



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Curvas de fragilidad  
correspondientes a la pala de un  
aerogenerador, considerando  
efectos de fatiga**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Arturo Medina Molina

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/022/18

Señor  
ARTURO MEDINA MOLINA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. SONIA ELDA RUÍZ GÓMEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"CURVAS DE FRAGILIDAD CORRESPONDIENTES A LA PALA DE UN AEROGENERADOR,  
CONSIDERANDO EFECTOS DE FATIGA"**

- INTRODUCCIÓN
- I. FUERZAS DEL VIENTO
- II. ESTRUCTURA DE ANÁLISIS
- III. FÁTIGA
- IV. CURVA DE FRAGILIDAD
- V. CASO DE ESTUDIO
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 2 de marzo del 2018.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

# Dedicatoria

A mi Dios, que me ha dado quien soy y cuanto tengo.

A mi Madre, mi fuerza y luz a cada paso.

A mi Padre, mi guía y valía en todo momento.

A mi Hermano, mi equipo, el que siempre creyó en mí.

A Elena, la que nos dio todo cuanto tenía con tal de hacernos hombres de bien.

A Irma, mi confidente incondicional.

A Gilberto, siempre el mejor ejemplo y el mejor hombre.

A Raymundo, mi gran amigo y mentor.

A Emilio, el más grande ejemplo de coraje que me ha dado la vida.

A David, Filiberto, Joaquín, Mateo, Moisés y Rosario, por dar lo mejor de ellos, por su amistad y cariño.

A Sergio y Carolina, a Mónica y Benjamín, a Ramón y Genoveva, por estar en los momentos buenos, en los malos y en los peores.

A Kar, mi inspiración y compañera.

A Isaac y Máriam, los mejores amigos que siempre tendré.

A Daniel, Kevin, Manuel, Piero, Ricardo, Vicente y Yair, la familia que tuve la fortuna de escoger.

# Agradecimientos

A la Doctora Sonia E. Ruiz, por permitirme formar parte de su increíble equipo, por darme la mejor orientación posible y, sobre todo, por las oportunidades, el conocimiento y el apoyo que me brindó para lograr escribir esta tesis.

A la Maestra Indira Inzunza, por darme la idea de este proyecto y ayudarme a desarrollarlo hasta el final, por su inquebrantable paciencia y su inmejorable instrucción.

A mis profesores, por la grandiosa formación que me dieron para convertirme en un futuro profesionalista.

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme estudiar esta extraordinaria carrera y por ser mi segundo hogar.

A la Dirección General de Apoyo al Personal Académico de la UNAM por su apoyo dentro del proyecto PAPIIT-IN103517.

# Resumen

En esta tesis se desarrollan de manera general los aspectos básicos del diseño estructural y aerodinámico de las palas de un aerogenerador de eje horizontal, para posteriormente centrarse en el análisis avanzado de su comportamiento como estructura considerando efectos de fatiga en el material.

Se plantea una metodología para calcular las fuerzas de viento que actuarán sobre la pala, a través de la simulación de un campo de viento turbulento sujeto a una función de densidad de potencia espectral y la aplicación del método BEM (Blade Element Momentum), para los diferentes estados de funcionamiento del aerogenerador (detenido y en operación).

De igual forma, se proponen distintas modalidades para la generación de un modelo computacional en tercera dimensión, que considere las principales características geométricas y estructurales de la pala y permita el posterior análisis de elemento finito en un software comercial.

Por otra parte, se explica el procedimiento de obtención de las curvas de fragilidad de la estructura, considerando dos modelos de fatiga: el modelo de crecimiento de grieta (Hadavinia *et al.*, 2015) y el de daño acumulado (Aeran, 2017).

Finalmente, se aplica lo anterior a un caso de estudio particular para una pala genérica localizada en La Ventosa, Oaxaca, obteniendo las curvas de fragilidad para la estructura propuesta, correspondientes a los dos modelos de fatiga expuestos y para velocidades de operación variables.

# Índice

1 – Introducción .....	1
1.1 – Planteamiento del problema .....	2
1.2 – La importancia de la energía eólica en el mundo .....	2
1.3– La generación de energía eólica en México.....	3
1.4 – Tipos de aerogeneradores y su funcionamiento .....	4
1.5 – Objetivo general.....	7
1.6 – Objetivos específicos.....	7
1.7 – Alcances de la tesis .....	8
2 – Fuerzas del viento .....	10
2.1 – La velocidad del viento.....	10
2.2 – Factores que afectan a la velocidad del viento.....	11
2.3 – Componentes del viento.....	12
2.4 – Modelado del campo de viento .....	20
2.5 – Obtención de fuerzas del viento en la estructura .....	22
2.6 – Resolución del método “Blade Element Momentum” (BEM) .....	24
2.7 – Método BEM simplificado.....	29
3 – Estructura de análisis .....	31
3.1 – Componentes de un aerogenerador.....	31
3.2 – Generalidades de la geometría de la pala .....	32
3.3 – Caracterización de perfiles aerodinámicos.....	34
3.4 – Distribución de esfuerzos en la pala .....	37
3.5 – Componentes estructurales de la pala .....	37
3.6 – Materiales utilizados en palas.....	40
3.7 – Factores de falla en la pala.....	40
3.8 – Modelado de la pala por diferentes métodos .....	42
3.9 – Modelado de la pala en ANSYS APDL.....	47
4 – Fatiga .....	49
4.1 – Curva S-N.....	50
4.2 – Método de “Rainflow” .....	50

4.3 – Modelos de diseño por fatiga .....	51
5 – Curva de fragilidad .....	55
6 – Caso de estudio .....	56
6.1 – Características de la pala .....	56
6.2 – Características del sitio .....	59
6.3 – Generación de historias de fuerzas en el tiempo .....	60
6.4 – Simulaciones en ANSYS APDL.....	61
6.5 – Análisis por fatiga .....	63
6.6 – Análisis de fragilidad .....	67
Conclusiones .....	75
Referencias.....	76

# I – Introducción

Estadísticas recientes muestran que las reservas de gas natural y petróleo solo podrán cubrir la demanda energética durante 50 años más (Asadi y Sadjadi, 2017). Al mismo tiempo, la generación de energías renovables a nivel mundial ha incrementado significativamente, pues resultan una alternativa sustentable y económica frente al uso de combustibles fósiles y químicos, siendo amigables con el medio ambiente.

La figura 1.1 muestra el crecimiento en la producción de energías renovables por país y el porcentaje de difusión de energía eólica y solar con respecto a la nuclear en los últimos 20 años.

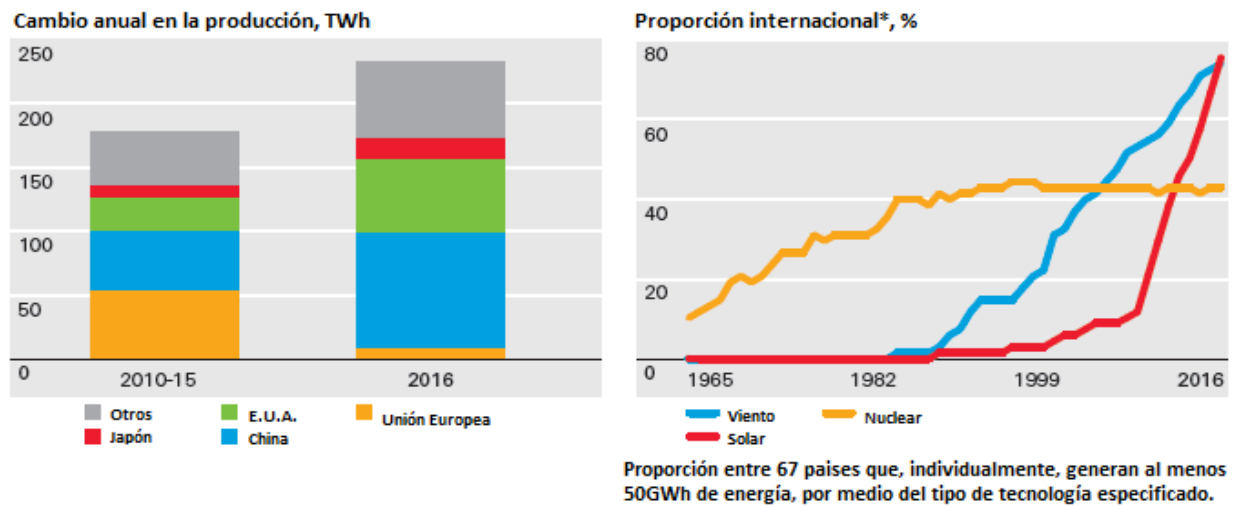


Figura 1.1 –Crecimiento por país (izquierda) y difusión de tecnologías para la generación de energía (BP Global, 2017).

