



VCC Scano Sindia Srl



REGIONE SARDEGNA
COMUNE DI SCANO DI MONTIFERRO (OR)
COMUNE DI SINDIA (NU)



**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO DI
POTENZA PARI A 336.000 kW CON SISTEMA DI ACCUMULO
DA 49.000 kW**
"Scano - Sindia"

Provvedimento unico ambientale ex art.27 D.Lgs. 152/2006
Valutazione di Impatto Ambientale artt.23-24-25 D.Lgs. 152/2006

REL.13

Elaborato di Progetto

PROGETTO DEFINITIVO
RELAZIONE DI CALCOLO GITTATA MASSIMA

Committente:
VCC Scano Sindia Srl
Via O.Ranelletti, 271 - 67043 - Celano (AQ)
P.IVA e C.F.: 02097190660
PEC: vccscanosindia@legalmail.it

PROGETTO REDATTO DA: VCC Trapani Srl

Progettista:
Prof. Ing. Marco Trapanese
Ordine degli ingegneri della Provincia di Palermo N. 6946

Data:
18/05/2022

Rev.00

SCALA -

Sommario

1	CONTENUTI DELLA RELAZIONE.....	3
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE E CONSISTENZA E TIPOLOGIA DELL'IMPIANTO -DATI DI PROGETTO .	3
2.1.	Ubicazione dell'impianto.....	3
2.2	Tabella 2 - Dati di carattere generale.....	5
2.3	Tabella 3- Dati relativi all'area.....	5
2.4	Tabella 4 - Dati relativi alle influenze esterne.....	5
2.5	Tabella 5 - Dati relativi alla rete di collegamento.....	6
2.6	Tabella 6 - Dati relativi all'impianto.....	6
3.	GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO	6
4.	ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI	7
5.	ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA	7
5.1.	INTRODUZIONE E IPOTESI ALLA BASE DEL MODELLO DI CALCOLO.....	7
5.2.	AEROGENERATORI DI RIFERIMENTO.....	8
5.3.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	9
6.	VALUTAZIONE DEL RISCHIO.....	12
7.	CONCLUSIONI	12

1 CONTENUTI DELLA RELAZIONE

La presente relazione ha l'obiettivo di rappresentare i risultati del calcolo della gittata massima che si ottiene attraverso il moto percorso da una pala distaccatasi dall'aerogeneratore. Il capitolo 2 descrive in generale il sito e il layout degli aerogeneratori di nuova costruzione. Il capitolo 3 descrive in generale le caratteristiche tecniche e costruttive di un aerogeneratore moderno di grossa taglia ed espone brevemente il suo funzionamento. Nel capitolo 4 è riportata una breve analisi storica e statistica degli incidenti sugli aerogeneratori, focalizzato sulle pale. Il capitolo 5 affronta il metodo di calcolo della gittata massima, mentre nel capitolo 6 sono riportate le conclusioni con riferimento alle posizioni degli aerogeneratori di nuova costruzione in sito.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E CONSISTENZA E TIPOLOGIA DELL'IMPIANTO -DATI DI PROGETTO

2.1. Ubicazione dell'impianto

Il parco eolico è localizzato in agro dei comuni di Sindia in provincia di Nuoro e di Scano di Montiferro in provincia di Oristano e la stazione di connessione in agro del comune di Macomer in provincia di Nuoro (Fig.1).

Il parco è costituito da 56 torri eoliche ciascuna di potenza massima pari a 6.0 MW e da una stazione di accumulo elettrochimico per una potenza pari 49 MW. La potenza nominale totale dell'impianto sarà pari a 385 MW.

L'area oltre a presentare un adeguato profilo altimetrico, risulta nella parte circostante totalmente libera da ostacoli che potrebbero produrre ombreggiamento idrodinamico e quindi una diminuzione di rendimento dell'impianto.

In tabella 1 sono riportate le coordinate e i dati catastali delle particelle interessate da ciascun aerogeneratore.

