



REGIONE MOLISE



COMUNE DI RICCIA




COMUNE DI
CERCEMAGGIORE



PROVINCIA DI
CAMPOBASSO

Progetto definitivo per la realizzazione di un parco eolico da 39,2 MW nel Comune di Riccia (CB) con opere di connessione nel Comune di Cercemaggiore (CB)



| | | | | | |
|---------------|---|----------------------------|------------------|---|----------------------|
| Proponente |  <p>New green energy s.r.l. Via Diocleziano, 107 cap 80125 Napoli Tel:081-195 66613</p> | | | | |
| Progettazione |  <p><i>Viale Michelangelo, 71</i> 80129 Napoli TEL.081 579 7998 mail: tecnico.inse@gmail.com</p> <p>Amm. Francesco Di Maso Ing. Nicola Galdiero</p> <p>Collaboratori: Geol. V.E.Iervolino Dott. A. Ianiro Archeol. A. Vella Ing. V. Triunfo Arch. C. Gaudiero Dott.ssa M. Mauro Ing. E. Fama</p> | | | | |
| Elaborato | <p>Nome Elaborato:</p> <p style="text-align: center;">STUDIO DELLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI-Relazione</p> | | | | |
| | | | |  | |
| 00 | Giugno 2021 | PRIMA EMISSIONE | INSE s.r.l. | INSE s.r.l. | 17370 INSE s.r.l. |
| Rev. | Data | Oggetto della revisione | Elaborazione | Verifica | Approvazione |
| Scala: | - | | | | |
| Formato: | A4 | Codice Pratica S216 | Codice Elaborato | AS216-SI12-R | |

SOMMARIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA | 2 |
| 2 | DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO | 2 |
| 3 | IPOTESI DI CALCOLO | 4 |
| 4 | DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE..... | 5 |
| 4.1 | STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA..... | 6 |
| 4.2 | GITTATA MASSIMA | 7 |
| 4.3 | DETERMINAZIONE DEL BARICENTRO | 8 |
| 4.4 | Calcolo della velocità periferica..... | 8 |
| 4.5 | CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA | 9 |
| 4.6 | ANALISI DEI RICETTORI | 12 |
| 5 | ROTTURA DELL' ESTREMITA' DI PALA | 12 |
| 5.1 | CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO DI 10 M | 13 |
| 5.2 | CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO 5 M..... | 16 |
| 6 | CONCLUSIONI | 17 |

1 PREMESSA

La società New Green Energy s.r.l è proponente di un progetto di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica ubicato nel Comune di Riccia, in Provincia di Campobasso ed opere di connessione nel comune di Cercemaggiore.

L'ipotesi progettuale prevede l'installazione di n.7 aerogeneratori della potenza nominale di 5,6 MW per una potenza complessiva di impianto pari a 39,2 MW. Gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotto interrato in MT a 30kV che collegheranno il parco eolico alla stazione di trasformazione utente 30/150 kV localizzata in un'area adiacente alla SP 93 nel Comune di Cercemaggiore; essa sarà collegata attraverso un cavo aereo AT 150kV allo stallo condiviso 150kV interno alla SE di smistamento Terna 150kV, localizzata nel Comune di Cercemaggiore (CB), che sarà collegata in entra ed esci alla linea 150 kV "Castelpagano-Campobasso". Questa rappresenta il punto di connessione dell'impianto alla RTN.

Il progetto è assoggettato a Valutazione di Impatto Ambientale di competenza Regionale (Ptot>1 MW).

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e di un frammento di pala di 10 e 5 m relativamente al seguente aerogeneratore.

| |
|--------------------|
| TIPO WTG |
| VESTAS V150 5.6 MW |

e ci si è posti nell'ipotesi di distacco della pala nel punto di attacco sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo in esame, sono le più gravose possibili, in modo da trovarsi nella situazione maggiormente cautelativa.

2 DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

L'ambito territoriale considerato si trova nella parte Sud della Regione Molise quasi a confine con il territorio Nord-Est della Regione Campania. I comuni interessati dal progetto sono i Comuni di Riccia (CB) per quanto concerne l'impianto eolico e il Comune di Cercemaggiore (CB) per quanto concerne la connessione alla SE. L'impianto si localizza quindi sul confine tra i due Comuni di Riccia e Cercemaggiore.

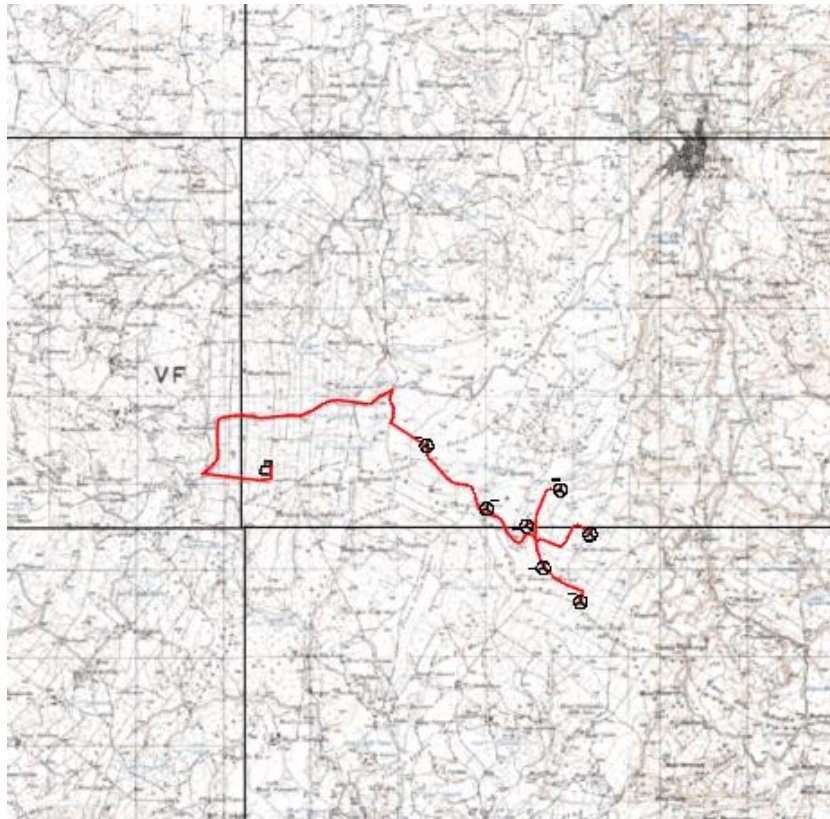


Figura 1 - Indicazione area di intervento su IGM

Il layout in progetto (di seguito le coordinate) prevede la realizzazione di n. 7 aerogeneratori della potenza unitaria di 5,6 MW, di produzione Vestas V150 ciascuno avente altezza al mozzo pari a 105 metri, rotore pari a 150 m e altezza totale pari a 180 metri, per una potenza complessiva di 39,2 MW.

| N° Aerogeneratore | Coordinate UTM 33 WGS84 | |
|-------------------|-------------------------|------------|
| | EST | NORD |
| WTG01 | 483247,37 | 4589213,77 |
| WTG02 | 483934,83 | 4588496,68 |
| WTG03 | 484391,95 | 4588299,42 |
| WTG04 | 484774,40 | 4588712,77 |
| WTG05 | 485116,24 | 4588201,79 |
| WTG06 | 484580,70 | 4587821,21 |
| WTG07 | 485007,60 | 4587428,03 |

L'aerogeneratore, scelto in fase progettuale è un aerogeneratore da 5,6 MW con rotore pari a 180 m di diametro e altezza mozzo pari a 105 m per una H totale pari a 180 m.

3 IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo della gittata massima per distacco dell'intera pala sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi.

Per il calcolo della massima gittata si considerano 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);
- 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 sono i seguenti.

- Altezza del mozzo $H = 105$ m
- Diametro del rotore $D = 150$ m, quindi lunghezza della pala 75 m
- Distanza del centro di massa dal mozzo $= L_p/3 = 25$ m
- Velocità di rotazione $V=12$ giri/min come da stralcio seguente tratto dalla documentazione tecnica VESTAS

| 3.1 Rotor | | | |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| The wind turbine is equipped with a rotor consisting of three blades and a hub. The blades are controlled by the microprocessor pitch control system OptiTip®. Based on the prevailing wind conditions, the blades are continuously positioned to optimise the pitch angle. | | | |
| Rotor | V117 | V136 | V150 |
| Diameter | 117 m | 136 m | 150 m |
| Swept Area | 10751 m ² | 14527 m ² | 17671 m ² |
| Speed, Dynamic Operation Range | 6.7-17.5 | 5.6-14.0 | 4.9-12.0 |

Figura 2 – Stralcio documentazione tecnica WTG

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore, prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente 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 trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

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, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, 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. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo pari a $\pi/4$; ad ulteriori incrementi dell'angolo a il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorquando il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a π .

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) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano XY in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

4 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

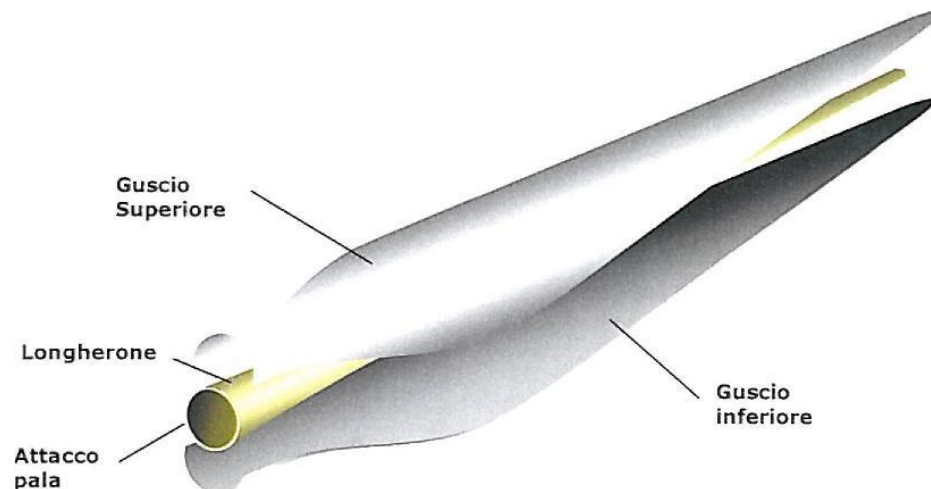


Figura 3 – Componenti di una pala

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore. Per cui l'errata verifica

del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

4.1 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA

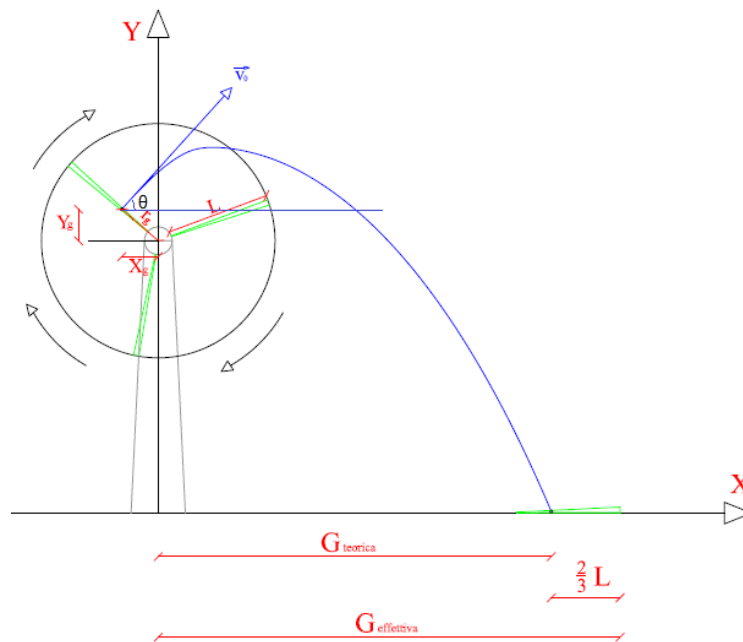
Considereremo il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Sceglieremo 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:

$$a_x = 0 \qquad a_y = -g$$

Dove $g = 9,81m/s^2$ è l'accelerazione di gravità.

Rappresenteremo 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:



Ricordando che:

$$a_x = 0 \qquad a_y = g$$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

Il vettore velocità v nell'istante iniziale $t = 0$ ha modulo v_0 ed è inclinato di un certo angolo θ rispetto alla

direzione positiva dell'asse delle x ; le sue componenti sono:

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

Poiché non esistendo componenti orizzontali dell'accelerazione, la componente orizzontale della velocità v_x rimane costante, la componente verticale v_y cambia nel tempo perché esiste un'accelerazione costante diretta verso il basso ($a_y = -g$):

$$v_x = v_{x0} \quad x = x_0 + v_{x0}t$$

e

$$v_y = gt + v_{y0} \quad y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

Dove (x_0, v_0) è la posizione iniziale del punto materiale e (v_x, v_y) è la sua velocità.

4.2 GITTATA MASSIMA

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo y determinando così l'istante t in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota $y=0$ sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che $y_0 = 0$ si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0 \quad t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

t_0 corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che $y_0 = 0$);

t_1 all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo valore nell'equazione $x = x_0 + v_{x0}t$, descrittiva del moto lungo x , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2 \frac{v_0^2}{g} \sin \theta \cos \theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = -\frac{v_0}{g} \sin 2\theta$$

La gittata G è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala ed è funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di ϑ angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando $\sin 2\vartheta = 1$ cioè $2\vartheta = \pi/2$ ossia $\vartheta = \pi/4$.

Nel caso in questione y_0 non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

4.3 DETERMINAZIONE DEL BARICENTRO

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 $rg = 25 \text{ m}$ essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 75 m .

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{torre} + Y_g$$

Dove

$$(Y_g = r_g \cos \vartheta)$$

Ciò implica che la soluzione di t sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo x , per trovare la gittata massima.

4.4 CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. 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, che è appunto la velocità angolare ω al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio r percorre la circonferenza $2\pi r$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2\pi r n$ metri/minuto. E 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 di 12 giri al minuto) corrisponde a:

$$V_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g$$

e cioè $V_g = 31,4$ m/s

Se si vuol considerare l'effetto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulterebbe, secondo studi empirici, ridotta del 30% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore risulterebbe pari a 22 m/s.

4.5 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Lo schema adottato per il calcolo è il seguente, avendo indicato con G il baricentro del sistema avremo:

R_g = raggio del baricentro

V_g = velocità periferica del baricentro

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

$$x_0 = R_g \sin(\vartheta)$$

$$y_0 = H + R \cos(\vartheta)$$

$$v_x = V \sin(\vartheta)$$

$$v_y = V \cos(\vartheta)$$

Quindi, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno $a_x = 0$, $a_y = -g$.
- la velocità periferica del baricentro v_g è uguale a 31,42 m/sec. (22 m/s se si considera l'effetto attrito)

Le coordinate del punto di partenza del corpo non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma $(0, H_G = H_{torre} + Y_g)$ ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

Infatti, il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, che si ritiene con buona approssimazione posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia $R_g = 25$ m, essendo il

raggio di ciascuna pala uguale a 75 m, viene valutato all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di R_g sulla verticale ossia:

$$hg = H + (RG * \cos\vartheta)$$

Dove H è l'altezza del mozzo e il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

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

| TIPO WTG | Baricentro r_g (m) |
|--|----------------------|
| VESTAS V150 5.6 MW hmozzo= 105 m D= 150 m | 25 |

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} - X_g$$

Al valore di gittata andrà sottratta la distanza X_g del baricentro rispetto all'asse della torre ($X_g = r_g \sin\vartheta$).

Inoltre, supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene il punto più lontano di caduta pari al valore massimo di gittata + i 2/3 della lunghezza della pala.