Dentro de la clasificación de las energías renovables, la energía eólica es la que mantiene el ritmo de crecimiento más rápido, tanto como fuente de abastecimiento de poder eléctrico, como en cantidad de tecnología instalada (Archer y Jacobson, 2005).

La desventaja principal en su uso es la naturaleza cambiante del viento, que puede registrar velocidades muy distintas entre un instante y otro. Con tal de lograr un aprovechamiento óptimo, en especial cuando el flujo de viento es fuerte, la tecnología usada para su obtención debe ser de alta calidad y eficiencia.

Las turbinas de viento o aerogeneradores son los dispositivos mecánicos encargados de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica (Bianchi *et al.*, 2007). Aunque su diseño debe tomar en cuenta numerosos criterios multidisciplinarios, la parte que atañe a la ingeniería civil es su comportamiento estructural.



## 1.1 – Planteamiento del problema

Análisis recientes (Pfaffel *et al.*, 2017) comparan la tasa de falla y el tiempo de vida estadístico de varios componentes de los aerogeneradores y concluyen que las fallas más comunes son en las palas. Así mismo, registros históricos revelaron que, durante el año 2015, alrededor del 0.54% de las palas operativas a nivel mundial presentaron una falla importante, consecuencia de un mal diseño (Campbell, 2015).

Una falla en las palas puede resultar en la destrucción total del aerogenerador, hecho que representaría una gran pérdida económica y un riesgo importante para lo que rodea al parque eólico y la turbina. Es por ello que una pala aerodinámica debe diseñarse para cumplir sus funciones de forma efectiva por al menos 20 años (figura 1.2).

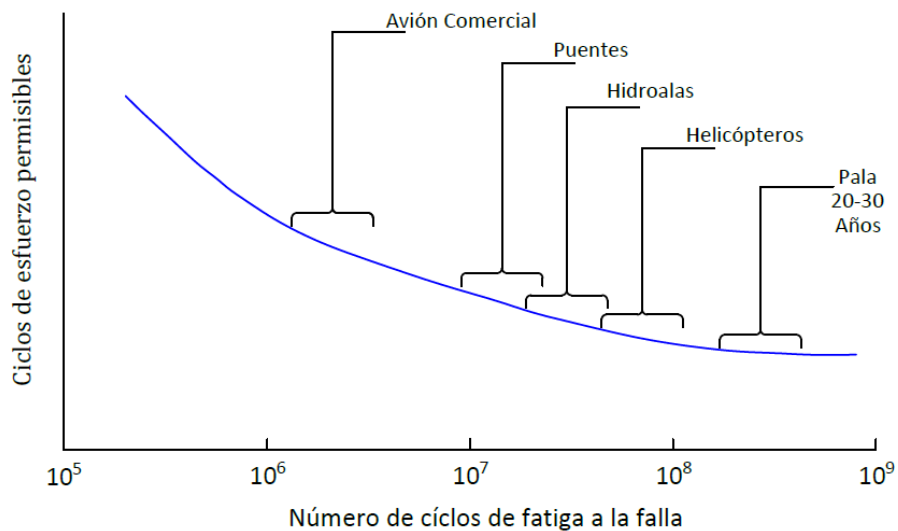


Figura 1. 2 - Curva S-N esquemática para diferentes componentes industriales (Shokrieh y Rafiee, 2006).

El fenómeno que ocasiona mayor daño a largo plazo en los aerogeneradores es el desgaste de los materiales por fatiga, pues afecta directamente su eficiencia y seguridad al reducir su capacidad estructural y, en el caso de las palas, provocando modos de falla por deslaminación.

Una forma de representar el daño probable que se presentará por fatiga es a través de las curvas de fragilidad. Éstas dependen de las propiedades estructurales de los materiales y se pueden relacionar con otras variables, como la caracterización del viento o el modelo de fatiga.

## 1.2 – La importancia de la energía eólica en el mundo

La energía eólica es una de las energías renovables con menor impacto ambiental, es un ente crucial en la disminución de emisiones de  $\text{CO}^2$  relativas a la producción de electricidad y su obtención, desde el punto de vista económico, es altamente viable gracias al gran desarrollo tecnológico que existe en torno a ella.

La amplia aceptación internacional de la energía eólica se traduce en los números, de acuerdo con la *World Wind Energy Association* (WWEA, 2018), la capacidad global instalada en 2003 era de 39 000 MW y, para el final de 2017, alcanzó los 539 552 MW. Un aumento en proporción de casi 14 veces en los últimos 15 años, tal como se puede apreciar en la figura 1.3

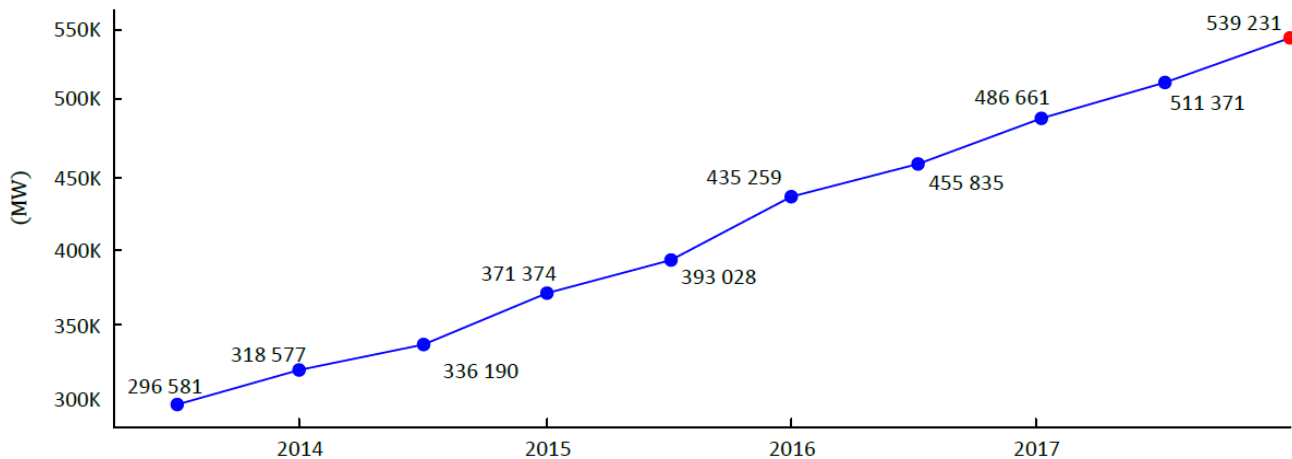


Figura 1.3 – Capacidad total instalada a nivel mundial (energía eólica) 2013-2017 (WWEA, 2018).

Hoy en día aproximadamente el 5% de la demanda energética mundial está cubierta por energía eólica; para muchos países es la alternativa favorita y uno de los pilares estratégicos para extinguir el uso de combustibles fósiles y de energía nuclear. Prueba de esto es Dinamarca, que durante 2017 se convirtió en líder en la generación de energía eólica, al lograr cubrir sus necesidades energéticas en un 43% solo con la utilización de ésta (WWEA, 2018).

