

Regione **Puglia**
Comune di **Spinazzola (BT)**
Proponente **RC Wind Srl**

Parco eolico
"Spinazzola"
Progetto Definitivo

1.29

Relazione di Calcolo sulla Gittata

Progettisti:

Dott.a Giulia Canavero

Giulia Canavero

Data	Rev.	Descrizione	Elaborato	Controllato	Approvato
25.05.2018	A	Prima emissione	G.Canavero	G.Canavero	P.Fazzino
15.01.2019	B	Revisione per spostamento AG3	G.Canavero	G.Canavero	P.Fazzino

Comm. 90

Elaborato: SPN-1.29-B_Relazione Calcolo Gittata

E' vietata la riproduzione del presente documento, anche parziale, con qualsiasi mezzo, senza l'autorizzazione di F.E.R.A. S.r.l.

INDICE

1. PREMESSA	5
2. INTRODUZIONE	6
3. BREVE DESCRIZIONE DEL PROGETTO	7
4. EQUAZIONI DEL MOTO	7
5. GEOMETRIA DEL PROBLEMA	8
6. CALCOLO DELLA GITTATA	9
7. INTERFERENZA CON STRADE E CASE	12
8. CONCLUSIONI	14
9. ALLEGATI	15

1. PREMESSA

Il presente documento viene emesso in revisione B in quanto è stato necessario riposizionare l'aerogeneratore AG3. Lo spostamento in questione è pari a circa 150 m verso est rispetto alla posizione considerata inizialmente. Tale ricollocazione è motivata dalla presenza nelle immediate vicinanze di un metanodotto di proprietà SNAM SpA per il quale, dietro indicazioni dell'Ente, si è concordato di rispettare una distanza pari a 180 m rispetto all'asse della condotta, ovvero pari all'altezza totale dell'aerogeneratore (vedi Figura 2)



Figura 1 – Confronto tra la posizione AG3 presentata e modificata (AG3 new)

