



CODE
SCS.DES.R.CIV.ITA.W.5631.001.00

PAGE
1 di/of 17

AVAILABLE LANGUAGE: IT

IMPIANTO EOLICO COPERTINO COMUNI DI COPERTINO-CARMIANO-LEVERANO (LE)

Relazione gittata massima elementi rotanti per rottura accidentale

File name: SCS.DES.R.CIV.ITA.W.5631.001.00_gittata max.docx

00	03/04/2023	EMISSIONE	F. DE CASTRO	F. DE CASTRO	A. SERGI
REV	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
IMPIANTO / Plant IMPIANTO EOLICO COPERTINO		CODE			
<small>GROUP</small>	<small>FUNCION</small>	<small>TYPE</small>	<small>DISCIPLINE</small>	<small>COUNTRY</small>	<small>TEC</small>
SCS	DES	R	C I V I T A W	5 6 3 1	0 0 1 0 0
CLASSIFICATION:			UTILIZATION SCOPE : PROGETTO DEFINITIVO		

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE	3
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	4
3. GLI AEROGENERATORI E IL LORO FUNZIONAMENTO	6
4. ANALISI STORICA DEGLI INCIDENTI	7
5. ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	8
5.1. AEROGENERATORI DI RIFERIMENTO	8
5.2. MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA	9
5.2.1 REGIME DI FUNZIONAMENTO NORMALE.....	9
5.2.2 REGIME IN CONDIZIONI DI ROTTURA	10
5.2.3 RISULTATI.....	13
6. CONCLUSIONI	17

1. INTRODUZIONE

SCS Ingegneria Srl, in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da wpd Salentina 2 srl di redigere il progetto autorizzativo per un impianto eolico nei Comuni di Copertino, Leverano, Carmiano e Nardò, in provincia di Lecce, costituito da 8 aerogeneratori di potenza nominale pari a 4,5 MW, per una potenza totale di 36 MW.

1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

La società proponente è WPD Salentina 2 S.r.l. Il gruppo WPD nasce in Germania, a Brema ed ha un'esperienza decennale nel settore delle energie rinnovabili, in particolare da fonte eolica. WPD è presente, con le sue società controllate in oltre 28 Paesi (Europa, Asia, America del Nord).

Ad oggi il gruppo WPD ha installato oltre 2550 torri eoliche con una capacità totale di circa 5740 MW ed è responsabile del funzionamento e della gestione di 513 parchi eolici, equivalenti a 5,3 GW di potenza installata.

La società WPD Salentina S.r.l. è promotrice di un progetto per l'installazione di un impianto eolico le cui opere civili ed elettriche ricadono nei territori comunali di Copertino, Carmiano, Leverano e Nardò, tutti Comuni appartenenti alla Provincia di Lecce.

La potenza generata dal parco eolico sarà distribuita alla sottostazione utente (SSU) di WPD Salentina 2 S.r.l. di nuova realizzazione dove verrà eseguita una elevazione di tensione di sistema (150/33 kV) per il collegamento in antenna AT a 150 kV su una nuova Stazione Elettrica (SE) 380/150 kV da inserire in entra-esce sulla linea RTN a 380 kV "Erchie 380 – Galatina 380". Inoltre, al fine di razionalizzare l'utilizzo delle strutture di rete, il nuovo stallo a 150 kV da realizzare nella nuova SE della RTN 380/150 kV sarà condiviso con altri impianti di produzione.

Si pone l'accento sin da questa premessa, che la proposta progettuale considera l'installazione di turbine eoliche ad alta efficienza, che potrà costituire una fonte considerevole di produzione di energia, riducendo fortemente l'impronta CO2 equivalente alla produzione della stessa da fonti convenzionali.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito di installazione delle turbine è ubicato a circa 12 km a sud-ovest di Lecce, nel territorio del Comune di Copertino, Leverano e Carmiano, in Provincia di Lecce, Regione Puglia.

La zona interessata dall'impianto si sviluppa in un'area pianeggiante, a circa 14 km dalla costa Ionica e a 23 km da quella Adriatica.

Di seguito è riportato l'inquadramento territoriale dell'area di progetto e la configurazione proposta su ortofoto.