Es necesario mencionar que a nivel mundial hay diferencias significativas en el grado de implementación de energía eólica, pues existen regiones como el Medio Oriente, que aún dependen altamente de los combustibles fósiles (Pablo-Romero y Pozo-Barajas, 2017), lo cual demuestra que su evolución en cada nación es diferente y que su difusión representa un campo de desarrollo potencial muy importante.

### 1.3 – La generación de energía eólica en México

Durante las últimas 3 décadas el sector energético en México ha cambiado radicalmente. Mientras que en 1995 la capacidad de generación de energía eólica instalada era prácticamente nula, apenas 2 MW, entre el 2006 y el 2012 se incrementó hasta los 1000 MW, aunado a esto, se generaron proyectos para llevarla hasta los 2000 MW (Wood *et al.*, 2012).

Según la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE, 2016), en el 2016 se tenía una capacidad de generación registrada, proveniente de 42 parques eólicos en operación, de 3 527 MW y se ha proyectado, como objetivo a mediano plazo, alcanzar los 12 000 MW durante 2020, para llegar a una meta final de 17 000 MW durante 2024, que representaría el 35% de la demanda de energía eléctrica en el país.

De manera igualmente optimista, se dice que México cuenta con más de 50 000 MW eólicos aprovechables distribuidos a lo largo del país. Como se muestra en el mapa de la figura 1.4, las zonas con mayor potencial son Los Vergeles en Tamaulipas, La Ventosa en Oaxaca y La Rumorosa en Baja California. También existen zonas con menor potencial, como Veracruz, que pudieran ser bien explotadas (Hernández-Escobedo *et al.*, 2012).

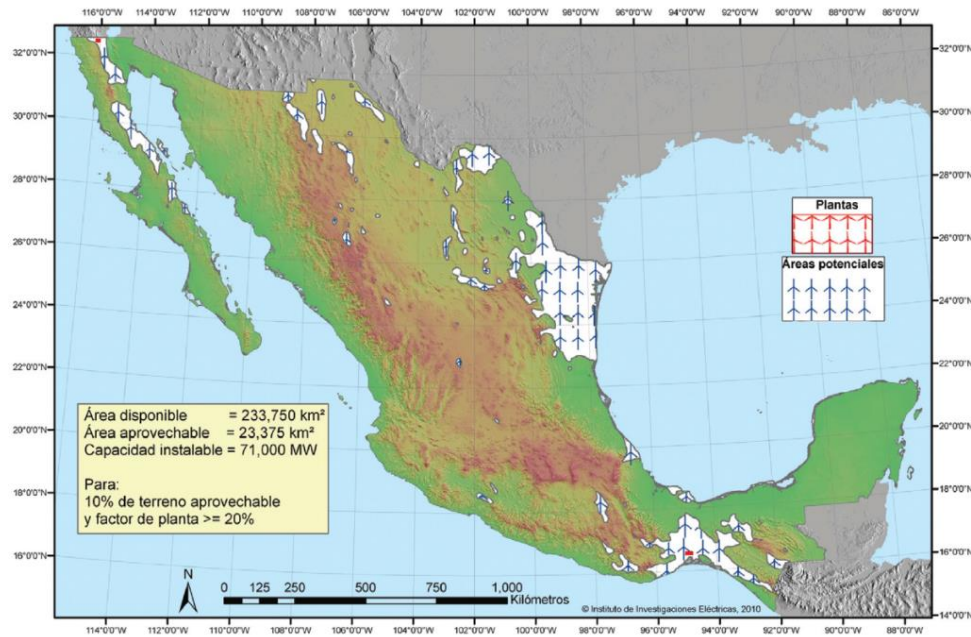


Figura 1.4 – Recursos eólicos aprovechables en México (Wood *et al.*, 2012).

### 1.4 – Tipos de aerogeneradores y su funcionamiento

Con el desarrollo de nuevas tecnologías que integran a los aerogeneradores modernos se han diseñado diferentes modelos, que responden a necesidades y situaciones específicas. Éstos se han clasificado principalmente a partir de la orientación de su eje rotacional, dividiéndolos en dos grandes grupos: de eje horizontal y de eje vertical (Savonius, Darrenius y H).

Las dos configuraciones de rotor son perfectamente distinguibles entre sí y cada una tiene aspectos favorables con respecto a la otra; sin embargo, el vago desarrollo de turbinas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés), atribuible a las dificultades para controlar y automatizar el rango de velocidades y el arranque de operación, han impuesto a las turbinas de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés) como los aerogeneradores más comunes y populares en la industria. La figura 1.5 es un boceto de los tipos de aerogeneradores existentes.

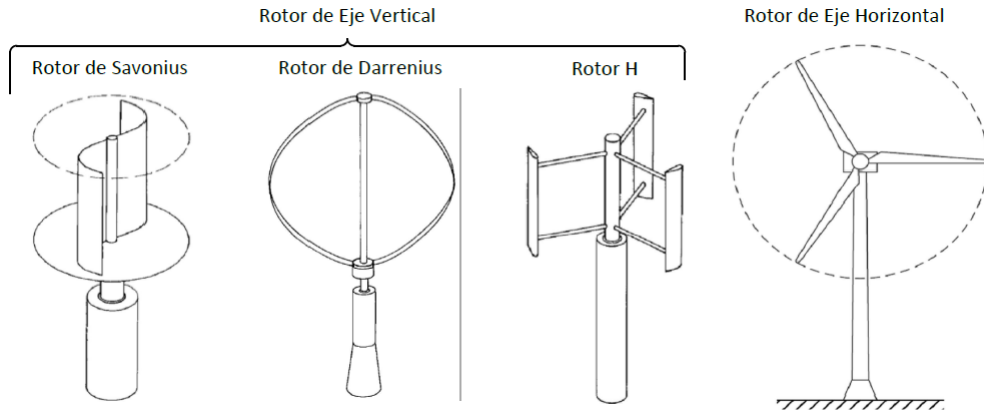


Figura 1. 5 – Tipos de aerogeneradores (Hau, 2006).

**1.4.1 – Funcionamiento específico de los aerogeneradores (Eficiencia)**

De manera general, los aerogeneradores están compuestos por una torre, su estructura de soporte, y por un rotor, consistente de palas unidas a un buje. Este último se encarga de extraer la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica; una eficiencia alta en el rotor se traduce en un incremento en la energía producida.

De acuerdo con Hau (2006), la teoría de rotores aerodinámicos relaciona la energía extraída por el rotor,  $P_R$ , con la geometría de las palas, utilizando un coeficiente de eficiencia,  $c_{PR}$ , con la siguiente expresión:




$$P_R = \frac{1}{2} c_{PR} \rho_{aire} V^3 A_R \tag{1. 1}$$

Donde  $V$  es la velocidad del viento,  $\rho_{aire}$  es la densidad del aire y  $A_R$  el área de barrido del rotor.

La tabla 1.1 contiene el coeficiente de eficiencia teórico,  $c_{PR}$ , para diferentes tipos de turbinas. Como puede observarse, con el avance de la tecnología se ha logrado alcanzar coeficientes de eficiencia cada vez mayores.

Tabla 1.1 – Coeficientes de Eficiencia Teórica (Schubel, P. y Crossley, R., 2012).

Tipo	Clasificación	Propulsión	$c_{PR}$ (teórico)	Uso	Diagrama
Savonius	VAWT	Arrastre	16%	Antiguamente molino persa. Ventilación.	
Molino de granja americana	HAWT	Levantamiento	31%	Molino de granja del siglo XVIII a la actualidad. Bombeo de agua, molido de granos, generación eléctrica.	

