 | 146.33 | 459.93 | 3.33 | 463.26 |
| 37 | 0.65 | 0.60 | 0.80 | 147.32 | 469.52 | 3.33 | 472.85 |
| 38 | 0.66 | 0.62 | 0.79 | 148.29 | 478.71 | 3.33 | 482.04 |
| 39 | 0.68 | 0.63 | 0.78 | 149.25 | 487.49 | 3.33 | 490.83 |
| 40 | 0.70 | 0.64 | 0.77 | 150.20 | 495.87 | 3.33 | 499.20 |
| 41 | 0.72 | 0.66 | 0.75 | 151.13 | 503.83 | 3.33 | 507.16 |
| 42 | 0.73 | 0.67 | 0.74 | 152.05 | 511.37 | 3.33 | 514.71 |
| 43 | 0.75 | 0.68 | 0.73 | 152.96 | 518.50 | 3.33 | 521.83 |
| 44 | 0.77 | 0.69 | 0.72 | 153.85 | 525.21 | 3.33 | 528.54 |
| 45 | 0.79 | 0.71 | 0.71 | 154.72 | 531.50 | 3.33 | 534.83 |
| 46 | 0.80 | 0.72 | 0.69 | 155.58 | 537.36 | 3.33 | 540.69 |
| 47 | 0.82 | 0.73 | 0.68 | 156.43 | 542.80 | 3.33 | 546.14 |
| 48 | 0.84 | 0.74 | 0.67 | 157.26 | 547.83 | 3.33 | 551.16 |
| 49 | 0.86 | 0.75 | 0.66 | 158.07 | 552.43 | 3.33 | 555.77 |
| 50 | 0.87 | 0.77 | 0.64 | 158.87 | 556.62 | 3.33 | 559.96 |
| 51 | 0.89 | 0.78 | 0.63 | 159.65 | 560.40 | 3.33 | 563.73 |
| 52 | 0.91 | 0.79 | 0.62 | 160.41 | 563.76 | 3.33 | 567.09 |
| 53 | 0.93 | 0.80 | 0.60 | 161.16 | 566.71 | 3.33 | 570.05 |
| 54 | 0.94 | 0.81 | 0.59 | 161.89 | 569.26 | 3.33 | 572.60 |
| 55 | 0.96 | 0.82 | 0.57 | 162.60 | 571.42 | 3.33 | 574.75 |