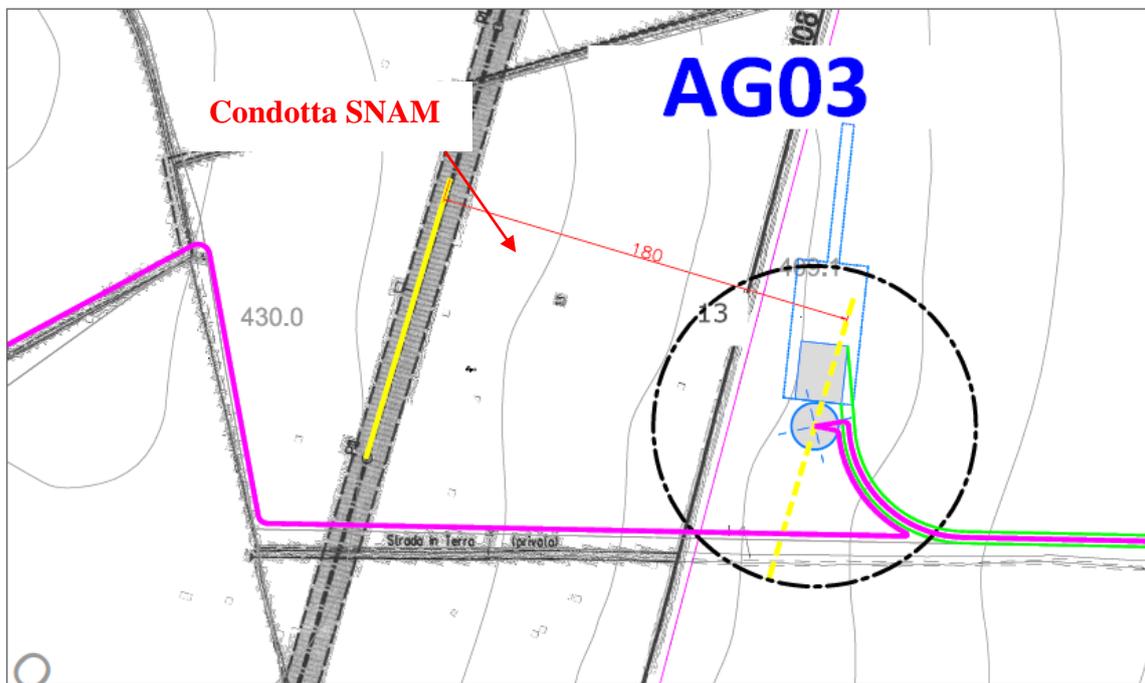


Figura 2 -Nuova posizione AG3 e rispetto 180 m asse condotta SNAM SpA

2. INTRODUZIONE

La seguente relazione ha l'obiettivo di determinare la massima distanza che raggiunge una pala di un aerogeneratore in fase di distacco mentre la macchina è in funzione.

In letteratura sono annoverati pochissimi casi di danni causati dalle pale delle turbine in caso di rottura accidentale. Si tratta infatti di una circostanza eccezionale e comunque i rischi connessi, soprattutto per la salute pubblica, sono estremamente bassi.

Il distacco o la rottura della pala sono eventi che si verificano per condizioni operative al di fuori del normale *range* di funzionamento delle macchine. Gli aerogeneratori che si utilizzeranno sono provvisti di sistemi di sicurezza che intervengono quando le condizioni di funzionamento sono tali da compromettere la funzionalità della macchina e la sicurezza pubblica.

A tal riguardo, a conforto di quanto detto prima e a titolo d'esempio, si allegano due documenti tecnici forniti dal produttore di turbine Senvion/Repower, valedoli in linea teorica per qualsiasi altro produttore di aeroturbine:

- Allegato 1 - Product description: a pag. 9 viene descritto il sistema rotorico della turbina con tutti gli accorgimenti di sicurezza che vengono adottati a livello costruttivo; a pag. 23 vengono descritti i sistemi di rilevamento del ghiaccio della turbina. Uno dei sistemi di controllo rileva le vibrazioni del rotore fermando la turbina in caso del superamento di una determinata soglia limite; questo sistema (che si attiva prevalentemente in caso di formazione di ghiaccio sulla pala e sbilanciamento/vibrazioni eccessive del rotore) agisce anche in caso di fratture incipienti della pala che inducono vibrazioni/sbilanciamenti del rotore;
- Allegato 2 - Maintenance manual: nella prima sezione del documento si evidenziano i controlli semestrali sulle pale per rilevare eventuali non conformità.

Il sistema di controllo della macchina e le ispezioni periodiche in fase di manutenzione riducono enormemente la probabilità di accadimento del lancio della pala.

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

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

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 intercetta il suolo al tempo T tale che $y(t) = 0$.

5. GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Il presente studio deve essere ricondotto alla composizione di due movimenti sopra un sistema di assi cartesiani noto, con l'asse x coincidente con l'asse orizzontale alla base dell'aerogeneratore, ovvero il suolo, e l'asse y coincidente con l'asse verticale centrale dell'aerogeneratore.