Molino de granja Holandesa	HAWT	Levantamiento	27%	Utilizado en el siglo XVI para moler grano.		
Darrenius	VAWT	Arrastre	40%	Generación eléctrica en el siglo XX.		
Aerogenerador moderno	HAWT	Levantamiento	1 Pala	43%	Generación eléctrica en el siglo XX.	
			2 Palas	47%		
			3 Palas	50%		

**1.4.2 – Funcionamiento específico de los aerogeneradores (Propulsión)**

El método de propulsión utilizado por la turbina afecta críticamente a su eficiencia: cuando el empuje del viento es vertical a la cara de las palas, la propulsión recae en el arrastre del viento; por otro lado, cuando el empuje depende de las propiedades aerodinámicas de las palas, sin importar la dirección del viento, la propulsión recae en el levantamiento del viento.

Ambas componentes del empuje de viento, arrastre y levantamiento, están asociadas a coeficientes que dependen de las propiedades geométricas de la pala y que se tratarán más adelante en el escrito.

La figura 1.6, muestra la funcionalidad de cada mecanismo de empuje. El arrastre suele aplicarse a turbinas de eje vertical, mientras que el levantamiento a turbinas de eje horizontal (Schubel y Crossley, 2012).

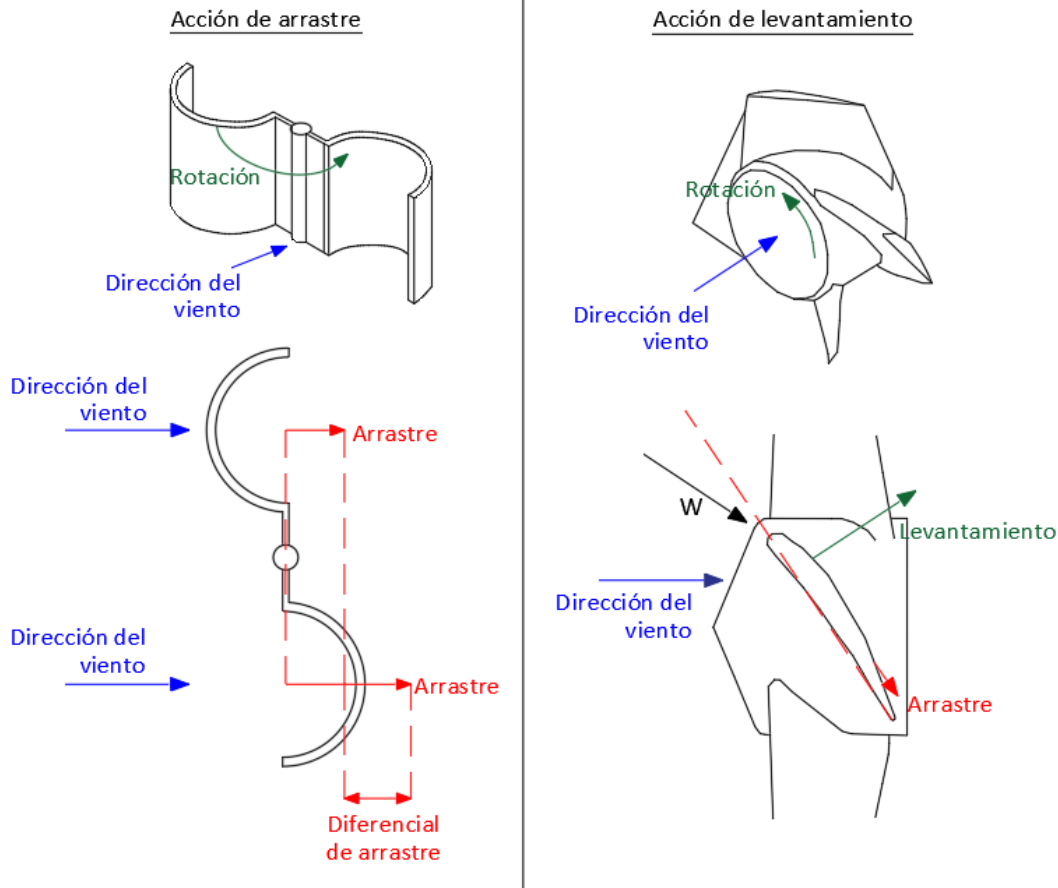


Figura 1.6 – Acciones de Propulsión (Schubel y Crossley, 2012).

## 1.5 – Objetivo general

El objetivo de esta tesis es mostrar la metodología que se utiliza para la generación de curvas de fragilidad correspondientes a una estructura sometida a las fuerzas de viento y posteriormente aplicarla a las palas de un aerogenerador ubicado en la zona de La Ventosa, Oaxaca.

## 1.6 – Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta tesis son:

Modelar un campo de viento que simule las condiciones que se presentarán en la zona del caso de estudio, para posteriormente obtener las fuerzas que actuarán sobre un aerogenerador de eje horizontal.

Modelar por medio de software de análisis de elemento finito, en este caso ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013), una pala genérica de un aerogenerador de eje horizontal, constituida de un material de propiedades conocidas.

Obtener las curvas de fragilidad por el criterio de crecimiento de la grieta, por medio de la ley de Paris ajustada a un material compuesto (Hadavinia *et al.*, 2015), y por el criterio de daño acumulado, utilizando la curva S-N del material (Aeran, 2017).

### 1.7 – Alcances de la tesis

La presente tesis está diseñada para evaluar los efectos de fatiga en la pala de un aerogenerador de eje horizontal, bajo la acción de un campo de viento turbulento obtenido por medio del método de Veers (1988), y estimando las fuerzas actuantes por medio del método *Blade Element Momentum* (BEM). Estos efectos se representan a través de las curvas de fragilidad, obtenidas por medio de dos criterios distintos.

Las curvas obtenidas serán aplicables para la región de La Ventosa, Oaxaca, debido a las características particulares de la probabilidad de ocurrencia velocidades del viento, sujetas a una distribución bimodal de Weibull, y para el material compuesto seleccionado: fibra de vidrio reforzada.

El análisis de fatiga se da por terminado con el cálculo de dichas curvas y no se considera propiamente un análisis de la confiabilidad de la estructura, pues no se consideran las curvas de peligro eólico ni la degradación probabilística del material a través del tiempo.

Cabe mencionar que el modelo de elemento finito de la pala, sobre del cual se simularán las acciones del viento, está restringido a los recursos computacionales disponibles.

Esta tesis está dividida en 6 capítulos:

El primero de ellos es una introducción a la energía eólica, el panorama mundial y nacional al respecto, así como una descripción de los aerogeneradores y la importancia de su correcto diseño estructural, específicamente el diseño por fatiga.

El capítulo segundo, habla de las fuerzas actuantes en la estructura por la acción del viento, la caracterización de este fenómeno y los factores que influyen en su comportamiento.

El tercer capítulo contiene una descripción detallada de un aerogenerador, particularmente se estudia la composición de las palas, su diseño, los materiales usados en su construcción, su comportamiento estructural, y se plantea como realizar el modelo de elemento finito.

En el cuarto capítulo se explica el efecto de fatiga y se mencionan los criterios de diseño bajo el mismo; también se estudian los parámetros utilizables para medir la resistencia a la fatiga de los materiales, como la curva S-N, y se define el conteo de ciclos por fatiga.

El capítulo quinto describe brevemente la fragilidad estructural y el modelo matemáticos para obtener las curvas de fragilidad para diferentes estados límite.

Finalmente, el sexto capítulo aplica los conceptos tratados en los capítulos anteriores al caso de estudio y presenta los resultados obtenidos.





## II – Fuerzas del viento

Se define como viento al fenómeno ocasionado por el movimiento de grandes masas de aire en la atmósfera, consecuencia de la existencia de gradientes de presión en la superficie terrestre ocasionados por diferencias de temperatura. De modo que, cuando en los polos se presentan temperaturas inferiores a las de la región ecuatorial, se produce un intercambio de aire caliente por aire frío, es decir, una corriente.