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 12 di 14 |

| Angolo θ | radianti | sen θ | cos θ | Hg | Gittata Teorica | Lg | Gittata Effettiva |
|-----------------|----------|--------------|--------------|--------|-----------------|------|-------------------|
| 56 | 0.98 | 0.83 | 0.56 | 163.30 | 573.17 | 3.33 | 576.51 |
| 57 | 0.99 | 0.84 | 0.54 | 163.97 | 574.54 | 3.33 | 577.88 |
| 58 | 1.01 | 0.85 | 0.53 | 164.63 | 575.53 | 3.33 | 578.87 |
| 59 | 1.03 | 0.86 | 0.52 | 165.27 | 576.15 | 3.33 | 579.48 |
| 60 | 1.05 | 0.87 | 0.50 | 165.90 | 576.39 | 3.33 | 579.73 |
| 61 | 1.06 | 0.87 | 0.48 | 166.50 | 576.28 | 3.33 | 579.61 |
| 62 | 1.08 | 0.88 | 0.47 | 167.09 | 575.81 | 3.33 | 579.14 |
| 63 | 1.10 | 0.89 | 0.45 | 167.65 | 575.00 | 3.33 | 578.33 |
| 64 | 1.12 | 0.90 | 0.44 | 168.20 | 573.85 | 3.33 | 577.18 |
| 65 | 1.13 | 0.91 | 0.42 | 168.73 | 572.37 | 3.33 | 575.71 |
| 66 | 1.15 | 0.91 | 0.41 | 169.24 | 570.58 | 3.33 | 573.92 |
| 67 | 1.17 | 0.92 | 0.39 | 169.73 | 568.48 | 3.33 | 571.82 |
| 68 | 1.19 | 0.93 | 0.37 | 170.20 | 566.08 | 3.33 | 569.42 |
| 69 | 1.20 | 0.93 | 0.36 | 170.65 | 563.40 | 3.33 | 566.73 |
| 70 | 1.22 | 0.94 | 0.34 | 171.08 | 560.44 | 3.33 | 563.77 |
| 71 | 1.24 | 0.95 | 0.33 | 171.49 | 557.21 | 3.33 | 560.54 |
| 72 | 1.26 | 0.95 | 0.31 | 171.88 | 553.72 | 3.33 | 557.05 |
| 73 | 1.27 | 0.96 | 0.29 | 172.24 | 549.99 | 3.33 | 553.32 |
| 74 | 1.29 | 0.96 | 0.28 | 172.59 | 546.02 | 3.33 | 549.36 |
| 75 | 1.31 | 0.97 | 0.26 | 172.92 | 541.83 | 3.33 | 545.17 |
| 76 | 1.33 | 0.97 | 0.24 | 173.23 | 537.43 | 3.33 | 540.77 |
| 77 | 1.34 | 0.97 | 0.22 | 173.51 | 532.83 | 3.33 | 536.16 |
| 78 | 1.36 | 0.98 | 0.21 | 173.78 | 528.04 | 3.33 | 531.37 |
| 79 | 1.38 | 0.98 | 0.19 | 174.02 | 523.06 | 3.33 | 526.40 |
| 80 | 1.40 | 0.98 | 0.17 | 174.25 | 517.92 | 3.33 | 521.26 |
| 81 | 1.41 | 0.99 | 0.16 | 174.45 | 512.63 | 3.33 | 515.96 |
| 82 | 1.43 | 0.99 | 0.14 | 174.63 | 507.18 | 3.33 | 510.51 |
| 83 | 1.45 | 0.99 | 0.12 | 174.79 | 501.60 | 3.33 | 504.93 |
| 84 | 1.47 | 0.99 | 0.10 | 174.93 | 495.90 | 3.33 | 499.23 |
| 85 | 1.48 | 1.00 | 0.09 | 175.05 | 490.08 | 3.33 | 493.41 |
| 86 | 1.50 | 1.00 | 0.07 | 175.15 | 484.15 | 3.33 | 487.48 |
| 87 | 1.52 | 1.00 | 0.05 | 175.22 | 478.13 | 3.33 | 481.47 |
| 88 | 1.54 | 1.00 | 0.03 | 175.27 | 472.03 | 3.33 | 475.36 |
| 89 | 1.55 | 1.00 | 0.02 | 175.31 | 465.85 | 3.33 | 469.18 |
| 90 | 1.57 | 1.00 | 0.00 | 175.32 | 459.60 | 3.33 | 462.93 |

Tabella 2: Calcolo della gittata teorica, in funzione dei diversi valori dell'angolo θ , nel caso di rottura di un frammento di pala di lunghezza 5 m.

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDOdT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 13 di 14 |

6 Applicazione dello studio al progetto in esame

Nel progetto in esame si prevede la realizzazione di 8 aerogeneratori del modello Vestas con diametro 150 m e altezza mozzo 105 m localizzati in località Conca d’Oro, di potenza unitaria 6 MW, per una potenza complessiva dell’impianto di 48 MW.

Il calcolo della gittata massima appena descritto mostra come tale valore, nel caso maggiormente cautelativo, si attesti a 579,73 m.

È stata considerata una distanza di 580 m da ogni aerogeneratore e dall’immagine sottostante emerge che le abitazioni si trovano oltre tale distanza. Per ogni approfondimento si rimanda all’elaborato grafico “CDOdT_GENT01800_00_Planimetria generale con distanze tra WTG e edifici e strade esistenti”.

