



## **CENTRALE EOLICA OFFSHORE "RIMINI" (330 MW) ANTISTANTE LA COSTA TRA RIMINI E CATTOLICA**

proponente:

**EnergiaWind 2020 srl** \_ Riccardo Ducoli amministratore unico



**RELAZIONE SPECIALISTICA DEL PROGETTO DEFINITIVO**

## **STUDIO SULLA GITTATA MASSIMA DEGLI ORGANI ROTANTI DEGLI AEROGENERATORI**



Progetto e redazione:

**Tecnoconsult Engineering Construction srl**

**Ing. Paolo Pierangeli**

Albo Ingegneri di Pesaro e Urbino A2162

Febbraio 2022

## INDICE DELLA RELAZIONE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI E METODOLOGICI PER L'ELABORAZIONE DELLO STUDIO	3
1.2	UBICAZIONE DELL'IMPIANTO E CARATTERISTICHE DELL'AREA DI INTERVENTO	3
1.3	NOTE RELATIVE AL PROGETTO PREDISPOSTO PER LA VIA, ALTERNATIVE CONSIDERATE E AMBITO DI INDAGINE	4
1.4	OPERE PRINCIPALI	7
<b>2</b>	<b>DISTANZA DEL CAMPO EOLICO DAI RICETTORI</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>LAYOUT DELL'IMPIANTO</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>DATI TECNICI DEGLI AEROGENERATORI</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>METODO DI CALCOLO</b>	<b>15</b>
5.1	IPOTESI DI CALCOLO	15
5.2	MODELLO DI CALCOLO	16
5.3	CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA ( $v_0$ ) DEL CENTRO DI MASSA DELLA PALA DEL FRAMMENTO	18
<b>6</b>	<b>CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER LA PALA INTERA E PER UN SUO FRAMMENTO</b>	<b>19</b>
6.1	PRIMA IPOTESI: DISTACCO DELLA PALA DELL'AEROGENERATORE NEL PUNTO DI SERRAGGIO DEL MOZZO	19
6.2	SECONDA IPOTESI: DISTACCO DI UN FRAMMENTO DI PALA DI 10M	22
6.3	TERZA IPOTESI: DISTACCO DI UN FRAMMENTO DI PALA DI 5M	25
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>RIFERIMENTI</b>	<b>33</b>

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Ubicazione della Centrale eolica offshore "Rimini" e zone di interdizione (in grigio chiaro).....	4
Figura 1.2 – Centrale eolica offshore "Rimini" _ LAYOUT A .....	6
Figura 1.3 – Centrale eolica offshore "Rimini" _ LAYOUT B .....	6
Figura 1.4 – simulazione della centrale eolica off-shore "Rimini" _ LAYOUT B e stazione elettrica marina.....	8
Figura 2.1 –Distanze del layout A dai ricettori .....	9
Figura 2.2 – Distanze del layout B dai ricettori.....	10
Figura 4.1 – MySE6.45-180 WTGS .....	12
Figura 4.2 – Rotore della turbina.....	14
Figura 5.1 – Schematico del calcolo dell'angolo di rotazione .....	15
Figura 5.2 – Rappresentazione di distacco di pala eolica .....	16

Figura 5.3 – Rappresentazione del moto parabolico.....	16
Figura 6.1 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco pala intera .....	20
Figura 6.2 – Rappresentazione gittata massima della pala intera per angolo di 36° .....	22
Figura 6.3 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco frammento di 10m .....	23
Figura 6.4 – Rappresentazione gittata massima del frammento di pala di 10m per angolo di 28° .....	25
Figura 6.5 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco frammento di 5m .....	26
Figura 6.6 – Rappresentazione gittata massima del frammento di pala di 5m per angolo di 31° .....	28
Figura 7.1 – Stralcio da “VESTAS 0065-1415 V00 – Technical description of a 67m blade .....	30
Figura 7.2 – Stralcio da “VESTAS 0059-1120 V02 – Lightning protection and EMC .....	31

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.1 – Coordinate geografiche delle turbine per i 2 layout.....	11
Tabella 4.1 – Principali caratteristiche dell’aerogeneratore MingYang MySE6.45-180.....	12
Tabella 4.2 – Principali caratteristiche tecniche dell’aerogeneratore MingYang MySE6.45-180 .....	13
Tabella 4.3 – Caratteristiche tecniche della turbina necessarie per il calcolo della gittata massima .....	14
Tabella 6.1 – Valori di gittata al variare dell’angolo di rotazione per distacco dell’intera pala .....	21
Tabella 6.2 – Valori di gittata al variare dell’angolo di rotazione per distacco del frammento di pala di 10m .....	24
Tabella 6.3 – Valori di gittata al variare dell’angolo di rotazione per distacco del frammento di pala di 5m .....	27

# 1 INTRODUZIONE

Oggetto dello Studio è la valutazione e definizione delle ipotesi, del metodo, e dei risultati del calcolo della massima distanza raggiungibile dalla pala rotante di un aerogeneratore eolico che si stacchi a causa della rottura accidentale, ovvero di un frammento di essa, e che quindi si proietti lontano dall'aerogeneratore per la proposta di installazione della Centrale eolica offshore "Rimini" ubicata nel mare antistante la costa tra Rimini e Cattolica, composta da 51 aerogeneratori della potenza di 6,45 MW (per 330 MW complessivi) e opere di collegamento alla RTN (Rete di Trasmissione Nazionale), con punto di connessione alla Stazione TERNA "San Martino in Venti" ubicata in comune di Rimini.

Il soggetto proponente è Energia Wind 2020 srl, con sede legale in via Aldo Moro 28 - 25043 Breno (BS) C.F. P. IVA e Iscrizione al Registro delle Imprese di Brescia n. 03466270984.

Il progetto della Centrale Eolica "Rimini" è stato presentato a livello di Preliminare il 30 marzo 2020, allegato all'istanza di Autorizzazione Unica ai sensi dell'art. 12 del D.lgs 387/2003 (secondo quanto stabilito dalla Circolare n. 40 del 05/01/2012 del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, che stabilisce l'articolazione del procedimento in 3 fasi) e **ha superato la prima fase del procedimento**, coordinato dalla Capitaneria di Porto di Rimini e relativo all'istruttoria tecnico amministrativa finalizzata al rilascio della Concessione Demaniale.

L'approfondimento tematico di cui al presente studio costituisce parte integrante del Progetto (approfondito a livello di Definitivo) e della documentazione allegata allo Studio di Impatto Ambientale, documenti redatti in conformità delle norme vigenti e richiesti dal D.lgs 152/2006 e ss.mm.ii. e dalla Circolare 40/2012 relativamente alla fase di Valutazione di Impatto Ambientale e alla fase di Autorizzazione Unica.

## 1.1 Riferimenti normativi e metodologici per l'elaborazione dello Studio

Nel capitolo 8 seguente sono riportati i principali riferimenti metodologici adottati.

Si riportano di seguito alcune informazioni utili per l'inquadramento e la caratterizzazione del progetto.

## 1.2 Ubicazione dell'impianto e caratteristiche dell'area di intervento

Su larga scala l'area di progetto si inserisce nel bacino del mare Adriatico Settentrionale e per ubicazione geografica la centrale eolica offshore impegna il braccio di mare antistante la costa compresa tra Rimini e Cattolica e parte del litorale marchigiano che dal confine della Regione Emilia Romagna prosegue sino a Gabicce e al Colle San Bartolo.

Nello specifico, lo specchio d'acqua complessivo in cui ricadono gli aerogeneratori nelle diverse alternative di configurazione e localizzazione proposte, è compreso nei seguenti limiti:

- a nord ovest da aree concesse a ENI e occupate dalle piattaforme metanifere del gruppo Azalea e da attraversamenti di condotte;
- a nord est dal limite delle acque territoriali (12 MN) per il Layout "A", già oggetto di valutazione nella prima fase istruttoria, e dal limite delle 18 MN per le configurazioni di layout alternative proposte;
- a sud est dalle piattaforme del gruppo "Regina" e dal limite delle competenze amministrative delle Capitanerie di Porto di Rimini e Pesaro;

- a sud ovest da una linea teorica parallela alla costa e coincidente con il limite delle 6 MN per il layout "A" e con il limite delle 9 MN per i layout alternativi, entrambe identificate sia per attenuare la visibilità degli aerogeneratori dalla terra ferma e sia per rispettare le limitazioni relative agli ostacoli e ai pericoli per la navigazione aerea stabilite per l'aeroporto internazionale di Rimini \_ San Marino; in tutti i layout proposti gli aerogeneratori mantengono una distanza minima dal ARP (Airport Reference Point) maggiore di 15 km e risultano esterni alla OHS (Other Horizontal Surface).

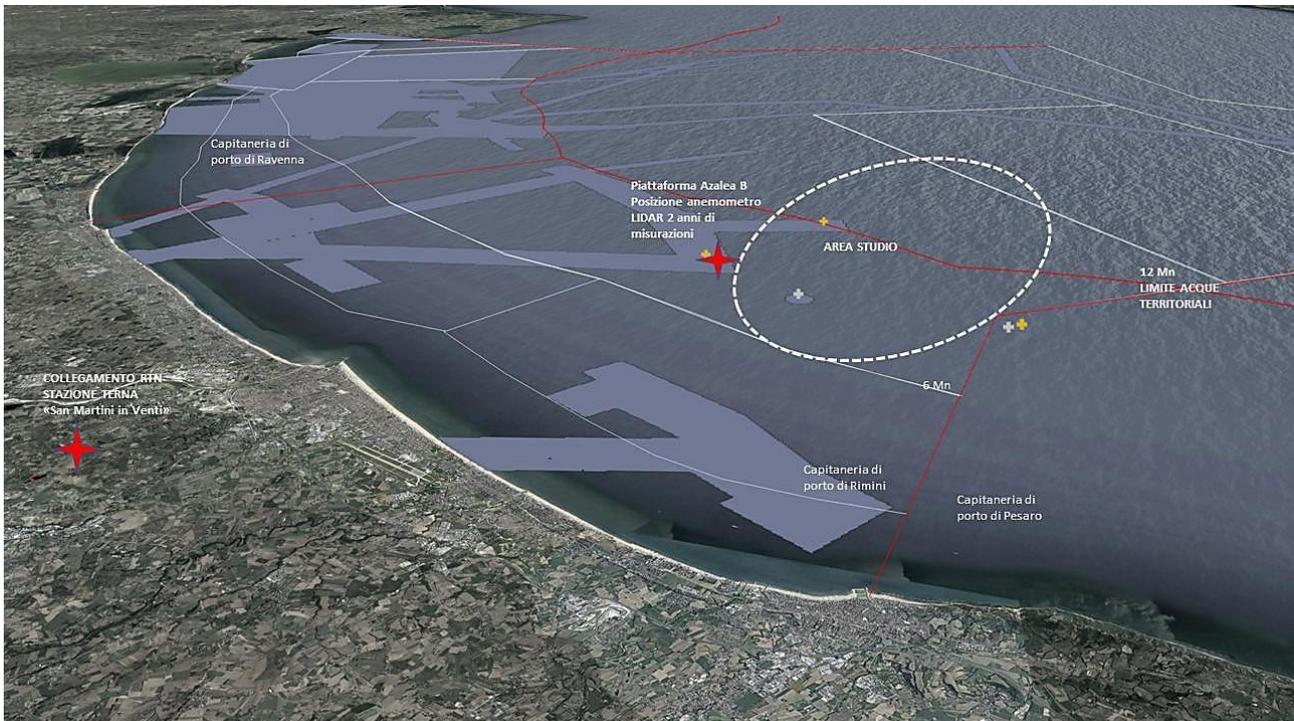


Figura 1.1 – Ubicazione della Centrale eolica offshore "Rimini" e zone di interdizione (in grigio chiaro).

### 1.3 Note relative al progetto predisposto per la VIA, alternative considerate e ambito di indagine

Per il completamento delle procedure autorizzative, il progetto recepisce le prescrizioni e le osservazioni degli enti che hanno espresso parere nell'ambito della procedura sino a qui esperita nonché alcune considerazioni espresse dai portatori di interesse.

Come previsto dalle norme in materia di Valutazione di Impatto ambientale, il progetto prevede delle alternative sia riguardo al tracciato delle opere terrestri di connessione (cavo AT interrato) che alla localizzazione e disposizione degli aerogeneratori.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, si precisa quanto segue:

- Per tutti i Layout considerati restano invariate la posizione della Stazione di Trasformazione Elettrica ubicata in mare nonché le opere di connessione alla RTN;
- il primo riferimento è il **Layout "A"** compreso tra le 6 Mn e le 12 Mn, presentato come integrazione volontaria il 25/09/2020 nell'ambito del procedimento di concessione demaniale, rispetto al quale si sono espressi gli Enti in Conferenza di Servizi attestandone l'ammissibilità in termini di localizzazione; le turbine occupano posizioni con profondità del fondale variabile e compresa tra -15 e -34 m;

l'interdistanza tra le torri è regolare e pari a 680 m; la minima distanza dal punto di misurazione anemometrica (Piattaforma Azalea "B") è pari a 2,8 km;

- rispetto al precedente, sono state studiate delle alternative localizzative e di configurazione che interessano in parte l'areale del layout "A" e in parte una zona immediatamente contigua e disposta verso il largo sino alle 18 MN; in tale ambito sono state verificate 3 configurazioni degli aerogeneratori; tra le alternative ne è stata approfondita una in particolare, il "Layout B", vista la sostanziale parità di implicazioni ambientali e di producibilità energetica rispetto agli altri 2 layout proposti e denominati "C" e "D", che in ogni caso vanno considerati come alternative possibili;
- Il **Layout "B"** esemplificativo delle alternative considerate e contiguo al layout "A", occupa un'area a cavallo delle 12 MN ed è compreso tra le 9 e le 18 MN; gli aerogeneratori si dispongono lungo le direttrici di tre archi, in questo caso paralleli e distanti tra loro 3 km, occupando posizioni con profondità del fondale variabile e compresa tra -22 e -43 m; l'interdistanza tra le torri è regolare e pari a 720 m; la minima distanza dal punto di misurazione anemometrica (Piattaforma Azalea "B") è pari a 6 km;
- gli altri layout considerati sono il layout "C", anch'esso organizzato su tre archi, ma concavi verso Nord Ovest e il Layout "D" che è l'unico organizzato "a freccia" su tre rette che si svasano verso il largo; la distanza minima dal punto di misurazione è rispettivamente pari a circa 2,7 km e 3 km;
- per tutti i layout proposti, la profondità e la natura dei fondali fanno sì che le opere di fondazione siano del tipo a monopilone, con elementi cilindrici in acciaio di circa 7,5 m di diametro e infissi al di sotto del fondale con profondità variabili in base alla batimetria.
- Per quanto riguarda l'elettrodotto interrato AT terrestre il progetto prevede che il tracciato, a partire dalla buca giunti di collegamento tra il cavo marino e quello terrestre, segua prevalentemente la viabilità esistente secondaria con un percorso preferenziale di circa 11,7 km, di cui circa 380 m in TOC per il superamento della SS N. 72 Rimini/San Marino e del Torrente Ausa; si prevede anche un percorso alternativo che si distacca e si ricongiunge al precedente e segue viabilità primaria, per una lunghezza complessiva di 11,6 km.