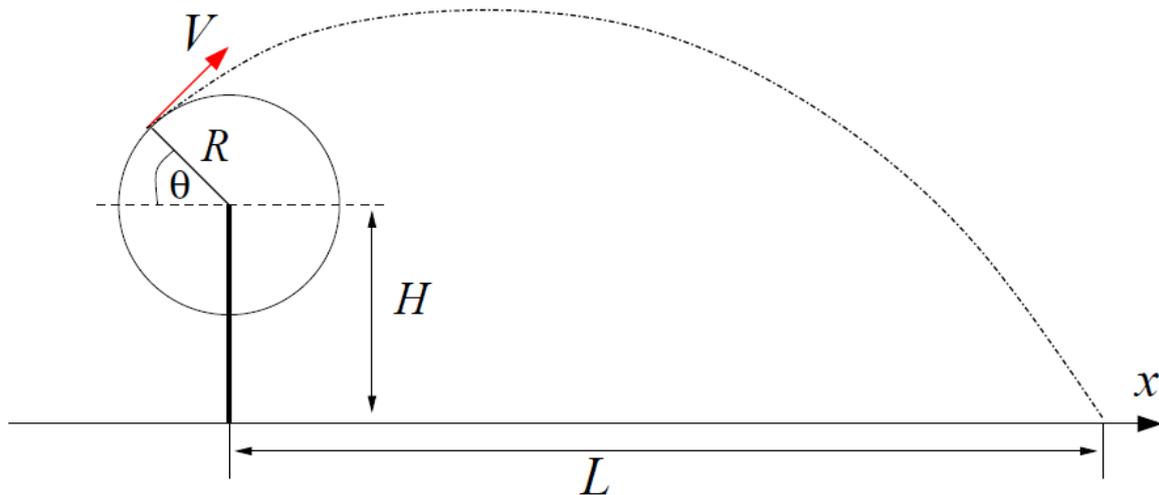


Figura 4: Schematizzazione esemplificativa

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 relazioni:

$$x_0 = -R \cos(\theta)$$

$$y_0 = H + R \sin(\theta)$$

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

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

La gittata L è la distanza del punto di impatto al suolo della pala proiettata.

6. CALCOLO DELLA GITTATA

Gli aerogeneratori che si prevedono di installare nel parco eolico sono di potenza nominale pari a 3,6 MW, con altezza massima al mozzo pari a 112 m e rotore di diametro massimo pari a 138 m (dimensioni assimilabili all'aerogeneratore Enercon E138, che si prenderà ad esempio). La massima velocità del rotore raggiunta da questa tipologia di aerogeneratore è pari a 15,38 giri al minuto.

Lo studio della gittata di un elemento rotante dell'aerogeneratore si basa sull'ipotesi di considerare l'elemento come un corpo rigido, ovvero un insieme di particelle soggette a forze tali da mantenere costanti nel tempo le loro distanze relative. Pertanto, il moto di un corpo rigido è traslatorio quando tutte le particelle che costituiscono il corpo subiscono lo stesso spostamento qualsiasi sia l'intervallo di tempo considerato. In un moto traslatorio, rettilineo o curvilineo, ogni segmento che congiunge due punti qualunque del corpo rigido, durante il movimento, resta parallelo a se stesso, quindi tutti i punti descrivono traiettorie uguali e sovrapponibili. Il moto traslatorio di un corpo rigido resta dunque conosciuto quando è noto il moto di uno qualunque dei suoi punti.

Tutti i punti del corpo rigido in rotazione si muovono con la stessa velocità angolare, pertanto si considera il centro di applicazione della velocità il baricentro del corpo.

Nello studio si considera il moto del corpo bidimensionale, traslatorio e curvilineo, rappresentato da un punto materiale (baricentro) lanciato in aria obliquamente sottoposto all'accelerazione di gravità costante g diretta verso il basso ed ad velocità iniziale data dalla rotazione delle pale.

Lo studio della gittata massima degli elementi rotanti viene effettuato ipotizzando una condizione conservativa del moto in cui vengono trascurate le forze di resistenza che agiscono sulla pala.

Semplificare la trattazione del moto significa effettuare lo studio nelle condizioni peggiorative, poiché in assenza di forze viscosse la condizione sopra definita è quella che dà la massima gittata. Ciò è vero finché si trascura la resistenza esercitata dall'aria sul corpo in movimento, che agendo in verso opposto alla velocità tende costantemente a diminuire la velocità del corpo.

Il moto reale è difficilmente schematizzabile in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio) della pala, ma comunque, con le condizioni da noi ipotizzate, è possibile affermare di essere a favore di sicurezza.

