



REGIONE BASILICATA



PROVINCIA DI POTENZA



COMUNE DI PIETRAGALLA



COMUNE DI POTENZA



COMUNE DI  
VAGLIO BASILICATA

Committente:

**EXENERGY** s.r.l.s.

Via Principe Amedeo, n. 7 – 85010 Pignola (Pz)

Oggetto:

PROGETTO DEFINITIVO  
"PARCO EOLICO POGGIO D'ORO"

Titolo:

Relazione specialistica -  
Analisi degli effetti della rottura  
degli organi rotanti

Tavola:

**A.7**

-Progettista Architettonico/Elettromecc.:

Ing. Paolo Battistella

-Committente:

-Responsabile V.I.A.:

Arch. Antonio De Maio



**VEGA** sas  
LANDSCAPE ECOLOGY  
& URBAN PLANNING

-Consulenza Geologica:

Dott. Geologo Viviani

|    |           |         |      |       |                      |
|----|-----------|---------|------|-------|----------------------|
|    |           |         |      |       | Data:<br>Giugno 2019 |
|    |           |         |      |       |                      |
|    |           |         |      |       |                      |
|    |           |         |      |       |                      |
| 0  | Emissione | 06/2019 | MS   | BP    |                      |
| N° | REVISIONE | DATA    | RED. | APPR. |                      |

Committente:  
**EXENERGY SRL**

Via Lavaredo,44/52 – 30174 Venezia Mestre

Parco Eolico Poggio d' Oro  
**ANALISI DEGLI EFFETTI ROTTURA ORGANI ROTANTI  
A7**

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| A. INTRODUZIONE.....                                   | 2  |
| B. CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE .....  | 3  |
| C. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO.....                  | 4  |
| D. ROTTURA DELL'INTERA PALA DEL ROTORE.....            | 6  |
| E. ROTTURA DI UN FRAMMENTO DELLA PALA DEL ROTORE ..... | 9  |
| F. CONCLUSIONI .....                                   | 10 |
| G. ALLEGATI .....                                      | 10 |

|           |               |      |             |
|-----------|---------------|------|-------------|
|           | Redatto       | Note | Data        |
| Emissione | P.Battistella |      | Giugno 2019 |

## A. INTRODUZIONE

Lo scopo del calcolo è la definizione della gittata della pala e degli eventuali frammenti, in caso di rottura, in relazione alla dimensione, alla velocità di esercizio e all'angolo di distacco.

La definizione del calcolo è lasciata al progettista della fase esecutiva che, una volta scelta la turbina specifica, dovrà stabilire quali siano le modalità di calcolo più conservative che riescano a comprendere tutti i possibili casi applicabili.

Da un punto di vista strettamente teorico, infatti, il comportamento di un corpo lanciato in atmosfera in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto al precedente, frenando notevolmente il corpo.

Considerando la natura della pala, avente profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, per la determinazione di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione con il vento (portanza e resistenza) e può essere completamente sviluppato solo conoscendo con precisione la geometria della pala e le modalità di rottura possibili.

Tutti questi effetti inducono ad affrontare in questa fase progettuale il problema con modalità semplificata e conservativa, per essere sempre a favore della sicurezza.

## B. CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore.

Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato *yaw control*, che modifica l'orientamento della navicella, allineando la macchina rispetto alla direzione del vento e garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

La figura seguente evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.

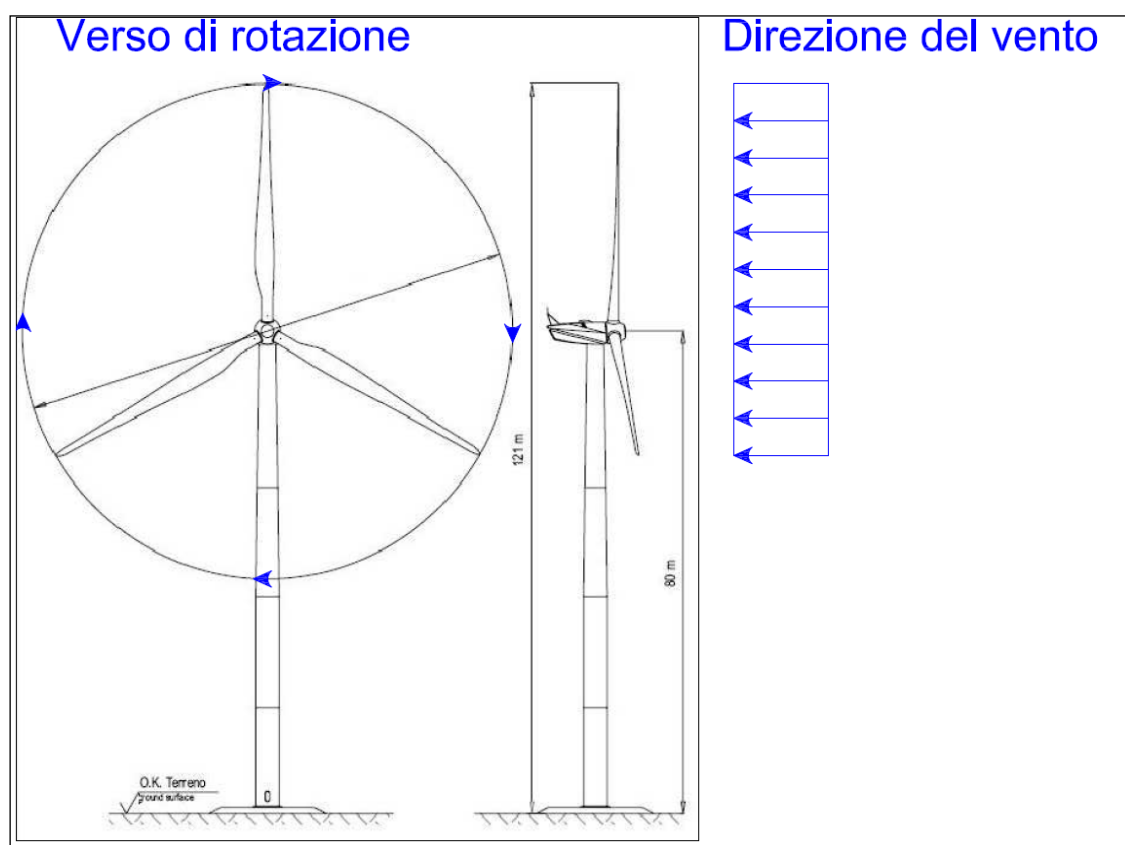


Figura 1 – Schema di relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca.

Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

## C. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO

L'aerogeneratore prescelto quale rappresentativo per il Parco Eolico "Poggio d'Oro" è la turbina Vestas V117 nella configurazione a 4,2MW di potenza.

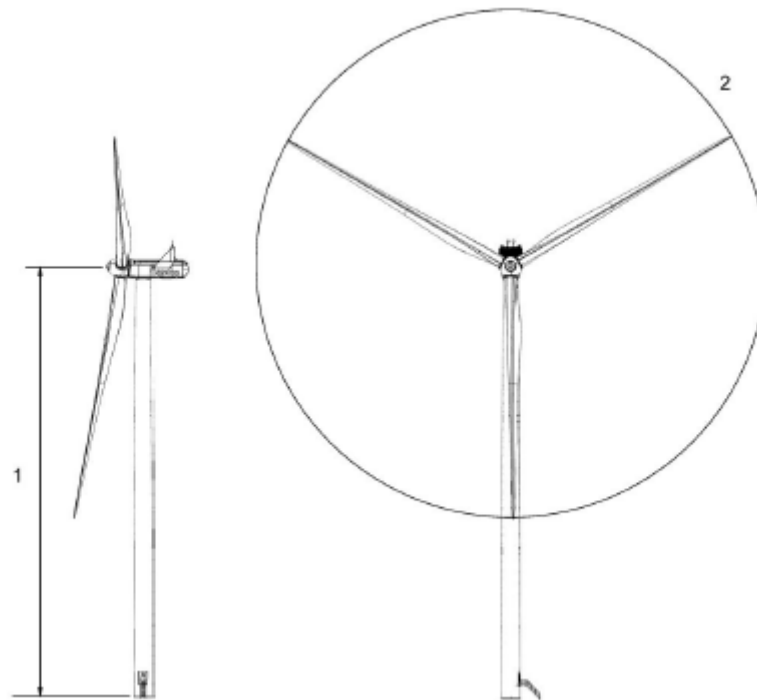


Figura 2 Dimensioni (1 altezza torre - 2 diametro rotore)

---

### OPERATIONAL DATA

|                                      |                                                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Rated power                          | 4,000/4,200 kW                                    |
| Cut-in wind speed                    | 3 m/s                                             |
| Cut-out wind speed                   | 25 m/s                                            |
| Re cut-in wind speed                 | 23 m/s                                            |
| Wind class                           | IEC IB-T/IEC IIA-T/IEC S-T                        |
| Standard operating temperature range | from -20°C* to +45°C with de-rating<br>above 30°C |

---

### SOUND POWER

|                                                     |        |
|-----------------------------------------------------|--------|
| Maximum                                             | 106 dB |
| Sound Optimised Modes dependent on site and country |        |

---

### ROTOR

|                |                                              |
|----------------|----------------------------------------------|
| Rotor diameter | 117 m                                        |
| Swept area     | 10,751 m <sup>2</sup>                        |
| Air brake      | full blade feathering with 3 pitch cylinders |

---

### ELECTRICAL

|           |            |
|-----------|------------|
| Frequency | 50/60 Hz   |
| Converter | full scale |

---

Figura 3 Caratteristiche tecniche principali V117-4.2MW

|                                         |                                            |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>GEARBOX</b>                          |                                            |
| Type                                    | two planetary stages and one helical stage |
| <b>TOWER</b>                            |                                            |
| Hub heights                             | 84 m (IEC IIA) and 91.5 m (IEC IB)         |
| <b>NACELLE DIMENSIONS</b>               |                                            |
| Height for transport                    | 3.4 m                                      |
| Height installed (incl. CoolerTop®)     | 6.9 m                                      |
| Length                                  | 12.8 m                                     |
| Width                                   | 4.2 m                                      |
| <b>HUB DIMENSIONS</b>                   |                                            |
| Max. transport height                   | 3.8 m                                      |
| Max. transport width                    | 3.8 m                                      |
| Max. transport length                   | 5.5 m                                      |
| <b>BLADE DIMENSIONS</b>                 |                                            |
| Length                                  | 57.2 m                                     |
| Max. chord                              | 4 m                                        |
| Max. weight per unit for transportation | 70 metric tonnes                           |

*Figura 4 Caratteristiche tecniche V117-4.2MW*

## D. ROTTURA DELL'INTERA PALA DEL ROTORE

Viene eseguito il calcolo teorico della gittata nel caso di rottura della pala dell'aerogeneratore preso a riferimento. Vista la complessità del calcolo, si è proceduto assumendo le seguenti ipotesi di calcolo per definire un modello che sia rappresentativo del fenomeno e che sia nello stesso tempo conservativo. Le ipotesi sono:

- 1) **distacco netto ed istantaneo** di un'intera pala alla sua radice. Visti i materiali che costituiscono la pala tale ipotesi è remota in quanto non si ha una rottura di tipo fragile (i compositi tendono ad avere una rottura progressiva con sfilamento delle fibre) salvo la remota possibilità del tranciamento dei prigionieri di base;
- 2) baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
- 3) **assenza di attriti viscosi** durante il volo: questa ipotesi risulta assai conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche oltre al 20% rispetto alla durata teorica;
- 4) **distacco in corrispondenza di un angolo di 53°** rispetto al piano orizzontale che in questo caso garantisce la massima gittata;
- 5) distacco alla **rotazione di funzionamento massima**, ovvero corrispondente ad una velocità del rotore di 17,66rpm che corrisponde al limite dei 2000 rpm del generatore con entrata in funzione della protezione di sovravelocità (Over speed protection);
- 6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità nominale;
- 7) effetti di "portanza" del profilo alare stimati cautelativamente al 10%.

Considerando:

**Hm** = Altezza al mozzo dell'aerogeneratore

$$= 91,5 \text{ m}$$

**Lp** = Lunghezza della pala dell'aerogeneratore

$$\approx 117/2 \text{ m}$$

$$= 58,5 \text{ m}$$

**Dcm** = Distanza dal mozzo del Centro di Massa della Pala

$$= \text{Lunghezza pala} / 3$$

$$= 19,5 \text{ m}$$

**Vang** = Max Velocità Angolare Rotore

$$= 17,66 \text{ giri/min}$$

$$= 17,66 * 2 * \pi / 60$$

$$= 1,85 \text{ rad/s}$$

L'altezza (ordinata) al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

**Or** = Ordinata rottura

$$= H_m + D_{cm} \cdot \cos(53^\circ)$$

$$= 107,96 \text{ m}$$

La Velocità Lineare del Centro di Massa,  $V_{max}$ , è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$

**Vmax** = Velocità Lineare al Centro di Massa

$$= V_{ang} \cdot D_{cm}$$

$$= 36,0 \text{ m/s}$$

Le componenti Verticale  $V_y$  ed Orizzontale  $V_x$  della velocità lineare sono quindi:

**Vy** = Componente Verticale Velocità

$$= V_{max} \cdot \sin 53^\circ$$

$$= 21,7 \text{ m/s}$$

**Vx** = Componente Orizzontale Velocità

$$= V_{max} \cdot \cos 53^\circ$$

$$= 28,8 \text{ m/s}$$

Il tempo necessario  $T_y$  perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

**Ty** = Tempo di decelerazione Verticale

$$= V_y / g$$

L'altezza Massima  $H_{max}$  si ottiene da:

$$\mathbf{H_{max}} = O_r + 1/2 \cdot g \cdot T_y^2$$

$$= 127,22 \text{ m}$$

Dove:

$T_y$  = Tempo di decelerazione Verticale

$$= V_y / g$$



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

$$\begin{aligned} T_{max} &= \text{tempo di decelerazione} + \text{tempo di caduta} \\ &= T_y + \sqrt{(H_{max} \cdot 2/g)} \\ &= 7,3 \text{ s} \end{aligned}$$

La distanza massima **DLmax** dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

$$DL_{max} = \sqrt{(V_x \cdot T_{max} - D_{cm} \cdot \sqrt{2/2})^2 + (V_v \cdot T_{max})^2} = \mathbf{221,40 \text{ m}}$$

Considerando un incremento del 10% della distanza e sommandoci la lunghezza dei 2/3 della pala si arriva ad un valore pari a:

$$\mathbf{D_{max} = 282,54 \text{ m}}$$

Si ricorda che tale valore è la gittata massima teorica alla quale può arrivare la pala tranciata alla radice secondo tutte le ipotesi fatte che risultano tutte eseguite secondo i principi conservativi (ovvero scegliendo condizioni più sfavorevoli).

Pertanto tale valore può essere assunto quale limite di sicurezza nei riguardi della rottura degli organi rotanti (pala).

## E. ROTTURA DI UN FRAMMENTO DELLA PALA DEL ROTORE

La seguente analisi prende a riferimento lo studio pubblicato da *BP Power*<sup>1</sup>, ente scientifico di ricerca certificato, su richiesta di *Vestas Wind Systems*.

Lo studio ha lo scopo di stimare le conseguenze della perdita di parte della pala, ovvero di definire la gittata del materiale in caso di rottura, nell'ipotesi di condizioni nominali di funzionamento. I frammenti presi in considerazione hanno dimensione di 5m e 10m.

Il calcolo effettuato da *BP Power* è relativo alla turbina Vestas V80

|                              | Vestas V80 |
|------------------------------|------------|
| Diametro m                   | 80         |
| Area Spazzata m <sup>2</sup> | 5.027      |
| Velocità di rotazione rpm    | 19         |
| Intervallo operativo rpm     | 16,7 - 19  |
| Numero pale                  | 3          |

Le ipotesi del modello sono state definite sulla base del caso peggiore, ovvero della maggiore distanza raggiunta dal distacco del corpo.

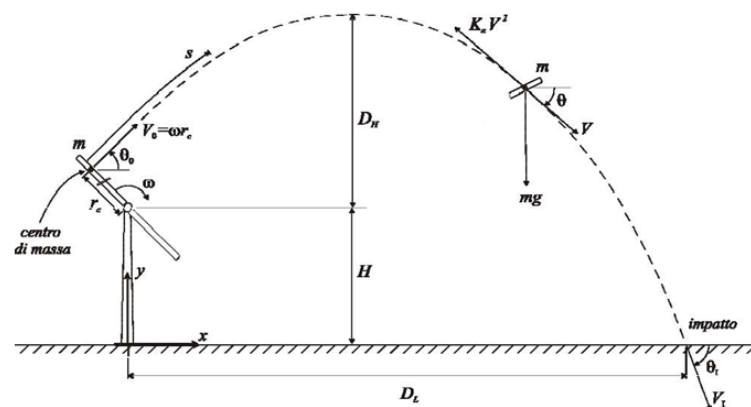


Figura 5 - Schematizzazione della traiettoria.

I risultati presentati nel documento<sup>2</sup> mostrano gittate (per pala intera o frammento) che vanno oltre i 500m. È da ritenersi però che tali risultati siano derivanti dal tipo di approccio teorico al problema.

<sup>1</sup> Blade throw calculation under normal operating conditions V80 - 2MW.

<sup>2</sup> Blade throw calculation under normal operating conditions V80 - 2MW.

Gli eventi reali sono sempre molto più complessi rispetto al modello teorico utilizzato poiché dipendono dalle caratteristiche del frammento (massa, forma, aerodinamicità...), dal meccanismo di rottura (urto, tipo di rottura, angolo di distacco,...) e dalle condizioni del momento (vento, turbolenza, velocità di rotazione,...).

Come descritto nel documento di riferimento (si riporta in italiano) *“l’esperienza pratica su una casistica di 1578 dati (fino all’agosto del 2006) ha dimostrato che nel caso di distacco della pala, o parti di essa, l’unico moto che si è registrato è stato un moto di complex rotational e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre **ben al di sotto delle lunghezze riportate nel calcolo**. Le parti staccatesi, in genere piccole, a causa di guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine), sono state trovate a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre.”*

Risulta quindi improponibile, per il numero di variabili associate, un calcolo deterministico della gittata di un ipotetico frammento<sup>3</sup>.

Come indicato dallo studio di riferimento, è corretto riferirsi al calcolo teorico utilizzandolo quale valore di riferimento per avere un limite di sicurezza. In questa ottica si indica il valore definito nel paragrafo precedente.

## F. CONCLUSIONI

Lo sviluppo dell’analisi della rottura di una pala nella sezione di radice, con distacco netto e immediato in corrispondenza dell’angolo di maggior effetto, con assenza dell’effetto viscoso (rallentante) dell’aria e supponendo un effetto “portante “ che prolunghi la traiettoria del 10% è da ritenersi un approccio conservativo al problema.

Conseguentemente assumere il valore risultante di **285m quale distanza di sicurezza** è da ritenersi una scelta congruente con quanto avviene in alti campi della progettazione.

## G. ALLEGATI

*Blade throw calculation under normal operating conditions V80-2MW - Vestas, 20.08.2005*

---

<sup>3</sup> Sarebbe forse più opportuno affrontare il tema con una analisi di rischio adeguata (safety matrix) che però esulta dallo scopo del lavoro.

Class I

JULY 2001

# BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS R01

V80 – 2MW



## Introduction

*The discussions are based on the original report issued by BP Power on request of Vestas Wind Systems A/S in 2001.*

*The findings of the original report have been reviewed considering the operation experience of the last years on the same type of wind turbine and further information from the wind turbine design hypothesis. Newer hints have been highlighted with italic letters.*

Following discussions between Mr Bjarne Iverson of Vestas Wind Systems A/S and Mr Paul van Lieshout of PB Power Ltd, PB Power has been asked on Monday the 2<sup>nd</sup> of July 2001, to consider the consequences of the loss of a blade, or part of a blade, from a Vestas V 80 wind turbine in regards to 'distance thrown'.

The objective of this work is to provide an estimate of how far such material might be thrown or carried in a failure scenario.

As requested by Vestas, the failure scenario considered in this study is that of a blade throw under normal operational conditions (as might occur due to for instance blade-tower strike or a lightening strike etc.).

PB Power has investigated in a theoretical manner, the distance that blade sections of 5m and 10m as well as an entire blade can travel.

*It has to be emphasized that the from the design point of view the combined partial safety factors for loads, materials and the consequences of failure are prescribed not being less than those specified in IEC61400-1 standard. According to this classification the wind turbine blades can be considered fail-safe.*

This report presents the initial findings for discussion with Vestas.

Blade flight due to abnormal operational turbine conditions is not reported on. Additional investigations regarding runaway rpm could be assessed, however this should be done together with a thorough investigation of the safety procedures, applied by Vestas to the turbine in order to ensure against the runaway situations.

## Summary of Findings

Results of the study are presented in Appendix One of this report. Several cases are presented in an attempt to cover the likely range of flight trajectories, which could be possible under a blade throw scenario. Due to time constraints, PB Power has simplified the problem by considering the principal averaged or 'effective' forces acting on the blade during its flight path, instead of computational modelling of the blade throw in the time-domain.

The results of the analysis indicate that under the most likely 'complex rotational' motion of the blade or blade section (case 3), the travel distance would be less than 350 m in the worst case considered and under 300 m in most other cases considered when detachment occurs at a rotational speed of 20 rpm. However, we note that in the unlikely 'pure javelin' scenario (Cases 1 and 2) flight distance could exceed 500m in certain instances.

*Practical experience on a fleet of 1578 (up to August 2006) has shown that the real conditions in case of detachment of blade parts have been only 'complex rotational' and flight distance has always been far below the results of this simplified calculation.*

*Detached parts, usually small, due to damages caused by external events (such as high energy lightnings) have been found at no more than 40-50m from wind turbine tower base.*

## Methodology and Assumptions

From a theoretical point of view, not taking aerodynamic characteristics into account, the longest flight will be reached when the blade or blade section detachment occurs when the blade is at 45 degrees. Drag forces

will act on the blade mass shortening the flight time (and distance), however due to the aerodynamic characteristics of the blade section a net lift force might prolong the flight and lengthen the distance. This depends largely on the rolling, yawing and pitching of the blade during its flight. This has not been modelled within the time provided. Instead a net 'average lift' has been used in the different simulations.

### ***Rotor speed Condition***

The 'normal' operating rotorspeed is taken to be 20 rpm. In reality this rotational rpm at rated wind speed is between 16.7 and 19 rpm. The figure of 20 rpm is used to provide a 5% margin to account for transient deviations from nominal (due to generator slip, rotor and pitch system lag effects). This results in slightly larger flight paths compared with the 16.7-19 rpm.

### ***Modelling of Blade Trajectory and Forces / Moments Acting***

PB Power has taken the 'worst case' scenario, which would result in the longest flight for (a part of) the blade when detached. The flight path of the blade or a blade section is calculated on the basis that the blade/blade section becomes detached at an angle of 45 degrees to the vertical before top dead centre of the blade (ie at an azimuth of 135 degrees).

The combination of forces and moments acting on the blade/blade section under a blade throw condition is clearly a highly complex problem to model. The initial trajectory will be determined principally by the launch angle and the inertial forces and moments acting on it. These include for example the impulse resulting from a tower strike event or the reactions generated by flapwise, pitchwise and edgewise moments acting on the blade section at the time of separation.

Once the blade has become airborne, it will continue to rotate (due to its angular momentum and at a rate defined by the external moments acting and the principal moments of inertia of the section) until acted upon by external aerodynamic forces and moments. The only inertial force acting on the blade section at this stage is the force due to gravity.

Of the aerodynamic forces, static lift, static drag and dynamic lift forces and moments will all act on the body as it moves and tumbles through the air. These will affect the path/trajectory of the blade section.

PB Power has simplified the problem by considering the principal averaged or 'effective' forces acting on the blade during its flight path. These are described below.

In general terms, the **time** of travel of the blade/blade section is determined by its initial vertical velocity (at the centre of gravity of the blade/section), its position relative to ground, the vertical acceleration (ie gravity plus effective lift force) acting upon it and the drag acting on it. The calculated time is then used to calculate the horizontal travel in-plane and out-of-plane.

The horizontal distance travelled is determined by the initial horizontal speed at detachment, the in-plane and out-of-plane drag forces acting upon the body during its flight and the time as defined above.

The in-plane distance is affected by drag and the initial horizontal in-plane speed when detached at 45 degrees. The out-of-plane distance is affected by drag forces and the wind speed at the time of detachment. The vectorial sum of these two distances result in the total distance travelled.

#### Inertial Forces and Moments other than Gravity

These are not modelled. Instead a non rotational or a complex rotational trajectory is assumed.

#### Aerodynamic Lift

The effect of a net lift force (static and dynamic) acting on the blade is modelled as a force that would give rise to an acceleration that would assist or counter the acceleration due to gravity. Values of 0g, -0.05g and -0.1g are used.

### Aerodynamic Drag

Due to the time constraint, in-plane drag has been assumed to act in the horizontal plane only. In reality the force would act through the line of (linear) motion of the blade and thus would act to decelerate the blade in the horizontal plane and assist gravity in the vertical plane on the upward path but act against it on the downward path. This simplification will result in a slight under-estimation of total distance travelled in the 'javelin' mode, since the vertical components could be expected to cancel each other out whilst the horizontal component will be lower overall than has been assumed.

In-plane drag is treated as bluff body drag on the sectional area of blade perpendicular to the flight path of the blade and parallel to the oncoming wind. For cases 1 and 2 below, surface drag might be as (or indeed more) significant as (than) bluff body drag since it will act over the combined upper and lower surfaces in plane YX. This effect has not been modelled in this analysis and should be noted when interpreting the results from cases 1 and 2 (javelin mode). For case 3, bluff body drag is the dominant effect.

The out of plane drag force generated by the incident wind is used to calculate the downstream 'carry' of the blade (movement of the blade parallel to the wind).

### **Blade Characteristics**

The initial tangential velocity of the blade/blade section is calculated for the centre of mass of the blade/blade section in question. Owing to time constraints, we have assumed that the spanwise location of the centre of gravity of each blade section acts at 28.75% of the spanwise length. This figure was calculated on the basis of the known location of centre of gravity of the whole blade. We are aware that at outer sections, the centre of gravity will lie further towards the geometric centre of the section in question. The effect of our simplification is to underestimate the distance travelled by the blade section, however this might be off set by the slightly higher rpm (20 rpm instead of the 16.7-19 rpm).

We have assumed a 1m radial offset of the blade from the centre of rotation.

The plan areas used in the study are shown in the table below. The coordinate system shown in Figure 1 applies.

Plan areas shown are approximate (given the available time) and are based on section data provided by VESTAS. For simplicity, the plan area in plane YZ has been calculated to be 67% of the product of the maximum thickness and the chord at the location of interest. The sectional masses are based on mass densities provided by VESTAS. We note that the lightening conductor located at the tip may alter the 5m and 10m masses assumed below. The whole blade mass is known to be 6300 kg.

| (Outboard)<br>Section<br>of blade | plan area<br>Plane XY<br>m <sup>2</sup> | plan area<br>Plane XZ<br>m <sup>2</sup> | plan area<br>Plane YZ<br>m <sup>2</sup> | mass<br>kg |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------|
| 5                                 | 2.52                                    | 0.06                                    | 0.10                                    | 82.7       |
| 10                                | 9.79                                    | 1.07                                    | 0.24                                    | 345.8      |
| 39                                | 81.46                                   | 22.80                                   | 2.38                                    | 6300.0     |

### **Cases Considered**

All failure conditions have been assumed to occur with the rotor in the upwind position in a windspeed of 25 m/s. This again is conservative and provides the longest out-of-plane travel distance.

Three failure trajectories have been considered. These are described under Cases 1, 2, and 3 below.

#### **Case 1: Non Rotational Motion**

There is no blade motion about axes XX, YY, ZZ. Axis XX is aligned with the overall path trajectory. Axis YY lies in the vertical plane. This thus result in a 'javelin' trajectory and would provide a 'worst case' theoretical scenario. This result in the 'longest theoretical throw.



Therefore:-

- No significant lift is generated in the in-plane direction
- Maximum (bluff body) drag is generated in the out of plane direction.
- In-plane drag acts over the cross sectional area in plane YZ.

### **Case 2 Non Rotational Motion**

Axis XX is aligned with the overall path trajectory. Axis YY lies in the horizontal plane. Once the blade has reached this position, there is no subsequent blade motion about axes XX, YY, ZZ. This thus again results in a 'javelin' trajectory.

Therefore:-

- The trajectory on the upward path is augmented by lift generated by the blade (the blade sees the effective, incident wind along axis XX at an incoming angle determined by the blade in-plane speed, the out of plane wind speed and the angle subtended by the blade to the horizontal). On the downward trajectory, lift acts in the opposite direction to increase the rate of fall of the blade.

Three cases are modelled:

**Case 2a** The net effect of lift on flight time is zero.

The (approximate) solution to this is given in Case 1 by the in-plane distance only.

**Case 2b** Net effect of lift on flight time is to increase it by 5%

**Case 2c** Net effect of lift on flight time is to increase it by 10%, this is again a 'worst case' situation, resulting in the longest flight time.

Out of plane drag acts over the plan area in plane XZ.

In-plane drag acts over the plan area in plane YZ.

### **Case 3 Complex Rotational Motion**

There is complex blade motion about axes XX, YY, ZZ. This is, without performing additional modelling, the most likely flight path scenario.

The blade rotates about axis ZZ due to angular momentum imparted to it at the point of failure (ie due to rotor torque or due to tower strike). Out of plane wind incident on the blade causes rotation of the blade about axis YY (spanwise centre of gravity and aerodynamic centre of blade (or blade section) are not coincident). Out of plane wind incident on the blade causes rotation of the blade about axis XX (chordwise centre of gravity and aerodynamic centre of blade (or blade section) are not coincident).

In-plane and out of plane drag are dominated by rotation about XX and YY axes. To simplify the problem, we have assumed an effective area equal to the plan area in the plane XY multiplied by the square of the cosine of 45 degrees.

In-plane lift is dominated by rotation about the axis XX. We have assumed a 10% increase in flight time due to lift effects.

Three cases are modelled to reflect differing values of 'effective' drag coefficient:-

**Case 3a** –Cd (in plane and out of plane) = 0.5

**Case 3b** –Cd (in plane and out of plane) = 1.0

**Case 3c** –Cd (in plane and out of plane) = 1.5

### **Discussion of Findings**

Cases 1, 2a, 2b and 2c show that, if the flight trajectory were to be 'non rotational', then 5m and 10m sections could feasibly travel a distance of around 500 m under certain conditions. The worst case scenario modelled is under Case 2c, where a net lift force acting against gravity of  $-0.1g$  is considered. Further work is necessary to confirm how realistic a  $-0.1g$  assumption is.

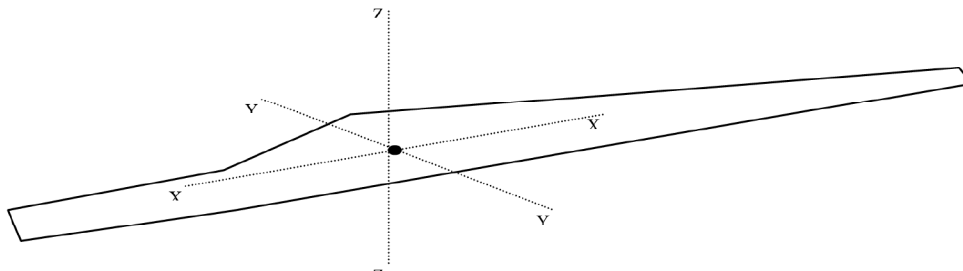


**Case 3 shows that, under 'complex rotational' motion, the travel distance would be less than 350 m in the worst case considered and under 300 m in most other cases considered.**

*Deatched parts, usually small, due to damages caused by external events (such as high energy lightenerings) have been found at no more than 40-50m from wind turbine tower base.*

We note that, for a blade strike event, the blade section trajectory is most likely to begin as 'complex rotational' motion. It may subsequently continue in this way or alternatively become aligned with the direction of travel (depending on the forces and moments acting on the body) and continue to travel under non-rotational motion. Thus the 'most likely travel distance will fall somewhere between Case 1 (where lift does not assist flight duration), Case 3 and a fourth case (not modelled) where lift acts to decrease flight time.

**We consider 'complex rotational motion' to be the most likely form of motion due to a blade throw during normal operation.**



**FIGURE 1 – BLADE COORDINATE SYSTEM USED**  
(YY – Flapwise, XX – Pitchwise, ZZ – Edgewise)

## APPENDIX ONE

BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING  
CONDITIONS V80 – 2MW

| Case 1                     | 5m blade section                                                              | 10m blade section                                                             | Whole blade                                                                    |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 0.10 m <sup>2</sup><br>IPCD=OPCD=2<br>OPA=2.52m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 0.24 m <sup>2</sup><br>IPCD=OPCD=2<br>OPA=9.79m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 2.38 m <sup>2</sup><br>IPCD=OPCD=2<br>OPA=81.46m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                               |                                                                               |                                                                                |
| Flight Time                | 12.64                                                                         | 11.64                                                                         | 6.27                                                                           |
| In-plane distance (m)      | 468.6                                                                         | 460.4                                                                         | 104.4                                                                          |
| Outplane distance (m)      | 251.8                                                                         | 225.6                                                                         | 80.1                                                                           |
| Vectorial distance (m)     | 531.9                                                                         | 512.7                                                                         | 131.6                                                                          |
|                            |                                                                               |                                                                               |                                                                                |

| Case 2b                    | 5m blade section                                                                       | 10m blade section                                                                     | Whole blade                                                                             |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 0.10 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=2.52 m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 0.24 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=9.79m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 2.38 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=81.46 m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                                        |                                                                                       |                                                                                         |
| Flight Time                | 13.23                                                                                  | 12.17                                                                                 | 6.49                                                                                    |
| In-plane distance (m)      | 484.2                                                                                  | 476.5                                                                                 | 107.6                                                                                   |
| Outplane distance (m)      | 99.1                                                                                   | 81.9                                                                                  | 14.2                                                                                    |
| Vectorial distance (m)     | 494.3                                                                                  | 483.5                                                                                 | 108.6                                                                                   |
|                            |                                                                                        |                                                                                       |                                                                                         |

| Case 2c                    | 5m blade section                                                                       | 10m blade section                                                                     | Whole blade                                                                             |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 0.10 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=2.52 m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 0.24 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=9.79m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 2.38 m <sup>2</sup><br>IPCD=2<br>OPCD=0.15<br>OPA=81.46 m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                                        |                                                                                       |                                                                                         |
| Flight Time                | 13.88                                                                                  | 12.76                                                                                 | 6.74                                                                                    |
| In-plane distance (m)      | 499.5                                                                                  | 495.5                                                                                 | 112.5                                                                                   |
| Outplane distance (m)      | 106.5                                                                                  | 88.7                                                                                  | 15.5                                                                                    |
| Vectorial distance (m)     | 510.8                                                                                  | 503.4                                                                                 | 113.5                                                                                   |
|                            |                                                                                        |                                                                                       |                                                                                         |

BLADE THROW CALCULATION UNDER NORMAL OPERATING  
CONDITIONS V80 – 2MW

| Case 3a                    | 5m blade section                                                                        | 10m blade section                                                                    | Whole blade                                                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 1.26 m <sup>2</sup><br>IPCD=0.5<br>OPCD=0.5<br>OPA=1.26 m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 4.9 m <sup>2</sup><br>IPCD=0.5<br>OPCD=0.5<br>OPA=4.9m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 40.73 m <sup>2</sup><br>IPCD=0.5<br>OPCD=0.5<br>OPA=40.73 m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                                         |                                                                                      |                                                                                           |
| Flight Time                | 13.88                                                                                   | 12.76                                                                                | 6.74                                                                                      |
| In-plane distance (m)      | 316.3                                                                                   | 296.4                                                                                | 103.8                                                                                     |
| Outplane distance (m)      | 143.1                                                                                   | 121.2                                                                                | 24.0                                                                                      |
| Vectorial distance (m)     | 347.2                                                                                   | 320.2                                                                                | 106.5                                                                                     |

| Case 3b                    | 5m blade section                                                                    | 10m blade section                                                                | Whole blade                                                                           |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 1.26 m <sup>2</sup><br>IPCD=1<br>OPCD=1<br>OPA=1.26 m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 4.9 m <sup>2</sup><br>IPCD=1<br>OPCD=1<br>OPA=4.9m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 40.73 m <sup>2</sup><br>IPCD=1<br>OPCD=1<br>OPA=40.73 m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                                     |                                                                                  |                                                                                       |
| Flight Time                | 13.88                                                                               | 12.76                                                                            | 6.74                                                                                  |
| In-plane distance (m)      | 216.6                                                                               | 208.5                                                                            | 94.6                                                                                  |
| Outplane distance (m)      | 195.2                                                                               | 169.2                                                                            | 41.0                                                                                  |
| Vectorial distance (m)     | 291.6                                                                               | 268.5                                                                            | 103.1                                                                                 |

| Case 3c                    | 5m blade section                                                                        | 10m blade section                                                                    | Whole blade                                                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | For Drag<br>IPA= 1.26 m <sup>2</sup><br>IPCD=1.5<br>OPCD=1.5<br>OPA=1.26 m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 4.9 m <sup>2</sup><br>IPCD=1.5<br>OPCD=1.5<br>OPA=4.9m <sup>2</sup> | For Drag<br>IPA= 40.73 m <sup>2</sup><br>IPCD=1.5<br>OPCD=1.5<br>OPA=40.73 m <sup>2</sup> |
| <b>Rotorspeed = 20 rpm</b> |                                                                                         |                                                                                      |                                                                                           |
| Flight Time                | 13.88                                                                                   | 12.76                                                                                | 6.74                                                                                      |
| In-plane distance (m)      | 168.2                                                                                   | 164.2                                                                                | 87.3                                                                                      |
| Outplane distance (m)      | 223.8                                                                                   | 196.3                                                                                | 53.7                                                                                      |
| Vectorial distance (m)     | 280.0                                                                                   | 256.0                                                                                | 102.5                                                                                     |