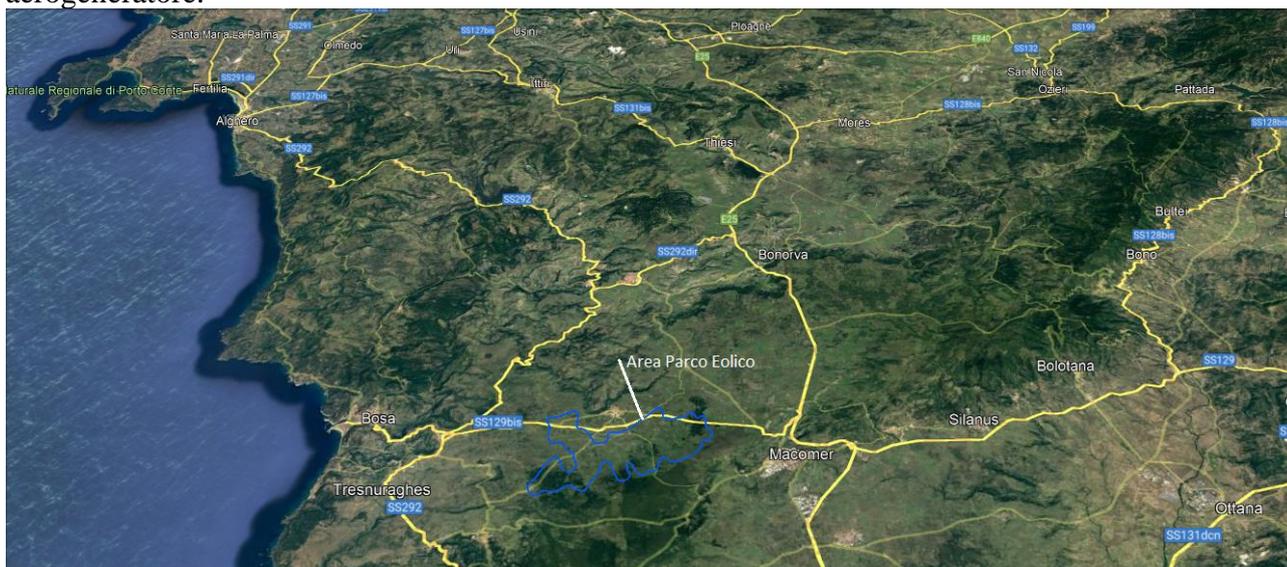


Figura 1 Ubicazione Area Impianto

Tabella 1 - Dati catastali e coordinate delle aree interessate dagli aerogeneratori

PROGETTO EOLICO "SCANO - SINDIA"					
WTG N.	COMUNE	FOGLIO	PART.	COORDINATE GEOGRAFICHE	
1	SINDIA	15	8	40°16'27.79"N	8°37'12.85"E
2	SINDIA	15	2	40°17'0.07"N	8°37'38.10"E
3	SINDIA	27	1	40°16'38.90"N	8°37'40.42"E
4	SINDIA	27	2	40°16'20.17"N	8°37'44.97"E
5	SINDIA	28	27	40°16'35.04"N	8°38'21.60"E
6	SINDIA	37	36	40°15'56.42"N	8°40'1.47"E
7	SINDIA	30	81	40°16'17.63"N	8°38'46.33"E
8	SINDIA	36	8	40°16'0.12"N	8°38'36.01"E
9	SINDIA	36	31	40°15'47.72"N	8°38'22.23"E
10	SCANO	1	73	40°15'31.86"N	8°37'31.26"E
			10		
11	SCANO	4	66	40°15'17.52"N	8°37'20.50"E
12	SCANO	4	68	40°15'2.25"N	8°37'10.64"E
13	SCANO	12	41	40°14'35.38"N	8°36'47.72"E
14	SCANO	13	84	40°14'37.13"N	8°37'15.48"E
15	SCANO	14	106	40°14'53.87"N	8°37'59.49"E
16	SCANO	5	96	40°15'8.18"N	8°38'21.72"E
17	SCANO	5	7	40°15'30.82"N	8°38'21.01"E
18	SINDIA	36	34	40°15'37.11"N	8°39'2.04"E
19	SINDIA	31	10	40°16'31.72"N	8°39'33.39"E
20	SINDIA	37	7	40°16'38.51"N	8°40'10.07"E
21	SINDIA	33	45	40°16'43.83"N	8°40'35.41"E
22	SINDIA	32	25	40°17'4.71"N	8°40'43.06"E
23	SINDIA	26	195	40°17'21.01"N	8°41'12.38"E
24	SINDIA	38	22	40°16'22.87"N	8°40'41.95"E
25	SINDIA	37	15	40°16'22.18"N	8°40'5.03"E
26	SINDIA	31	52	40°16'1.40"N	8°39'24.27"E
27	SINDIA	36	84	40°15'36.26"N	8°39'34.85"E
28	SINDIA	36	34	40°15'20.42"N	8°38'57.68"E
29	SCANO	14	109	40°14'49.69"N	8°38'42.77"E
30	SCANO	14	90	40°14'34.30"N	8°38'36.25"E
31	SINDIA	38	126	40°15'38.58"N	8°40'2.44"E
32	SCANO	7	21	40°14'56.83"N	8°39'57.36"E
33	SCANO	6	6	40°15'3.25"N	8°38'54.30"E
34	SINDIA	36	98	40°15'16.31"N	8°39'42.07"E
35	SINDIA	38	139	40°15'41.70"N	8°40'37.57"E
36	SINDIA	38	22	40°15'56.47"N	8°40'56.13"E
37	SINDIA	39	3	40°16'13.29"N	8°41'13.96"E
38	SINDIA	33	40	40°16'31.39"N	8°41'13.75"E
39	SINDIA	34	24	40°16'46.08"N	8°41'27.40"E
40	SINDIA	35	16	40°17'7.60"N	8°42'20.12"E
41	SINDIA	35	134	40°16'48.07"N	8°42'43.62"E

42	SINDIA	35	49	40°16'51.11"N 8°42'1.81"E
43	SINDIA	35	29	40°16'29.29"N 8°42'31.12"E
44	SINDIA	35	107	40°16'21.86"N 8°41'54.91"E
45	SINDIA	39	44	40°15'54.13"N 8°41'28.02"E
46	SINDIA	38	103	40°15'40.31"N 8°41'2.51"E
47	SINDIA	38	132	40°15'22.40"N 8°40'38.42"E
48	SINDIA	38	99	40°15'5.29"N 8°40'44.18"E
49	SINDIA	38	44	40°15'15.10"N 8°41'11.73"E
50	SINDIA	41	25	40°15'33.06"N 8°41'59.19"E
51	SINDIA	40	19	40°15'49.57"N 8°42'22.78"E
52	SINDIA	35	39	40°16'3.49"N 8°42'37.46"E
53	SINDIA	35	152	40°16'28.33"N 8°43'4.03"E
54	SINDIA	35	24	40°17'2.94"N 8°43'5.41"E
55	SINDIA	16	40	40°17'16.58"N 8°37'59.65"E
56	SINDIA	30	7	40°16'42.26"N 8°38'49.68"E
Stazione di Trasformazione	SINDIA	38	40	40°15'25.45"N 8°39'58.06"E
Area storage	SINDIA	36	97	40°15'24.11"N 8°39'46.87"E

2.2 Tabella 2 - Dati di carattere generale

<i>Pos.</i>	<i>Dati</i>	<i>Valori stabiliti</i>
1.1	Committente	VCC SCANO SINDIA SRL
1.2	Scopo del lavoro	Realizzazione di un impianto eolico collegato alla rete elettrica di trasmissione nazionale
1.3	Vincoli da rispettare	vincoli ambientali. Impatto visivo contenuto; Normativa regionale vigente

2.3 Tabella 3- Dati relativi all'area

<i>Pos</i>	<i>Dati</i>	<i>Valori stabiliti</i>
2.1	Proprietari	Si veda elenco particellare
2.2	Sito di installazione	Comune di Sindia e Comune di Scano di Montiferro
2.3	Destinazione d'uso	Terreni agricoli
2.4	Ambienti soggetti a normativa specifica CEI	Nessuna parte dell'impianto è ubicata in zone soggette a normativa specifica CEI

2.4 Tabella 4 - Dati relativi alle influenze esterne

<i>Pos</i>	<i>Dati</i>	<i>Valori stabiliti</i>	<i>note</i>
3.1	Temperatura: - Min/max all'interno degli edifici; - Min/max all'aperto;	- +5°C/+35°C - 10°C/+40°C	Norma UNI 10349
3.2	Formazione di condensa	Possibile	
3.3	Altitudine (s.l.m.)	Compresa tra 400 m e 700 m	

3.4	Latitudine (centro area)	40°15'55" N	
3.5	Longitudine (centro area)	08°40'00" E	
3.6	Vento: - Direzione prevalente - Velocità media - Massima velocità di progetto	- Ovest; Nord-Ovest - 7/8 m/s - 25 m/s	Valori misurati con campagna anemometrica
3.7	Carico di neve	Il carico neve è di 1,60 kPa, calcolato per la zona I.	D.M. 16/1/96
3.8	Effetti sismici	Il parco risulta ubicato in zona sismica 4	
3.9	Presenza di polvere	No	
3.10	Condizioni ambientali speciali	No	

2.5 Tabella 5 - Dati relativi alla rete di collegamento

<i>Pos</i>	<i>Dati</i>	<i>Valori stabiliti</i>
4.1	Dati del collegamento elettrico - Descrizione della rete di collegamento - Punto di consegna - Tensione nominale (Un) - Potenza disponibile continua - Stato del neutro	-Rete Terna di alta tensione 380 kV -Comune di Macomer -380 kV -385 MW
4.2	Misura dell'energia	Contatore generale

2.6 Tabella 6 - Dati relativi all'impianto

<i>Pos</i>	<i>Dati</i>	<i>Valori stabiliti</i>	<i>Note</i>
5.1	Tipo di intervento	Nuovo impianto	
5.2	Caratteristiche area di installazione	Terreni agricoli	
5.3	Potenza nominale	385 MW totale (336 MW da impianto eolico 49 MW da accumulo)	
5.4	Energia primaria	eolica	
5.5	Numero aerogeneratori	56	
5.6	Tipologia Accumulo	Accumulatori elettrochimici Pn 49 MW	

3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO

Un aerogeneratore (o turbina eolica) è, in generale, costituito dai seguenti sottosistemi principali:

- il rotore eolico, che trasforma l'energia cinetica del vento in energia meccanica mediante alcune pale, opportunamente sagomate secondo un profilo aerodinamico e montate su un asse orizzontale o verticale rispetto al terreno;

- l'apparato di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica, basato su un generatore elettrico rotante azionato dal rotore eolico attraverso un sistema di trasmissione, che spesso comprende un moltiplicatore di giri per ottenere la velocità appropriata per il generatore;
- il convertitore statico di frequenza e tensione, se necessario per ottenere una potenza elettrica con caratteristiche diverse da quelle in uscita dal generatore ed appropriate all'impiego. Nelle macchine ad asse orizzontale, come quelle dell'impianto eolico oggetto della presente relazione, il rotore ha di norma tre pale, generalmente costruite in vetroresina con eventuali rinforzi in fibra di carbonio. Le pale sono a passo variabile, cioè il loro angolo di calettamento al mozzo può essere variato da un servomeccanismo comandato dal sistema di controllo dell'aerogeneratore.

Gli aerogeneratori ad asse orizzontale comprendono, oltre al rotore, i seguenti componenti strutturali principali:

- la navicella o gondola, in cui sono alloggiati gli alberi di trasmissione, il moltiplicatore di giri, il generatore, eventuali altri componenti elettrici e le apparecchiature ausiliarie e di controllo; la navicella viene orientata dal sistema di controllo per mantenere l'asse del rotore allineato alla direzione del vento;
- il sostegno, generalmente metallico con struttura tubolare o a traliccio, che ha la funzione di mantenere il rotore ad un'altezza opportuna rispetto al suolo (la velocità del vento tende ad aumentare con l'altezza) e appoggia, a sua volta, su una fondazione in calcestruzzo armato. Il rotore è calettato al generatore elettrico attraverso l'albero lento, il moltiplicatore di giri e l'albero veloce, trasferisce l'energia cinetica al generatore, il quale a sua volta la converte in energia elettrica. Il trasformatore presente in navicella innalza la tensione dell'energia prodotta e attraverso un sistema di cavidotti l'energia prodotta viene immessa nella rete elettrica nazionale.

4. ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI

Diversi studi¹ condotti a livello internazionale tra il 1990 e il 2014 hanno evidenziato che la probabilità di guasto di una pala in un anno è compresa tra lo 0,1% e lo 0,7%. La variabilità dei dati è dovuta al differente numero di campioni, a differenti tassi di guasto e differenti ore di manutenzione dovute alla rottura.

Inoltre, uno studio del 2013, effettuato su un campione di circa 10,000 aerogeneratori, caratterizzati dall'essere operativi da anni diversi, ha evidenziato che circa il 2% delle turbine (nei 10 anni di funzionamento) richiedono la sostituzione della pala, considerando però anche tutte le sostituzioni che avvengono nei primi due anni di funzionamento dovute a problemi durante il trasporto e la costruzione.

Lo studio evidenzia inoltre che la causa maggiore di rottura delle pale è dovuta all'impatto con i fulmini.

5. ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

In questa sezione vengono riportate un'introduzione alla problematica della rottura di pala, le specifiche dell'aerogeneratore di riferimento e infine il calcolo della gittata massima.

5.1. INTRODUZIONE E IPOTESI ALLA BASE DEL MODELLO DI CALCOLO

La rottura improvvisa di una pala dell'aerogeneratore (o di un frammento di essa) è un fattore molto importante da analizzare in fase di progettazione e per la localizzazione dell'impianto eolico. La rottura di una pala, che spesso avviene alla radice di essa, è un evento che ha due cause principali:

1. Rottura del giunto di collegamento tra mozzo e pala;
2. Fenomeni di fatica sul profilo di pala causati dalla discontinuità della struttura.

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 percorsa. A differenza di un classico moto parabolico (es. moto del proiettile), in cui è possibile definire che l'angolo a cui vi è la gittata massima è 45° , la complessa struttura geometrica ed aerodinamica della pala porta a dover studiare in modo più approfondito il fenomeno del distacco di pala. Di seguito, vengono riportate alcune definizioni ed ipotesi utili per la definizione e il calcolo della gittata massima, affrontato nei paragrafi successivi:

- Gittata (L): è la distanza percorsa lungo l'asse delle ascisse da un corpo lasciato in aria. Essa dipende fortemente dall'angolo di distacco, dalle caratteristiche della pala come dimensione, peso e profilo aerodinamico, dalla velocità di rotazione del corpo, dalla velocità del vento e dalle forze di attrito che agiscono sulla pala durante il volo.
- Tempo di volo (T): è l'intervallo di tempo che intercorre tra il distacco del corpo ed il suo arrivo al suolo (il tempo trascorso in aria). Come definito per la gittata, esso dipende dalle caratteristiche della pala, dall'angolo di distacco e dalla velocità di rotazione del corpo. Il calcolo della gittata massima dell'aerogeneratore necessita, inoltre, di alcune ipotesi semplificative, necessarie a descrivere il modello del moto parabolico:
- Viene considerato il distacco della totalità della pala in modo istantaneo. Questa ipotesi è assolutamente conservativa, dato che non si considera la resistenza posta dalla pala;
- Viene considerata la rotazione massima (massimi giri al minuto) per la turbina al momento del distacco;
- Sono considerati solamente gli effetti gravitazionali sul moto e non gli effetti di attrito di aria e vento. Questa ipotesi è conservativa, dato che trascurare gli effetti di aria e vento causa un incremento del valore della gittata massima della pala distaccata a favore di sicurezza. Gli effetti di portanza sul profilo della pala sono trascurati;

Il moto della pala al momento del distacco è un moto complesso, che dipende strettamente dalle dimensioni della pala, dal suo peso e dalle forze aerodinamiche in gioco. Il modello teorico che meglio descrive il moto della pala è il "moto rotazionale complesso" che permette di descrivere il moto della pala tridimensionalmente. In questa analisi, trascurando gli effetti di aria e vento, il moto della pala distaccata viene descritto attraverso il movimento del punto del centro di massa (baricentro), posto ad $1/3$ della lunghezza di pala. Tali considerazioni sono utili al fine di descrivere un moto dipendente solamente dagli effetti gravitazionali. Tale ipotesi, che non considera effetti di attrito e il moto rotazionale complesso, porta a sovrastimare il valore della gittata a favore di sicurezza; Infine, non si considera alcuna mutazione della velocità del vento durante il volo. La velocità del vento durante il volo è bensì assunta pari a quella al momento del distacco e pari alla velocità massima di funzionamento.

5.2. AEROGENERATORI DI RIFERIMENTO

Gli aerogeneratori che verranno installati presso il nuovo impianto oggetto di questo studio saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Si riportano di seguito le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore (in grassetto i valori necessari per il calcolo della gittata):

POTENZA NOMINALE 6,0 MW

DIAMETRO DEL ROTORE 164 m

LUNGHEZZA DELL'ELICA r_{tip} circa 80 m

CORDA MASSIMA DELL'ELICA 4,5 m

AREA SPAZZATA 22.000 circa m²

ALTEZZA MOZZO H_m 125 m

VELOCITÀ DI ATTIVAZIONE 3 m/s,

VELOCITÀ NOMINALE 10 m/s,

VELOCITÀ DI ARRESTO 25 m/s,

VELOCITÀ ANGOLARE (n) 8,8 giri/minuto

Per il calcolo della gittata, è necessario descrivere il moto parabolico nel centro di massa del corpo. Data la disomogenea distribuzione di massa lungo la pala, una buona approssimazione è considerare che il baricentro di pala è circa a 1/3 della lunghezza di pala. Dunque, per gli aerogeneratori oggetto del presente studio il raggio baricentrico r_g sarà pari a 26.66 m. Nel baricentro vengono quindi descritte la velocità angolare, la velocità periferica ed il moto parabolico. Una volta individuata la gittata massima al raggio baricentrico sarà possibile individuare la gittata massima al "tip" della pala, sommando la lunghezza che vi è tra il "tip" e il raggio baricentrico. Per il calcolo della gittata è stato ipotizzato un numero di giri pari a 8,8 rpm, valore riscontrato da dati tecnici dell'aerogeneratore.

5.3. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}\tag{1}$$

dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t - \frac{1}{2} g t^2\end{aligned}\tag{2}$$

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 $t_{volò}$ tale che $y(t_{volò}) = 0$.

Dalla legge del moto si ottiene:

$$t_{volò} = \frac{v_y + \sqrt{v_y^2 + 2y_0g}}{g}\tag{3}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, 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. Detto 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 del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

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, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa:

$$r_g = (164/2 - 81.0) + 81,0/3 \text{ m} = 28 \text{ m} \quad (4)$$

essendo il diametro del rotore $D = 164 \text{ m}$ e la lunghezza di ciascuna pala $R = 81,0 \text{ m}$ circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare pari a $8,8 \text{ giri/minuto}$.

Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega \cdot r_g = 2\pi n r_g / 60 = 25,79 \text{ m/sec} \quad (5)$$

La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo θ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned} x_0 &= -r_g \cos(\theta) \\ y_0 &= H + r_g \sin(\theta) \\ v_x &= V_g \sin(\theta) \\ v_y &= V_g \cos(\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (125 m).

Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = x(t_{\text{volo}}) \quad (7)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata L in termini di V_g e di θ :

$$L = -r_g \cos(\theta) + \frac{V_g \sin(\theta)}{g} [V_g \cos(\theta) + \sqrt{(V_g^2 \cos^2(\theta) + 2(H + r_g \sin(\theta))g)}] g \quad (8)$$

Nella formula di L sopra riportata, si assumono i seguenti dati: $V_g = 27,01 \text{ m/s}$ $r_g = 29,33 \text{ m}$ $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ $H = 125 \text{ m}$ Il valore massimo della gittata dipenderà dall'angolo θ .

Si noti che, fissato un generico angolo θ , la gittata aumenta quadraticamente con V_g salvo i casi particolari $\theta = +90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari ad r_g .

Come si evidenzia dal grafico, il valore massimo della gittata è pari a 161,65 m, con un angolo di distacco pari a: $\theta = 5,24 \text{ rad}$



Fig.1 Distanza di volo in funzione dell'angolo di distacco

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

- il baricentro della pala è posizionato ad $1/3$ rispetto alla lunghezza della pala;
- 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 è uguale a quella calcolata in precedenza (incrementata del 5% rispetto alla massima di esercizio) il massimo valore della gittata sarà pari al valore calcolato in precedenza, 150.0 m, per $\theta = 1,24$ rad, al quale dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro, ovvero 54.0 m, per un valore complessivo $L_{tot} = 205.00$ m

6. VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Nell'ambito di questa valutazione, si tiene in considerazione del rispetto della suddetta distanza per gli elementi di territorio in cui vi è una alta probabilità di presenza di persone in maniera continuativa nell'arco dell'intera vita utile. Nell'ambito della definizione del layout di progetto, in relazione al rischio che può generare il distacco degli organi rotanti, è stata fatta un'analisi specifica, considerando un buffer pari a 220 m (distanza minima da unità abitative -mitigazione cfr. DM 10.09.2010, $H_{maxWTG} = 220$ m, maggiore del valore di calcolo della gittata massima), dalla quale è evidente che nessuna unità abitativa/recettore sensibile ricade in questo buffer. Medesimo buffer è considerato in relazione alle strade (distanza minima WTG - Strade provinciali e nazionali, mitigazione cfr. DM 10.09.2010, $H_{maxWTG} = 220$ m, maggiore del valore di calcolo della gittata massima) e anche in questo caso, nessuna strada provinciale o nazionale ricade in tale buffer. Studi consolidati in materia hanno mostrato che se si affronta un caso base, si conclude che la probabilità 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 organo rotante che si distacchi dalla WTG.

L'analisi del rischio su cose o persone che hanno una permanenza non continuativa all'interno dell'area di potenziale pericolo di distacco di organi rotanti, considerando che la probabilità di 1 su 1 milione riguarda la permanenza continua durante l'anno, non può che decrementare le probabilità di accadimento dell'evento, mettendola in relazione al tempo reale che il target passa effettivamente entro quel buffer. A titolo di esempio e semplificando le assunzioni in maniera cautelativa, si riporta il seguente esercizio matematico. Se un contadino lavora la sua terra per 3 ore alla settimana, per tutte le settimane dell'anno, all'interno di un raggio di 210 dall'aerogeneratore, vi trascorre circa 156ore/anno, cioè 1,7% del totale delle ore dell'anno. In queste condizioni, il contadino ha una possibilità di 1:178 milioni di essere colpito da un frammento distaccatosi dall'aerogeneratore, 4 volte più improbabile di una cinquina al lotto (1:43,9 milioni). Si può concludere sulla base dell'analisi condotta, che il rischio di incidente legato al distacco degli organi rotanti può definirsi trascurabile.

7. CONCLUSIONI

L'analisi sopra riportata e il lay out scelto dimostrano come tutti gli aerogeneratori si trovino a distanze dagli elementi sensibili superiori rispetto alla gittata massima. Le numerose ipotesi semplificative usate nel calcolo rispetto al caso reale causano anche un aumento del valore reale di gittata massima, pertanto il rischio di impatto causato da parte distaccantesi dal rotore è da considerarsi estremamente basso e per tanto sostenibile.