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore, ossia di distacco dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale, senza l'intervento di nessuno dei numerosi sistemi di

sicurezza di cui sono provvisti gli aerogeneratori considerati. Si suppone dunque che l'eventuale rottura della pala avvenga nelle condizioni più gravose ovvero:

- alla velocità massima del rotore, pari a 15,38 giri/minuto;
- nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo = $\pi/4$;
- con il centro di massa posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate agenti sulla pala. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco iniziale.

L'aerogeneratore delle dimensioni massime previsto, ossia tipo Enercon E138, possiede:

- altezza al mozzo dell'aerogeneratore $H = 112$ m;
- lunghezza della pala dell'aerogeneratore $L_p = 69$ m;
- distanza dal mozzo del Centro di Massa della pala $R = L_p/3 = 23$ m;
- Massima Velocità Angolare Rotore $V_{ang} = 15,38$ Giri/Minuto * $2\pi/60 = 1,61$ Rad/sec.

L'ordinata di massima velocità y_0 al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo con la componente verticale del Centro di Massa:

$$y_0 = H + R * \sqrt{2}/2 = 128,2 \text{ m}$$

Analogamente l'ascissa di massima velocità x_0 , al momento di rottura risulta:

$$x_0 = - R * \sqrt{2}/2 = -16,3 \text{ m}$$

La velocità lineare al Centro di Massa v è desunta dalla Velocità Angolare V_{ang} , ossia:

$$v = V_{ang} * R = 37 \text{ m/sec}$$

Le componenti verticale v_y ed orizzontale v_x di tale velocità lineare al Centro di Massa si ottengono conseguentemente:

$$v_x = v_y = v * \sqrt{2}/2 = 26,19 \text{ m/sec}$$

Il tempo di decelerazione verticale T_y necessario perché la componente verticale della velocità sia nulla è dato dalla formula:

$$T_y = v_y / 9,8 \text{ m/sec}^2 = 2,67 \text{ sec}$$

L'altezza massima H_{max} raggiunta si ottiene dalla formula:

$$H_{max} = y_0 + v_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = 163,2 \text{ m}$$

Il tempo di caduta T_{max} necessario affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

$$T_{max} = \sqrt{(H_{max} / 4,9 \text{ m/sec}^2)} = 5,77 \text{ sec}$$

La gittata massima L percorsa dall'elemento rotante distaccatosi dall'aerogeneratore nelle condizioni più sfavorevoli risulta quindi:

$L = v_x * (T_{max} + T_y) + x_0 = 204,8 \text{ m}$

Nei casi reali, l'impatto a terra sarà verosimilmente a distanze inferiori rispetto a quanto sopra stimato, sia per le condizioni iniziali al momento del distacco, che non necessariamente saranno quelle teoriche per una gittata massima, sia per i moti rotazionali della pala, dovuti ai momenti delle forze resistenti, che comporteranno ulteriori dissipazioni di energia e condizioni generalmente meno favorevoli per il moto.

Tuttavia si ritiene opportuno fare alcune considerazioni aggiuntive per tenere conto di elementi che determinerebbero un incremento della distanza massima raggiunta dalla pala, per la determinazione di una distanza massima più conservativa.

Aggiungendo i 46 m di lunghezza tra il baricentro (cui sono riferiti i calcoli) e la punta della pala, si ottiene un risultato di 250,8 m.

$L_{max} = 204,4 \text{ m} + 46 \text{ m} \approx 250 \text{ m}$
--

Si ritiene, perciò, che **la distanza calcolata e ritenuta utile ai fini del layout di progetto sia estremamente cautelativa.**

7. INTERFERENZA CON STRADE E CASE

Riportando un cerchio di raggio 250 m in pianta si vede che nessuna strada sarebbe eventualmente coinvolta nel caso ipotetico e remoto di un distacco della pala (Figura 5).