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori dell'angolo ϑ .

| θ (°) | θ (rad) | Vx | Vy | Hg | Gt | Xg | Lg | Ge |
|--------------|----------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
| 0 | 0,00 | 31,42 | 0,00 | 130,00 | 161,73 | 0,00 | 50,00 | 211,73 |
| 5 | 0,09 | 31,30 | 2,74 | 129,90 | 167,85 | 2,18 | 50,00 | 217,85 |
| 10 | 0,17 | 30,94 | 5,46 | 129,62 | 172,84 | 4,34 | 50,00 | 222,84 |
| 11 | 0,19 | 30,84 | 5,99 | 129,54 | 173,67 | 4,77 | 50,00 | 223,67 |
| 12 | 0,21 | 30,73 | 6,53 | 129,45 | 174,45 | 5,20 | 50,00 | 224,45 |
| 13 | 0,23 | 30,61 | 7,07 | 129,36 | 175,17 | 5,62 | 50,00 | 225,17 |
| 14 | 0,24 | 30,48 | 7,60 | 129,26 | 175,82 | 6,05 | 50,00 | 225,82 |
| 15 | 0,26 | 30,35 | 8,13 | 129,15 | 176,41 | 6,47 | 50,00 | 226,41 |
| 20 | 0,35 | 29,52 | 10,74 | 128,49 | 178,30 | 8,55 | 50,00 | 228,30 |
| 25 | 0,44 | 28,47 | 13,28 | 127,66 | 178,25 | 10,57 | 50,00 | 228,25 |
| 30 | 0,52 | 27,21 | 15,71 | 126,65 | 176,02 | 12,50 | 50,00 | 226,02 |
| 35 | 0,61 | 25,73 | 18,02 | 125,48 | 171,41 | 14,34 | 50,00 | 221,41 |
| 40 | 0,70 | 24,07 | 20,19 | 124,15 | 164,29 | 16,07 | 50,00 | 214,29 |
| 45 | 0,79 | 22,21 | 22,21 | 122,68 | 154,58 | 17,68 | 50,00 | 204,58 |
| 50 | 0,87 | 20,19 | 24,07 | 121,07 | 142,28 | 19,15 | 50,00 | 192,28 |
| 55 | 0,96 | 18,02 | 25,73 | 119,34 | 127,46 | 20,48 | 50,00 | 177,46 |
| 60 | 1,05 | 15,71 | 27,21 | 117,50 | 110,28 | 21,65 | 50,00 | 160,28 |
| 65 | 1,13 | 13,28 | 28,47 | 115,57 | 90,96 | 22,66 | 50,00 | 140,96 |
| 70 | 1,22 | 10,74 | 29,52 | 113,55 | 69,82 | 23,49 | 50,00 | 119,82 |
| 75 | 1,31 | 8,13 | 30,35 | 111,47 | 47,21 | 24,15 | 50,00 | 97,21 |
| 80 | 1,40 | 5,46 | 30,94 | 109,34 | 23,56 | 24,62 | 50,00 | 73,56 |
| 85 | 1,48 | 2,74 | 31,30 | 107,18 | -0,67 | 24,90 | 50,00 | 49,33 |
| 90 | 1,57 | 0,00 | 31,42 | 105,00 | -25,00 | 25,00 | 50,00 | 25,00 |

Table 1: Valori della gittata al variare dell'angolo di rotazione senza considerare l'effetto attrito

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dal baricentro dell'elemento si ottiene per un angolo θ intorno a 20° con un valore di gittata pari a circa 228 metri circa considerando il vertice della pala.

Le ipotesi teoriche di calcolo determinano il valore ultimo espresso d, trascurando l'effetto aerodinamico che oltretutto indurrebbe nella pala un moto rototraslatorio combinato, derivante dall'azione centrifuga di espulsione, dall'avvolgimento sul proprio asse che si induce nella pala espulsa a causa del suo stesso profilo e dalla azione del vento ortogonale al piano che contiene la circonferenza di rotazione delle pale. Pertanto, il moto derivante andrebbe studiato nella sua evoluzione 3D anziché nel piano; tuttavia la semplificazione introdotta dal modello 2D adottato è a vantaggio di sicurezza par quanto riguarda la gittata massima, non avendo considerato l'effetto dell'attrito viscoso dell'aria.

Di conseguenza il valore definitivo determinato risulta:

$$G_{Max} = 230 \text{ m}$$

Questo valore in realtà dovrebbe essere inferiore per l'effetto dell'attrito dell'aria e per la resistenza nella rototraslazione.

Riportando uno studio della BP POWER nel "Blade throw calculation under normal operating" "esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all'agosto del 2006 hanno dimostrato che, nel caso di distacco della pala o parti di essa, l'unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre".

4.6 ANALISI DEI RICETTORI



Figura 4: Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 230 metri

L'individuazione e la scelta dei fabbricati da considerare come ricettori sensibili nella verifica dell'impatto in caso di rottura accidentale della pala, è stata effettuata individuando in un raggio di 230 metri i fabbricati esistenti e se del caso, verificare la destinazione d'uso degli stessi.

Si rappresenta che nell'area intorno agli aerogeneratori per un raggio di 230 metri, non si riscontrano fabbricati ad uso abitativo. I 2 ricettori sensibili più prossimi all'aerogeneratore WTG01 sono R2 ed R3 rispettivamente di categoria catastale D/10 e A/3 e a distanza di circa 350m e 420m.

5 ROTTURA DELL' ESTREMITA' DI PALA

Questo tipo di incidente si è quasi sempre manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle

norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala. E' possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

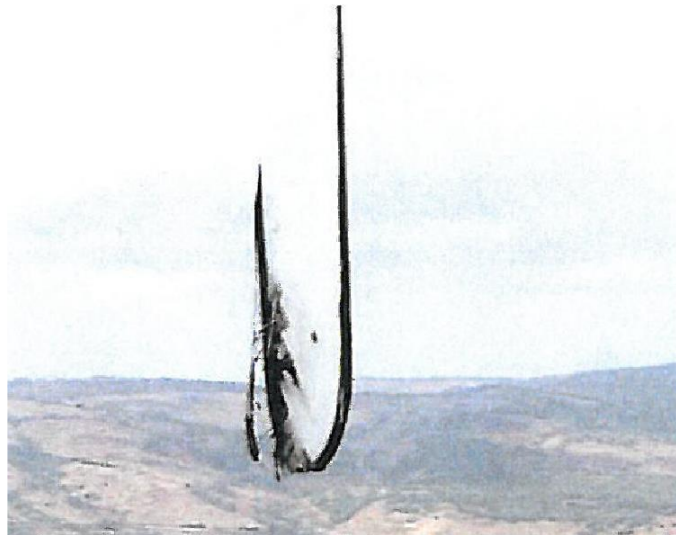


Figura 5: - Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica.

5.1 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO DI 10 M

Benché il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile, sarà comunque preso in considerazione il calcolo della gittata di un frammento di pala di 10 m (e successivamente di 5 m) considerando questa volta l'attrito viscoso dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Sottolineiamo che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte precedentemente per il distacco dell'intera pala sono a vantaggio di sicurezza in quanto, non si è tenuto conto delle dissipazioni causate dalle forze viscoso dovute alla resistenza prodotta dall'aria. Se ne terrà invece in conto per il distacco dei frammenti in quanto, le forze di inerzia dovute al movimento dell'oggetto e la risultante delle forze resistenti dovuta all'aria, saranno comparabili tra loro e quindi non più trascurabili.

La velocità di rotazione al momento del distacco, presa in considerazione per il calcolo, è quella massima indicata dal costruttore. E' evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- 1) Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto.
- 2) Si assume come velocità iniziale \mathbf{v}_0 il vettore applicato nel baricentro di cui al punto precedente al momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come

direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco.

3) Si determina l'angolo α_0 per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza mozzo, diametro rotore, dimensioni del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco.

4) Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off).

5) Il modulo della forza di attrito agente sul frammento, in moto libero, dopo il distacco è dato dalla formula.

$$FD = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times Cd \times A \times Vxz$$

Dove:

- ρ_{aria} è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare + rotore. In questo caso è posta pari a $0,898 \text{ Kg/m}^3$.
- Cd è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente delle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1.
- A è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria. Nel caso di un frammento di pala di 10 m, si è considerata una superficie efficace di 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Vxz è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo

6) Il moto libero di un corpo di massa nota M sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$ax = -1/M \times FD \times \cos\alpha$$

$$ay = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times Cd \times A \times (w - Vy)^2 / M$$

$$az = -1/M \times (FD \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$FD = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times Cd \times A \times Vxz$$

Dove:

- α rappresenta l'arcotangente del rapporto Vz/ Vx e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- w è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- Vy è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;

- g è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- altezza del mozzo posta pari a 105 m.
- massa M , area efficace A , lunghezza L posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a $1/3$ della lunghezza nel caso dell'intera pala e a $1/2$ nel caso di un frammento);
- α_0 viene inizializzato al valore arbitrario di 20° , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco $X_0=0$ e $Y_0=0$
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento $V_{y0}=0$, in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal mozzo, dovrà essere calcolata la distanza tra mozzo e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si dovrà tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala.

I parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- $M= 1600$ kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo.
- Altezza mozzo $Q_t= 105$ m, diametro rotore 150 m, lunghezza pala 75 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 12 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura.
- A = superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.

- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha = 20^\circ$.
- Densità dell'aria $\rho = 0,898 \text{ kg/m}^3$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo, considerando che il frammento si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno è

GMax= 340 m

Con tempo di permanenza in volo di 12,5 secondi circa.

Di seguito sono riportati i grafici delle traiettorie calcolati al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

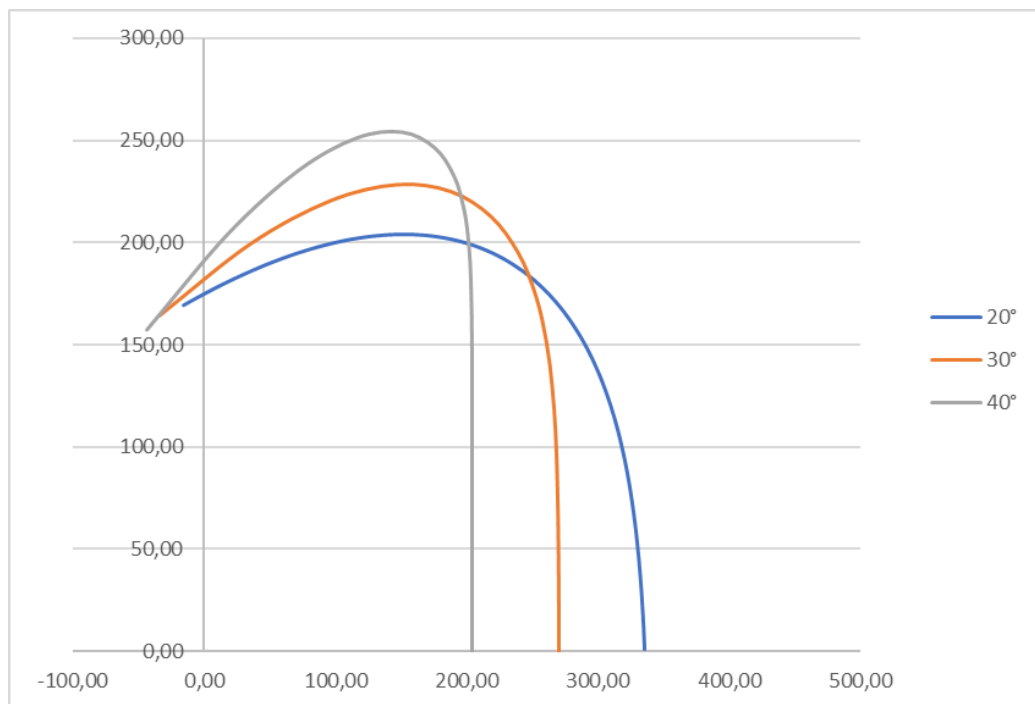


Figura 6: Grafica della traiettoria di un frammento di pala di 10 m.

5.2 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA – DISTACCO FRAMMENTO 5 M

Benché, come detto, il distacco di un frammento di pala è da considerarsi un evento pressoché impossibile di seguito si riporta il valore della gittata massima nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m.

I parametri fisici e geometrici che sia assumeranno saranno i seguenti:

- $M = 900 \text{ kg}$ in relazione alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo $H_t = 105 \text{ m}$, diametro rotore 150 m , lunghezza pala 75 m , lunghezza frammento 5 m , velocità di rotazione 12 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- $C_d = 1$, sulla base di dati riportati in letteratura

- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 3 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo α a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato $\alpha = 20^\circ$.
- Densità dell'aria $\rho = 0,898 \text{ kg/m}^3$, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è

$$\mathbf{G_{Max} = 300 \text{ m}}$$

Con tempo di permanenza in volo di 17,6 secondi circa.

Di seguito sono riportati i grafici delle traiettorie calcolati al variare dell'angolo di lancio con il metodo complesso:

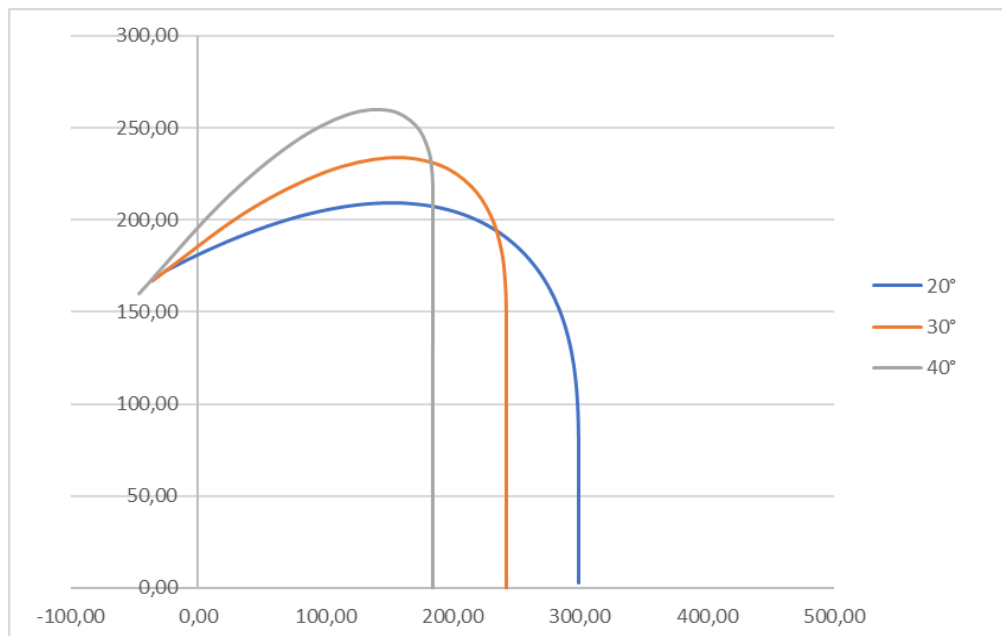


Figura 7: Grafica della traiettoria di un frammento di pala di 5 m.

6 CONCLUSIONI

La definizione del moto di una pala di un aerogeneratore o di un frammento di pala è un problema alquanto complesso. E' certo sulla base dell'esperienza e di semplici considerazioni fisiche (conservazione della quantità di moto) che trattasi di un moto rotazionale complesso in un fluido viscoso (aria).

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima.

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile.

-Dai calcoli è risultato che la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è 230 metri nel caso di pala intera e inferiore a 400 m per frammenti di 10 e 5 m.

-La gittata dipende dal peso del frammento e dalla sua superficie efficace di resistenza al moto. Non è detto che un frammento più piccolo abbia una gittata maggiore. Nei casi calcolati il frammento di 10 m va più lontano di quello di 5 m.

- Nel caso peggiore di distacco di frammenti di 5 e 10 m di pala, all'interno del buffer di 300 m vicino l'aerogeneratore WTG05, esiste solo un edificio sensibile, R57, di categoria catastale D/10.

-Nel buffer di 340 m (per distacco del frammento di 10 m) è invece intercettato il ricettore sensibile R2 di categoria catastale D/10 e il ricettore non sensibile R1, unità collabente. Nelle immediate vicinanze del buffer si trova anche il ricettore non sensibile R21, di categoria C/2.



Figura 8: Individuazione planimetrica dei ricettori nel buffer di 300 e 340 metri

- Nel buffer di 340 metri dalle WTG 02, WTG06 e WTG07, si rileva la presenza delle strade Provinciali N. 121 e N.36. Sono comunque rispettate le distanze dalle strade nazionali e provinciali di 150 m come da Linee Guida Nazionali del 2010 .