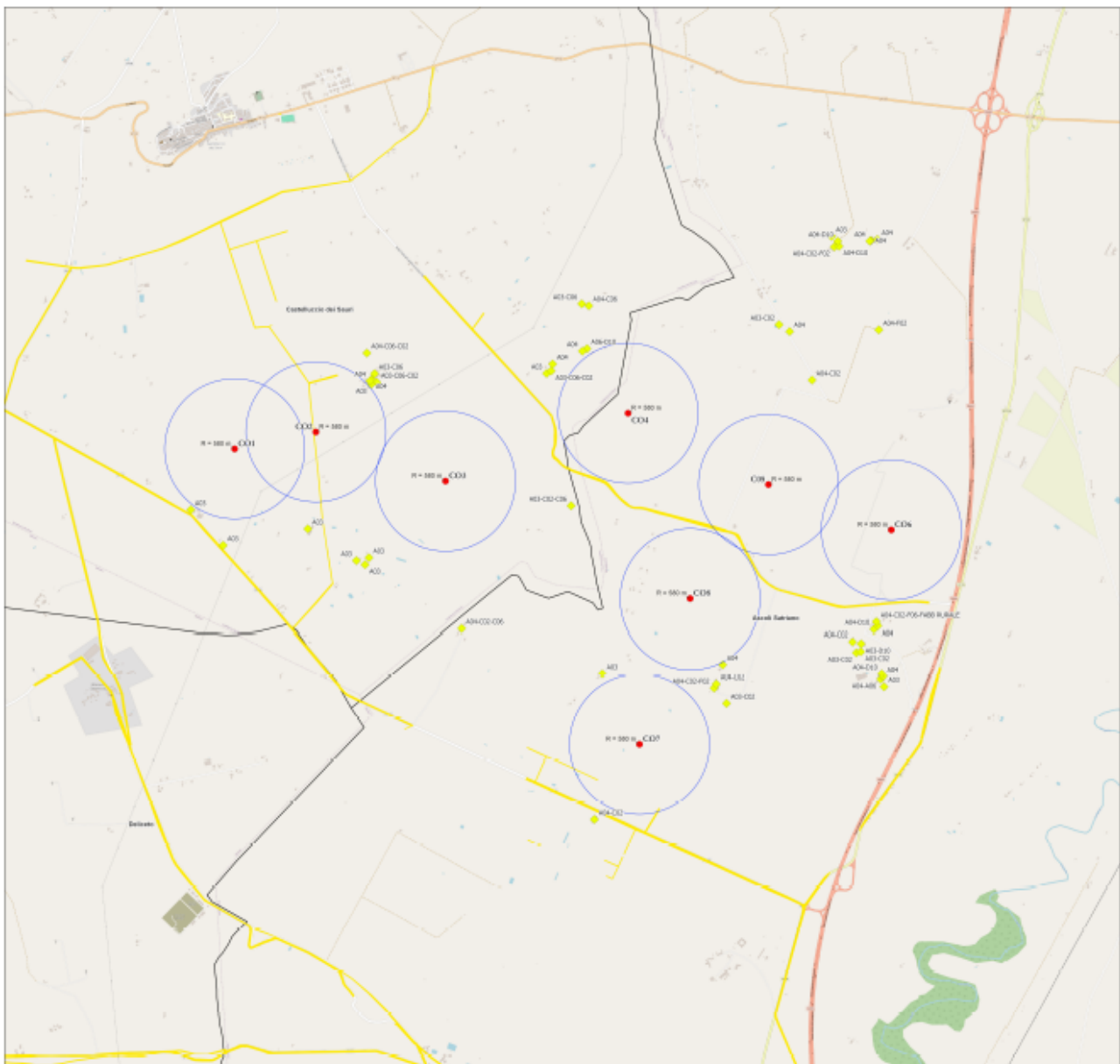


Figura 3: Ubicazione degli aerogeneratori rispetto agli edifici esistenti.

| | | |
|--|--|---|
| AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Conca d’Oro” | PROGETTO DEFINITIVO | Codice Elaborato: CDODT_GENR03000_00 |
| | | Data: 11/03/2024 |
| | RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA | Revisione: 00 |
| | | Pagina: 14 di 14 |

7 Conclusioni

La presente relazione descrive il calcolo eseguito al fine della valutazione della gittata massima che si verifica in caso di rottura accidentale di un aerogeneratore. In base a quanto riportato, il punto di caduta più lontano, nel caso di rottura dell’intera pala corrisponde a **178,27 m** e nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5 m corrisponde a **579,73 m**. I valori di gittata sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30%, per tener conto delle forze resistenti e dell’attrito dell’aria.

Le distanze degli aerogeneratori di progetto dalle strade provinciali/statali/autostrade e dagli edifici esistenti risultano maggiori ai valori di gittata ottenuti. Si conclude quindi che nell’ipotesi remota di rottura di un aerogeneratore, l’impianto in progetto risulti sicuro.

Si sottolinea che dalla pratica sul campo per questo tipo di impianti, oltre che da studi specialistici pubblicati, il fenomeno della rottura dell’aerogeneratore risulta una eventualità molto remota.

Si conclude, quindi, che il progetto dell’impianto eolico, proposto dalla società AREN Green Srl nel territorio dei Comuni di Ascoli Satriano, Castelluccio dei Sauri e Deliceto (FG) in località “Conca d’Oro”, costituito da 8 aerogeneratori del tipo Vestas con diametro 150 m e altezza al mozzo 105 m di potenza unitaria pari a 6 MW, non ostacola la pubblica sicurezza nell’ipotesi remota di rottura di una pala o di un frammento di essa.