Anche la nuova posizione di AG3 non comporta un interessamento della strada ad est della turbina.

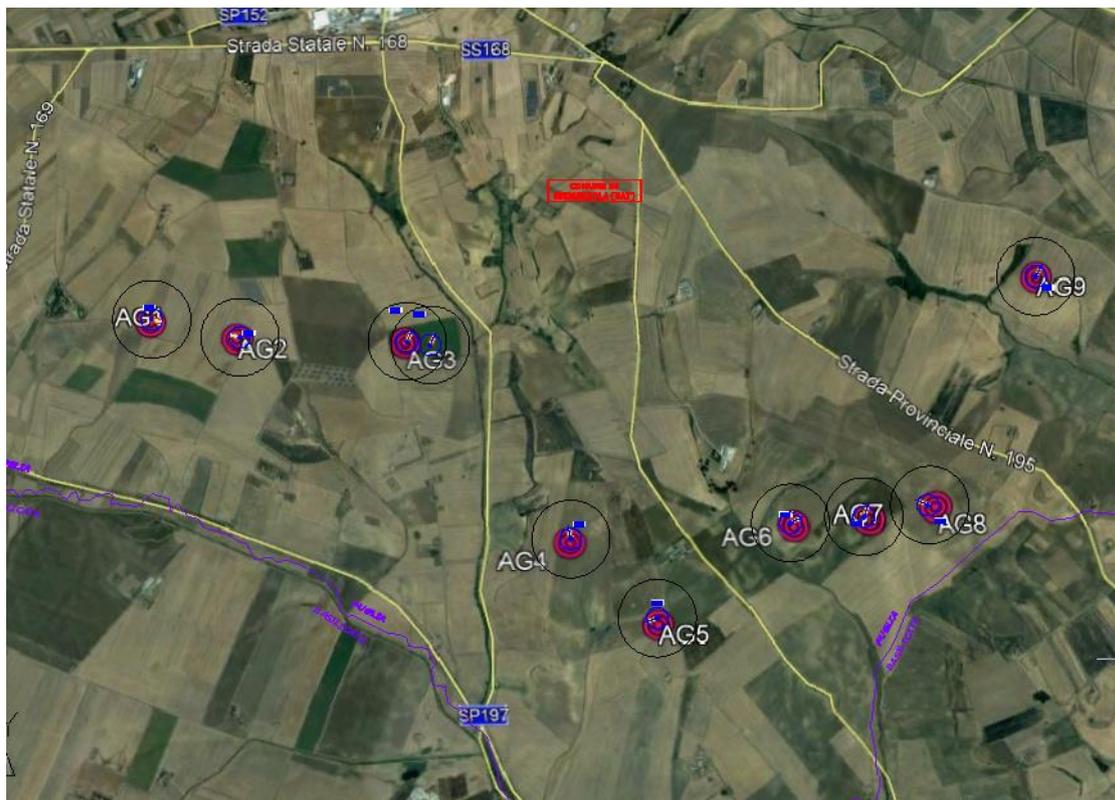


Figura 5 - Lay-out e strade. Per AG3 vengono mostrate sdia la posizione presentata che quella in variante

Per quanto riguarda gli edifici (vedi Figura 6) si vede che nessuno è situato in un raggio di 250 m dalle turbine.