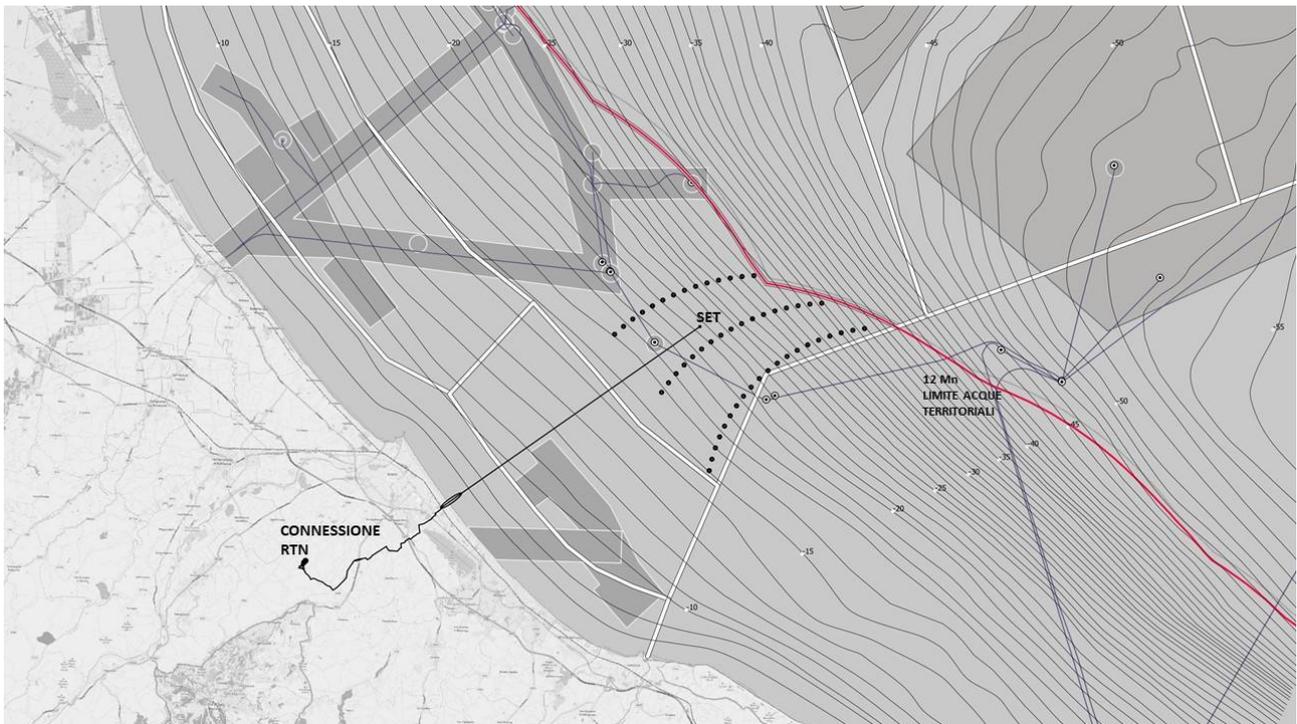


Figura 1.2 – Centrale eolica offshore "Rimini" \_ LAYOUT A

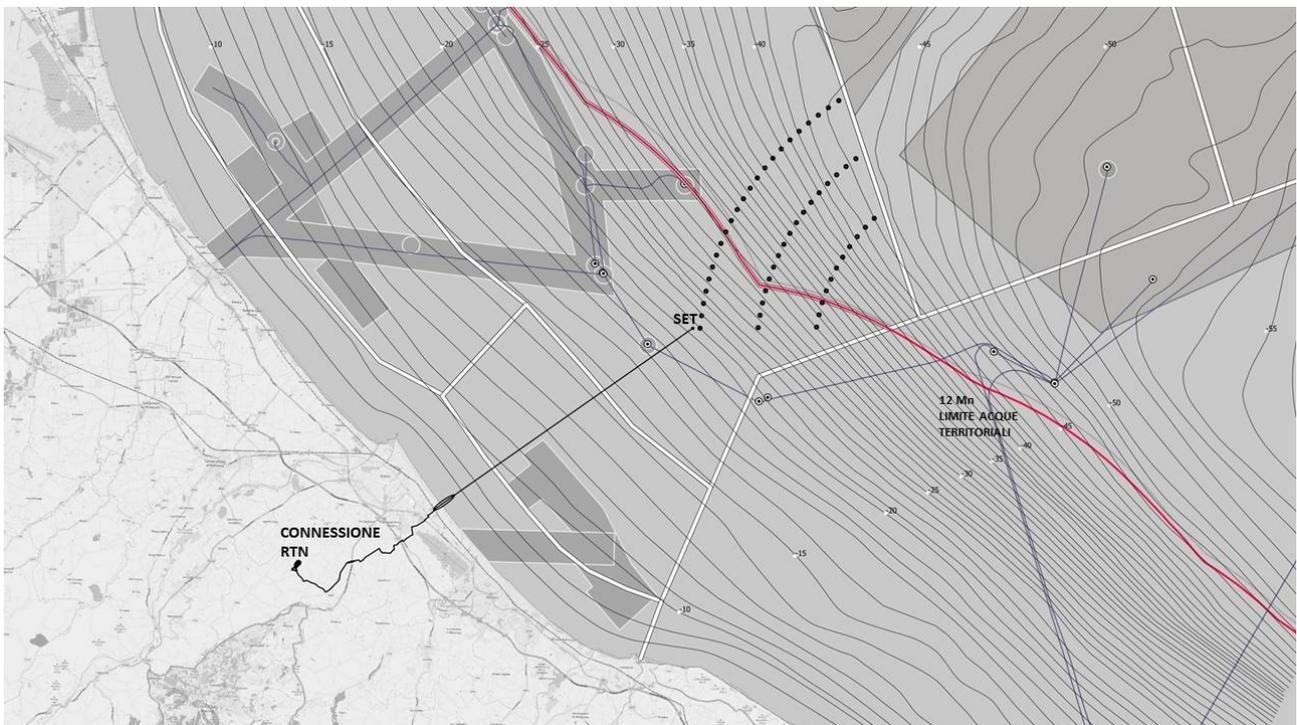


Figura 1.3 – Centrale eolica offshore "Rimini" \_ LAYOUT B

## 1.4 Opere principali

Si riporta di seguito l'elenco sintetico delle principali opere previste dal progetto.

OPERE IN MARE:

- **51 aerogeneratori di potenza nominale unitaria pari a 6,45 MW, per una capacità complessiva di 330 MW, ancorati al fondale con fondazione del tipo monopilone in acciaio;**

gli aerogeneratori presi come riferimento tecnologico per il progetto sono del tipo MingYang MySE 6.45-180, con hub a 110/125 m di altezza, diametro del rotore pari a 180 m, tronco di transizione con parte fuori acqua pari a 9/10 m, per un range di altezza complessiva massima compreso tra 210/220 m dal medio mare (in tali range di potenza e dimensionali rientrano altri aerogeneratori simili che potrebbero essere considerati in fase di progettazione esecutiva); gli aerogeneratori vengono proposti in configurazioni alternative, comparate per aspetti ambientali in merito alla localizzazione;

- **Una rete elettrica sottomarina a tensione nominale pari a 66 kV che collega gli aerogeneratori in serie, raggruppandoli in 8 sezioni principali, per poi connettersi alla Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) offshore 66/380 kV ;**
- **Una piattaforma marina che ospita la Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) 66/380 kV, attrezzata con 2 trasformatori da 180/200 MVA, 1 reattore per la compensazione della potenza reattiva, apparecchiature, quadri di controllo e manufatti di servizio e accessori;**
- **Un elettrodotto sottomarino di collegamento tra la Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) offshore e la buca giunti terra-mare, costituito da un cavo in AT 380 kV di lunghezza pari a 18,15 km di cui 1,45 km realizzato con HDD (Horizontal Directional Drilling) per la parte di transizione terra\_mare);**

la parte di approdo e atterraggio (transizione terra-mare del cavo marino realizzata con HDD) inizia in mare a circa 930 m dalla linea di battigia e raggiunge la buca giunti dopo aver bypassato la spiaggia (in corrispondenza del nuovo circolo velico di Bellariva ubicato tra il bagno 98 e 99), il lungomare Giuseppe Di Vittorio, gli edifici prospicienti, la rete ferroviaria e la linea Metro\_Mare;

OPERE A TERRA PER LA CONNESSIONE ALLA RTN:

- **Una buca giunti interrata, in cui avviene la giunzione tra la l'elettrodotto sottomarino e quello terrestre, interrata e posizionata nello slargo compreso tra il sottopasso di Viale Portofino e Viale Siracusa, immediatamente a sud ovest della linea Metro\_Mare e della Rete Ferroviaria adriatica;**
- **Un elettrodotto terrestre interrato costituito da una terna di cavi isolati in AT 380 kV, di lunghezza pari a circa 11,7 km (con buche giunti ogni 500/600 m), che raggiunge la Stazione di Transizione cavo-aereo adiacente alla SE TERNA 380/150 kV "San Martino in Venti", dove avviene la connessione alla RTN;**

il progetto prevede che il tracciato, a partire dalla buca giunti di collegamento tra il cavo marino e quello terrestre, segua prevalentemente la viabilità esistente secondaria con un percorso preferenziale di circa 11,7 km, di cui circa 380 m in TOC per il superamento della SS N. 72 Rimini/San Marino e del Torrente Ausa; si prevede anche un percorso alternativo che si distacca e si ricongiunge al precedente e segue viabilità primaria, per una lunghezza complessiva di 11,6 km.

- **Una Stazione di Transizione cavo-aereo da realizzarsi in prossimità della stazione elettrica TERNA "San Martino in Venti", che ospiterà il reattore, le apparecchiature elettromeccaniche, i locali quadri e misure e il portale di partenza della linea aerea di collegamento alla stazione RTN;**

verrà realizzato un breve tratto stradale di lunghezza pari a circa 130 m e larghezza pari a 7 m incluso banchine laterali, di collegamento tra Via San Martino in Venti e la Stazione Utente;

- **Un elettrodotto aereo trifase lungo circa 450 m, in conduttori nudi binati alla tensione di 380 kV, di connessione con lo stallo a 380 kV nella stazione elettrica "San Martino in Venti" 150/380 kV esistente e di proprietà TERNA S.p.A.;**
- **Un nuovo stallo a 380 kV, previo ampliamento della stazione TERNA "San Martino in Venti", nella parte nord-ovest, e interrimento di un tratto di linea in cavo aereo esistente;**

per la realizzazione del nuovo stallo, come indicato dal gestore della rete TERNA, è previsto l'interrimento dell'ultima campata di un elettrodotto aereo a 132 kV "San Martino-Gambettola" esistente; l'elettrodotto aereo, lungo circa 170 m, e il traliccio di arrivo saranno eliminati e sostituiti da un elettrodotto interrato AT 150 kV, di lunghezza pari a circa 230 m, da realizzare all'interno dell'area di ampliamento della Stazione Elettrica San Martino in Venti.

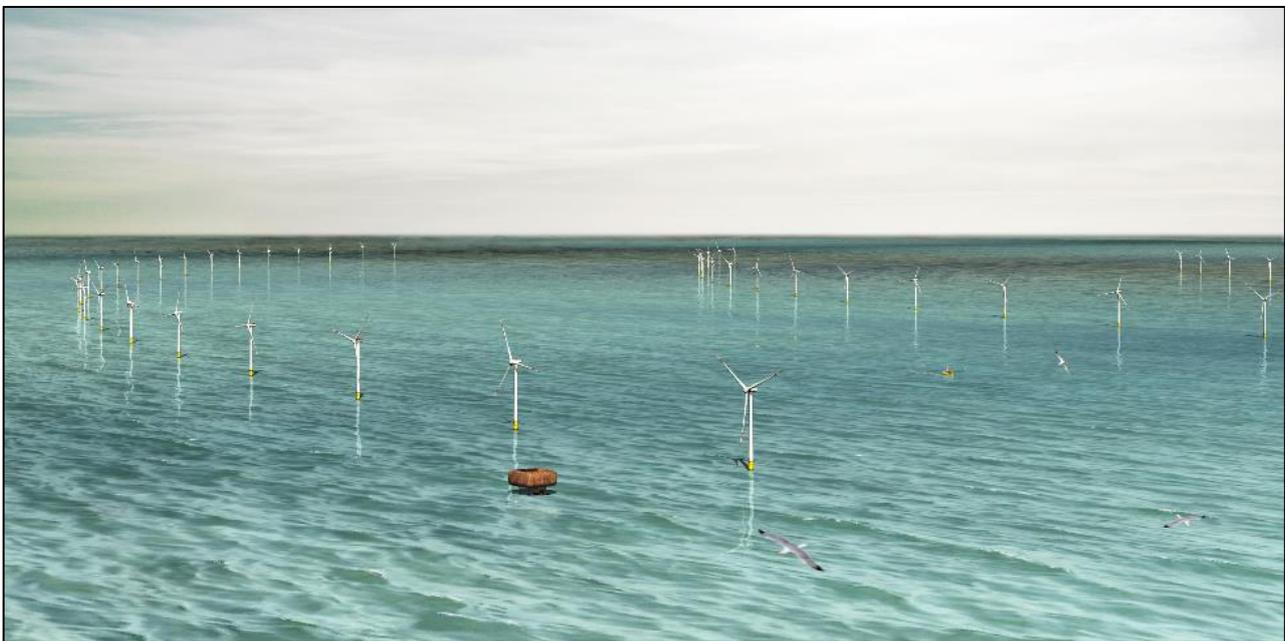


Figura 1.4 – simulazione della centrale eolica off-shore "Rimini" \_ LAYOUT B e stazione elettrica marina

## 2 DISTANZA DEL CAMPO EOLICO DAI RICETTORI

L'area dove si intende effettuare la costruzione del parco si trova nel braccio di mare antistante la costa tra Rimini e Cattolica.

La zona prescelta per il parco eolico ha un profilo batimetrico regolare con profondità comprese tra circa 20 e 45 metri. Le profondità non sono così elevate e permettono di utilizzare la tecnologia di fondazione a pali fissi.

Il layout A è situato ad est dalla costa Romagnola ad una distanza minima di circa 13km dalla costa riminese e a una distanza minima di 11km dal Parco Naturale del San Bartolo.

Il layout B invece è situato ad una distanza minima maggiore (18.5km circa) dalla costa riminese.

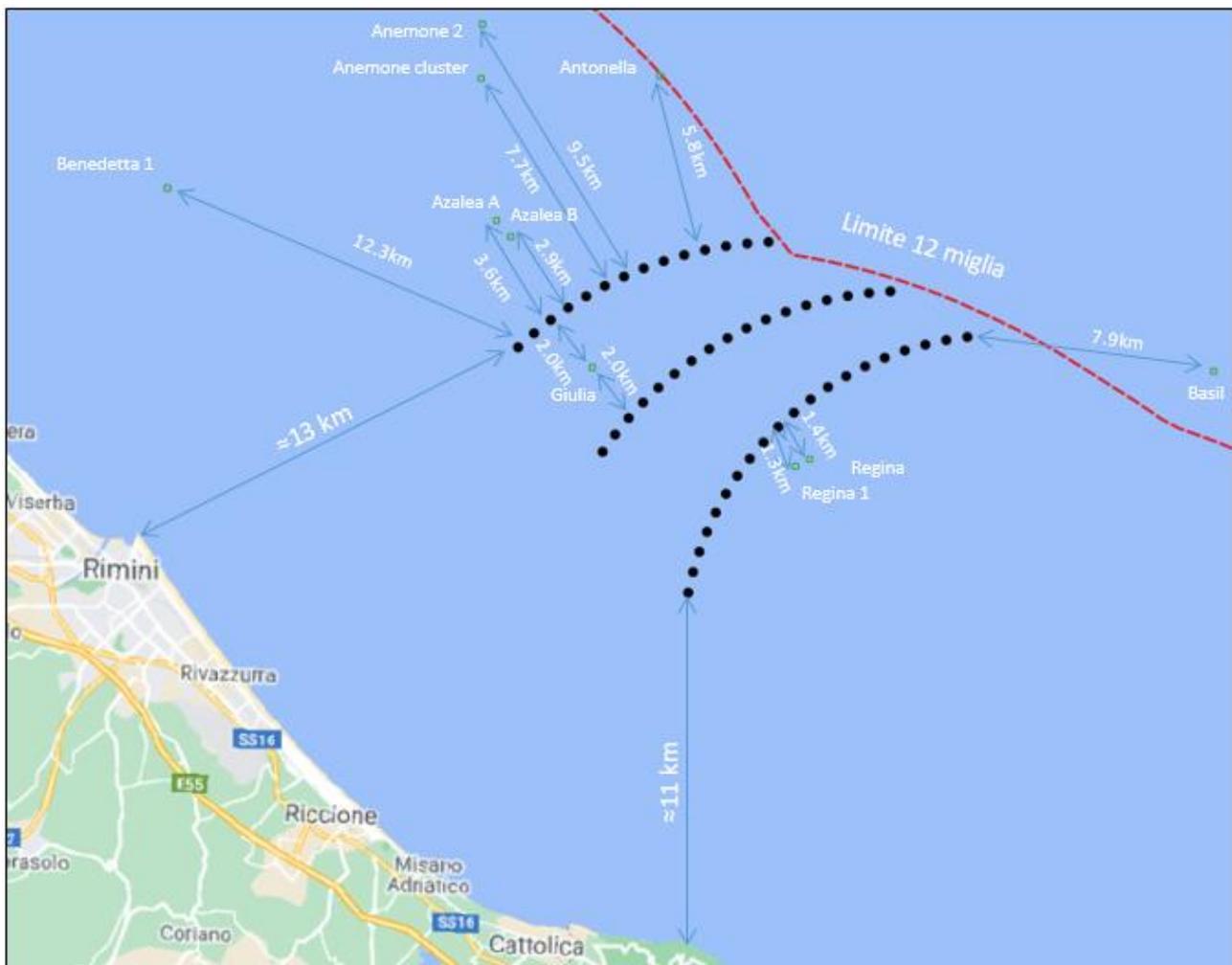


Figura 2.1 –Distanze del layout A dai ricettori

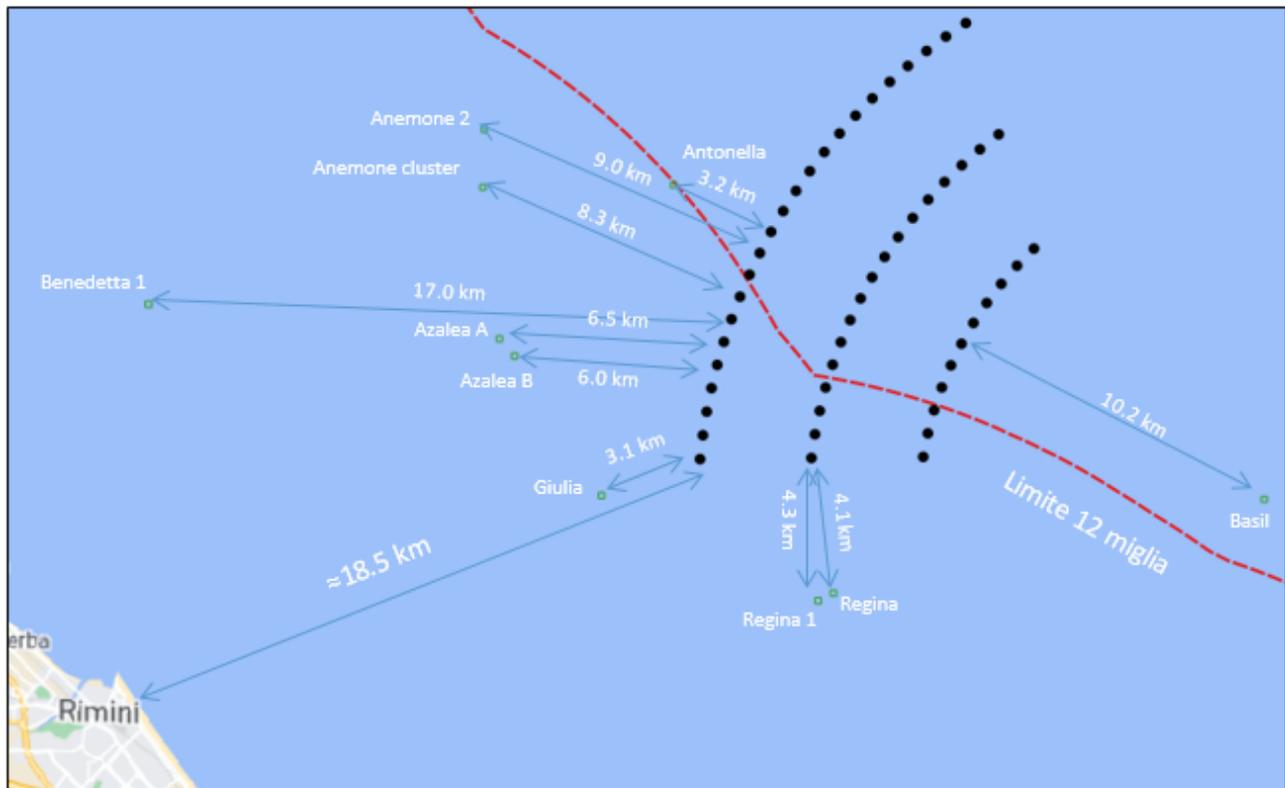


Figura 2.2 – Distanze del layout B dai ricettori

Nella Figura 2.1 e Figura 2.2 vengono anche riportate le distanze tra gli aerogeneratori e i ricettori più prossimi, ovvero le piattaforme a mare.

Per quanto riguarda il layout A la piattaforma più vicina è distante 1.3km (piattaforma Regina), mentre per il layout B la piattaforma più vicina è a 3.1km (piattaforma Giulia).

### 3 LAYOUT DELL'IMPIANTO

Di seguito vengono riportate le rappresentazioni grafiche e le coordinate geografiche (UTM WGS84 fuso 33N) delle turbine per i 2 layout:

Turbine number	Layout A		Layout B	
	Easting	Northing	Easting	Northing
1	325928	4892794	323257	4889864
2	325249	4892745	323342	4890579
3	324575	4892658	323456	4891290
4	323906	4892535	323599	4891996
5	323245	4892375	323770	4892695
6	322594	4892179	323969	4893387
7	321954	4891949	324197	4894070
8	321328	4891683	324451	4894744
9	320718	4891384	324733	4895406
10	320124	4891052	325042	4896057
11	319550	4890688	325377	4896694
12	318996	4890294	325737	4897317
13	318465	4889869	326122	4897926
14	317957	4889417	326532	4898518
15	329803	4891210	326965	4899093
16	329125	4891156	327422	4899650
17	328452	4891063	327900	4900188
18	327785	4890931	328400	4900706
19	327126	4890761	328921	4901203
20	326479	4890554	329461	4901679
21	325844	4890309	330020	4902132
22	325224	4890029	330598	4902563
23	324622	4889713	331192	4902970
24	324039	4889364	326581	4889897
25	323477	4888981	326687	4890610
26	322938	4888567	326828	4891316
27	322423	4888122	327004	4892014
28	321935	4887648	327215	4892702
29	321475	4887147	327460	4893379
30	321045	4886621	327739	4894043
31	320645	4886071	328050	4894692
32	332257	4889748	328393	4895325
33	331584	4889647	328767	4895940
34	330920	4889502	329172	4896536
35	330267	4889314	329605	4897111
36	329627	4889082	330067	4897663
37	329005	4888809	330556	4898192
38	328402	4888494	331070	4898696
39	327821	4888141	331609	4899173
40	327264	4887750	332171	4899623
41	326735	4887323	329919	4889931
42	326235	4886862	330058	4890637
43	325767	4886369	330243	4891333
44	325332	4885846	330472	4892016
45	324933	4885296	330745	4892682
46	324571	4884720	331060	4893329
47	324248	4884122	331417	4893955
48	323966	4883503	331813	4894556
49	323725	4882867	332247	4895131
50	323527	4882217	332717	4895676
51	323372	4881555	333222	4896189

Tabella 3.1 – Coordinate geografiche delle turbine per i 2 layout

## 4 DATI TECNICI DEGLI AEROGENERATORI

L'impianto sarà costituito da 51 aerogeneratori.

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto è il modello MySE6.45-180 WTGs. Ciascun aerogeneratore sarà tripala ad asse orizzontale costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 111m e con un diametro di base di circa 7.5m. L'altezza della turbina viene incrementata a 119m grazie al transition piece. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 178m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 208m (TIP).



Figura 4.1 – MySE6.45-180 WTGS

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche geometriche e tecniche:

No.	Main component	Packing size (m) L×W×H	Weight (t)	Center of mass
1	Main frame assembly	10.36×5.478×9.207	247	X=-2.484 Y=0 Z=2.905
2	Hub assembly	6.333×5.764×6.111	92	X=0.237 Y=0 Z=0.034
3	Blade	86.5	3X31±3%	X=25.82

Tabella 4.1 – Principali caratteristiche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180

No.	Component	Unit	Technical parameter
<b>1</b>	<b>General parameter</b>		
1.1	Manufacturer/model		Ming Yang Smart Energy Group Limited /MySE6.45-180
1.2	Rated power	kW	6450
1.3	Rotor diameter	m	178
1.4	Cut-in wind speed	m/s	3
1.5	Design annual average wind speed	m/s	9
1.6	Turbulence intensity		0.14
1.7	Static rated power	m/s	10.5 (standard air density)
1.8	Cut-out wind speed (average within 10min)	m/s	25 (soft cut-out 28)
1.9	Hub height	m	111
1.10	Extreme (survival) wind speed (maximum within 3s)	m/s	77.28
1.11	Design service life	year	25
<b>2</b>	<b>Blade</b>		
2.1	Blade material		Reinforced glass fiber
2.2	Blade tip linear velocity	m/s	100.6
<b>3</b>	<b>Gearbox</b>		
3.1	Number of gear stage		2
3.2	Gear drive ratio		1: 23.187
3.3	Rated torque	kNm	6366.7 (input)
<b>4</b>	<b>Generator</b>		
4.1	Rated power	kW	7000
4.2	Rated voltage	V	710
4.3	Rated power factor		-0.95C
4.4	Insulation class		H/F
<b>5</b>	<b>Converter</b>		
5.1	Apparent power	kVA	6750
5.2	Rated output voltage	V	690
5.3	Rated output current	A	5648
5.4	Output frequency range:	Hz	50±2.5
5.5	Protection class		IP54
5.6	Cooling method		Water cooling
<b>6</b>	<b>Braking system</b>		
6.1	Main braking system		Independent pitch braking
6.2	Secondary braking system		Hydraulic disc brake
<b>7</b>	<b>Yaw system</b>		
7.1	Control		Active type
7.2	Yaw control speed	°/s	0.293
<b>8</b>	<b>Lightning protection</b>		
8.1	Lightning protection design standard		IEC61400-24 I
8.2	Grounding resistance of turbine	Ω	≤4
<b>9</b>	<b>Weight</b>		
9.1	Nacelle (including generator and gearbox)	kg	24600
9.2	Generator	kg	51000
9.3	Gearbox	kg	76000
9.4	Blades (1 set)	kg	3×31000±3%
9.5	Hub system	kg	92000

Tabella 4.2 – Principali caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180

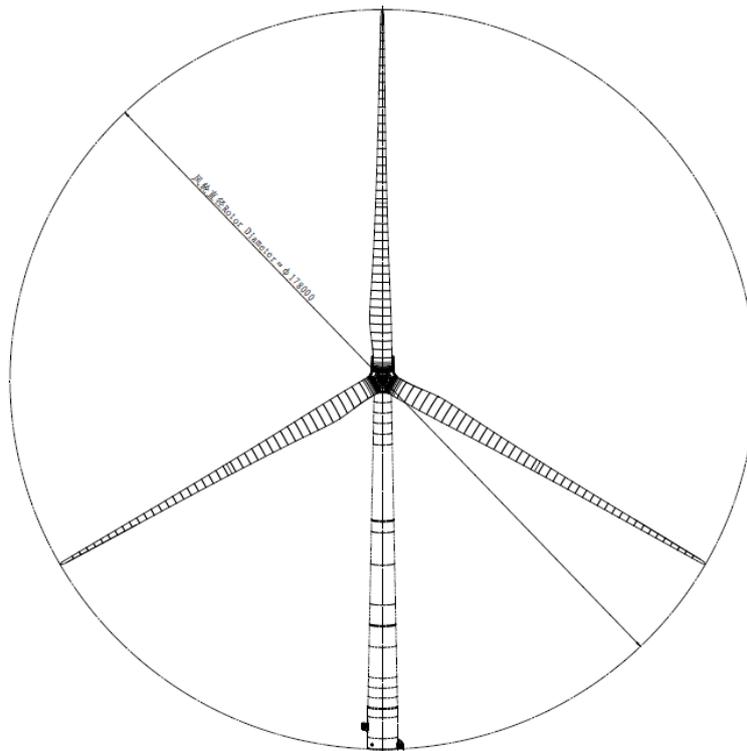


Figura 4.2 – Rotore della turbina

La Tabella 4.3 riassume i principali parametri utilizzati per il calcolo della gittata massima dell'intero elemento di pala e per i frammenti di pala di 10 m e di 5 m (per questi ultimi i pesi sono stati ipotizzati sulla base di modelli di turbine simili a quella di progetto):

Altezza della turbina [m]	<b>119</b>
Max Giri al minuto [rpm]	<b>12.3</b>
Diametro del rotore [m]	<b>178</b>
Lunghezza delle pale [m]	<b>86.5</b>
Baricentro delle pale [m]	<b>25.82</b>
Massa totale [kg]	<b>31000</b>
Massa frammento di 10m [kg]	<b>546</b>
Massa frammento di 5m [kg]	<b>222</b>

Tabella 4.3 – Caratteristiche tecniche della turbina necessarie per il calcolo della gittata massima

## 5 METODO DI CALCOLO

### 5.1 Ipotesi di calcolo

L'ipotesi di partenza è che una pala o un frammento di essa, avente lunghezza pari a 5 m e 10 m, si distacchi accidentalmente mentre il rotore è in movimento e venga poi proiettato in aria.

Il moto risultante sarà quello di un corpo libero, soggetto solo all'accelerazione di gravità e alla forza di attrito viscoso con l'aria. La sua dinamica risulta essere piuttosto complessa in quanto è governata da numerose variabili, come la forma dell'oggetto e la sua massa. Inoltre, la rottura della pala, combinata al movimento del rotore, imprimeranno all'oggetto distaccato un moto rototraslatorio di cui non è possibile prevedere la componente rotatoria.

Al fine del calcolo si assumerà, infatti, che il moto bidimensionale parabolico sia assimilato a quello di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità corrispondenti a quella dell'oggetto distaccato. È inoltre assunto che l'oggetto trasli senza ruotare, disponendosi in una posizione tale da offrire il minor attrito possibile con l'aria rispetto alle componenti orizzontali della sua velocità e, al contrario, massimo attrito rispetto a quelle verticali (massima portanza).

**Tutte queste assunzioni risultano conservative ai fini della gittata massima; in questo modo la gittata reale non sarà mai superiore a quella di seguito calcolata.**

Nel calcolo non è stato considerato il contributo del vento in direzione perpendicolare al moto dell'oggetto (asse z), risultando questo trascurabile.

I calcoli tengono conto della possibile rottura al variare dell'angolo di lancio.

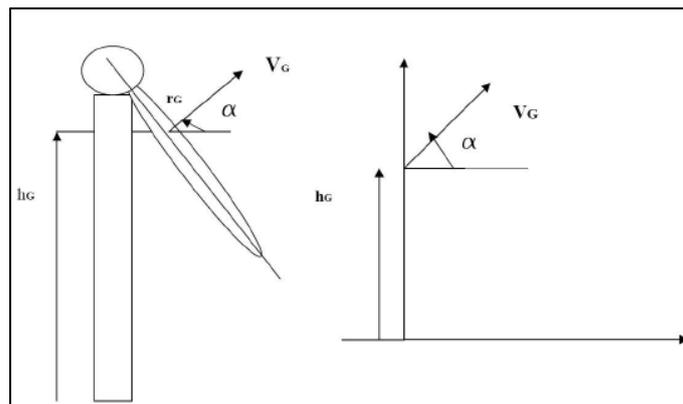


Figura 5.1 – Schematico del calcolo dell'angolo di rotazione

Inoltre si tiene conto della direzione di rotazione delle pale rispetto al lato in cui si ritiene venga lanciato il detrito.

Per una rotazione antioraria:

- La gittata D1 viene calcolata a sinistra della pala
- La gittata D2 viene calcolata a destra della pala.

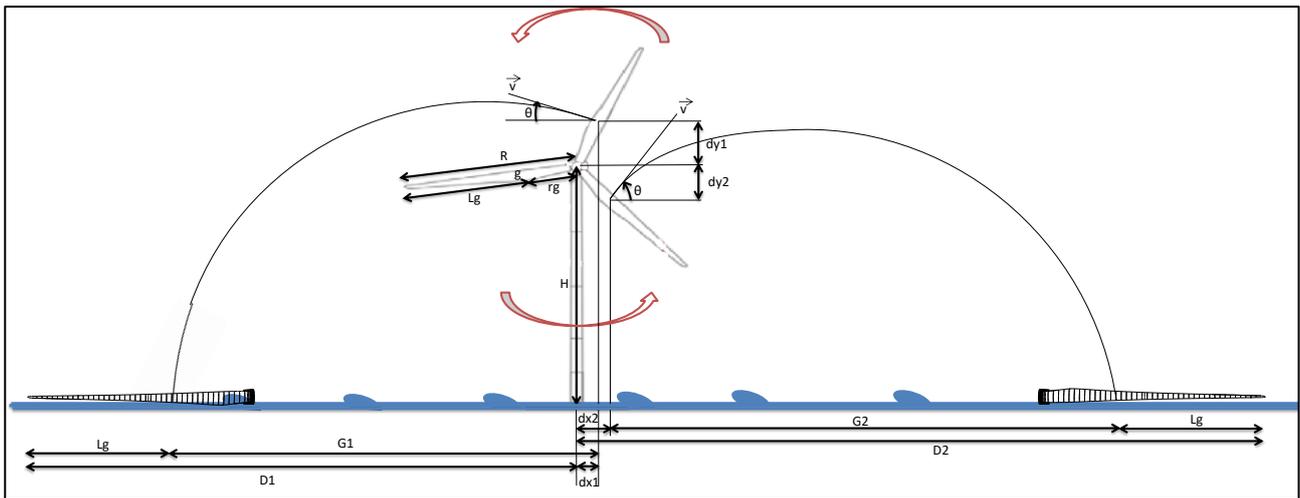


Figura 5.2 – Rappresentazione di distacco di pala eolica

## 5.2 Modello di calcolo

Il moto parabolico dell'oggetto, sia nelle ipotesi di rottura accidentale dell'intero elemento rotante, sia di distacco di un frammento di pala a 5 m e a 10 m dall'estremità della stessa, viene analizzato attraverso la cinematica, prendendo in considerazione le forze aerodinamiche agenti su di esso.

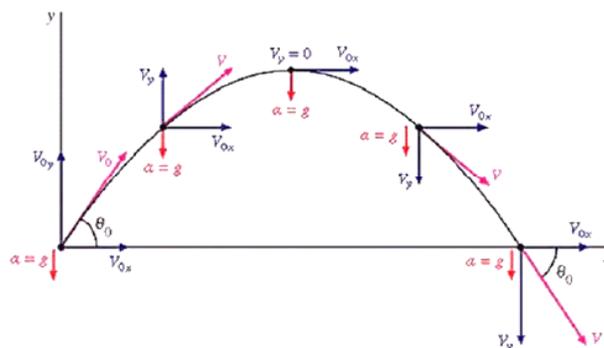


Figura 5.3 – Rappresentazione del moto parabolico

Un corpo in movimento attraverso l'aria è soggetto alla forza di attrito viscoso che ha verso opposto alla direzione della sua velocità ed è funzione di quest'ultima, della sua geometria e della densità dell'aria.

In prima approssimazione s'ipotizza quindi che la forza di attrito dovuta alla presenza dell'aria sia direttamente proporzionale alla velocità, ottenendo le seguenti equazioni del moto (1):

$$\begin{aligned} mx''(t) &= -kx'(t) \\ my''(t) &= -mg - ky'(t) \end{aligned}$$

con le condizioni iniziali:

$$\begin{aligned} x(0) &= -R \sin \theta \\ y(0) &= y_0 \\ x'(0) &= v_{0x} \\ y'(0) &= v_{0y} \end{aligned}$$

Nel caso in questione,  $y_0$  corrisponde alla quota del baricentro C del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

La velocità iniziale della pala, o del frammento di pala, sarà pari alla velocità tangenziale del suo centro di massa. I valori iniziali delle componenti del vettore velocità possono essere scritti in funzione dell'angolo di gittata  $\theta$ , che è l'angolo misurato rispetto alla verticale in cui si suppone il distacco del frammento:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta$$

Integrando le equazioni (1) si ottengono le soluzioni(2):

$$x(t) = \frac{m}{k} v_{0x} \left( 1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right)$$

$$y(t) = \frac{m}{k} \left( \frac{m}{k} g + v_{0y} \right) \left( 1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right) - \frac{m}{k} g t + y_0$$

Dove:

m: massa dell'oggetto;

k: costante di proporzionalità tra la forza d'attrito e la velocità dell'oggetto data da:

$$k = \frac{1}{2} C \rho S v_0$$

Dove:

C: coefficiente di penetrazione aerodinamica dell'oggetto; è legato esclusivamente alla geometria dell'oggetto e ha valori compresi tra 0,3 e 2;

$\rho$ : densità dell'aria ed ha valore pari a 1,217 Kg/m<sup>3</sup>;

S: sezione dell'oggetto, misurata nel piano perpendicolare alla direzione di moto.

Per semplificare la soluzione si trascura l'attrito in direzione verticale mantenendoci in situazione conservativa.

Dalla seconda equazione che ritorna ad essere quella della gittata nel vuoto, si ottiene l'equazione del Tempo di volo t, che è il tempo che intercorre tra l'istante del lancio e quello di arrivo del punto che coincide con il tempo necessario a percorrere il tratto corrispondente alla Gittata massima con la velocità  $v_{0x}$ (3):

$$t = \frac{v_{0y} + \sqrt{v_{0y}^2 + 2gy_0}}{g}$$

Considerando l'azione dell'attrito dell'aria l'angolo di distacco, misurato rispetto alla verticale e che da luogo al valore di gittata maggiore, varia in funzione della massa e della superficie dell'oggetto.

La Gittata è la distanza percorsa dall'oggetto in direzione x prima che il corpo cada a terra, cioè quel valore di x corrispondente a  $y=0$ . Questo valore può essere ottenuto sostituendo il tempo di volo ottenuto nella (3) nella prima equazione delle (2).

### 5.3 Calcolo della velocità periferica ( $v_0$ ) del centro di massa della pala del frammento

Si consideri il baricentro C di un corpo rotante, corrispondente al centro di massa di una pala della turbina eolica, che si muove di moto circolare uniforme. Il moto circolare uniforme è il moto di un corpo che si muove con velocità di modulo costante su una superficie piana e lungo una traiettoria circolare. La velocità angolare media  $\omega$  esprime la rapidità con cui il raggio, che collega il centro della circonferenza al corpo, descrive l'angolo al centro corrispondente all'arco di circonferenza, percorso dal corpo. Il modulo della velocità angolare media è il rapporto tra lo spostamento angolare del corpo e l'intervallo impiegato a compiere tale spostamento è:

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

Si indichi con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che a ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per n giri si avrà  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

La relazione fra le due velocità, angolare e periferica, è:

$$V_0 = \omega * r_c$$

Ovvero:

$$V_0 = \frac{2\pi r_c n}{60} [\text{m/s}]$$

Considerate le caratteristiche geometriche delle pale e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo delle stesse, si può ritenere con buona approssimazione che il centro di massa sia posizionato ad  $1/3$  della lunghezza delle pale rispetto al punto di serraggio del mozzo, ossia:

$$r_c = \frac{1}{3} L_p$$

Dove:

$L_p$ : lunghezza dell'intera pala.

Per quanto riguarda il frammento di pala invece, si può ritenere con buona approssimazione che:

$$r_c = (L_p - L_f) + \frac{1}{3} L_f$$

Con  $L_f$ : lunghezza del frammento in esame.

## 6 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER LA PALA INTERA E PER UN SUO FRAMMENTO

Alla luce di quanto analizzato e stimato si può affermare che la rottura di una pala è un evento accidentale e pertanto non è possibile prevedere come e in quale punto avverrà; per coprire le diverse possibilità sono quindi stati identificati tre casi di calcolo, corrispondenti al distacco di una delle pale nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione meccanica a causa del collegamento, o al distacco di un frammento di pala a 5 m e a 10 m dall'estremità della stessa.

Per il calcolo della gittata s'ipotizza inoltre, in tutti i casi presi in considerazione, che l'elemento si stacchi dall'aerogeneratore quando questo sta ruotando alla massima velocità consentita prima del cut-off.

Per gittata massima si intende la massima distanza raggiunta dalla pala o da un suo frammento rispetto al centro della torre della turbina.

### 6.1 Prima ipotesi: distacco della pala dell'aerogeneratore nel punto di serraggio del mozzo

Si prende in considerazione in primo luogo il caso in cui si verifichi la rottura della pala nel punto di serraggio del mozzo. Le assunzioni adottate per la metodologia di calcolo prevedono:

- Massima velocità di rotazione del rotore delle turbine in esame al momento della rottura della pala;
- Considerando che le pale dell'aerogeneratore sono state progettate per generare portanza, s'ipotizza che la pala distaccata si disponga ponendo la sua corda nella direzione del moto; sulla base di questa ipotesi sono stati selezionati i coefficienti di penetrazione aerodinamica  $C$  e le sezioni della pala  $S$ .

Il calcolo esatto e reale della traiettoria seguita da una pala eolica, nell'ipotesi di rottura accidentale dell'elemento d'aerogeneratore in condizioni nominali di funzionamento, è un'analisi assai complessa se mirata all'ottenimento di risultati che siano quanto più possibili prossimi alla realtà.

Infatti, le condizioni al contorno da prendere in considerazione ai fini di un'indagine olistica del problema sarebbero molteplici e dovrebbero attenersi, oltre alle mere caratteristiche geometriche e dinamiche della turbina, anche ad altri fattori quali: le caratteristiche strutturali e aerodinamiche della pala, le possibili modalità di rottura e/o collasso degli elementi strutturali, le caratteristiche fluidodinamiche, le particolari condizioni del sito nel quale il fenomeno è atteso verificarsi, ecc. e, non ultime, le caratteristiche dinamiche della pala in fase di caduta.

Spesso, la difficoltà più gravosa sta nel fatto che alcuni dei dati peculiari precedentemente elencati sono disponibili solo presso i progettisti e i costruttori delle turbine eoliche, i quali probabilmente dovrebbero essere gli unici demandati alla valutazione di questo tipo di fenomeno.

Numerose indagini presenti in letteratura attuano un approccio semplificativo al fenomeno, forzando le procedure di calcolo a una mera valutazione fisica del problema e analizzandone gli effetti solo dal punto di vista geometrico/analitico; ottenendo per forza di cose risultati "abnormi", cioè distanti dalla realtà.

In questo report viene eseguita un'analisi semplificativa dello studio, adottando l'ipotesi di moto bidimensionale di un oggetto che avviene secondo la legge del moto parabolico tenendo conto della possibile

rottura al variare dell'angolo di lancio, studiato attraverso la cinematica e prendendo in considerazione le forze aerodinamiche agenti sull'oggetto stesso.

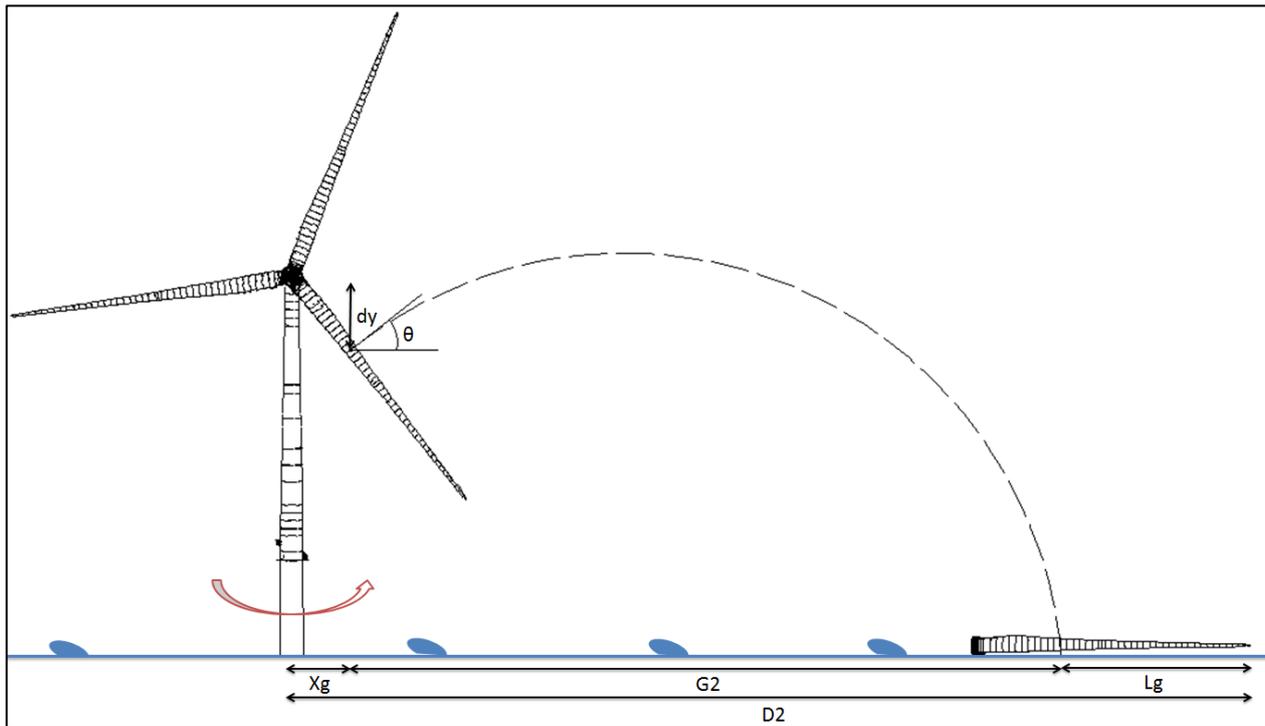


Figura 6.1 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco pala intera

E' evidente che  $v_{x0}$ ,  $v_{y0}$  ed  $H_g$  dipendono dall'angolo  $\theta$ , a cui avviene il distacco della pala e pertanto tale valore sarà calcolato per valori di  $\theta$  che variano da  $0^\circ$  (pala in verticale) a  $90^\circ$  (pala in orizzontale), con massima/minima estensione in altezza. Al valore della gittata calcolato con questa formula andrà sommata/sottratta la distanza  $X_g$  del baricentro della pala rispetto all'asse della torre al momento del distacco e la distanza del vertice della pala dal baricentro  $L_g = 60.7$  m.

Angolo $\theta$	Vox [m/s]	Voy [m/s]	Hg1 [m]	Hg2 [m]	Gittata teorica G1 [m]	Gittata teorica G2 [m]	Xg [m]	Lg [m]	Gittata effettiva D1 [m]	Gittata effettiva D2 [m]
0	36.5	0.0	147.3	90.7	184.5	147.2	0.0	60.7	245.2	207.9
1	36.5	0.6	147.3	90.7	186.5	149.3	0.5	60.7	246.7	210.5
2	36.5	1.3	147.3	90.7	188.4	151.4	1.0	60.7	248.1	213.1
3	36.4	1.9	147.3	90.7	190.3	153.4	1.5	60.7	249.5	215.6
4	36.4	2.5	147.3	90.7	192.2	155.5	2.0	60.7	250.9	218.1
5	36.3	3.2	147.2	90.8	194.0	157.5	2.5	60.7	252.2	220.6
6	36.3	3.8	147.2	90.8	195.7	159.4	3.0	60.7	253.4	223.1
7	36.2	4.4	147.1	90.9	197.4	161.4	3.5	60.7	254.6	225.5
8	36.1	5.1	147.0	91.0	199.0	163.3	3.9	60.7	255.8	227.9
9	36.0	5.7	147.0	91.0	200.6	165.2	4.4	60.7	256.9	230.3
10	35.9	6.3	146.9	91.1	202.1	167.0	4.9	60.7	257.9	232.6
11	35.8	7.0	146.8	91.2	203.5	168.8	5.4	60.7	258.8	234.9
12	35.7	7.6	146.7	91.3	204.9	170.6	5.9	60.7	259.7	237.1
13	35.5	8.2	146.6	91.4	206.2	172.3	6.4	60.7	260.5	239.3
14	35.4	8.8	146.5	91.5	207.4	173.9	6.9	60.7	261.2	241.5
15	35.2	9.4	146.4	91.6	208.5	175.5	7.3	60.7	261.9	243.5
16	35.1	10.1	146.2	91.8	209.6	177.0	7.8	60.7	262.5	245.5
17	34.9	10.7	146.1	91.9	210.5	178.5	8.3	60.7	262.9	247.5
18	34.7	11.3	145.9	92.1	211.4	179.9	8.8	60.7	263.4	249.3
19	34.5	11.9	145.8	92.2	212.2	181.2	9.2	60.7	263.7	251.1
20	34.3	12.5	145.6	92.4	212.9	182.5	9.7	60.7	263.9	252.8
21	34.1	13.1	145.4	92.6	213.5	183.6	10.1	60.7	264.1	254.5
22	33.8	13.7	145.3	92.7	214.0	184.7	10.6	60.7	264.1	256.0
23	33.6	14.3	145.1	92.9	214.4	185.7	11.1	60.7	264.1	257.5
24	33.3	14.8	144.9	93.1	214.8	186.6	11.5	60.7	263.9	258.8
25	33.1	15.4	144.7	93.3	215.0	187.4	12.0	60.7	263.7	260.1
26	32.8	16.0	144.5	93.5	215.1	188.1	12.4	60.7	263.3	261.2
27	32.5	16.6	144.2	93.8	215.1	188.8	12.9	60.7	262.9	262.3
28	32.2	17.1	144.0	94.0	214.9	189.3	13.3	60.7	262.3	263.3

29	31.9	17.7	143.8	94.2	214.7	189.7	13.7	60.7	261.7	264.1
30	31.6	18.2	143.5	94.5	214.4	190.0	14.2	60.7	260.9	264.8
31	31.3	18.8	143.3	94.7	213.9	190.2	14.6	60.7	260.0	265.5
32	30.9	19.3	143.0	95.0	213.4	190.3	15.0	60.7	259.0	266.0
33	30.6	19.9	142.8	95.2	212.7	190.2	15.4	60.7	257.9	266.3
34	30.2	20.4	142.5	95.5	211.9	190.1	15.8	60.7	256.7	266.6
35	29.9	20.9	142.2	95.8	211.0	189.8	16.2	60.7	255.4	266.7
36	29.5	21.4	141.9	96.1	209.9	189.4	16.6	60.7	254.0	266.8
37	29.1	22.0	141.6	96.4	208.8	188.9	17.0	60.7	252.4	266.6
38	28.7	22.5	141.3	96.7	207.5	188.3	17.4	60.7	250.7	266.4
39	28.3	23.0	141.0	97.0	206.1	187.5	17.8	60.7	248.9	266.0
40	27.9	23.4	140.7	97.3	204.6	186.6	18.2	60.7	247.0	265.5
41	27.5	23.9	140.4	97.6	202.9	185.6	18.6	60.7	245.0	264.9
42	27.1	24.4	140.0	98.0	201.1	184.5	18.9	60.7	242.9	264.1
43	26.7	24.9	139.7	98.3	199.2	183.2	19.3	60.7	240.6	263.2
44	26.2	25.3	139.4	98.6	197.2	181.8	19.7	60.7	238.2	262.2
45	25.8	25.8	139.0	99.0	195.1	180.3	20.0	60.7	235.7	261.0
46	25.3	26.2	138.7	99.3	192.8	178.6	20.4	60.7	233.1	259.7
47	24.9	26.7	138.3	99.7	190.4	176.8	20.7	60.7	230.4	258.2
48	24.4	27.1	137.9	100.1	187.9	174.9	21.0	60.7	227.6	256.6
49	23.9	27.5	137.6	100.4	185.3	172.9	21.4	60.7	224.6	254.9
50	23.4	27.9	137.2	100.8	182.6	170.7	21.7	60.7	221.6	253.1
51	23.0	28.3	136.8	101.2	179.7	168.4	22.0	60.7	218.4	251.1
52	22.5	28.7	136.4	101.6	176.7	165.9	22.3	60.7	215.1	248.9
53	22.0	29.1	136.0	102.0	173.6	163.4	22.6	60.7	211.7	246.7
54	21.4	29.5	135.6	102.4	170.4	160.7	22.9	60.7	208.2	244.3
55	20.9	29.9	135.2	102.8	167.1	157.9	23.2	60.7	204.6	241.8
56	20.4	30.2	134.8	103.2	163.6	154.9	23.5	60.7	200.9	239.1
57	19.9	30.6	134.4	103.6	160.1	151.9	23.8	60.7	197.0	236.3
58	19.3	30.9	134.0	104.0	156.4	148.7	24.0	60.7	193.1	233.4
59	18.8	31.3	133.6	104.4	152.7	145.4	24.3	60.7	189.1	230.4
60	18.2	31.6	133.2	104.8	148.8	142.0	24.5	60.7	185.0	227.2
61	17.7	31.9	132.7	105.3	144.9	138.5	24.8	60.7	180.8	223.9
62	17.1	32.2	132.3	105.7	140.8	134.8	25.0	60.7	176.5	220.5
63	16.6	32.5	131.9	106.1	136.6	131.1	25.2	60.7	172.1	217.0
64	16.0	32.8	131.4	106.6	132.4	127.2	25.5	60.7	167.6	213.4
65	15.4	33.1	131.0	107.0	128.0	123.3	25.7	60.7	163.1	209.6
66	14.8	33.3	130.5	107.5	123.6	119.2	25.9	60.7	158.4	205.8
67	14.3	33.6	130.1	107.9	119.1	115.1	26.1	60.7	153.7	201.8
68	13.7	33.8	129.6	108.4	114.5	110.8	26.3	60.7	148.9	197.7
69	13.1	34.1	129.1	108.9	109.8	106.5	26.4	60.7	144.1	193.6
70	12.5	34.3	128.7	109.3	105.1	102.0	26.6	60.7	139.2	189.3
71	11.9	34.5	128.2	109.8	100.3	97.5	26.8	60.7	134.2	184.9
72	11.3	34.7	127.8	110.2	95.4	92.9	26.9	60.7	129.1	180.5
73	10.7	34.9	127.3	110.7	90.4	88.2	27.1	60.7	124.0	176.0
74	10.1	35.1	126.8	111.2	85.4	83.4	27.2	60.7	118.9	171.3
75	9.4	35.2	126.3	111.7	80.3	78.6	27.4	60.7	113.7	166.6
76	8.8	35.4	125.9	112.1	75.2	73.7	27.5	60.7	108.4	161.9
77	8.2	35.5	125.4	112.6	70.0	68.7	27.6	60.7	103.1	157.0
78	7.6	35.7	124.9	113.1	64.8	63.7	27.7	60.7	97.8	152.1
79	7.0	35.8	124.4	113.6	59.5	58.6	27.8	60.7	92.4	147.1
80	6.3	35.9	123.9	114.1	54.2	53.5	27.9	60.7	87.0	142.0
81	5.7	36.0	123.4	114.6	48.9	48.3	28.0	60.7	81.6	136.9
82	5.1	36.1	122.9	115.1	43.5	43.0	28.0	60.7	76.2	131.8
83	4.4	36.2	122.5	115.5	38.1	37.8	28.1	60.7	70.7	126.5
84	3.8	36.3	122.0	116.0	32.7	32.4	28.2	60.7	65.2	121.3
85	3.2	36.3	121.5	116.5	27.3	27.1	28.2	60.7	59.8	116.0
86	2.5	36.4	121.0	117.0	21.8	21.7	28.3	60.7	54.3	110.6
87	1.9	36.4	120.5	117.5	16.4	16.3	28.3	60.7	48.8	105.3
88	1.3	36.5	120.0	118.0	10.9	10.9	28.3	60.7	43.3	99.9
89	0.6	36.5	119.5	118.5	5.5	5.5	28.3	60.7	37.8	94.4
90	0.0	36.5	119.0	119.0	0.0	0.0	28.3	60.7	32.4	89.0

Tabella 6.1 – Valori di gittata al variare dell'angolo di rotazione per distacco dell'intera pala

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo  $\alpha = 36^\circ$  per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa **266.8 m** dal centro della torre tubolare.

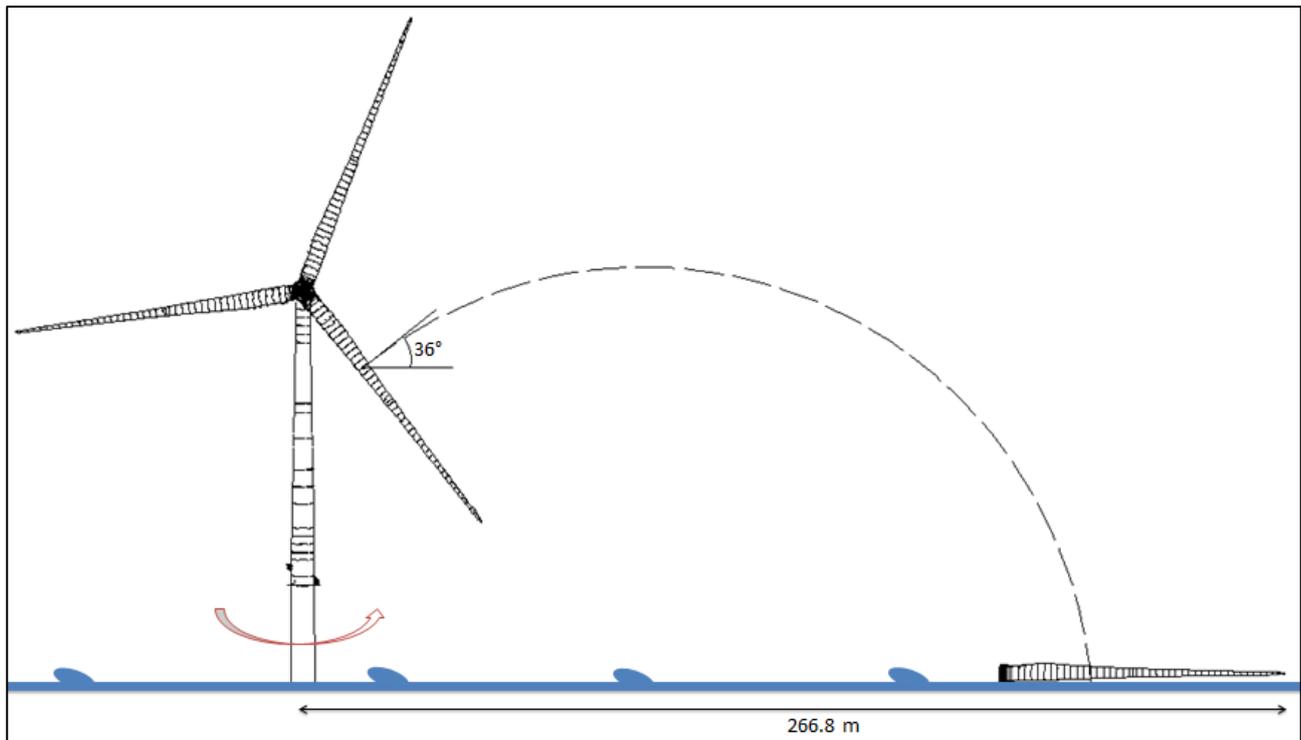


Figura 6.2 – Rappresentazione gittata massima della pala intera per angolo di 36°

## 6.2 Seconda ipotesi: distacco di un frammento di pala di 10m

Nonostante la conformazione monolitica dell'elemento di pala e le caratteristiche tecnologiche dei materiali all'avanguardia utilizzati per la sua realizzazione permettano di escludere a priori qualunque ipotesi accidentale di distacco parziale di un frammento di essa, in quanto la probabilità che si verifichi un evento del genere è praticamente nulla, è stato effettuato il calcolo della gittata massima nel caso di distacco di un frammento di pala a 5 m e a 10 m dall'estremità della stessa.

Si è analizzato in primo luogo il caso in cui si distacchi un frammento della pala pari a 10 m considerando la seguente ipotesi semplificativa:

- Il centro di massa del frammento di pala di 10 m è posizionato ad  $1/3$  della lunghezza del frammento stesso.

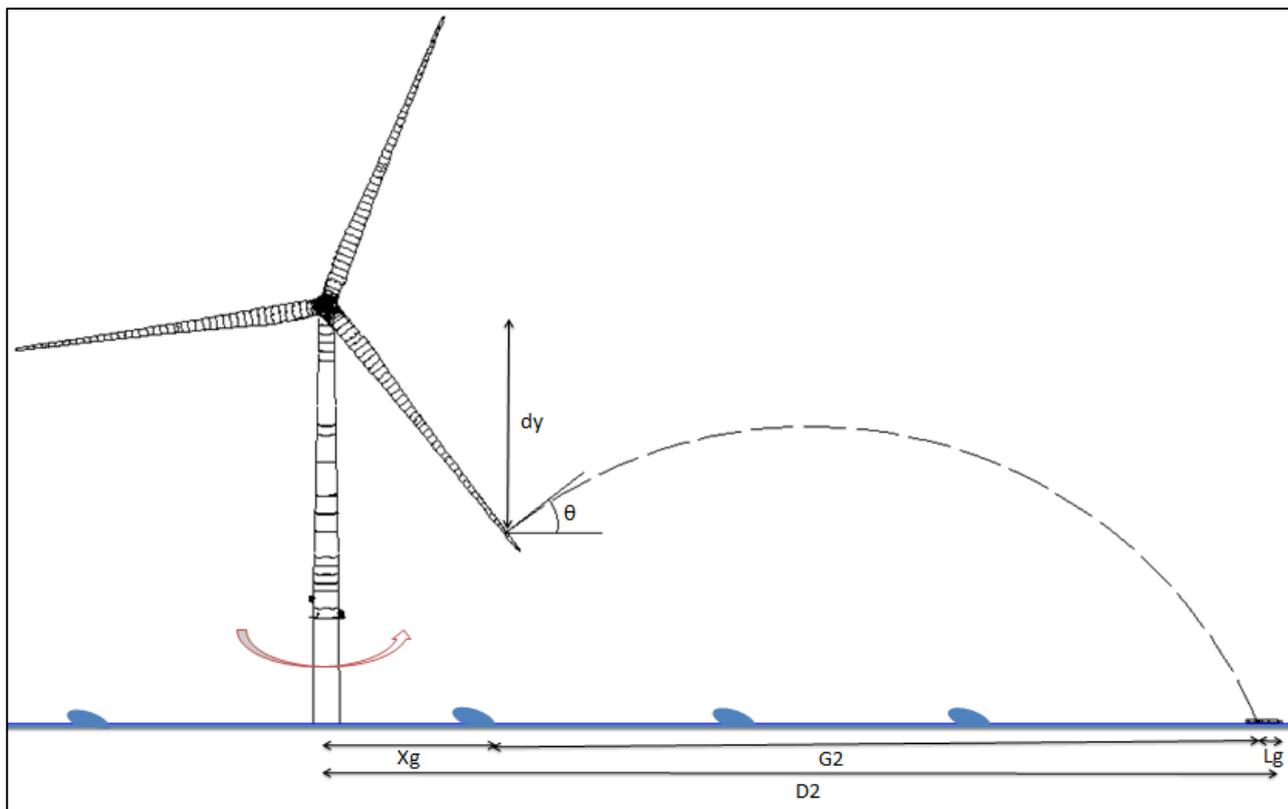


Figura 6.3 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco frammento di 10m

Di seguito la tabella con i risultati di gittata al variare dell'angolo di distacco.

Angolo $\theta$	Vox [m/s]	Voy [m/s]	Hg1 [m]	Hg2 [m]	Gittata teorica G1 [m]	Gittata teorica G2 [m]	Xg [m]	Lg [m]	Gittata effettiva D1 [m]	Gittata effettiva D2 [m]
0	106.0	0.0	201.3	36.7	352.6	214.4	0.0	6.7	359.3	221.1
1	106.0	1.9	201.3	36.7	357.0	225.1	1.4	6.7	362.2	233.2
2	106.0	3.7	201.3	36.7	361.2	235.9	2.9	6.7	365.0	245.4
3	105.9	5.6	201.2	36.8	365.2	246.8	4.3	6.7	367.6	257.8
4	105.8	7.4	201.1	36.9	369.0	257.6	5.7	6.7	369.9	270.0
5	105.6	9.2	201.0	37.0	372.5	268.2	7.2	6.7	372.0	282.1
6	105.5	11.1	200.9	37.1	375.8	278.6	8.6	6.7	373.9	293.8
7	105.3	12.9	200.7	37.3	378.9	288.6	10.0	6.7	375.5	305.3
8	105.0	14.8	200.5	37.5	381.7	298.1	11.5	6.7	376.9	316.2
9	104.7	16.6	200.3	37.7	384.3	307.1	12.9	6.7	378.0	326.7
10	104.4	18.4	200.1	37.9	386.5	315.6	14.3	6.7	378.9	336.6
11	104.1	20.2	199.8	38.2	388.6	323.5	15.7	6.7	379.5	345.9
12	103.7	22.0	199.5	38.5	390.3	330.8	17.1	6.7	379.9	354.6
13	103.3	23.9	199.2	38.8	391.8	337.4	18.5	6.7	379.9	362.6
14	102.9	25.7	198.9	39.1	393.0	343.5	19.9	6.7	379.7	370.1
15	102.4	27.4	198.5	39.5	393.9	348.9	21.3	6.7	379.3	376.9
16	101.9	29.2	198.1	39.9	394.6	353.7	22.7	6.7	378.6	383.0
17	101.4	31.0	197.7	40.3	395.0	357.9	24.1	6.7	377.6	388.6
18	100.9	32.8	197.3	40.7	395.1	361.5	25.4	6.7	376.3	393.6
19	100.3	34.5	196.8	41.2	394.9	364.5	26.8	6.7	374.8	398.0
20	99.7	36.3	196.4	41.6	394.5	367.1	28.2	6.7	373.1	401.9
21	99.0	38.0	195.9	42.1	393.9	369.1	29.5	6.7	371.1	405.2
22	98.3	39.7	195.3	42.7	393.0	370.6	30.8	6.7	368.8	408.1
23	97.6	41.4	194.8	43.2	391.8	371.6	32.2	6.7	366.3	410.5
24	96.9	43.1	194.2	43.8	390.4	372.2	33.5	6.7	363.6	412.4
25	96.1	44.8	193.6	44.4	388.8	372.4	34.8	6.7	360.7	413.9
26	95.3	46.5	193.0	45.0	387.0	372.2	36.1	6.7	357.5	414.9
27	94.5	48.1	192.4	45.6	384.9	371.6	37.4	6.7	354.2	415.6
28	93.6	49.8	191.7	46.3	382.6	370.6	38.7	6.7	350.6	415.9
29	92.8	51.4	191.0	47.0	380.1	369.3	39.9	6.7	346.8	415.9
30	91.8	53.0	190.3	47.7	377.4	367.7	41.2	6.7	342.9	415.5

31	90.9	54.6	189.6	48.4	374.5	365.7	42.4	6.7	338.7	414.8
32	89.9	56.2	188.8	49.2	371.4	363.5	43.6	6.7	334.4	413.8
33	88.9	57.8	188.1	49.9	368.1	361.0	44.8	6.7	329.9	412.5
34	87.9	59.3	187.3	50.7	364.6	358.2	46.0	6.7	325.2	411.0
35	86.9	60.8	186.4	51.6	361.0	355.2	47.2	6.7	320.4	409.1
36	85.8	62.3	185.6	52.4	357.1	352.0	48.4	6.7	315.4	407.1
37	84.7	63.8	184.8	53.2	353.2	348.5	49.5	6.7	310.3	404.7
38	83.6	65.3	183.9	54.1	349.0	344.8	50.7	6.7	305.0	402.2
39	82.4	66.7	183.0	55.0	344.7	341.0	51.8	6.7	299.6	399.4
40	81.2	68.2	182.1	55.9	340.2	336.9	52.9	6.7	294.0	396.5
41	80.0	69.6	181.1	56.9	335.6	332.6	54.0	6.7	288.3	393.3
42	78.8	71.0	180.2	57.8	330.9	328.2	55.1	6.7	282.5	389.9
43	77.6	72.3	179.2	58.8	326.0	323.5	56.2	6.7	276.5	386.4
44	76.3	73.7	178.2	59.8	321.0	318.8	57.2	6.7	270.5	382.6
45	75.0	75.0	177.2	60.8	315.8	313.8	58.2	6.7	264.3	378.7
46	73.7	76.3	176.2	61.8	310.6	308.8	59.2	6.7	258.0	374.7
47	72.3	77.6	175.2	62.8	305.2	303.5	60.2	6.7	251.6	370.4
48	71.0	78.8	174.1	63.9	299.6	298.2	61.2	6.7	245.1	366.0
49	69.6	80.0	173.0	65.0	294.0	292.7	62.1	6.7	238.5	361.5
50	68.2	81.2	171.9	66.1	288.2	287.1	63.1	6.7	231.8	356.8
51	66.7	82.4	170.8	67.2	282.4	281.3	64.0	6.7	225.1	352.0
52	65.3	83.6	169.7	68.3	276.4	275.5	64.9	6.7	218.2	347.0
53	63.8	84.7	168.5	69.5	270.4	269.5	65.8	6.7	211.3	341.9
54	62.3	85.8	167.4	70.6	264.2	263.4	66.6	6.7	204.3	336.7
55	60.8	86.9	166.2	71.8	257.9	257.2	67.4	6.7	197.2	331.4
56	59.3	87.9	165.0	73.0	251.6	251.0	68.3	6.7	190.0	325.9
57	57.8	88.9	163.8	74.2	245.1	244.6	69.1	6.7	182.8	320.3
58	56.2	89.9	162.6	75.4	238.6	238.1	69.8	6.7	175.5	314.6
59	54.6	90.9	161.4	76.6	232.0	231.5	70.6	6.7	168.1	308.8
60	53.0	91.8	160.2	77.8	225.3	224.9	71.3	6.7	160.7	302.9
61	51.4	92.8	158.9	79.1	218.5	218.2	72.0	6.7	153.2	296.8
62	49.8	93.6	157.7	80.3	211.7	211.4	72.7	6.7	145.6	290.7
63	48.1	94.5	156.4	81.6	204.8	204.5	73.4	6.7	138.1	284.5
64	46.5	95.3	155.1	82.9	197.8	197.5	74.0	6.7	130.4	278.2
65	44.8	96.1	153.8	84.2	190.7	190.5	74.6	6.7	122.7	271.8
66	43.1	96.9	152.5	85.5	183.6	183.4	75.2	6.7	115.0	265.3
67	41.4	97.6	151.2	86.8	176.4	176.2	75.8	6.7	107.3	258.7
68	39.7	98.3	149.8	88.2	169.1	169.0	76.3	6.7	99.5	252.0
69	38.0	99.0	148.5	89.5	161.8	161.7	76.9	6.7	91.6	245.2
70	36.3	99.7	147.2	90.8	154.5	154.4	77.4	6.7	83.8	238.4
71	34.5	100.3	145.8	92.2	147.1	147.0	77.8	6.7	75.9	231.5
72	32.8	100.9	144.4	93.6	139.6	139.5	78.3	6.7	68.0	224.5
73	31.0	101.4	143.1	94.9	132.1	132.0	78.7	6.7	60.0	217.4
74	29.2	101.9	141.7	96.3	124.6	124.5	79.1	6.7	52.1	210.3
75	27.4	102.4	140.3	97.7	117.0	116.9	79.5	6.7	44.1	203.1
76	25.7	102.9	138.9	99.1	109.4	109.3	79.9	6.7	36.1	195.9
77	23.9	103.3	137.5	100.5	101.7	101.6	80.2	6.7	28.1	188.5
78	22.0	103.7	136.1	101.9	94.0	94.0	80.5	6.7	20.1	181.2
79	20.2	104.1	134.7	103.3	86.3	86.2	80.8	6.7	12.1	173.7
80	18.4	104.4	133.3	104.7	78.5	78.5	81.1	6.7	4.1	166.2
81	16.6	104.7	131.9	106.1	70.7	70.7	81.3	6.7	-3.9	158.7
82	14.8	105.0	130.5	107.5	62.9	62.9	81.5	6.7	-11.9	151.1
83	12.9	105.3	129.0	109.0	55.1	55.1	81.7	6.7	-19.9	143.5
84	11.1	105.5	127.6	110.4	47.3	47.3	81.9	6.7	-27.9	135.8
85	9.2	105.6	126.2	111.8	39.4	39.4	82.0	6.7	-35.9	128.1
86	7.4	105.8	124.7	113.3	31.5	31.5	82.1	6.7	-43.9	120.3
87	5.6	105.9	123.3	114.7	23.7	23.7	82.2	6.7	-51.9	112.6
88	3.7	106.0	121.9	116.1	15.8	15.8	82.3	6.7	-59.8	104.7
89	1.9	106.0	120.4	117.6	7.9	7.9	82.3	6.7	-67.8	96.9
90	0.0	106.0	119.0	119.0	0.0	0.0	82.3	6.7	-75.7	89.0

Tabella 6.2 – Valori di gittata al variare dell'angolo di rotazione per distacco del frammento di pala di 10m

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo  $\alpha = 28^\circ$  per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa **415.9 m** dal centro della torre tubolare.

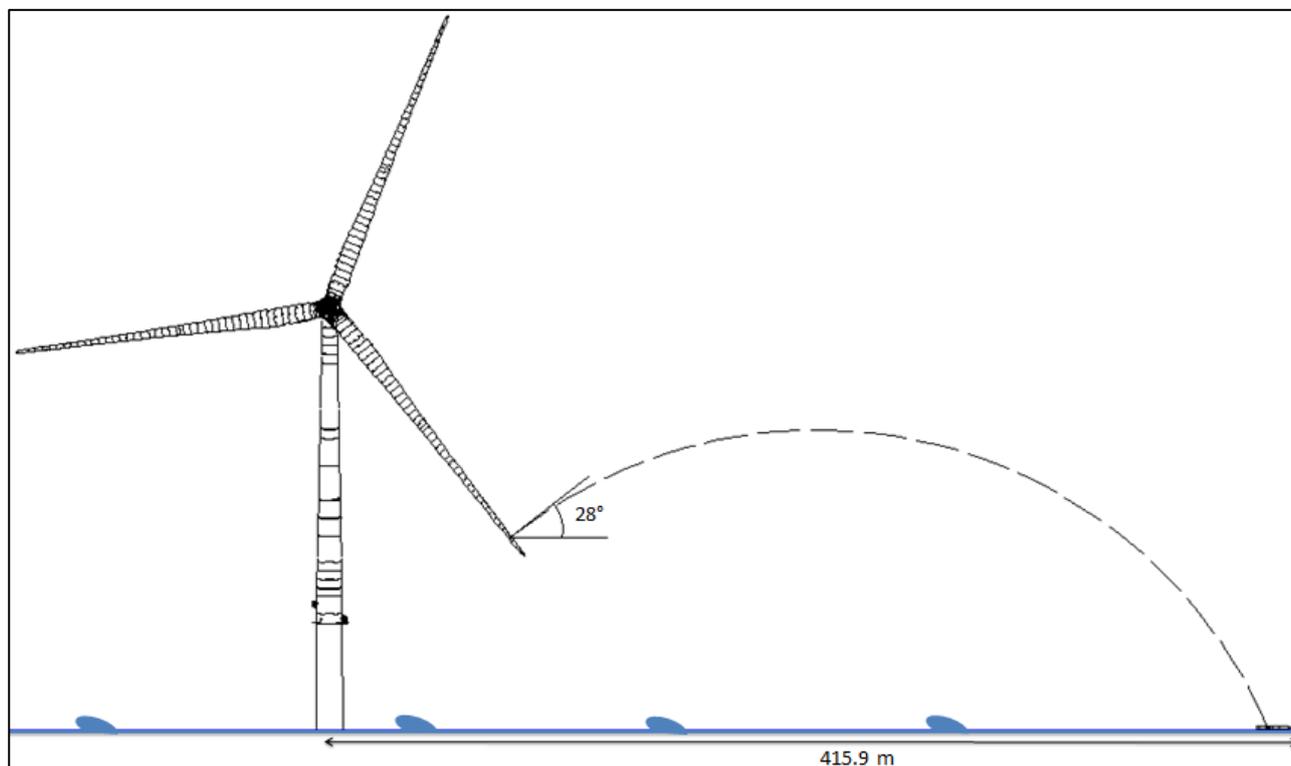


Figura 6.4 – Rappresentazione gittata massima del frammento di pala di 10m per angolo di  $28^\circ$

### 6.3 Terza ipotesi: distacco di un frammento di pala di 5m

Si è analizzato infine il caso in cui si distacchi un frammento della pala pari a 5 m considerando la seguente ipotesi semplificativa:

- Il centro di massa del frammento di pala di 5 m è posizionato ad  $1/3$  della lunghezza del frammento stesso.

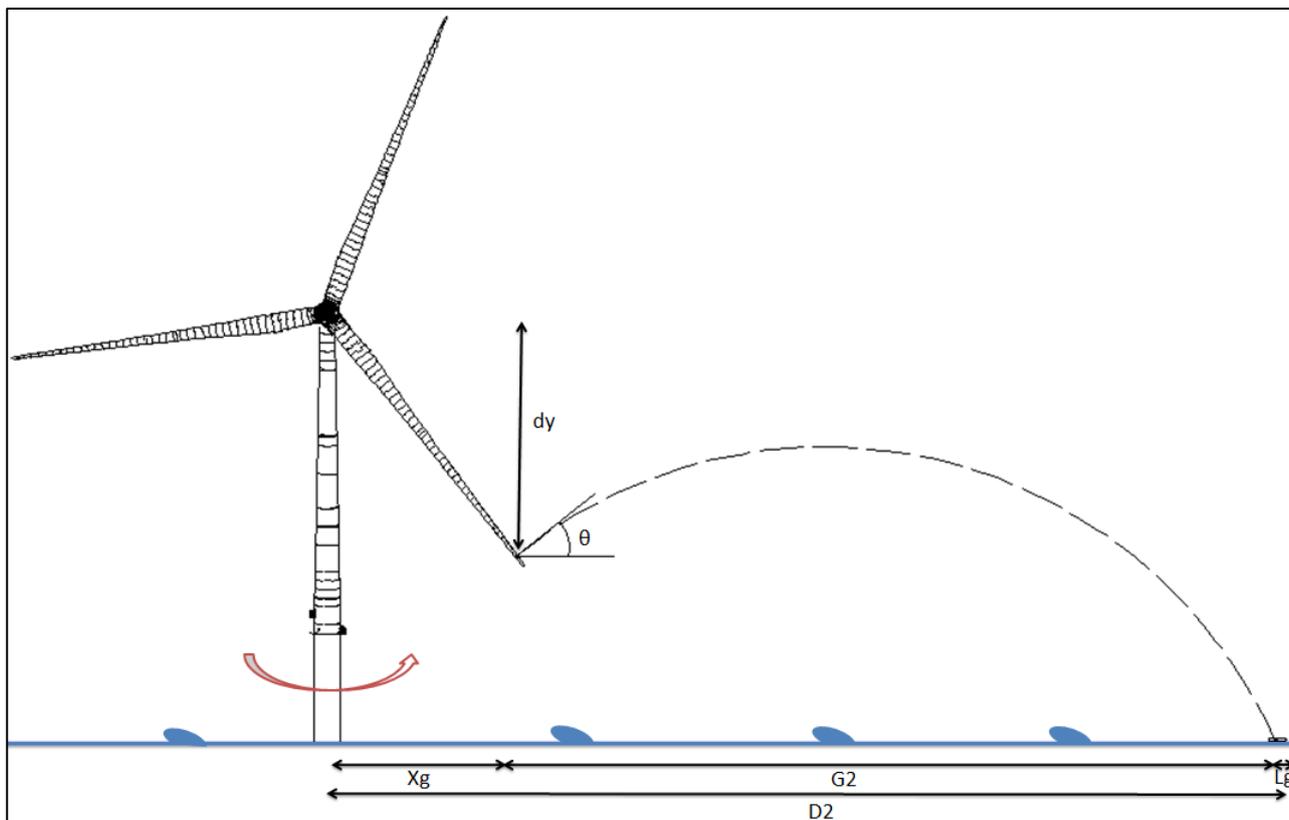


Figura 6.5 – Rappresentazione dei parametri principali di calcolo per distacco frammento di 5m

Di seguito la tabella con i risultati di gittata al variare dell'angolo di distacco.

Angolo $\theta$	Vox [m/s]	Voy [m/s]	Hg1 [m]	Hg2 [m]	Gittata teorica G1 [m]	Gittata teorica G2 [m]	Xg [m]	Lg [m]	Gittata effettiva D1 [m]	Gittata effettiva D2 [m]
0	110.3	0.0	204.7	33.3	424.0	230.3	0.0	3.3	427.3	233.6
1	110.3	1.9	204.7	33.3	430.8	244.1	1.5	3.3	432.6	249.0
2	110.3	3.9	204.6	33.4	437.3	258.5	3.0	3.3	437.7	264.8
3	110.2	5.8	204.5	33.5	443.7	273.1	4.5	3.3	442.6	280.9
4	110.1	7.7	204.5	33.5	449.9	287.8	6.0	3.3	447.2	297.1
5	109.9	9.6	204.3	33.7	455.7	302.5	7.5	3.3	451.6	313.3
6	109.7	11.5	204.2	33.8	461.4	317.0	9.0	3.3	455.7	329.3
7	109.5	13.4	204.0	34.0	466.7	331.3	10.4	3.3	459.6	345.0
8	109.3	15.4	203.8	34.2	471.7	345.1	11.9	3.3	463.1	360.3
9	109.0	17.3	203.6	34.4	476.5	358.4	13.4	3.3	466.4	375.1
10	108.7	19.2	203.4	34.6	480.8	371.1	14.9	3.3	469.3	389.3
11	108.3	21.1	203.1	34.9	484.9	383.1	16.3	3.3	471.9	402.8
12	107.9	22.9	202.8	35.2	488.6	394.4	17.8	3.3	474.1	415.5
13	107.5	24.8	202.5	35.5	492.0	404.9	19.3	3.3	476.0	427.5
14	107.1	26.7	202.1	35.9	495.0	414.7	20.7	3.3	477.6	438.8
15	106.6	28.6	201.7	36.3	497.6	423.7	22.2	3.3	478.7	449.2
16	106.1	30.4	201.3	36.7	499.8	431.9	23.6	3.3	479.6	458.9
17	105.5	32.3	200.9	37.1	501.7	439.4	25.0	3.3	480.0	467.7
18	104.9	34.1	200.5	37.5	503.2	446.0	26.5	3.3	480.1	475.8
19	104.3	35.9	200.0	38.0	504.4	451.9	27.9	3.3	479.8	483.2
20	103.7	37.7	199.5	38.5	505.2	457.1	29.3	3.3	479.2	489.8
21	103.0	39.5	199.0	39.0	505.6	461.6	30.7	3.3	478.2	495.7
22	102.3	41.3	198.4	39.6	505.6	465.4	32.1	3.3	476.9	500.9
23	101.6	43.1	197.9	40.1	505.3	468.6	33.5	3.3	475.2	505.4
24	100.8	44.9	197.3	40.7	504.6	471.1	34.8	3.3	473.1	509.3
25	100.0	46.6	196.6	41.4	503.6	473.0	36.2	3.3	470.7	512.5
26	99.2	48.4	196.0	42.0	502.3	474.3	37.6	3.3	468.0	515.2
27	98.3	50.1	195.3	42.7	500.6	475.0	38.9	3.3	465.0	517.3
28	97.4	51.8	194.6	43.4	498.5	475.3	40.2	3.3	461.7	518.8
29	96.5	53.5	193.9	44.1	496.2	475.0	41.5	3.3	458.0	519.8

30	95.6	55.2	193.2	44.8	493.5	474.2	42.8	3.3	454.0	520.3
31	94.6	56.8	192.4	45.6	490.6	472.9	44.1	3.3	449.8	520.4
32	93.6	58.5	191.6	46.4	487.3	471.2	45.4	3.3	445.2	519.9
33	92.5	60.1	190.8	47.2	483.7	469.1	46.7	3.3	440.4	519.1
34	91.5	61.7	190.0	48.0	479.9	466.5	47.9	3.3	435.3	517.8
35	90.4	63.3	189.2	48.8	475.8	463.6	49.1	3.3	430.0	516.1
36	89.3	64.9	188.3	49.7	471.4	460.3	50.4	3.3	424.4	514.0
37	88.1	66.4	187.4	50.6	466.8	456.6	51.6	3.3	418.5	511.5
38	87.0	67.9	186.5	51.5	461.8	452.6	52.7	3.3	412.4	508.7
39	85.8	69.4	185.6	52.4	456.7	448.3	53.9	3.3	406.1	505.5
40	84.5	70.9	184.6	53.4	451.3	443.7	55.1	3.3	399.6	502.1
41	83.3	72.4	183.7	54.3	445.7	438.7	56.2	3.3	392.8	498.3
42	82.0	73.8	182.7	55.3	439.8	433.5	57.3	3.3	385.9	494.2
43	80.7	75.3	181.7	56.3	433.8	428.0	58.4	3.3	378.7	489.8
44	79.4	76.7	180.6	57.4	427.5	422.2	59.5	3.3	371.3	485.1
45	78.0	78.0	179.6	58.4	421.0	416.2	60.6	3.3	363.8	480.1
46	76.7	79.4	178.5	59.5	414.3	410.0	61.6	3.3	356.1	474.9
47	75.3	80.7	177.4	60.6	407.5	403.5	62.7	3.3	348.2	469.5
48	73.8	82.0	176.3	61.7	400.4	396.8	63.7	3.3	340.1	463.8
49	72.4	83.3	175.2	62.8	393.2	389.9	64.7	3.3	331.9	457.9
50	70.9	84.5	174.1	63.9	385.8	382.8	65.6	3.3	323.5	451.7
51	69.4	85.8	172.9	65.1	378.2	375.5	66.6	3.3	314.9	445.4
52	67.9	87.0	171.7	66.3	370.4	367.9	67.5	3.3	306.2	438.8
53	66.4	88.1	170.6	67.4	362.5	360.3	68.4	3.3	297.4	432.0
54	64.9	89.3	169.4	68.6	354.4	352.4	69.3	3.3	288.5	425.0
55	63.3	90.4	168.1	69.9	346.2	344.4	70.2	3.3	279.4	417.9
56	61.7	91.5	166.9	71.1	337.9	336.2	71.0	3.3	270.2	410.6
57	60.1	92.5	165.7	72.3	329.4	327.9	71.8	3.3	260.9	403.0
58	58.5	93.6	164.4	73.6	320.8	319.4	72.6	3.3	251.4	395.4
59	56.8	94.6	163.1	74.9	312.0	310.8	73.4	3.3	241.9	387.5
60	55.2	95.6	161.8	76.2	303.1	302.0	74.2	3.3	232.3	379.5
61	53.5	96.5	160.5	77.5	294.1	293.1	74.9	3.3	222.5	371.4
62	51.8	97.4	159.2	78.8	285.0	284.1	75.6	3.3	212.7	363.1
63	50.1	98.3	157.9	80.1	275.8	275.0	76.3	3.3	202.8	354.6
64	48.4	99.2	156.6	81.4	266.5	265.7	77.0	3.3	192.8	346.1
65	46.6	100.0	155.2	82.8	257.0	256.4	77.6	3.3	182.7	337.3
66	44.9	100.8	153.8	84.2	247.5	246.9	78.3	3.3	172.6	328.5
67	43.1	101.6	152.5	85.5	237.9	237.3	78.9	3.3	162.4	319.5
68	41.3	102.3	151.1	86.9	228.2	227.7	79.4	3.3	152.1	310.5
69	39.5	103.0	149.7	88.3	218.4	217.9	80.0	3.3	141.7	301.3
70	37.7	103.7	148.3	89.7	208.5	208.1	80.5	3.3	131.3	291.9
71	35.9	104.3	146.9	91.1	198.5	198.2	81.0	3.3	120.9	282.5
72	34.1	104.9	145.5	92.5	188.5	188.2	81.5	3.3	110.4	273.0
73	32.3	105.5	144.0	94.0	178.4	178.2	81.9	3.3	99.8	263.4
74	30.4	106.1	142.6	95.4	168.2	168.0	82.3	3.3	89.2	253.7
75	28.6	106.6	141.2	96.8	158.0	157.8	82.7	3.3	78.6	243.9
76	26.7	107.1	139.7	98.3	147.7	147.6	83.1	3.3	68.0	234.0
77	24.8	107.5	138.3	99.7	137.4	137.3	83.5	3.3	57.3	224.1
78	22.9	107.9	136.8	101.2	127.0	126.9	83.8	3.3	46.6	214.0
79	21.1	108.3	135.3	102.7	116.6	116.5	84.1	3.3	35.8	203.9
80	19.2	108.7	133.9	104.1	106.1	106.0	84.4	3.3	25.1	193.7
81	17.3	109.0	132.4	105.6	95.6	95.6	84.6	3.3	14.3	183.5
82	15.4	109.3	130.9	107.1	85.1	85.0	84.8	3.3	3.6	173.2
83	13.4	109.5	129.4	108.6	74.5	74.5	85.0	3.3	-7.2	162.8
84	11.5	109.7	128.0	110.0	63.9	63.9	85.2	3.3	-18.0	152.4
85	9.6	109.9	126.5	111.5	53.3	53.3	85.3	3.3	-28.7	141.9
86	7.7	110.1	125.0	113.0	42.7	42.6	85.5	3.3	-39.5	131.4
87	5.8	110.2	123.5	114.5	32.0	32.0	85.5	3.3	-50.2	120.9
88	3.9	110.3	122.0	116.0	21.3	21.3	85.6	3.3	-60.9	110.3
89	1.9	110.3	120.5	117.5	10.7	10.7	85.7	3.3	-71.6	99.7
90	0.0	110.3	119.0	119.0	0.0	0.0	85.7	3.3	-82.3	89.0

Tabella 6.3 – Valori di gittata al variare dell'angolo di rotazione per distacco del frammento di pala di 5m

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo  $\alpha = 31^\circ$  per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa **520.4 m** dal centro della torre tubolare.

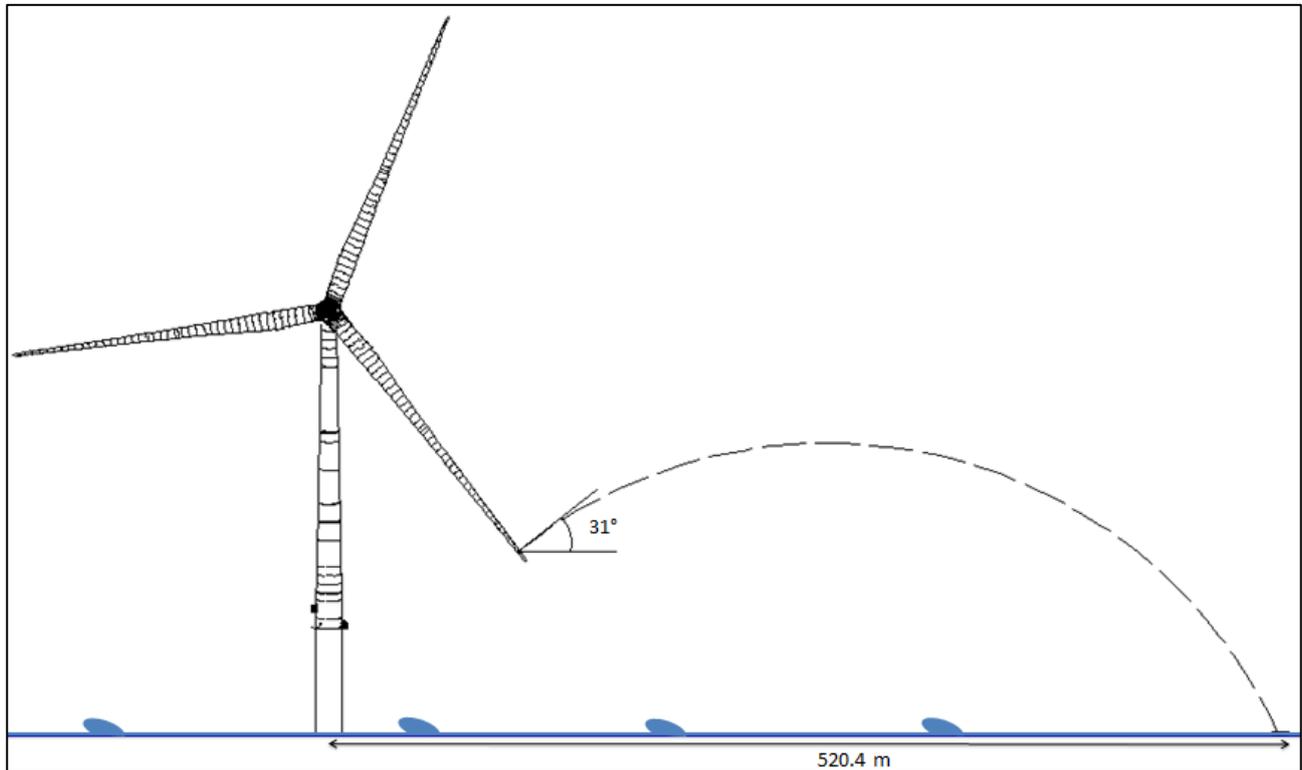


Figura 6.6 – Rappresentazione gittata massima del frammento di pala di 5m per angolo di  $31^\circ$

## 7 CONCLUSIONI

Conformemente ai contenuti del Paragrafo 7.1. "Analisi dei possibili incidenti", Capitolo 7 "INCIDENTI" dell'ALLEGATO 4 (punti 14.9, 16.3 e 16.5) "Impianti eolici: elementi per il corretto inserimento nel paesaggio e sul territorio" del D.M. 10 settembre 2010 "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili 10A11230)", il quale stabilisce che: «E' opportuno prendere in esame l'idoneità delle caratteristiche delle macchine, in relazione alle condizioni meteorologiche estreme del sito. In tal senso (...Omissis...) - andrebbe valutata la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale», è stata valutata la gittata massima degli elementi rotanti dei n. 51 aerogeneratori dell'impianto di progetto di Rimini, in caso di rottura accidentale di una pala e nell'ipotesi in cui si verifichi il distacco di un frammento di pala a 5 e a 10 m dall'estremità della stessa.

Ai fini dei calcoli è stato impiegato il modello di turbina eolica MySE6.45-180 WTGs da 6.45 MW della MingYang.

Dai calcoli è risultato che la distanza massima degli elementi rotanti, in caso di rottura accidentale, risulta essere compreso nel seguente intervallo: **266.8 m** (nell'ipotesi di rottura accidentale di una delle pale del modello di turbina eolica considerato)  $\leq$  **Gittatamax**  $\leq$  **520.4 m** (nell'ipotesi di rottura accidentale di un frammento di pala di 5 m del modello di turbina eolica considerato).

Sulla scorta del "Worst Case Scenario", ovvero delle ipotesi più gravose in termini di condizioni al contorno (condizioni di massima sicurezza), anche tenendo conto di eventuali distacchi parziali della pala, **si è deciso di adottare un valore cautelativo della Gittata massima pari a: Gittatamax= 520.4 m** pari alla gittata max del frammento di pala a 5 mt. dalla punta della stessa.

Anche considerando il maggiore valore di gittata del "Worst Case Scenario" nell'area di pertinenza di ciascun aerogeneratore non ricadono ricettori come piattaforme a mare.

A valle dei calcoli condotti per la valutazione della Gittata massima degli elementi rotanti, si può tuttavia ragionevolmente affermare che non è assolutamente verosimile che un frammento di pala si stacchi dalla stessa e venga scagliato a distanze significative, men che meno è verosimile l'ipotesi che un frammento di pala si stacchi dalla stessa e segua un moto assimilabile a quello di un proiettile scagliato con una velocità di partenza pari a quella della massima rotazione del rotore.

Le pale dei rotori di progetto, infatti, sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche.

L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato), e i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto.

Al fine di oggettivare quanto affermato, si espongono di seguito alcune ulteriori considerazioni basate sui dati costruttivi di dettaglio forniti da alcuni studi condotti dalla VESTAS. Questi dati fanno riferimento alle specifiche della macchina Vestas V136 che, in termini di metodologie e tecniche costruttive, può considerarsi del tutto analoga al modello di turbina eolica impiegata nella presente Relazione Tecnica ai fini dei calcoli.

Con riferimento al documento "VESTAS 0065-1415 V00 - Technical description of a 67 m blade" le caratteristiche strutturali di una pala di WTG sono schematizzabili come da figura seguente:

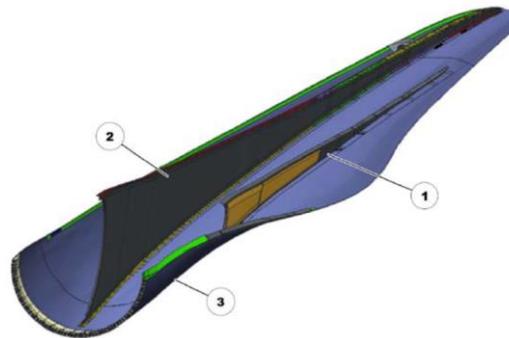


Figure 5.2: The main structural design of a 67 m blade

1	TE web	2	Main web
3	WW shell		

Figura 7.1 – Stralcio da “VESTAS 0065-1415 V00 – Technical description of a 67m blade

Ciascuna pala è quindi composta da:

- Una superficie esterna (guscio o shell) fatta di materiale composito rinforzato in fibra di vetro e realizzata in due semigusci (LW shell e WW shell – mostrato in figura);
- Due rinforzi interni (TE WEB e Main WEB), anch’essi in materiale composito e internamente accoppiati ai gusci, che sostengono il carico aerodinamico della pala.

Da un punto di vista del dimensionamento strutturale, la progettazione della pala segue una serie di norme citate nel documento VESTAS “0067-7060\_V00 - General Description 4MW Platform”, Par. 8.1..

Per quel che concerne la presente analisi, si evidenzia che la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC 61400-1, che impone l’utilizzo di condizioni particolarmente gravose. Le norme tecniche seguite in fase di dimensionamento sono tali da poter rendere trascurabile l’ipotesi di un significativo danneggiamento della pala per tutta la vita utile della WTG.

Ciononostante, nella remota ipotesi in cui ci sia un danneggiamento del materiale che compone i gusci o i rinforzi interni della pala, è assolutamente impossibile che si stacchi un frammento terminale della pala, dal momento che -per come la pala è costruita- non esistono giunzioni trasversali rispetto allo sviluppo della pala, ma esclusivamente la giunzione longitudinale tra i due semigusci. L’unica -remota- possibilità di danneggiamento riguarda una “separazione” parziale dei due semigusci. In questo scenario i rinforzi interni e la parte di semiguscio non danneggiata tratterrebbero la parte di guscio ipoteticamente rovinata e la macchina andrebbe automaticamente in pausa, evitando categoricamente la possibilità di proiezione di un frammento di pala alla massima velocità.

Non è pertanto ipotizzabile la rottura improvvisa e di netto di un frammento della pala con proiezione dello stesso.

Inoltre, è doveroso precisare che le turbine eoliche sono dotate di un sistema di sicurezza in grado di mandare in pausa la macchina a seguito di sbilanciamenti del rotore, eccessivo carico aerodinamico sulla pala o scostamenti sensibili tra velocità del vento e power curve.

Il danneggiamento di una pala che per quanto già spiegato evidentemente precede qualunque ipotesi di proiezione di un frammento della stessa- farebbe funzionare il rotore in condizioni non bilanciate, e

porterebbe necessariamente il sistema di sicurezza a rilevare almeno una delle tipologie di errori codificate come di seguito:

- "Tower Acceleration": dovuto a un forte sbilanciamento del rotore.
- "Power Curve Error": dovuto a un forte scostamento rispetto alla Power Curve attesa (che potrebbe essere generato da una variazione del profilo pala);
- "Tilt yaw Control": dovuto ad un eccessivo carico sulla pala misurato da un sensore.

Ciascuna di queste anomalie mette la macchina in pausa, e ferma quindi il rotore in attesa di un intervento tecnico. Non è pertanto possibile che il rotore giri alla sua massima velocità se una delle pale è danneggiata, e quindi che scagli un frammento di pala alla massima velocità ipotizzabile.

Si richiama inoltre il fatto che il modello turbina eolica è dotato di un sistema di protezione contro le fulminazioni per la torre, per l'hub e per le pale. In particolare, con riferimento alle pale, si riporta di seguito uno stralcio dal documento VESTAS "0059-1120 V02 - Lightning protection and EMC" che descrive il sistema di protezione dalle fulminazioni per macchine come quella utilizzata di progetto.

#### The V126 and V136 blade

The lightning protection system for the blade consists of 4 main elements: tip protection receptors, surface protection, down conductor, and lightning band.

The tip protection receptors consist of a solid metal tip and an array of lightning receptors. The array of lightning receptors has 4 lines of receptors along the leading and trailing edge of the windward and leeward shells. The solid metal tip and the lightning receptors preferentially attract lightning which results in few lightning attachment events to the fibreglass shells or to the main portion of the blade. The solid metal tip and receptors are connected with an insulated, high-voltage cable.

A portion of the windward and leeward shells between the array of lightning receptors and the root is covered with an expanded metal foil. As with the solid metal tip and array of lightning receptors, the expanded metal foil provides a preferred lightning attachment point to protect the uncovered portion of the blade from direct lightning strikes. The expanded metal foil is connected to the array of lightning receptors and the down conductor.

The down conductor consists of insulated high-voltage cable routed along the trailing edges of the blade. The high-voltage cable are chosen in accordance with IEC 61400-24.

The down conductors terminate at the blade band at the root of the blade. The blade band serves as the interface to the LCTU. See [section 3.6 Protection of the main bearings, page 10](#), for more information about the LCTU.

Figura 7.2 – Stralcio da "VESTAS 0059-1120 V02 – Lightning protection and EMC"

Si evince che ciascuna pala è dotata:

- Di un recettore in punta per i fulmini (solid metal tip);
- Di un array di ricettori metallici (lightning receptors);
- Di una rete metallica (expanded metal foil);

che sono collegati ad un cavo di scarico dell'alta tensione (down conductor).

Pertanto, in caso di fulminazione di una delle pale del rotore, la corrente di fulminazione sarebbe scaricata a terra e non comporterebbe alcun danneggiamento della pala. Valgono, ovviamente, in caso di ipotetico danneggiamento da parte di un fulmine, le considerazioni fatte precedentemente.

Per quanto spiegato è del tutto evidente che, anche in caso di rottura del frammento di una pala, lo stesso rimarrebbe vincolato (sostanzialmente "appeso") alla restante parte della pala e non sarebbe proiettato. Peralto anche nella assolutamente remota ipotesi di distacco del frammento, la maggior parte dell'energia cinetica sarebbe spesa per rompere il vincolo del frammento alla pala.

---

Si ritiene pertanto di confermare che l'unica condizione di proiezione di frammento ipotizzabile (non perché plausibile, ma esclusivamente perché si è in presenza di una giunzione bullonata e, quindi, di una discontinuità strutturale) è il distacco della pala dal rotore, per la quale valgono le considerazioni espone nella presente Relazione Tecnica specialistica.

**Alla luce delle considerazioni sopra espone si può affermare che la realizzazione delle turbine nelle aree individuate non costituirebbe pericolo in caso di distacco di pala dal mozzo del rotore né di interferenza tra le turbine.**

---

## 8 RIFERIMENTI

/A1/ Annex 1 WTG drawings of MySE6.45

/A2/ Annex 2. -Technical Specification of MySE6.45-180

/A3/ Health effects and wind turbines: A review of the literature, Knopper L D and Ollson CA. – Environmental Health, 10:78; 2011;

/A4/ Adverse health effects of industrial wind turbines: a preliminary report, Nissenbaum M, Aramini J, Hanning C – 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN); London, UK; 2011;

/A5/ "VESTAS V80 BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS", PB Power Ltd. (July 2001);

/A6/ Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan"

/A7/ D.M. 10 settembre 2010 "Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili 10A11230"

/A8/ "VESTAS 0067-7060\_V00 - General Description 4MW Platform", Par. 8.1., VESTAS;

/A9/ "VESTAS 0065-1415 V00 - Technical description of a 67 m blade", VESTAS;