El viento en un sitio específico está constituido por la combinación de vientos locales y vientos geostrofic

- Vientos locales: ocurren dentro de los primeros 100 metros de altura, en lo que se denomina como capa límite atmosférica. Su comportamiento, dirección y velocidad, es afectado por la fricción ejercida por la superficie terrestre, originando en muchos casos un flujo turbulento.
- Vientos geostrofic: ocurren por encima la capa límite de la atmósfera. En este punto, corrientes de gran escala son desviadas como resultado del equilibrio entre los gradientes de presión y el efecto de Coriolis, asociado a la rotación de la tierra.

La figura 2.1 muestra el punto en el que la dirección del viento se vuelve paralela a las isobaras. En esta posición tanto la fuerza del gradiente de presión, como la fuerza de Coriolis, son opuestas y totalmente equilibradas.

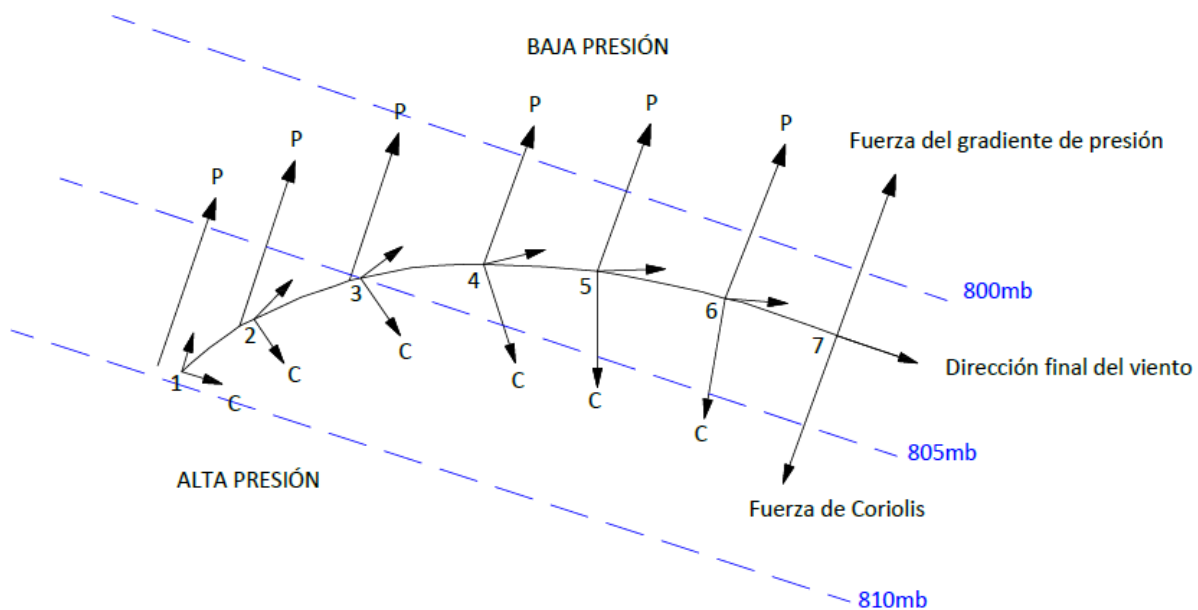


Figura 2.1 - Equilibrio del viento geostrofico con las isobaras.

### 2.1 – La velocidad del viento

Una de las variables más importantes en el estudio del viento es la velocidad; para caracterizarla se puede hacer uso de un espectro de potencia. Estos espectros describen la distribución de la energía

cinética del viento a lo largo de diferentes frecuencias; aunque siempre varían con relación a las condiciones del sitio de interés, en general presentan el mismo patrón.

Como ejemplo, en la figura 2.2 se muestra el espectro típico de *van der Hoven*. Se observa que la concentración de energía se separa en dos extremos de frecuencia y, por lo tanto, se pueden asociar frecuencias bajas a vientos no turbulentos o geostróficos y frecuencias altas a vientos turbulentos o locales (Bianchi *et al.*, 2007).

En virtud de ello, se puede separar a la velocidad del viento en dos componentes: una constante con velocidad media y una variable o componente turbulenta, las cuales se detallarán en el apartado 2.3.

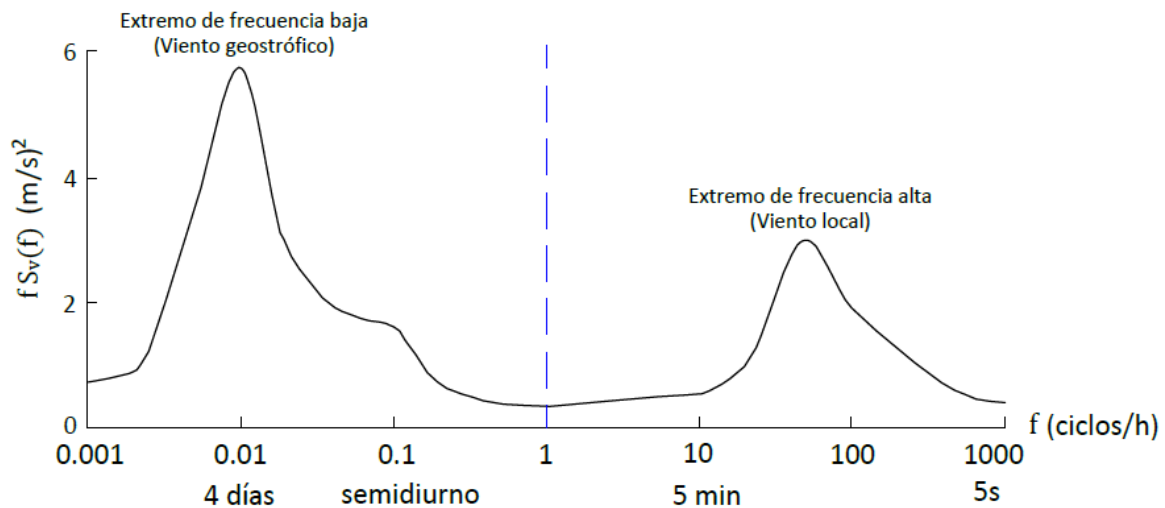


Figura 2.2 – Espectro típico de van der Hoven. Adaptada (Bianchi *et al.*, 2007).

### 2.2 – Factores que afectan a la velocidad del viento

El comportamiento de la velocidad del viento que se presenta en la capa límite atmosférica está influenciado por los siguientes factores:

a) Interferencia con la superficie:

i. Efecto friccionante: el roce de la superficie con la masa de aire provoca un decremento de la velocidad e interfiere con los efectos de la fuerza de Coriolis, desviando al viento, hasta en  $30^\circ$  cuando el terreno es rígido y hasta en  $10^\circ$  cuando son cuerpos de agua, de la dirección original que lleva como viento geostrófico.

ii. Cambios por las condiciones topográficas locales: como las pendientes de montaña en dirección al sol, que sufren un calentamiento más intenso en comparación con la otra pendiente; el calentamiento o enfriamiento del viento de una región boscosa cercana a cuerpos de agua; y la transición del tipo de terreno de valle a montaña y viceversa, entre otros factores, pueden provocar aceleraciones locales en la velocidad del viento.

La figura 2.3 muestra los cambios en la velocidad del viento con la altura, en porcentaje del viento de gradiente, para regiones con diferencias notables en el tipo de terreno y topografía.