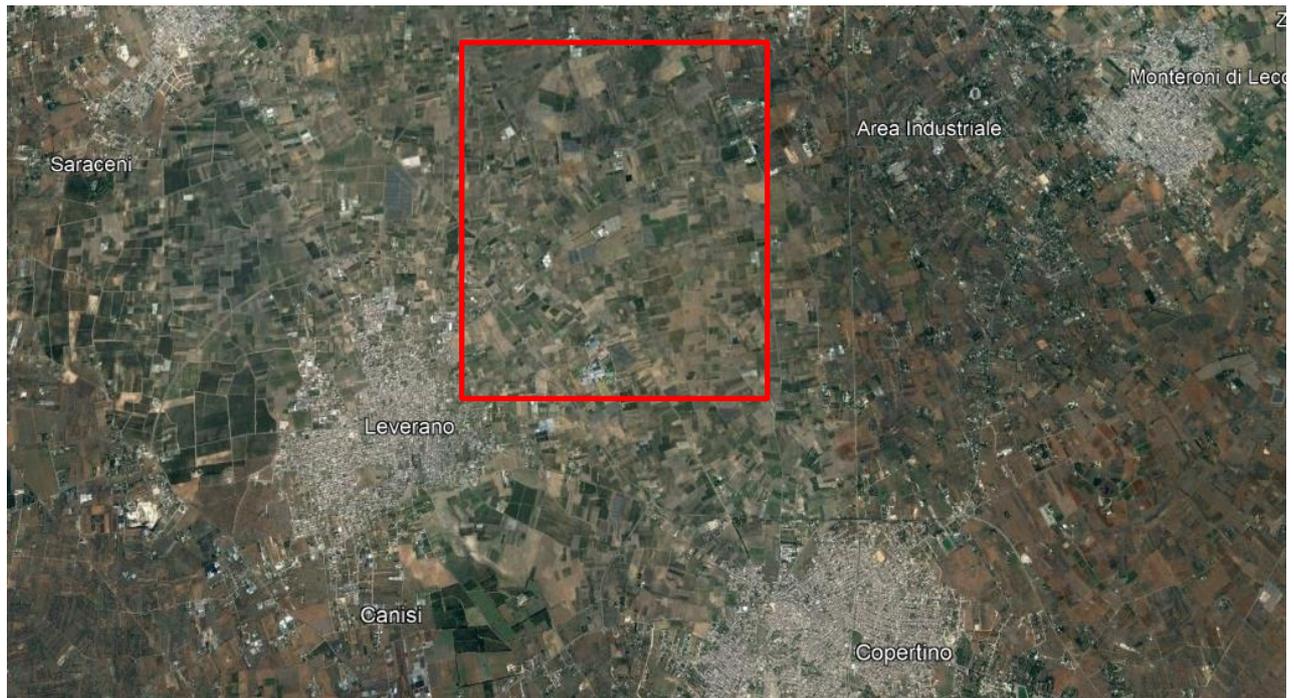


Figura 1: Individuazione su Ortofoto



Figura 2: Layout d'impianto su Ortofoto

La valutazione della gittata massima, è stata condotta considerando l'aerogeneratore tipo Vestas V136-4,5MW HH 82m.

SISTEMA DI RIFERIMENTO UTM WGS 84 - FUSO 34N			RIFERIMENTI CATASTALI		
Posizioni Aerogeneratori					
WTG	EST [m]	NORD [m]	COMUNE	FG	P.LLA
A1	246859,65	4467827,49	CARMIANO	27	263
A2	247410,55	4467093,61	COPERTINO	2	73 41
A3	246206,32	4466790,49	LEVERANO	13	45
A4	248068,30	4466378,01	COPERTINO	7	45
A5	247518,72	4465797,47	COPERTINO	6	325 326
A6	248030,58	4465567,96	COPERTINO	6	262 366
A7	248483,97	4465284,86	COPERTINO	7	157
A8	247718,67	4465003,81	COPERTINO	10	12 14

Tabella 1: Elenco degli aerogeneratori

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.

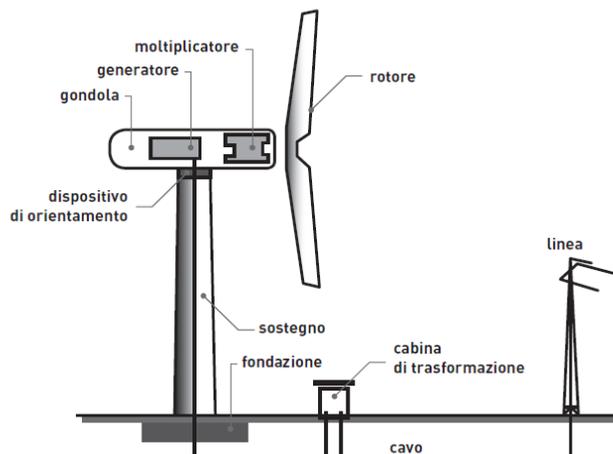


Figura 3: Elementi tipici di un aerogeneratore

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 studio² americano 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.

¹ Branner K., Ghadirian A., "Database about blade faults", 2014

² Lantz E. (NREL), "Operations Expenditures: Historical Trends And Continuing Challenges", 2013

5. ROTTURA PALA E CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

In questa sezione vengono le specifiche dell'aerogeneratore di riferimento e infine il calcolo della gittata massima.

5.1. AEROGENERATORI DI RIFERIMENTO

La valutazione della gittata massima corrispondente al distacco di un elemento del rotore di un aerogeneratore (pala o frammento di differenti dimensioni) e viene effettuato risolvendo il sistema di equazioni rappresentative del moto, nelle quali vengono espressi gli effetti dinamici indotti dalle forze agenti sul corpo stesso (Forza peso, Azione del vento, Reazione di attrito dell'aria), adottando quali condizioni al contorno (cfr. Scheda tecnica VESTAS):

DATI IMPIANTO	CARATTERISTICHE TORRE	ALTEZZA MOZZO H_m	82 m
		DIAMETRO DEL ROTORE	136 m
		NUMERO DI PALE	3
		VELOCITÀ DI ARRESTO	32 m/s
		VELOCITÀ DI ROTAZIONE ROTORE (r.p.m.)	10,4 r.p.m.
	CARATTERISTICHE DELLA PALA	LUNGHEZZA	66,7 m
		SUPERFICIE MAESTRA	176,8 m ²
		PESO	15775 Kg
		CORDA MASSIMA	4,1 m
		CORDA al 90% di L	1,2 m

Tabella 2: Caratteristiche principali dell'aerogeneratore

Oltre alla valutazione della gittata massima della pala, nel presente studio sarà analizzato anche il distacco del frammento di lunghezza 5 metri e 10 metri.

CARATTERISTICHE DEL FRAMMENTO	FRAMMENTO DI 5m	LUNGHEZZA	5 m
		SUPERFICIE MAESTRA	9,4 m ²
		PESO	495 Kg
	FRAMMENTO DI 10m	LUNGHEZZA	10 m
		SUPERFICIE MAESTRA	19,5 m ²
		PESO	1125 Kg

Tabella 3: Caratteristiche principali del frammento

CARATTERISTICHE AMBIENTALI	LOCALITA' COPERTINO (LE)
	TERRITORIO PIANEGGIANTE 40m s.l.m.
	DENSITA' DELL'ARIA 1,12 Kg/m ³

Tabella 4: Caratteristiche ambientali

5.2. MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA

Nello specifico caso della valutazione della gittata massima della pala o di un frammento di essa vengono considerate come condizioni di funzionamento al momento del distacco quelle che si riferiscono alla massima intensità del vento prima del corrispondente alla massima velocità prima che le pale vengano automaticamente poste in stallo (32 m/s) ed alla massima velocità di rotazione del rotore (10.4 r.p.m.), rappresentative di ipotesi cautelative perché corrispondenti a valori dei parametri fondamentali che massimizzano la gittata.

Adottando il sistema di riferimento riportato "Figura 4: Elementi tipici di un aerogeneratore", con:

- Asse X coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre e ortogonale all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Y coincidente con la retta orizzontale passante per la base della torre, ma parallelo all'asse di rotazione delle pale,
- Asse Z coincidente con l'asse della torre,

è possibile analizzare le condizioni di moto della pala o di un suo frammento corrispondenti al funzionamento normale dell'aerogeneratore ed al caso di distacco di un elemento del rotore.

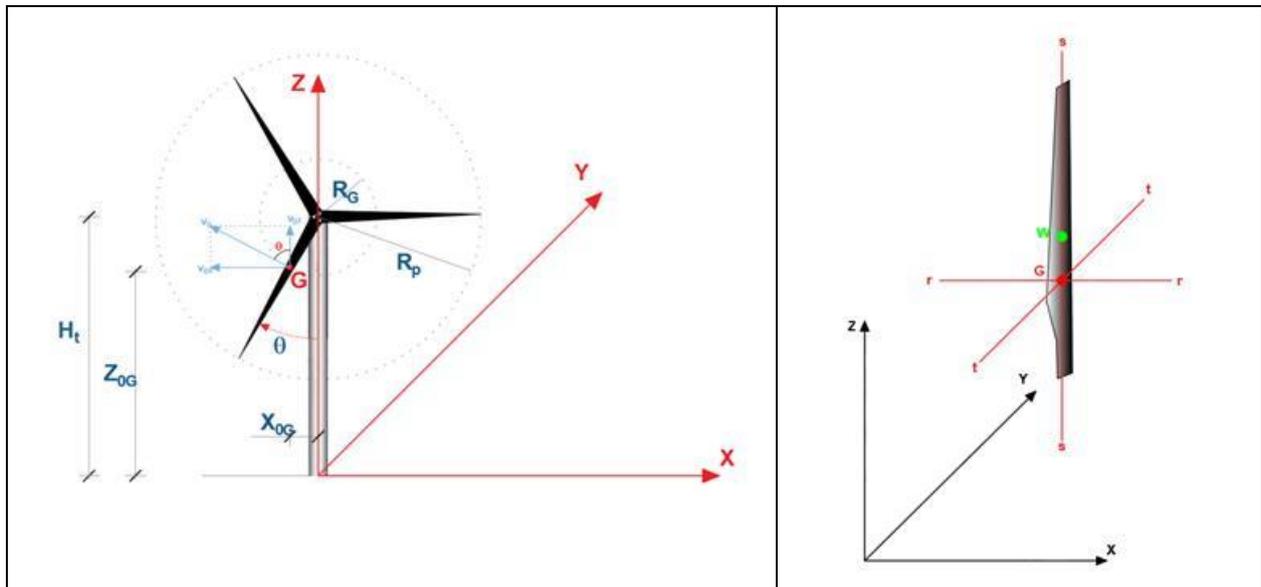


Figura 4: Elementi tipici di un aerogeneratore

5.2.1 REGIME DI FUNZIONAMENTO NORMALE

In condizioni di regime normale il vento che agisce in direzione ortogonale al piano delle pale, secondo una direzione parallela all'asse Y ($v_w = v_{wy}$), induce il moto rotatorio delle pale che ruotano nel piano XZ con velocità angolare costante ω descrivendo una circonferenza di raggio R_p , mentre il baricentro G della singola pala descrive, invece, una circonferenza di raggio R_g , usualmente ritenuto pari a circa $1/3$ di R_p (baricentro, ubicato a circa $1/3$ della lunghezza della pala). La pala non subisce rotazioni rispetto agli assi r-r, s-s, t-t.

In tali condizioni le caratteristiche geometriche e cinematiche del moto del baricentro di una specifica pala possono essere espresse in funzione dell'angolo θ , formato tra l'asse della torre e l'asse longitudinale della pala:

- la posizione del baricentro G (\mathbf{X}_{0G} , \mathbf{Y}_{0G} , \mathbf{Z}_{0G}):

$$X_{0G} = R_G \sin \theta ; Y_{0G} = 0 ; Z_{0G} = H_t - R_G \cos \theta \quad \text{con } R_G = \frac{1}{3} R_p \quad (1)$$

- la velocità \mathbf{V}_{0G} del baricentro G ha direzione ortogonale all'asse longitudinale della pala, in quanto tangente alla circonferenza di raggio R_G , verso coerente con quello di rotazione ω e componenti \mathbf{v}_{0x} , \mathbf{v}_{0y} , \mathbf{v}_{0z} :

$$v_{0x} = -v_{0G} \sin \theta ; v_{0y} = 0 ; v_{0z} = v_{0G} \cos \theta \quad \text{con } v_{0G} = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_G}{60} \quad (2)$$

Al variare della posizione della pala, descritta dall'angolo θ , cambiano, quindi, le condizioni cinematiche e la posizione del baricentro G.

5.2.2 REGIME IN CONDIZIONI DI ROTTURA

In condizioni di distacco della pala o di un suo frammento, le relazioni precedentemente descritte e le relative grandezze fisiche che esse rappresentano corrispondono solo alle condizioni di inizio distacco, coincidenti con l'origine dei tempi ($t=0$), mentre il resto del campo di moto ($t>0$) richiede una trattazione più complessa nella quale viene considerata l'analisi tridimensionale del moto rotazionale di un corpo di dimensioni non trascurabili che si muove ruotando attorno al proprio baricentro rispetto ai tre assi ortogonali di riferimento (r-r, s-s, t-t) e traslando nelle direzioni degli assi X, Y, Z.

Nel caso della stima del valore della gittata massima, possono essere utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso. Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili, ma garantisce ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

L'elemento considerato, al momento del distacco ($t=0$), presenta le caratteristiche cinematiche e geometriche descritte in precedenza (equaz. 1 e 2), ma su di esso agiscono anche:

- la forza peso F_g , che ha direzione verticale Z e verso contrario a quello dell'asse Z

$$F_g = m \cdot g \quad \text{in cui } \mathbf{m} \text{ è la massa della pala e } \mathbf{g} \text{ è l'accelerazione di gravità} \quad (3)$$

- la resistenza aerodinamica \mathbf{F}_v che ha direzione analoga a quella del vettore velocità \mathbf{V} di traslazione della pala, ma verso contrario, scomponibile nelle sue componenti principali, corrispondenti al moto traslatorio nel piano X-Z ed Y-Z

$$F_{xz} = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot v_{xz}^2 ; F_y = -\frac{1}{2} C \cdot \rho \cdot S \cdot (w - v_y)^2 \quad (4)$$

assumendo le ipotesi di regime turbolento

In cui:

$$v_{xz} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad \text{con} \quad \tan \beta = \frac{v_z}{v_x} \quad (5)$$

E quindi:

$$F_x = F_{xz} \cdot \cos \beta \quad ; \quad F_z = F_{xz} \cdot \sin \beta \quad (6)$$

È bene sottolineare che tali espressioni corrispondono all'assunzione che la pala o il frammento nel loro moto, ruotino progressivamente attorno al loro asse t-t, conservando sempre una direzione ortogonale al vettore velocità \mathbf{v}_{xz} .

Avendo indicato con:

- **C** il coefficiente di resistenza aerodinamica che è assunto pari a 0.82, sia per la pala che per un suo frammento, corrispondente al valore relativo ad un elemento cilindrico allungato,
- ρ la densità dell'aria, che è funzione della temperatura e della quota sul livello del mare ed è assunta cautelativamente pari a 1.2 Kg/m³,
- **S** la superficie maestra della pala ortogonale alla direzione del moto,
- **v** la velocità di traslazione della pala, tangente alla traiettoria nel punto considerato,
- **w** la velocità del vento assunta pari a 32 m/s, corrispondente alla massima velocità prima che vengano automaticamente poste in stallo le pale,
- ω la velocità di rotazione della pala assunta pari a 10.4 giri/min, corrispondente alla massima velocità di rotazione possibile per il tipo di aerogeneratore considerato.

Quindi, applicando il secondo principio della dinamica, è possibile scrivere, nel generico istante **t**, le equazioni di moto in ciascuna delle direzioni principali:

- Lungo la direzione X, sul corpo di massa **m** dotato di una certa velocità \mathbf{v}_x agirà l'azione della resistenza dell'aria \mathbf{F}_x (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione \mathbf{a}_x

$$m \cdot a_x(t) = -F_{xz}(t) \cdot \cos \beta(t) \quad (7)$$

- Lungo la direzione Y, sul corpo di massa **m** dotato di una certa velocità \mathbf{v}_y agirà l'azione della resistenza dell'aria \mathbf{F}_y (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione \mathbf{a}_y

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t) \quad (8)$$

- Lungo la direzione Z, sul corpo di massa **m** dotato di una certa velocità \mathbf{v}_z agiranno l'azione della resistenza dell'aria \mathbf{F}_z (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e l'azione della forza peso $-\mathbf{m} \cdot \mathbf{g}$, quindi il corpo subisce un'accelerazione \mathbf{a}_z

$$m \cdot a_z(t) = -F_{xz}(t) \cdot \sin \beta(t) - m \cdot g \quad (9)$$

Che permettono di ricavare i valori delle accelerazioni \mathbf{a}_x , \mathbf{a}_y , \mathbf{a}_z , nelle direzioni degli assi principali di riferimento X,Y,Z.

Conseguentemente le componenti della velocità **v** risultano espresse dalle relazioni:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t \quad (10)$$

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t \quad (11)$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

E le componenti dello spostamento dalle relazioni:

$$X(t + \Delta t) = X(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x(t) \cdot \Delta t^2 \quad (13)$$

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y(t) \cdot \Delta t^2 \quad (14)$$

$$Z(t + \Delta t) = Z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_z(t) \cdot \Delta t^2 \quad (15)$$

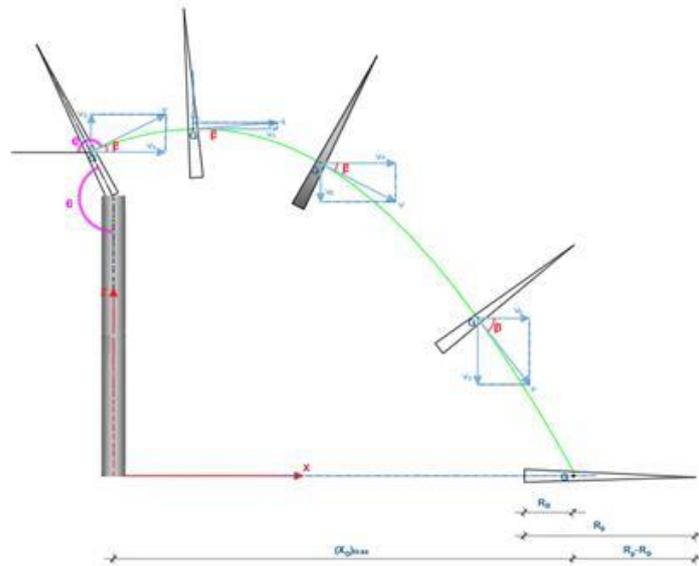


Figura 5: Sistema di riferimento adottato

Che descrivono le caratteristiche del moto della pala o del frammento nel generico istante di tempo considerato t e che possono essere integrate, a partire dall'istante di distacco assunto pari a zero ($t_0=0$), adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo (nel seguito considerato pari a 0.1 s).

In tale modo si ricavano le coordinate (X_t, Y_t, Z_t) della traiettoria e le caratteristiche cinematiche del moto ($v_{xt}, v_{yt}, v_{zt}, a_{xt}, a_{yt}, a_{zt}$) in ogni istante e si valuta il tempo t_v (tempo di volo) per il quale il corpo giunge al suolo in corrispondenza del punto più lontano di coordinate ($X_{max}, Y_{tv}, Z_{tv}=0$).

Ricavate le coordinate del punto di atterraggio della pala o del frammento è possibile valutare la distanza vettoriale di detto punto dall'origine degli assi (0,0,0), coincidente con la base della torre, attraverso la relazione:

$$L_{tv} = \sqrt{X_{tv}^2 + Y_{tv}^2} \quad (16)$$

La Gittata Vettoriale si ottiene quindi sommando, al valore L_{tv} ricavato, la distanza tra l'estremità dell'elemento ed il suo baricentro:

$$Gittata Vettoriale Pala = L_{tv} + L_p - R_{Gp} \quad (17)$$

$$Gittata Vettoriale Frammento = L_{tv} + L_p - R_{Gf} \quad (18)$$

Indicando con il pedice **p** i termini riferiti alla pala e con il pedice **f** quelli riferiti al frammento.

È bene sottolineare che, a vantaggio di sicurezza, la posizione del baricentro dell'intera pala è stata ipotizzata a $1/3 L_p$ dalla base della pala (forma triangolare), mentre nel caso del frammento il baricentro è stato ipotizzato a $1/2 L_f$ (forma rettangolare), assumendo così una maggiore velocità tangenziale al momento di distacco.

Al variare della posizione assunta dalla pala (angolo γ) nell'istante del distacco ($t_0=0$) cambiano le condizioni iniziali (X_{0G} , Y_{0G} , Z_{0G}) e, con esse, tutti i parametri che definiscono la traiettoria seguita dalla pala stessa e, quindi, la distanza massima del punto di caduta dall'asse della torre stessa.

La stima della Gittata Vettoriale Massima è stata ottenuta ripetendo il calcolo per differenti angoli iniziali γ ed individuando i parametri relativi alle condizioni più sfavorevoli.

5.2.3 RISULTATI

Considerando che il distacco delle porzioni di pala interessa la parte più estrema, prossimità della punta, e che tale frammento abbia come dimensioni quelle riportate in **Tabella 3: Caratteristiche principali del frammento**, si ottengono i valori di gittata riportati in **Tabella 5: Gittata massima**, relativi alle due ipotesi di frammento di lunghezza pari a 5 m e di frammento della lunghezza di 10 m.

Parametro	u.m.	Pala intera	Frammento	
			10.0	5.0
Lunghezza	[m]	66.7	10.0	5.0
Peso	[kg]	15775	1125	495
Superficie effic.	[m ²]	176.8	19.5	9.4
Angolo iniziale	[°]	45	56	59
Tempo di volo	[s]	6.1	9	9.3
Gittata massima	[m]	158.9	236.2	235.3

Tabella 5: Gittata massima

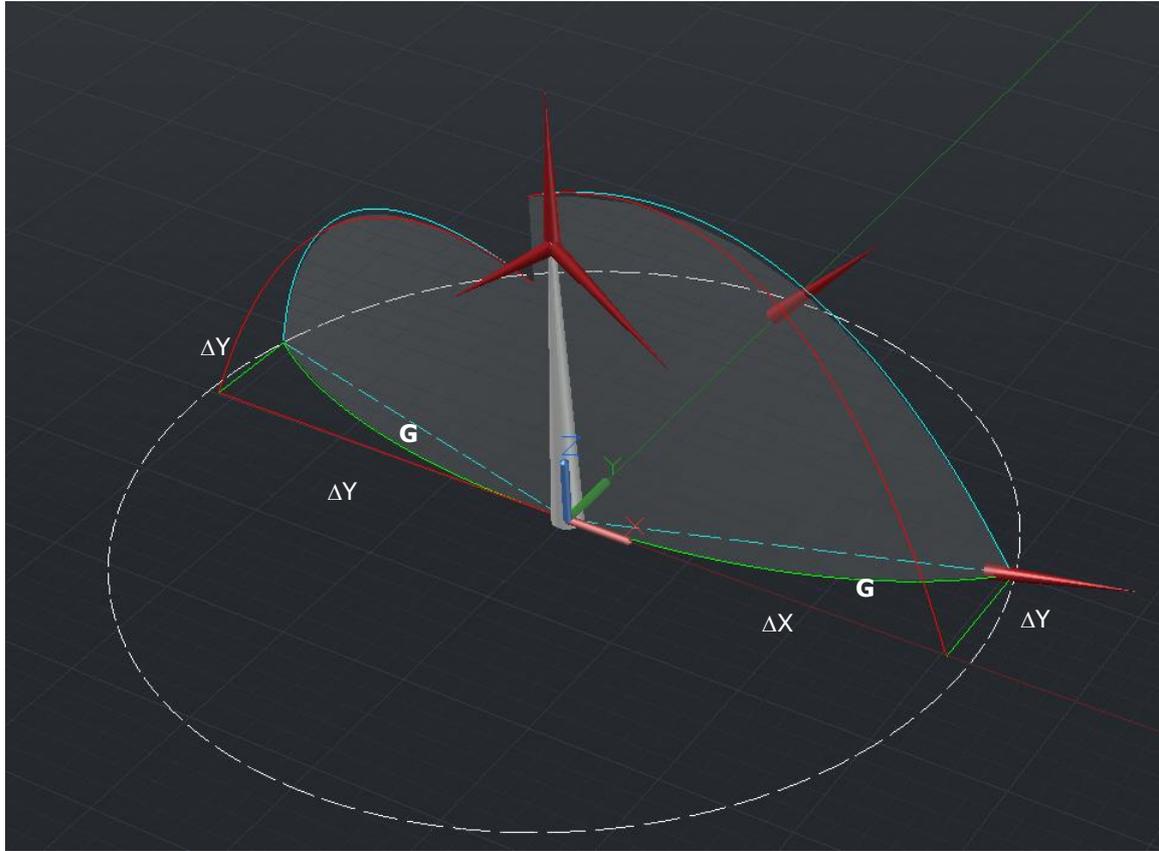


Figura 6: Andamento della pala o del frammento nello spazio

A seguire si riporta una sintesi dei risultati ottenuti.

Gittata pala intera			T volo	Gittata	XG	YG	ZG	T volo	Gittata	XG	YG	ZG
			t [s]	m	m	m	m	t [s]	m	m	m	m
Lunghezza pala/frammento L	66,7	m	0	61,1	-16,6	0,0	65,4	3,1	112,2	-65,0	19,3	70,3
Diametro	136	m	0,1	62,9	-18,4	0,0	67,1	3,2	113,8	-66,3	20,4	69,0
Raggio circonferenza rotore RP	68	m	0,2	64,7	-20,2	0,1	68,7	3,3	115,4	-67,6	21,5	67,5
Distanza baricentro da asse RG	23,53	m	0,3	66,4	-22,0	0,2	70,3	3,4	117,1	-69,0	22,6	66,0
Altezza Mozzo	82	m	0,4	68,2	-23,7	0,4	71,6	3,5	118,7	-70,3	23,8	64,4
Angolo asse torre e asse long.	180	°	0,5	69,9	-25,4	0,6	72,9	3,6	120,3	-71,6	25,0	62,7
Pala θ			0,6	71,6	-27,1	0,9	74,1	3,7	121,9	-72,9	26,2	60,9
Coefficiente di resistenza aerodinamica C	0,82		0,7	73,3	-28,8	1,2	75,2	3,8	123,5	-74,1	27,4	59,1
			0,8	75,0	-30,5	1,6	76,1	3,9	125,1	-75,4	28,7	57,1
Densità dell'aria ρ [kg/m³]	1,12	Kg/m³	0,9	76,6	-32,1	2,0	77,0	4	126,7	-76,6	30,0	55,1
			1	78,3	-33,7	2,4	77,7	4,1	128,3	-77,8	31,3	53,1
Superficie pala ort. Moto S	176,8	m²	1,1	79,9	-35,3	2,9	78,3	4,2	130,0	-79,0	32,6	50,9
			1,2	81,6	-36,9	3,4	78,8	4,3	131,6	-80,2	33,9	48,7
Velocità del vento [m/s] w	32	m/s	1,3	83,2	-38,5	4,0	79,3	4,4	133,2	-81,4	35,2	46,4
			1,4	84,8	-40,1	4,5	79,6	4,5	134,8	-82,6	36,6	44,0
Massa del corpo m	15775	Kg	1,5	86,4	-41,7	5,2	79,8	4,6	136,4	-83,7	38,0	41,6
			1,6	88,1	-43,2	5,8	79,9	4,7	138,0	-84,9	39,4	39,1
Velocità angolare ω [rpm]	10,4	giri/min	1,7	89,7	-44,7	6,5	80,0	4,8	139,6	-86,0	40,8	36,6
			1,8	91,3	-46,3	7,2	79,9	4,9	141,2	-87,1	42,2	34,0
Δt [s]	0,1	s	1,9	92,9	-47,8	8,0	79,7	5	142,8	-88,1	43,7	31,3
			2	94,5	-49,3	8,8	79,5	5,1	144,4	-89,2	45,1	28,6
			2,1	96,1	-50,7	9,6	79,1	5,2	146,1	-90,3	46,6	25,8
			2,2	97,7	-52,2	10,4	78,6	5,3	147,7	-91,3	48,1	22,9
GITTATA MASSIMA [m]	158,9	m	2,3	99,3	-53,7	11,3	78,1	5,4	149,3	-92,3	49,6	20,0
			2,4	100,9	-55,1	12,2	77,4	5,5	150,9	-93,3	51,1	17,1
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]	45,0	°	2,5	102,6	-56,6	13,2	76,7	5,6	152,5	-94,3	52,7	14,1
			2,6	104,2	-58,0	14,1	75,9	5,7	154,1	-95,3	54,2	11,0
TEMPO DI VOLO [s]	6,0	s	2,7	105,8	-59,4	15,1	74,9	5,8	155,7	-96,2	55,8	7,9
			2,8	107,4	-60,8	16,1	73,9	5,9	157,3	-97,2	57,4	4,8
			2,9	109,0	-62,2	17,1	72,8	6	158,9	-98,1	59,0	1,6
			3	110,6	-63,6	18,2	71,6					

Tabella 6: Gittata massima pala

Gittata frammento L=5m			T volo	Gittata	XG	YG	ZG	T volo	Gittata	XG	YG	ZG
Lunghezza pala/frammento L	5	m	t [s]	m	m	m	m	t [s]	m	m	m	m
Diametro	136	m	0	58,6	-56,1	0,0	48,3	4,6	154,1	-142,0	53,2	112,9
Raggio circonferenza rotore RP	68	m	0,1	62,2	-59,7	0,0	54,1	4,7	155,9	-143,2	55,0	111,7
Distanza baricentro da asse RG	65,5	m	0,2	65,6	-63,1	0,2	59,6	4,8	157,7	-144,4	56,8	110,4
Altezza Mozzo	82	m	0,3	68,7	-66,2	0,4	64,6	4,9	159,4	-145,6	58,7	109,0
			0,4	71,7	-69,2	0,7	69,3	5	161,2	-146,7	60,5	107,5
Angolo asse torre e asse long. Pala θ	59	°	0,5	74,6	-72,1	1,0	73,6	5,1	163,0	-147,8	62,4	105,9
			0,6	77,3	-74,8	1,5	77,6	5,2	164,7	-148,9	64,3	104,3
Coefficiente di resistenza aerodinamica C	0,82		0,7	79,9	-77,4	2,0	81,4	5,3	166,5	-150,0	66,2	102,6
			0,8	82,4	-79,9	2,5	84,9	5,4	168,2	-151,1	68,2	100,9
Densità dell'aria ρ [kg/m³]	1,12	Kg/m³	0,9	84,9	-82,3	3,2	88,2	5,5	170,0	-152,1	70,1	99,0
			1	87,2	-84,6	3,9	91,3	5,6	171,8	-153,2	72,1	97,2
Superficie pala ort. Moto S	9,4	m²	1,1	89,5	-86,9	4,6	94,2	5,7	173,5	-154,2	74,0	95,2
			1,2	91,7	-89,0	5,4	96,9	5,8	175,3	-155,2	76,0	93,2
Velocità del vento [m/s] w	32	m/s	1,3	93,9	-91,1	6,2	99,4	5,9	177,0	-156,1	78,0	91,1
			1,4	96,0	-93,2	7,1	101,7	6	178,8	-157,1	80,0	89,0
Massa del corpo m	495	Kg	1,5	98,0	-95,2	8,1	103,9	6,1	180,5	-158,0	82,1	86,8
			1,6	100,0	-97,1	9,0	105,9	6,2	182,3	-158,9	84,1	84,6
Velocità angolare ω [rpm]	10,4	giri/min	1,7	102,0	-99,0	10,1	107,8	6,3	184,1	-159,8	86,1	82,3
			1,8	104,0	-100,9	11,1	109,6	6,4	185,8	-160,7	88,2	79,9
Δt [s]	0,1	s	1,9	105,9	-102,7	12,2	111,2	6,5	187,6	-161,6	90,3	77,6
			2	107,8	-104,4	13,4	112,6	6,6	189,3	-162,4	92,3	75,1
			2,1	109,7	-106,2	14,6	114,0	6,7	191,1	-163,2	94,4	72,7
GITTATA MASSIMA [m]	235,3	m	2,2	111,5	-107,9	15,8	115,2	6,8	192,8	-164,0	96,5	70,1
			2,3	113,4	-109,5	17,0	116,3	6,9	194,6	-164,8	98,6	67,6
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]	59,0	°	2,4	115,2	-111,2	18,3	117,2	7	196,3	-165,6	100,8	65,0
			2,5	117,0	-112,8	19,6	118,1	7,1	198,1	-166,3	102,9	62,4
TEMPO DI VOLO [s]	9,2	s	2,6	118,8	-114,4	21,0	118,9	7,2	199,8	-167,0	105,0	59,7
			2,7	120,6	-115,9	22,4	119,5	7,3	201,6	-167,7	107,2	57,0
			2,8	122,4	-117,5	23,8	120,0	7,4	203,3	-168,4	109,4	54,3
			2,9	124,1	-119,0	25,2	120,5	7,5	205,1	-169,1	111,5	51,5
			3	125,9	-120,5	26,7	120,8	7,6	206,8	-169,8	113,7	48,7
			3,1	127,7	-122,0	28,1	121,0	7,7	208,6	-170,4	115,9	45,9
			3,2	129,4	-123,4	29,7	121,1	7,8	210,3	-171,0	118,1	43,0
			3,3	131,2	-124,9	31,2	121,2	7,9	212,1	-171,6	120,3	40,2
			3,4	133,0	-126,3	32,8	121,1	8	213,9	-172,2	122,5	37,3
			3,5	134,7	-127,7	34,3	120,9	8,1	215,6	-172,8	124,7	34,3
			3,6	136,5	-129,1	35,9	120,6	8,2	217,4	-173,4	127,0	31,4
			3,7	138,3	-130,5	37,6	120,3	8,3	219,2	-173,9	129,2	28,4
			3,8	140,0	-131,8	39,2	119,8	8,4	220,9	-174,5	131,5	25,4
			3,9	141,8	-133,1	40,9	119,3	8,5	222,7	-175,0	133,7	22,4
			4	143,5	-134,5	42,6	118,6	8,6	224,5	-175,5	136,0	19,4
			4,1	145,3	-135,8	44,3	117,9	8,7	226,3	-176,0	138,3	16,4
			4,2	147,1	-137,0	46,0	117,1	8,8	228,1	-176,5	140,5	13,3
			4,3	148,8	-138,3	47,8	116,2	8,9	229,9	-176,9	142,8	10,3
			4,4	150,6	-139,6	49,6	115,2	9	231,7	-177,4	145,1	7,2
			4,5	152,4	-140,8	51,3	114,1	9,1	233,5	-177,8	147,4	4,1
								9,2	235,3	-178,3	149,7	0,9

Tabella 7: Gittata massima frammento 5 m

Gittata frammento L=10m			T volo	Gittata	XG	YG	ZG	T volo	Gittata	XG	YG	ZG
Lunghezza frammento Lf	10	m	t [s]	m	m	m	m	t [s]	m	m	m	m
Diametro	136	m	0	57,2	-52,2	0,0	46,8	4,6	160,0	-146,6	50,4	107,6
Raggio circonferenza rotore RP	68	m	0,1	61,0	-56,0	0,0	52,3	4,7	161,8	-147,9	52,1	106,4
Distanza baricentro da asse RG	63	m	0,2	64,5	-59,5	0,2	57,4	4,8	163,7	-149,3	53,9	105,0
Altezza Mozzo	82	m	0,3	67,9	-62,9	0,4	62,1	4,9	165,5	-150,5	55,7	103,6
			0,4	71,1	-66,1	0,6	66,5	5	167,3	-151,8	57,5	102,1
Angolo asse torre e asse long.	56	°	0,5	74,1	-69,1	1,0	70,7	5,1	169,2	-153,1	59,3	100,5
Pala θ			0,6	77,1	-72,1	1,4	74,5	5,2	171,0	-154,3	61,1	98,8
Coefficiente di resistenza aerodinamica C	0,82		0,7	79,9	-74,9	1,8	78,2	5,3	172,8	-155,5	62,9	97,1
			0,8	82,6	-77,6	2,3	81,5	5,4	174,6	-156,7	64,8	95,3
Densità dell'aria ρ [kg/m³]	1,12	Kg/m³	0,9	85,3	-80,2	2,9	84,7	5,5	176,4	-157,9	66,7	93,5
			1	87,9	-82,8	3,6	87,7	5,6	178,2	-159,1	68,6	91,5
Superficie pala ort. Moto S	19,5	m²	1,1	90,4	-85,2	4,3	90,5	5,7	180,0	-160,2	70,5	89,5
			1,2	92,8	-87,6	5,0	93,1	5,8	181,8	-161,3	72,4	87,5
Velocità del vento [m/s] w	32	m/s	1,3	95,1	-90,0	5,8	95,5	5,9	183,6	-162,4	74,3	85,4
			1,4	97,5	-92,2	6,6	97,8	6	185,4	-163,5	76,2	83,2
Massa del corpo m	1125	Kg	1,5	99,7	-94,4	7,5	99,9	6,1	187,1	-164,5	78,2	81,0
			1,6	101,9	-96,6	8,4	101,8	6,2	188,9	-165,5	80,2	78,7
Velocità angolare ω [rpm]	10,4	giri/min	1,7	104,1	-98,7	9,4	103,7	6,3	190,7	-166,6	82,1	76,4
			1,8	106,3	-100,7	10,4	105,3	6,4	192,5	-167,5	84,1	74,0
Δt [s]	0,1	s	1,9	108,4	-102,7	11,4	106,9	6,5	194,2	-168,5	86,1	71,5
			2	110,4	-104,7	12,5	108,3	6,6	196,0	-169,5	88,1	69,1
			2,1	112,5	-106,6	13,6	109,6	6,7	197,8	-170,4	90,2	66,5
GITTATA MASSIMA [m]	236,2	m	2,2	114,5	-108,5	14,7	110,8	6,8	199,5	-171,3	92,2	64,0
			2,3	116,5	-110,4	15,9	111,8	6,9	201,3	-172,2	94,2	61,4
ANGOLO GITTATA MASSIMA [°]	56,0	°	2,4	118,5	-112,2	17,1	112,8	7	203,0	-173,1	96,3	58,7
			2,5	120,5	-114,0	18,4	113,6	7,1	204,8	-173,9	98,4	56,0
TEMPO DI VOLO [s]	8,9	s	2,6	122,4	-115,8	19,7	114,3	7,2	206,5	-174,7	100,4	53,3
			2,7	124,4	-117,5	21,0	114,9	7,3	208,3	-175,5	102,5	50,5
			2,8	126,3	-119,3	22,3	115,4	7,4	210,0	-176,3	104,6	47,7
			2,9	128,2	-120,9	23,7	115,8	7,5	211,8	-177,1	106,7	44,9
			3	130,2	-122,6	25,0	116,1	7,6	213,5	-177,9	108,8	42,0
			3,1	132,1	-124,3	26,5	116,2	7,7	215,3	-178,6	111,0	39,1
			3,2	133,9	-125,9	27,9	116,3	7,8	217,0	-179,3	113,1	36,2
			3,3	135,8	-127,5	29,4	116,3	7,9	218,8	-180,0	115,2	33,2
			3,4	137,7	-129,1	30,8	116,2	8	220,5	-180,7	117,4	30,3
			3,5	139,6	-130,7	32,4	116,0	8,1	222,2	-181,4	119,6	27,3
			3,6	141,5	-132,2	33,9	115,7	8,2	224,0	-182,0	121,7	24,2
			3,7	143,3	-133,7	35,5	115,3	8,3	225,7	-182,7	123,9	21,2
			3,8	145,2	-135,2	37,0	114,8	8,4	227,5	-183,3	126,1	18,1
			3,9	147,1	-136,7	38,6	114,2	8,5	229,2	-183,9	128,3	15,0
			4	148,9	-138,2	40,2	113,5	8,6	231,0	-184,5	130,5	11,9
			4,1	150,8	-139,6	41,9	112,8	8,7	232,7	-185,1	132,7	8,7
			4,2	152,6	-141,1	43,5	111,9	8,8	234,5	-185,6	134,9	5,6
			4,3	154,5	-142,5	45,2	111,0	8,9	236,2	-186,2	137,1	2,4
			4,4	156,3	-143,9	46,9	109,9					
			4,5	158,2	-145,2	48,6	108,8					

Tabella 8: Gittata massima frammento 10 m

6. CONCLUSIONI

In base ai calcoli riprodotti per ciascuna delle valutazioni esaminate e riassunti in precedenza, si ritiene che le valutazioni effettuate e ottenute considerando la gittata vettoriale massima risultano avere margini di approssimazione che seppure frutto del risultato di una modellazione teorica, esprimono adeguatamente il valore ingegneristicamente stimabile per le grandezze in gioco. Infatti essi considerano, cautelativamente, non solo la traslazione che il frammento subisce per effetto dell'inerzia nel piano di rotazione, ma anche la traslazione che il frammento di pala subisce nel piano ortogonale a quello di rotazione per effetto dell'azione del vento che incide sulla pala stessa.

Non di meno, nel moto reale il frammento sarà soggetto a rotazioni intorno ai propri assi indotte dalla non coincidenza dei punti di applicazione (centro di massa e centro di spinta) delle azioni che su di esso agiscono. Tali rotazioni produrranno ulteriori fenomeni dissipativi che si tradurranno in riduzione della gittata.

È bene sottolineare che gli aerogeneratori previsti sono tutti della stessa tipologia, installati in aree molto vicine fra loro e con morfologia simile e pianeggiante, quindi presentano condizioni di funzionamento omogenee tra di loro che permettono di estendere i calcoli effettuati sul singolo aerogeneratore a ciascuno degli altri aerogeneratori che compongono il parco eolico.

Di seguito viene riportata l'analisi degli elementi sensibili all'eventuale rottura di una pala dell'impianto in progetto.

In particolare, per ciascuna delle posizioni proposte degli aerogeneratori di nuova costruzione si riporta in tabella la distanza del recettore sensibile "RC" più vicino (unità abitativa) e la distanza dalla strada provinciale o regionale più vicina.

WTG	Buffer da recettore abitativo più vicino [m]	Distanza da strada provinciale/statale più vicina [m]
A1	>500	Distanza da SP17 >430
A2	>500	Distanza da SP119 >420
A3	>500	Distanza da SP17 >315
A4	>500	Distanza da SP119 >380
A5	>500	>500
A6	>500	>500
A7	>500	Distanza da SP124 >360
A8	>500	>500

Tabella 9: Analisi gittata per recettori sensibili e strade provinciali/regionali

Come visibile dalla tabella, tutti gli aerogeneratori si trovano a distanze dagli elementi sensibili superiori rispetto alla gittata massima.