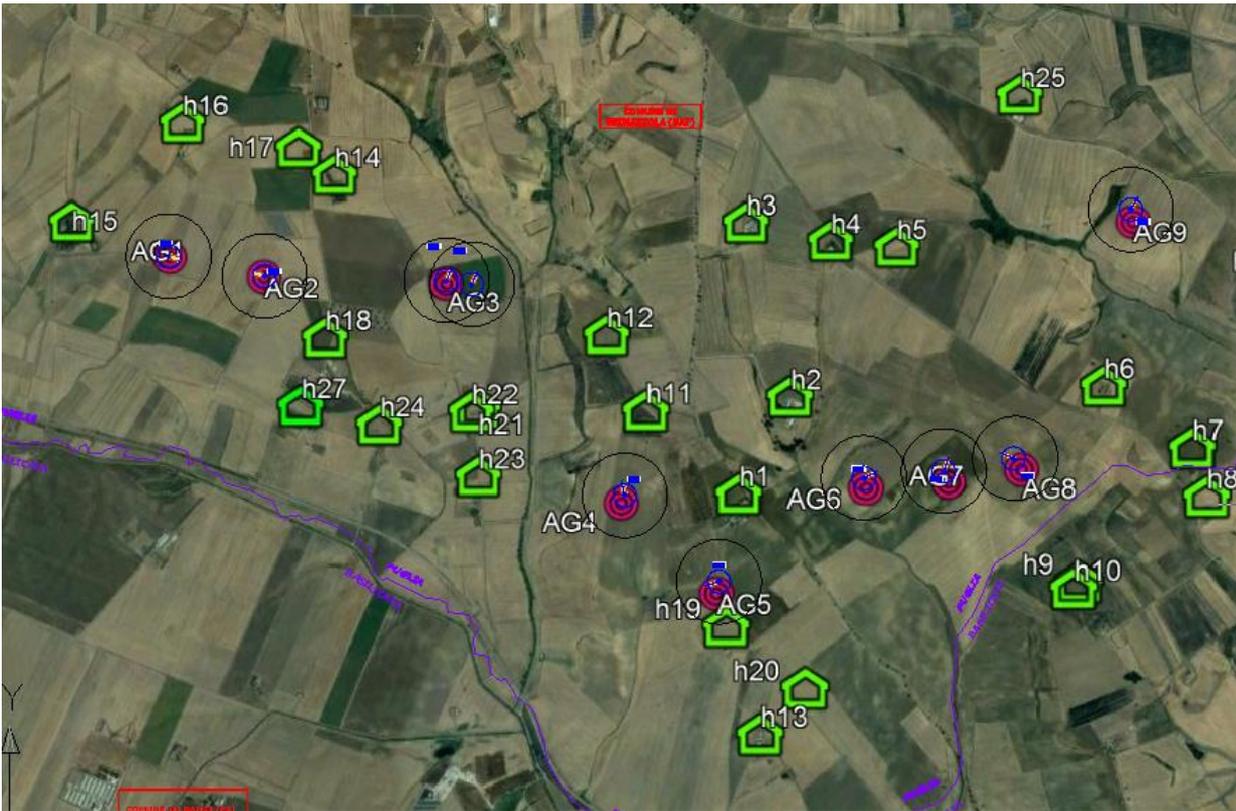


Figura 6 - Lay-out ed edifici. Per AG3 vengono mostrate sdia la posizione presentata che quella in variante

8. CONCLUSIONI

Premesso che la determinazione della reale distanza raggiunta da una pala distaccatasi dal rotore di un aerogeneratore è decisamente complessa a causa dell'influenza di un elevato numero di fattori, si è ottenuto un valore di riferimento con un modello semplificato ma conservativo, che tenesse conto di elementi significativi per la stima della distanza massima.

Dai calcoli condotti e dalle considerazioni e valutazioni svolte, si arriva alla conclusione che, per una macchina tipo Enercon E138, una pala che si distacchi in condizioni nominali di funzionamento arrivi a circa 250 m di distanza dalla torre.

Nessun edificio o strada è situato all'interno di un raggio di 250 m dalle turbine.

La nuova posizine di AG3 non comporta una modifica di quanto già presentato.

Si allega inoltre lo studio Vestas, Allegato 3, dal titolo "Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento" (Giugno 2008), che arriva a valori di gittata paragonabili a quanto qui ottenuto.

9. ALLEGATI

- Allegato 1 – Repower: Product description;
- Allegato 2 – Repower: Maintenance manual;
- Allegato 3 – Vestas: Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento.