

REGIONE LAZIO
PROVINCIA DI VITERBO
COMUNE DI TESSENNANO - COMUNE DI ARLENA DI CASTRO

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO NEI
COMUNI DI ARLENA DI CASTRO E TESSENNANO**

Denominazione impianto:

EOLICO ARLENA

Committente:



Energy Wind 1 s.r.l.
Via della Stazione, 36
01033 - Civita Castellana (VT)

WIND ENERGY 1 S.r.l.
Via della Stazione, 36
01033 Civita Castellana (VT)
R.I.a.e. C.F.: 02376810566



Progettazione:



Progettazione impianti
progettazione e sviluppo
energie da fonti rinnovabili

P.I. Lamberto Chiodi
P.I. Danilo Rocco
Dott. Geol. Emma Bernardini
Dott. Agr. Alberto Cardarelli
Dott. Ing. Enzo Alessandrini
Restituzione Grafica AnnaLisa Chiodi



Documento:

TAV. R22

**RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA DI UNA PALA DI UN
AEROGENERATORE**

Revisione:

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	APPROVATO
00	29/06/2021	Prima emissione		

Premessa

Il presente progetto definitivo tratta la realizzazione di un campo eolico costituito da 14 aerogeneratori da 6 MW ciascuno, per una potenza totale pari a 84 MW. L'installazione degli aerogeneratori è prevista nei comuni di Tessennano e Arlena di Castro (VT), esattamente nella località "Macchione", "Capo Terzo", "Cavalline", "Poggio del Terzo" per il Comune di Tessennano e nelle località "Banditaccia", "Montagna Lunga", "Le Mandrie", "Pianacce", "Mandrione", "Mandriuncino", "Spiniccio" per il comune di Arlena di Castro, con opere di connessione ricadenti nel comune di Arlena di Castro, in località "Cioccatello"; infine, il punto finale di allaccio alla RTN è previsto in località "Campo Villano" nel comune di Tuscania.

La società che propone tale iniziativa, al fine di ricavare energia da fonti rinnovabili e all'insegna della transizione ecologia, è la Wind Energy 1 srl, con sede a Civita Castellana (VT), Via della Stazione 36 avente codice fiscale e partita iva 02376810566 (PEC: windenergy1@sicurezzapostale.it)

1. Introduzione

Il presente report tratta la stima della gittata di una pala eolica nel caso di rottura della stessa. Tale situazione, seppur improbabile, è stata analizzata considerando ipotesi cautelative al fine di ottenere risultati conservativi, cioè i più pericolosi.

Nel dettaglio, la pala analizzata appartiene all'aerogeneratore prodotto dalla SIEMENS (modello GAMESA SG 6.0-170), con un'altezza da terra del mozzo (*rotor HUB*) pari a 115 m e potenza equale a 6.0 MW. Il punto di rottura è stato posto in prossimità dell'incastro delle pale con il rotor HUB, che coincide con il punto di maggiore sollecitazione meccanica dovuta, perlopiù, al momento flettente generato dalle forze aerodinamiche delle pale stesse.

Lo studio è stato condotto ipotizzando un angolo "di lancio" variabile, cioè considerando tutti gli angoli possibili di rottura della pala.

2. Equazioni cinematiche

Nel presente capitolo vengono riportati i dati geometrici e cinematici della pala, le ipotesi e i passaggi matematici necessari alla determinazione della legge del moto, e dunque alla gittata, nel caso di rottura della pala.

2.1. Dati geometrici e cinematici degli aerogeneratori

Gli aerogeneratori del campo eolico del progetto in esame, presentano i seguenti dati geometrici:

Diametro del rotore – D	170 m
Diametro del <i>rotor HUB</i> - d	3 m
Lunghezza della pala - l	83.5 m
Altezza da terra del <i>rotor HUB</i> - H	115 m

Tabella 1: Dati geometrici degli aerogeneratori

E i seguenti dati cinematici:

RPM del rotore – min	4.86
RPM del rotore – nom	8.83
RPM del rotore - MAX	10.60

Tabella 2: Dati cinematici degli aerogeneratori

2.2. Ipotesi di calcolo

Le ipotesi che verranno eseguite di seguito saranno cautelative, come già introdotto nell'Introduzione (Capitolo 1); tale scelta condurrà a dei risultati conservativi rispetto al caso reale.

La prima ipotesi che viene effettuata è quella di distacco netto e istantaneo nel punto di incastro della pala al rotor HUB. Tale ipotesi risulta essere particolarmente conservativa in quanto il distacco di un'ala, come di ogni altro elemento meccanico, non avviene mai in maniera netta, bensì si ha una rottura che parte da un lembo (ad esempio bordo d'uscita del profilo alare) e si protrae lungo la sezione fino al lembo opposto (ad esempio bordo d'attacco del profilo alare) in un intervallo di tempo Δt diverso da 0. Al fine di considerare la resistenza che il materiale delle pale esplica durante la rottura (maggiore rispetto al carico critico) e la resistenza aerodinamica della pala durante il suo moto in aria (proporzionale al quadrato della velocità stessa), è possibile ipotizzare una riduzione della velocità tangenziale della pala pari al 30% nel momento della rottura. Inoltre, trascurando la resistenza aerodinamica della pala durante il moto, è possibile approssimare la pala ad un punto posizionato nel baricentro della pala stessa (sistema a 3 gradi di libertà (g.d.l.)); con buona approssimazione, è possibile considerare la posizione del baricentro della pala posto a circa 1/3 della stessa, dunque a una distanza R pari a $R = d\sqrt{2} + l\sqrt{3} = 29.3 \text{ m}$ dal centro di rotazione. Infine, la velocità di rotazione del rotore considerata sarà quella massima riportata dal costruttore (vedi Tabella 2).

Ricapitolando, le ipotesi effettuate sono le seguenti:

1. Distacco netto e istantaneo della pala nel punto di incastro;
2. Riduzione della velocità tangenziale della pala del 30%;
3. Sistema puntiforme con 3 g.d.l.
4. Concentrazione della massa della pala nel suo baricentro, posto a distanza R dal centro di rotazione;
5. Velocità di rotazione del rotore massima.

2.2.1. Considerazioni sulle ipotesi di calcolo

Generalizzando per un attimo il problema, dunque considerando la pala non come un sistema puntiforme, le equazioni del moto che ne determinano la relativa legge sono le seguenti:

	$\begin{cases} M \cdot a = F \\ I \frac{d\omega}{dt} = 0 \end{cases}$	<i>Equazione 1</i>
--	---	--------------------

Dove:

- M è la massa;
- a è l'accelerazione;
- I è il momento d'inerzia;
- ω è la velocità angolare.

Le equazioni riportate nel sistema dell'Equazione 1, che risultano essere rispettivamente la prima e la seconda legge della dinamica, ci permettono di affermare che:

- Il corpo segue una traiettoria determinata dalla posizione del baricentro e dalle forze agenti sul corpo;
- Il corpo, durante la traiettoria precedentemente determinata, gira indisturbato intorno al suo asse principale d'inerzia con una velocità angolare pari a quella iniziale, non influenzando sulla traiettoria che esso compie.

Tali considerazioni sono state effettuate al fine di garantire la validità dell'approssimazione di sistema puntiforme a 3gdl precedentemente effettuata per il calcolo della gittata.

2.3. Moto di un proiettile

Grazie alle ipotesi effettuate nel Paragrafo 2.2, in particolar modo alla ipotesi di sistema puntiforme con 3 g.d.l., è possibile associare al problema in questione il modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante (a causa della mancanza della resistenza aerodinamica) e che compiono un moto noto con il termine: *moto di un proiettile*.

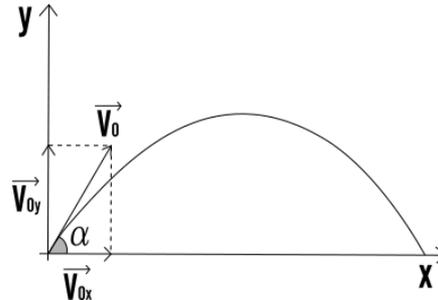


Figura 1

Il moto di un proiettile è dato dalla somma vettoriale di due differenti moti:

- Un moto longitudinale, lungo l'asse x, a velocità costante;
- Un moto trasversale, lungo l'asse z, uniformemente accelerato.

La combinazione di questi due moti fornisce un moto che nel piano X-Z presenta la caratteristica traiettoria parabolica come riportato in figura 1. La gittata è definita come la distanza che separa il punto di lancio del corpo (o proiettile, qualsivoglia) e il punto in cui esso tocca terra.

Considerando dunque un piano cartesiano X-Z ed origine O, è possibile scrivere le seguenti equazioni, che rappresentano le componenti delle accelerazioni lungo gli assi X e Z:

	$\begin{cases} \ddot{x} = 0 \\ \ddot{z} = -g \end{cases}$	Equazione 2
--	---	-------------

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità, pari a circa 9.81 m/s^2 .

Per quanto concerne le condizioni al contorno, il corpo è lanciato dall'origine degli assi con una velocità iniziale v_0 , inclinata rispetto all'asse X di un angolo θ , dunque con una componente lungo X e Lungo Z pari rispettivamente a:

	$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cdot \cos\theta \\ v_{0z} = v_0 \cdot \sin\theta \end{cases}$	Equazione 3
--	--	-------------

A questo punto, integrando l'Eq.2 ed applicando le condizioni al contorno, è possibile ottenere la legge del moto:

	$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0x} \cdot t \\ z(t) = z_0 + v_{0z} \cdot t - 1/2gt^2 \end{cases}$	Equazione 4
--	--	-------------

Ponendo $z = 0$ nella seconda dell'Eq.4 e scartando la soluzione negativa, è possibile ricavare il tempo al quale il corpo tocca terra. Sostituendo il tempo così ottenuto nella prima dell'Eq.4 è infine possibile calcolare la gittata G . Nel dettaglio

	$t _{z=0} = \frac{v_{0z}}{g} + \frac{\sqrt{v_{0z}^2 + 2 \cdot g \cdot z_0}}{g}$	Equazione 5
	$G = x_0 + v_{0x} \cdot t _{z=0}$	Equazione 6

2.4. Moto di una pala

Note le equazioni del moto di un proiettile, è possibile specificare il problema per il caso in esame.

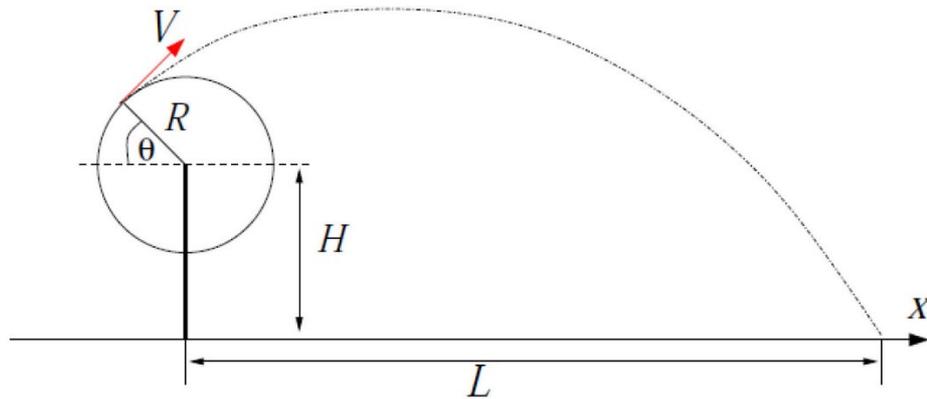


Figura 2

Facendo riferimento allo schema dell'aerogeneratore di Figura 2 e ponendo l'origine degli assi alla base dell'aerogeneratore, si ottengono le seguenti relazioni cinematiche del baricentro della pala prima della rottura della stessa:

	$\begin{aligned} x &= -R \cdot \cos(\omega t) \\ z &= H + R \cdot \sin(\omega t) \end{aligned}$	Equazione 7
--	---	-------------

Dove:

- $R = d\sqrt{2} + l\sqrt{3}$ è la distanza del baricentro della pala dal centro di rotazione;
- H è l'altezza del rotor HUB;
- ω è la velocità di rotazione.

Al fine di calcolare la velocità del baricentro della pala prima della rottura, è necessario derivare nel tempo l'Eq.7, ottenendo:

	$\begin{aligned} v_x &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \\ v_z &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \end{aligned}$	Equazione 8
--	--	-------------

Imponendo il tempo di rottura $t = \bar{t}$, dunque $\omega t = \omega \bar{t} = \theta$, è possibile calcolare le condizioni iniziali, posizione e velocità, del moto della pala. Nel dettaglio, esse risultano essere eguali a:

	$\begin{aligned} x_0 &= -R \cdot \cos(\theta) \\ z_0 &= H + R \cdot \sin(\theta) \\ v_{x_0} &= \frac{d(x)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \sin(\theta) \\ v_{z_0} &= \frac{d(z)}{dt} = R \cdot \omega \cdot \cos(\theta) \end{aligned}$	Equazione 9
--	---	-------------

Sostituendo le condizioni iniziali ottenute nell'Eq.5, è possibile calcolare il tempo di volo della pala, cioè il tempo che intercorre tra il momento della rottura \bar{t} e il momento in cui tocca terra. Nel dettaglio, risulta essere pari a:

	$t _{z=0} = \frac{R \cdot \omega \cdot \cos(\theta)}{g} + \frac{\sqrt{R^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\theta) + 2 \cdot g(H + R \cdot \sin\theta)}}{g}$	Equazione 10
--	---	-----------------

Infine, sostituendo $t|_{z=0}$ ricavato nell'Eq.10, all'interno della prima nell'Eq.4, si ricava la gittata della pala G :

	$G = -R\cos(\theta) + R\omega \sin(\theta) \cdot \frac{1}{g} \left[R\omega \cos(\theta) + \sqrt{R^2\omega^2 \cos^2 \theta + 2g(H + R\sin(\theta))} \right]$	Equazione 11
--	--	-----------------

L'Equazione 11 ci permette, note le caratteristiche geometriche (R, H) e cinematiche (ω) dell'aerogeneratore di calcolare la gittata della pala. È importante notare che la gittata G è funzione dell'angolo θ che la pala presenta nel momento della rottura. Al fine di determinare quale sia l'angolo θ per il quale la gittata G è massima, si procede con il calcolo dei massimi e dei minimi ponendo a 0 la derivata della gittata rispetto all'angolo θ ; cioè:

	$\frac{d(G)}{d\theta} = 0$	Equazione 12
--	----------------------------	-----------------

Che porta al seguente risultato:

	$\frac{\omega R \cos(\theta)(2gH + 3gR \sin(\theta) - \omega^2 R^2 \sin^2(\theta) + \omega^2 R^2 \cos^2(\theta))}{2\sqrt{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta) + 2g(H + R \sin(\theta))}} + \sin(\theta) \left(R - \frac{\omega^2 R^2 \sin(\theta)}{g} \right) + \frac{\omega^2 R^2 \cos^2(\theta)}{g} = 0$	Equazione 13
--	--	-----------------

Ricavando θ dall'Equazione 12, è possibile ottenere gli angoli di rottura della pala, per i quali si ottiene la gittata G massima.

3. Risultati

Sostituendo i dati a nostra disposizione, riportati nel paragrafo 2.1, nella Equazione 13, è possibile ottenere i seguenti risultati:

$$\theta|_{G_{MAX}} = 79.589^\circ \quad \text{per } x \text{ positive}$$

$$\theta|_{G_{MAX}} = 305.219^\circ \quad \text{per } x \text{ negative}$$

Sostituendo gli angoli θ così ottenuti nella Equazione 11, si ottengono le gittate massime sia per le x positive che negative:

$$G_{MAX}(\theta|_{G_{MAX}} = 79.589^\circ) = 125.9m$$

$$G_{MAX}(\theta|_{G_{MAX}} = 305.219^\circ) = -125.9m$$

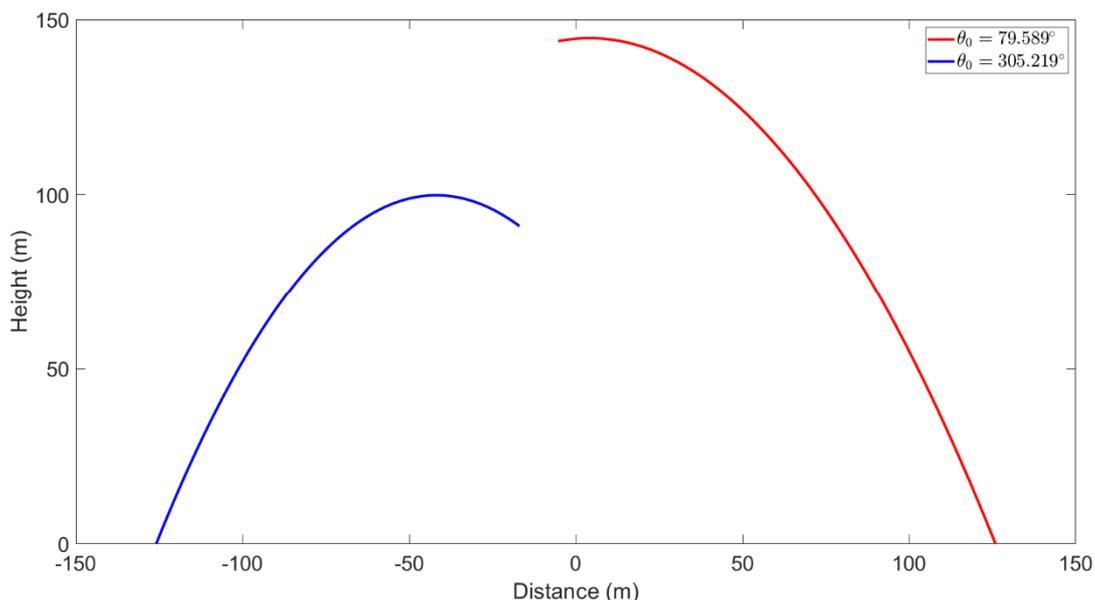


Figura 3: Traiettoria della pala in caso di rottura – Gittata massima

Nella Figura 33 si possono notare le traiettorie della pala in caso di rottura per le x positive, in rosso, e per le x negative in blu.

Per completezza, nella Tabella 3, si riportano i valori della gittata considerando diversi valori dell'angolo θ . Gli stessi risultati sono presentati anche in veste grafica nella XXX, dove l'asse x rappresenta l'angolo θ in gradi mentre l'asse y rappresenta la gittata.

θ - Gradi	θ - Radianti	Seno di θ	Coseno di θ	Gittata (m)
0	0	0	1	-29.3333
5	0.087266	0.087156	0.996195	-13.8632
10	0.174533	0.173648	0.984808	1.75169
15	0.261799	0.258819	0.965926	17.24223
20	0.349066	0.34202	0.939693	32.34914
25	0.436332	0.422618	0.906308	46.83034
30	0.523599	0.5	0.866025	60.46722
35	0.610865	0.573576	0.819152	73.07004
40	0.698132	0.642788	0.766044	84.48203
45	0.785398	0.707107	0.707107	94.58218
50	0.872665	0.766044	0.642788	103.2866
55	0.959931	0.819152	0.573576	110.5485
60	1.047198	0.866025	0.5	116.3566
65	1.134464	0.906308	0.422618	120.7326
70	1.22173	0.939693	0.34202	123.7274
75	1.308997	0.965926	0.258819	125.4163
80	1.396263	0.984808	0.173648	125.8939
85	1.48353	0.996195	0.087156	125.269
90	1.570796	1	6.13E-17	123.6586
95	1.658063	0.996195	-0.08716	121.1835
100	1.745329	0.984808	-0.17365	117.9636
105	1.832596	0.965926	-0.25882	114.114
110	1.919862	0.939693	-0.34202	109.7424
115	2.007129	0.906308	-0.42262	104.9468

120	2.094395	0.866025	-0.5	99.81424
125	2.181662	0.819152	-0.57358	94.42028
130	2.268928	0.766044	-0.64279	88.82893
135	2.356194	0.707107	-0.70711	83.09313
140	2.443461	0.642788	-0.76604	77.25543
145	2.530727	0.573576	-0.81915	71.34895
150	2.617994	0.5	-0.86603	65.39838
155	2.70526	0.422618	-0.90631	59.42099
160	2.792527	0.34202	-0.93969	53.42761
165	2.879793	0.258819	-0.96593	47.42355
170	2.96706	0.173648	-0.98481	41.40936
175	3.054326	0.087156	-0.99619	35.38159
180	3.141593	1.23E-16	-1	29.33333
185	3.228859	-0.08716	-0.99619	23.25479
190	3.316126	-0.17365	-0.98481	17.13371
195	3.403392	-0.25882	-0.96593	10.95584
200	3.490659	-0.34202	-0.93969	4.705312
205	3.577925	-0.42262	-0.90631	-1.63485
210	3.665191	-0.5	-0.86603	-8.0822
215	3.752458	-0.57358	-0.81915	-14.6541
220	3.839724	-0.64279	-0.76604	-21.367
225	3.926991	-0.70711	-0.70711	-28.2347
230	4.014257	-0.76604	-0.64279	-35.2672
235	4.101524	-0.81915	-0.57358	-42.4684
240	4.18879	-0.86603	-0.5	-49.8335
245	4.276057	-0.90631	-0.42262	-57.3457
250	4.363323	-0.93969	-0.34202	-64.973
255	4.45059	-0.96593	-0.25882	-72.6645
260	4.537856	-0.98481	-0.17365	-80.347
265	4.625123	-0.99619	-0.08716	-87.9227
270	4.712389	-1	-1.8E-16	-95.2679
275	4.799655	-0.99619	0.087156	-102.234
280	4.886922	-0.98481	0.173648	-108.652
285	4.974188	-0.96593	0.258819	-114.335
290	5.061455	-0.93969	0.34202	-119.088
295	5.148721	-0.90631	0.422618	-122.719
300	5.235988	-0.86603	0.5	-125.042
305	5.323254	-0.81915	0.573576	-125.896
310	5.410521	-0.76604	0.642788	-125.145
315	5.497787	-0.70711	0.707107	-122.691
320	5.585054	-0.64279	0.766044	-118.476
325	5.67232	-0.57358	0.819152	-112.489
330	5.759587	-0.5	0.866025	-104.765
335	5.846853	-0.42262	0.906308	-95.3843
340	5.934119	-0.34202	0.939693	-84.4735
345	6.021386	-0.25882	0.965926	-72.1981
350	6.108652	-0.17365	0.984808	-58.7594
355	6.195919	-0.08716	0.996195	-44.3872
360	6.283185	-2.5E-16	1	-29.3333

Tabella 3: Gittata della pala per diversi angoli di rottura

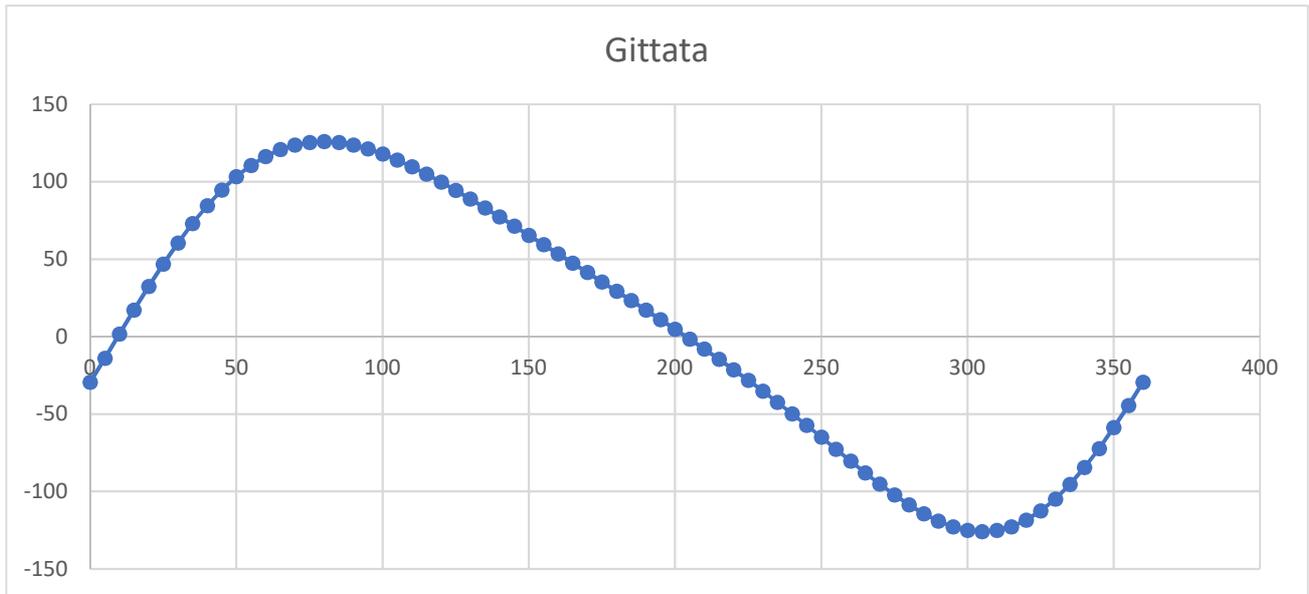


Figura 4: Gittata della pala per diversi angoli di rottura

Si ricorda che i valori della gittata presentati sono stati determinati effettuando una riduzione del 30% della velocità della pala nel momento della rottura, al fine di tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noti i valori di gittata massimi, il cui modulo coincide, date le caratteristiche geometriche della pala, presentate precedentemente, è possibile calcolare il punto in cui cade l'estremità della pala stessa.

Prendendo in considerazione l'ipotesi più pericolosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con il l'estremità alare nella direzione del moto, dunque con la parte più lontana del baricentro verso l'esterno, si ottiene:

$$Punto\ massima\ caduta = G_{MAX} + \frac{2}{3}l = 181.6\ m$$

4. Applicazione dello studio al progetto in esame

Nel caso dell'impianto eolico del progetto in esame è possibile rilevare che gli aerogeneratori sono collocati ad una distanza tale da risultare sempre superiore al valore della gittata che al valore di ribaltamento dell'intera pala, pari a circa 182 m, da:

- Strade provinciali;
- Strade Statali;
- Strade ad elevato scorrimento;
- Abitazioni e edifici.

Infatti, la distanza minima degli aerogeneratori rispetto alle strade risulta essere pari a 220 m, mentre la distanza minima da abitazioni e edifici è pari a 500 m.

Nel

dettaglio,

nella

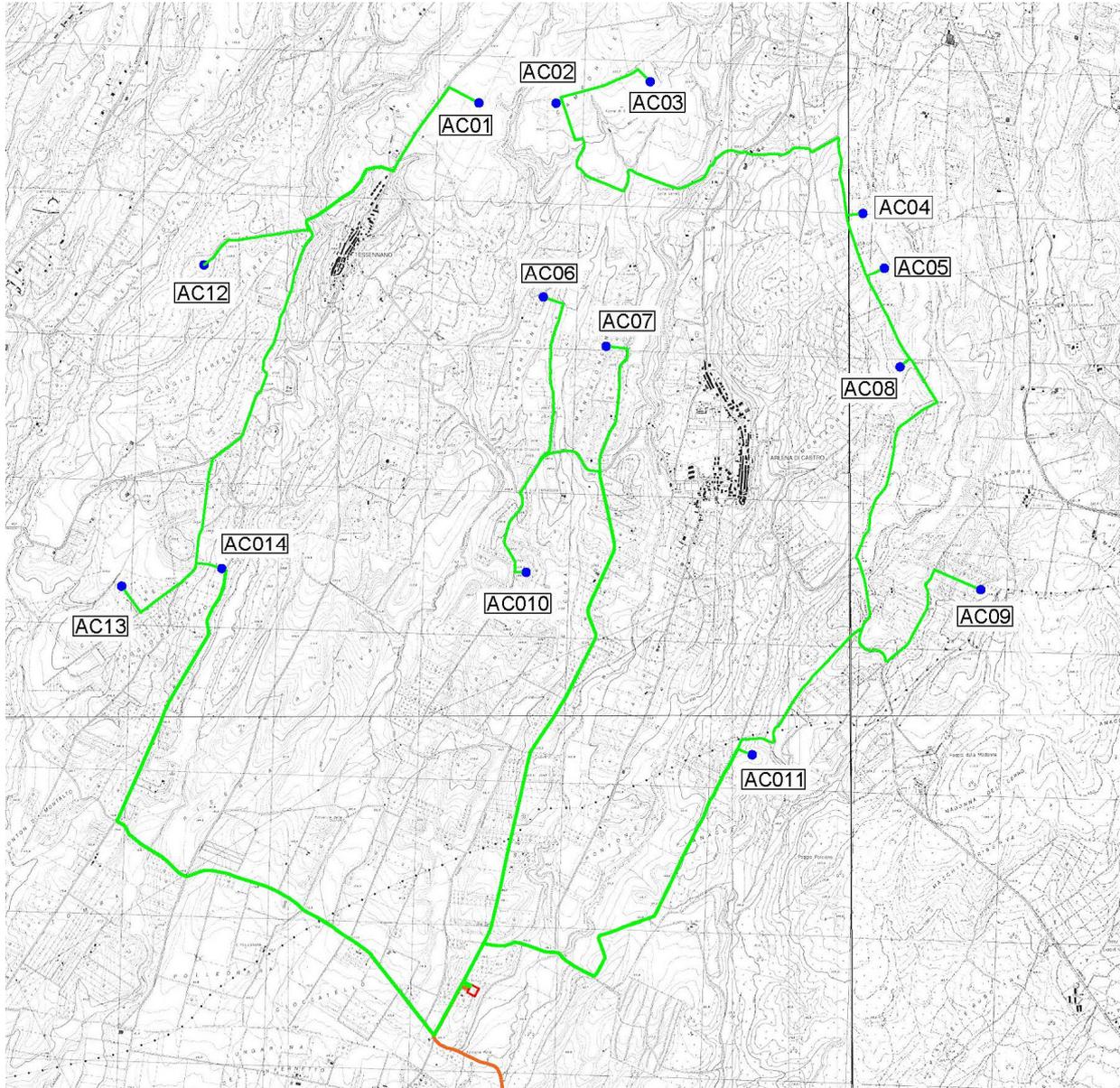


Figura è riportata la cartografia della posizione degli aerogeneratori del progetto in esame rispetto alle strade prossime alle pale stesse. Distanza minima tra AC01 e SP Valle Ripa pari a 220 m.

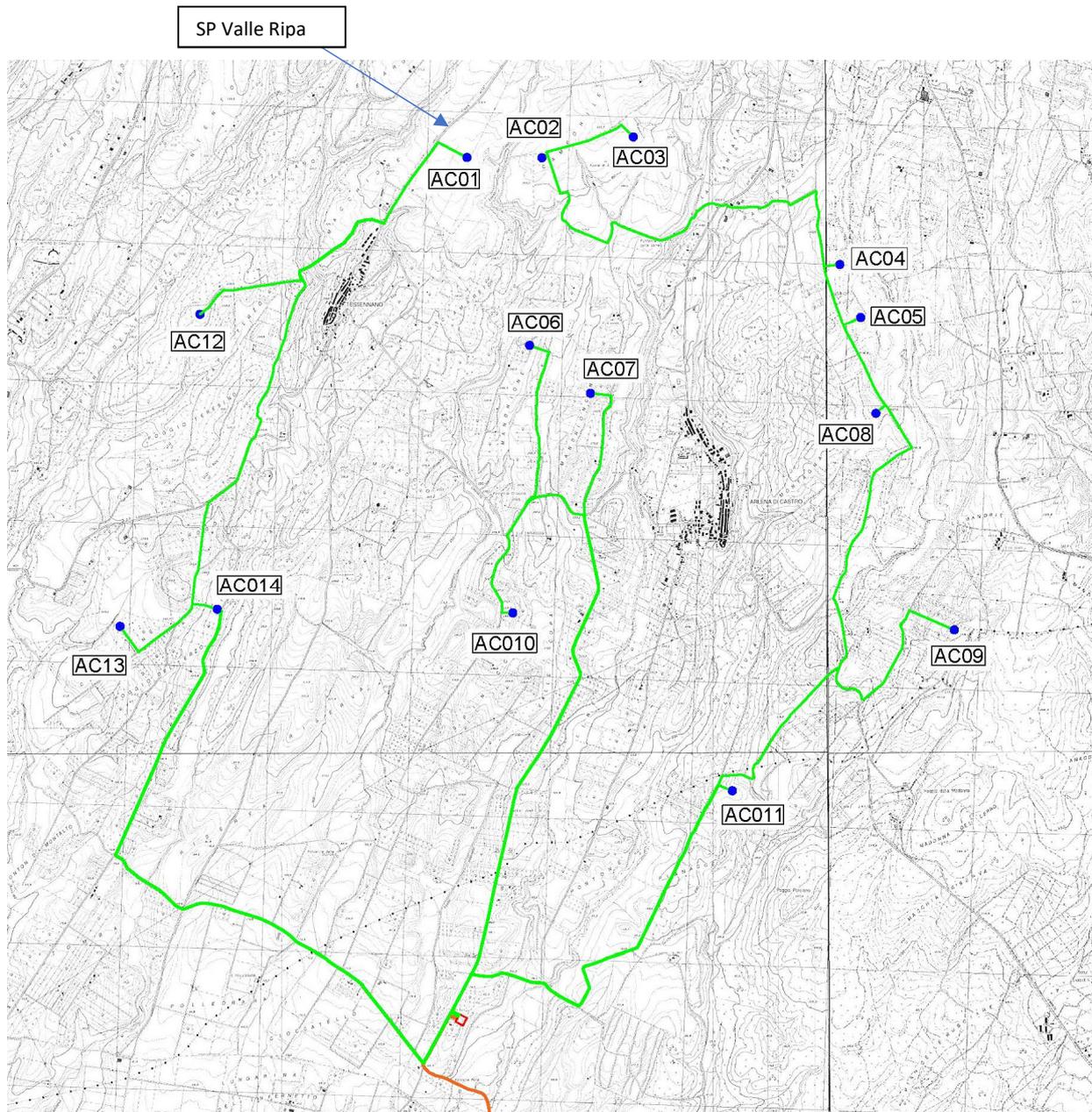


Figura 5: Distanze minime degli aerogeneratori dai ricettori (e.g. Strade, edifici, ...)

5. Conclusioni

Dai risultati riportati nel seguente report è possibile dedurre che la progettazione dell'impianto eolico ha tenuto in debita considerazione i rischi derivanti dall'eventualità, seppure remota, della rottura di una pala.

I risultati riportano che la gittata massima raggiunta dalla pala in caso di rottura in prossimità del mozzo corrisponde a **181.6 metri**. Tali valori sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30 %, al fine di considerare le forze resistenti del materiale e dell'attrito dell'aria.

La distanza minima degli aerogeneratori del progetto da eventuali ricettori risulta essere in ogni caso maggiori rispetto ai valori della gittata. È dunque possibile concludere che nell'ipotesi di rottura di una pala di un aerogeneratore si è in completa sicurezza.

Si tende a sottolineare come il calcolo di gittata di frammenti o porzioni di guscio della pala, risulta essere privo di basi computazionali, in quanto la determinazione delle dimensioni del reale pezzo di ala che si possa distaccare è del tutto aleatorio e non dipende da una causa specifica riconducibili ad una discontinuità, un

difetto di progettazione o di realizzazione della pala. Al fine di oltrepassare questo problema si potrebbe condurre un'analisi del rischio che è un indice funzione della probabilità di occorrenza di una specifica rottura e la gravità delle sue conseguenze. L'attuazione di questa analisi sarebbe possibile soltanto se tutte le informazioni riguardanti questo tipo di eventi fossero disponibili e se la popolazione statistica, cioè il numero di eventi di cui si hanno questo tipo di informazioni, sia notevolmente ampia, cosa che non è verificata nella realtà.

Dalle analisi effettuate è possibile dedurre che il fenomeno di rottura degli organi rotanti di un aerogeneratore risulta altamente improbabile e che per effetto degli agenti atmosferici, la fulminazione accidentale, è possibile ritrovare frammenti di pala, solitamente di piccole dimensioni, a non più di 40-50 metri dalla base della stessa. Inoltre, secondo lo studio della *DEWI OCC* le percentuali di guasti annuali degli aerogeneratori, relativi alla rottura delle pale e/o a parti di esse, hanno una probabilità di verificarsi pari a $4.2 \cdot 10^{-4}$; tale valore risulta essere particolarmente cautelativo: infatti, lo studio statistico è stato condotto su un parco eolico con installazioni molto datate, anche prima del 1984, e considera le innumerevoli rotture causate dalle fulminazioni, dunque di lieve entità e bassissima pericolosità. Inoltre, negli ultimi decenni, i metodi di progettazione e costruzioni, nonché la qualità dei materiali, sono notevolmente migliorati e rispondono a riconosciuti standard internazionali. Pertanto, la possibilità di rottura delle pale e/o di parte di esse è da ritenersi altamente improbabile e dunque i risultati a cui si è giunti sono altamente cautelativi.

Infine, è possibile concludere, a valle delle considerazioni effettuate nel presente report, che il progetto di parco eolico, proposto nel territorio dei Comuni di Tessennano e Arlena di Castro, non pone problemi alla pubblica sicurezza nell'ipotesi di rottura di una pala e/o parte di essa durante il suo esercizio.