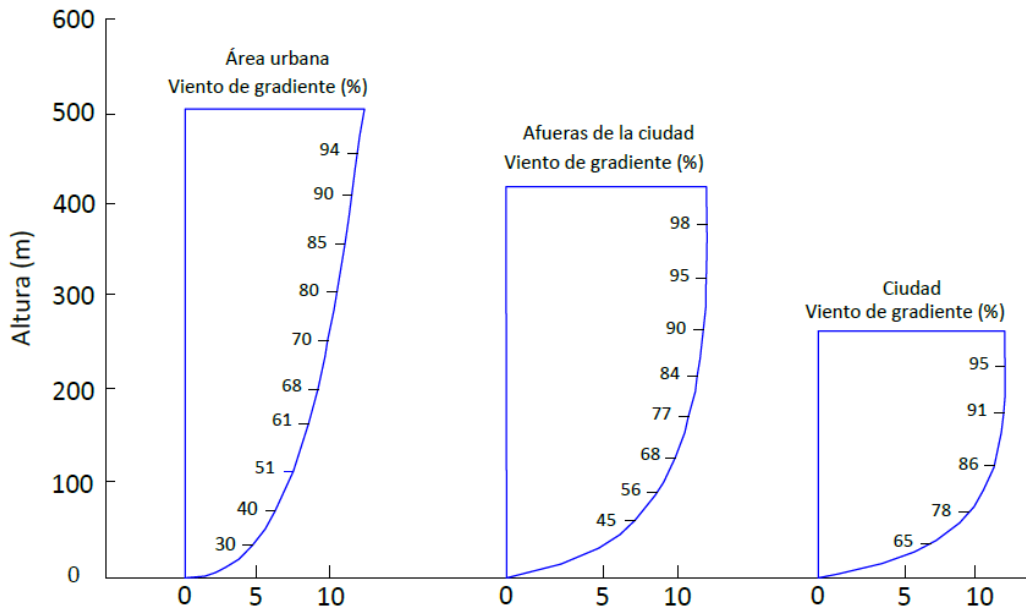


Figura 2.3 - Variaciones del viento con la altura de acuerdo con las características del sitio.

b) Influencia de los efectos térmicos de la atmósfera, divididos en tres categorías:

i. Estratificación inestable: ocurre cuando el aire de la superficie es expuesto a un fuerte calentamiento y se eleva en la atmósfera, causando un estado de fuerte turbulencia y el engrosamiento de la capa límite, así como mínimas variaciones de la velocidad con respecto a la altura.

ii. Estratificación estable: se alcanza cuando el aire caliente que ha ascendido en la atmósfera se enfría por medio de un proceso adiabático, alcanza una temperatura inferior a la de la masa de aire a su alrededor, y entonces se detiene su movimiento. En este caso el comportamiento del viento está dominado por el efecto de fricción y la variación de la velocidad con la altura es significativa.

iii. Estratificación neutra: se presenta cuando el enfriamiento del aire ascendente es tal que su temperatura se equilibra con la de la masa circundante. Ocurre cuando existen vientos fuertes y representa la condición atmosférica crítica.

### 2. 3– Componentes del viento

La velocidad del viento,  $V$ , se puede representar como la suma de una componente constante, que es la velocidad media del viento,  $\bar{V}$ , y una componente variable, que es la turbulencia,  $v$ , con media cero.

$$V = \bar{V} + v \tag{2. 1}$$

**2.3.1 – La velocidad media del viento**

La velocidad media,  $\bar{V}$ , supone la velocidad promedio que se tendrá en un sitio de acuerdo con sus características topográficas y tomando en cuenta datos estadísticos del lugar. Para considerar la influencia del medio se supone que la velocidad media está en función de la altura y de las condiciones del terreno. Según Bianchi *et al.* (2007), las formas que se utilizan más comúnmente para caracterizarla, son las siguientes:

a) Forma logarítmica:

Desarrollada teóricamente por Prandtl (1925), su validez está restringida a la capa límite atmosférica y la cercanía a la superficie (Ec. 2.2).

$$\frac{\bar{V}_z}{\bar{V}_{z_{ref}}} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \tag{2.2}$$

Donde  $z$  es la altura del punto de interés con respecto al nivel natural del terreno;  $z_{ref}$  es la altura de referencia, usualmente supuesta como 10 m y  $z_0$  es la longitud de rugosidad, un parámetro que depende de las condiciones del terreno (tabla 2.1).

Existen diversas modificaciones que sugieren tomar en cuenta la estabilidad de la atmósfera y otros factores ambientales con tal de mejorar su precisión. No obstante, dichas consideraciones requieren suponer variables desconocidas por regla y complicar los cálculos.

b) Forma exponencial:

Con base en la ley exponencial de Hellmann (Bañuelos-Ruedas *et al.*, 2011), relaciona la velocidad del viento a dos altitudes diferentes. Es muy utilizada en ingeniería por su relativa sencillez (Ec. 2.3).

$$\bar{V}_z = \bar{V}_{z_{ref}} \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^\alpha \tag{2.3}$$

Donde  $\alpha$  es el exponente de Hellman que depende de la longitud de rugosidad del terreno y se puede calcular de forma aproximada con la Ec. (2.4).

$$\alpha = \frac{1}{\ln\frac{z}{z_0}} \tag{2.4}$$

Tabla 2.1 – Longitud de rugosidad típica para varios tipos de terreno (Hau, 2006).

$z_0$ (m)	Tipo de terreno	Nivel de rugosidad
1.00	Ciudad	3
0.80	Bosque	
0.50	Suburbios	
0.30	Terreno urbanizado	

Tabla 2.1 (continuación) – Longitud de rugosidad típica para varios tipos de terreno (Hau, 2006).

z <sub>0</sub> (m)	Tipo de terreno	Nivel de rugosidad
0.20	Con muchos árboles y arbustos	2
0.10	Terreno agrícola de aspecto cerrado	
0.05	Terreno agrícola de aspecto abierto	
0.03	Terreno agrícola con muy pocos edificios, árboles, etc.	
0.01	Aeropuertos, pistas	1
0.007	Prados	
0.005	Tierra virgen (suave)	
0.001	Superficies con nieve	0
0.0003	Superficies arenosa	
0.0001	Cuerpos de agua (lagos, fiordos, mar, etc.)	

### 2.3.2 – Variación anual de la velocidad media del viento

La velocidad media anual del viento necesita de mediciones hechas *in situ* a lo largo de varios años para su correcta determinación. Conforme incrementan los periodos de estudio, y para lograr cálculos precisos, se requiere información estadística de la frecuencia de ocurrencia de las velocidades de viento características en un año.

A este parámetro se le conoce como frecuencia de distribución anual y se puede aproximar de forma efectiva utilizando mediciones de velocidad media a elevaciones específicas, a cada 10 minutos. Según los expertos en meteorología, una base estadística confiable requiere de hasta 10 años de registros (Hau, 2006).

En los casos prácticos en los que los datos estadísticos son insuficientes, se puede utilizar una metodología matemática para aproximar las frecuencias de distribución anual. La distribución probabilística de Weibull representa un buen acercamiento a las velocidades reales esperadas en un régimen normal de viento. La función de densidad acumulada de Weibull es como sigue:

$$F_W(V) = \int_0^{\infty} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV = 1 \quad (2.5)$$

Donde  $V$  es la velocidad de viento en (m/s),  $c$  es el parámetro de escala de Weibull en (m/s) y  $k$  es el parámetro de forma de Weibull, adimensional. La relación entre los parámetros  $c$  y  $k$  está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\bar{V}}{c} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.6)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{V}} = \frac{\sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.7)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la velocidad de viento y  $\Gamma$  es la función Gamma; dada por la siguiente expresión:

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{t-1} dx \tag{2.8}$$

Definiendo a la función Gamma para los números positivos reales se satisface que:

$$\Gamma(1) = 1 \text{ y } \Gamma(t + 1) = t\Gamma(t) \tag{2.9}$$

Como ha sido demostrado y desarrollado por Jaramillo y Borja (2004), en ocasiones las frecuencias calculadas por medio de la distribución de Weibull no son congruentes con las frecuencias reales, es decir, no hay un ajuste adecuado a los datos estadísticos recopilados. En estos casos, es posible que la distribución de probabilidad que se acople más al sitio sea la bimodal de Weibull o de Weibull & Weibull.

La figura 2.4 muestra la distribución de frecuencias de velocidad de viento para un conjunto de datos observados en La Ventosa, Oaxaca; como se puede observar, la distribución bimodal se ajusta al fenómeno real en este sitio de mejor forma que la unimodal.

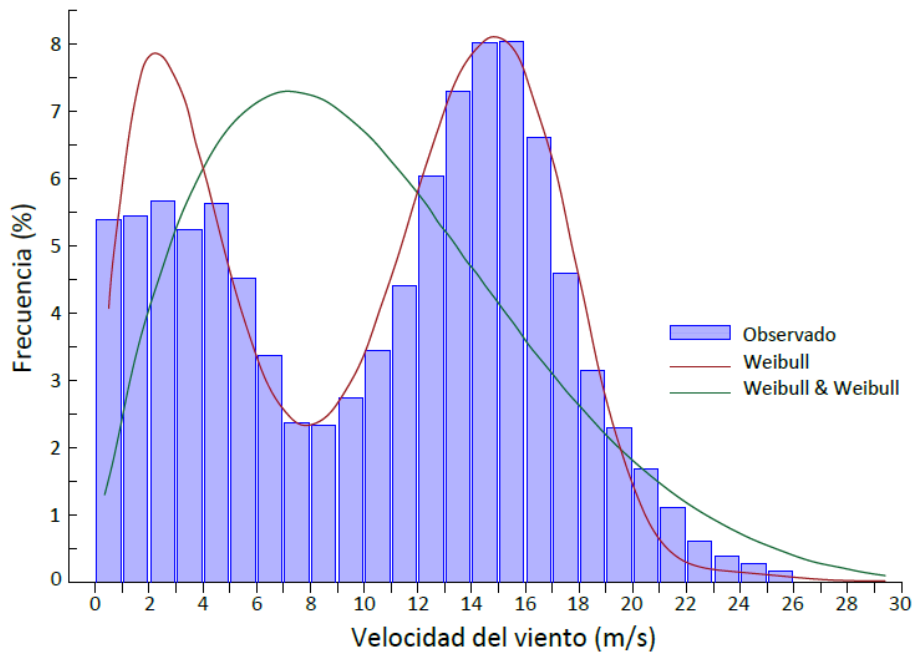


Figura 2.4 – Comparación entre los datos obtenidos en sitio y los ajustes de distribución unimodal de Weibull y bimodal de Weibull.

La distribución bimodal de Weibull tiene un comportamiento similar a la de la unimodal, con la diferencia de presentar dos picos de frecuencia, por lo que su función de densidad se separa, generando dos parámetros de escala, dos parámetros de forma y dos velocidades medias esperadas, esto es:

$$F_{WW}(V) = p[F_W(V)]_{izquierdo} + (1 - p)[F_W(V)]_{derecho} \quad (2.10)$$

De forma explícita:

$$F_{WW}(V) = p \int_0^\infty \frac{k_1}{c_1} \left(\frac{V}{c_1}\right)^{k_1-1} e^{-\left(\frac{V}{c_1}\right)^{k_1}} dV + (1 - p) \int_0^\infty \frac{k_2}{c_2} \left(\frac{V}{c_2}\right)^{k_2-1} e^{-\left(\frac{V}{c_2}\right)^{k_2}} dV \quad (2.11)$$

Donde  $F_{WW}(V)$  es la función de densidad de la distribución bimodal de Weibull,  $c_1$  y  $c_2$  son los nuevos parámetros de escala en (m/s) y  $k_1$  y  $k_2$  son los nuevos parámetros de forma, para los picos izquierdo y derecho, respectivamente;  $p$  es el peso de ponderación del lado izquierdo de la distribución, el cual se puede obtener con las siguientes ecuaciones:

$$\bar{V} = p\bar{V}_1 + (1 - p)\bar{V}_2 \quad (2.12)$$

$$\sigma^2 = p(\sigma_1^2 - (p - 1)(\bar{V}_1 - \bar{V}_2)^2) - (p - 1)\sigma_2^2 \quad (2.13)$$

Donde  $\bar{V}_1$  y  $\bar{V}_2$  son las velocidades medias en (m/s) para los picos izquierdo y derecho, respectivamente, mientras que  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$  son las varianzas para los picos izquierdo y derecho, respectivamente.

Los parámetros de forma y de escala se pueden obtener de manera sencilla a través de las siguientes ecuaciones:

$$\bar{V}_i = c_i \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_i}\right) \quad (2.14)$$

$$\sigma_i^2 = c_i^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k_i}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k_i}\right) \right] \quad (2.15)$$

El subíndice  $i$  será  $i = 1$  para el lado izquierdo de la distribución, mientras que  $i = 2$  será para el lado derecho de la distribución.

### 2.3.3 – Turbulencia

Se ha dicho que los vientos locales llevan consigo flujos turbulentos, asociados a un estado en que las velocidades muestran fluctuaciones irregulares en intervalos de tiempo relativamente cortos.

La turbulencia,  $v$ , es la componente variable de la velocidad y la responsable de sus cambios respecto al tiempo. Aunque tiene una influencia prácticamente nula en lo que respecta a la generación de energía, afecta de forma importante la calidad de la misma y las cargas que actúan sobre las estructuras.

Una forma de medirla es a través del parámetro intensidad de turbulencia,  $I_v$ , en ocasiones llamado “grado de turbulencia”, que es el cociente de la desviación estándar de la velocidad de viento,  $\sigma_v$ , y la velocidad media del viento,  $\bar{V}$ , expresado en porcentaje.

$$I_v = \frac{\sigma_v}{\bar{V}} (\%) \quad (2.16)$$

A través de datos estadísticos de las condiciones atmosféricas críticas, que incluyen las velocidades del viento mayores que 10 m/s, y condiciones de terreno más o menos homogéneo en un radio de al menos 30 km alrededor del punto de interés; la *Engineering Sciences Data Unit* (ESDU, 2001) ha desarrollado la siguiente expresión para el cálculo de la desviación estándar:

$$\frac{\sigma_o}{u_*} = \frac{7.5\eta \left(0.538 + 0.09 \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)\right)^p}{1 + 0.156 \ln\left(\frac{u_*}{f z_o}\right)} \quad (2.17)$$

En donde  $\eta$  y  $p$ , son parámetros que se calculan con las ecuaciones 2.18 y 2.19:

$$\eta = 1 - \frac{6fz}{u_*} \quad (2.18)$$

$$p = \eta^{16} \quad (2.19)$$

$u_*$  es un parámetro conocido como la velocidad de fricción, y  $f_c$ , es el parámetro de Coriolis:

$$u_* = \frac{\bar{V}}{2.5 \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \quad (2.20)$$

$$f_c = 2\Omega \sin(\phi) \quad (2.21)$$

Donde  $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la tierra  $\left(72.9 \times 10^{-6} \frac{rad}{s}\right)$ , y  $\phi$  es el ángulo de latitud del sitio en radianes.

### 2.3.4 – Espectro de Turbulencia

El comportamiento de la variable turbulenta en un punto dado puede describirse de manera estocástica, utilizando un espectro de turbulencia derivado de datos estadísticos. Dicho espectro muestra las variaciones del viento con la frecuencia y está dado por la función de densidad espectral,  $S_v(f)$ , que es la función que reporta la distribución de la energía de la turbulencia en una señal para cierto rango de frecuencias.

La intensidad de turbulencia se puede definir como la integración de la densidad espectral para un rango de frecuencias que abarca desde  $f$ , hasta  $f + df$  (Bianchi *et al.*, 2007), como lo ejemplifica la ecuación 2.22.

$$\sigma_v = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_v(f) df} \quad (2.22)$$



Los modelos del espectro de turbulencia más aceptados son el de von Karman (ecuación 2.23) y el de Kaimal (ecuación 2.24), el cual es el recomendado por la *International Electrotechnical Commission* (IEC, 2009) para el diseño de aerogeneradores:

$$S_v(f) = \frac{K_V}{(1 + (fT_V)^2)^{\frac{5}{6}}} \quad (2.23)$$

$$S_v(f) = \frac{K_V}{(1 + fT_V)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.24)$$

Ambos modelos están parametrizados por la constante  $T_V$ , que determina el ancho de banda de la frecuencia de la turbulencia, y por  $K_V$  que se asocia directamente con la energía de la turbulencia. Estos parámetros dependen de la velocidad promedio del viento y de las características del terreno. Se pueden aproximar de la siguiente forma:

$$K_V = 0.475 \sigma_0^2 \frac{L_v}{\bar{V}_z} \quad (2.25)$$

$$T_V = \frac{L_v}{\bar{V}_z} \quad (2.26)$$

$L_v$  es una longitud de escala de turbulencia, dependiente de las condiciones del terreno y de la altura del punto de interés. Cuando hay un gran número de obstrucciones y la altura,  $z$ , es cercana a la superficie, la turbulencia se incrementa y  $L_v$ , disminuye. Por otro lado, conforme la altura se incrementa y el punto se aleja de la superficie, la turbulencia deja de depender del terreno y  $L_v$  se vuelve constante.

La ESDU (2001) propone la siguiente expresión para calcular el valor de la longitud de escala de turbulencia, para la componente longitudinal del viento ( $x$ ), en el espectro de von Karman (con unidades en metros):

$${}^x L_v = \begin{cases} 280 \left(\frac{z}{z_i}\right)^{0.35} & , \quad z \leq z_i \\ 280 & , \quad z > z_i \end{cases} \quad (2.27)$$

Donde se considera a la altura de la capa limite como:

$$z_i = 1000z_0^{0.18} \quad (2.28)$$

En el caso del espectro de Kaimal, la relación para la longitud de escala de turbulencia es:

$$L_v = 2.329 {}^x L_v \quad (2.29)$$

### 2.3.5 – Espectro cruzado

El espectro tratado anteriormente proporciona el comportamiento de la turbulencia en un solo punto de estudio; si se desea describir correctamente la acción estructural de la turbulencia sobre la turbina, se necesitan la información estadística de al menos dos puntos (Veers, 1988).

El método estadístico del “espectro cruzado” se utiliza como base para la mayoría de los modelos teóricos de turbulencia, pues permite analizar las fluctuaciones de los flujos turbulentos en dos puntos simultáneamente. Consta de una parte real, conocida como co-espectro (*co-spectrum*) y una parte imaginaria, llamada espectro de cuadratura (*quadrature spectrum*).

El co-espectro captura las componentes de frecuencia y se utiliza para el cálculo de la respuesta estructural, mientras que el espectro de cuadratura muestra la información relativa a las fases de turbulencia, es decir, compara el comportamiento de la turbulencia en los dos puntos con respecto al tiempo. En un campo de viento homogéneo, la parte real es la dominante, mientras que la parte imaginaria suele considerarse despreciable.

La coherencia,  $\gamma$ , permite obtener el espectro cruzado normalizado en sus componentes real e imaginaria. La coherencia, en términos de la densidad espectral en los puntos de estudio, está descrita por la siguiente expresión:

$$\gamma_{ab}^2(f) = \frac{|S_{ab}(f)|^2}{S_{aa}(f)S_{bb}(f)} \quad (2.30)$$

Algunos de los modelos empíricos más utilizados para la obtención de la coherencia son el modelo exponencial modificado de la IEC, el modelo de coherencia de la ESDU y modelo exponencial de Davenport (Davenport, 1961). Este último es relativamente el modelo más sencillo y se representa con las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_{ab}^2(f) = e^{-c_{ab}(f_{r_{ab}})} \quad (2.31)$$

$$f_{r_{ab}} = \frac{D_{ab}}{\bar{V}_{ab}} \quad (2.32)$$

Donde:  $f_r$  es la frecuencia reducida y  $c_{ab}$  una constante de decaimiento, que es cambiante entre modelos de acuerdo con las consideraciones que los autores del mismo tomen. El modelo propuesto por Paganini y Solari (1987) es una buena opción, pues considera la relación estrecha entre  $c_{ab}$  y  $f_r$ , así como la gran dispersión que existe en los resultados (Ec. 2.33 y Ec. 2.34).

$$c_{ab} = B \left( \frac{D_{ab}}{Z_{ab}} \right)^{0.25} \quad (2.33)$$

$$B = 12 + 5\mu \quad (2.34)$$

Donde:  $D_{ab}$  es la distancia de separación entre los puntos  $a$  y  $b$ , y  $\bar{V}_{ab}$  es la velocidad media del viento de los puntos  $a$  y  $b$ ,  $z_{ab}$  es la altura media entre los puntos  $a$  y  $b$ , y  $\mu$  es un coeficiente adimensional de distribución uniforme, que varía entre -1 y 1.

## 2.4 – Modelado del campo de viento

Existen distintas metodologías que permiten simular un campo de viento turbulento en tres dimensiones; los estándares internacionales para aerogeneradores, como el de la IEC (2009), aprueban el uso del modelo de Mann, así como del método SANDIA, comúnmente conocido como método de Veers.

El método Veers, además de estar diseñado especialmente para turbinas de eje horizontal, permite reducir el tiempo computacional y el almacenamiento de datos, al efectuar las simulaciones de las velocidades de viento sólo cuando la turbina lo cruza. Sus principales características son:

- a) Utiliza como datos de entrada las densidades espectrales de un punto y la función de coherencia, para simular una malla de series de tiempo correlacionadas.
- b) La homogeneidad del campo no es necesaria, pero suele suponerse.
- c) Las fases de turbulencia y la incompresibilidad se ignoran.

### 2.4.1 – Formulación del método SANDIA (Veers)

Esta metodología crea  $N$  series de tiempo correlacionadas y basadas en una matriz espectral,  $S$ . La diagonal de la matriz es la densidad de potencia espectral y cada uno de los términos que no pertenecen a dicha diagonal ( $S_{ab}$ ), representan la densidad espectral cruzada entre los puntos  $a$  y  $b$ .

$$S(f) = \begin{bmatrix} S_{11}(f) & S_{12}(f) & \cdots & S_{1X_C}(f) \\ S_{21}(f) & S_{22}(f) & \cdots & S_{2X_C}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{X_F1}(f) & S_{X_F2}(f) & \cdots & S_{X_FX_C}(f) \end{bmatrix}_{X_F \times X_C} \quad (2.35)$$

Donde:  $X_F$  es el número de la fila y  $X_C$  es el número de columna de la matriz de  $(N \times N)$  términos.

Las  $N$  series de tiempo son generadas a partir de una combinación lineal de  $N$  procesos independientes de ruido blanco, es decir, señales aleatorias en las que sus valores en dos instantes distintos no guardan correlación estadística, por lo que su densidad de poder espectral será constante.

En este caso, la matriz  $S$  se podrá escribir como el producto de una matriz de transformación,  $H$ , y la transpuesta de su conjugado complejo,  $H^{*T}$  (Ec. 2.36).

$$S(f) = H(f)H^{*T}(f) \quad (2.36)$$

Se puede afirmar que:

- a) Tanto  $S$  como  $H$  son funciones de la frecuencia.
- b) Dado que  $S$  es real,  $H$  también lo es.

- c)  $H = H^*$
- d)  $S$  es simétrica, por lo que contiene  $\frac{N^2+N}{2}$  términos independientes.
- e)  $H$  contiene  $N^2$  términos independientes.

$H$  no está definida de forma única, con la excepción del caso en el que se supone como una matriz triangular inferior. En este caso, los elementos que no sean cero serán considerados como únicos y entonces, se pueden determinar a través de un sistema recursivo de ecuaciones que responde a la factorización de Cholesky, que se expresa como:

$$H(f) = Chol(S(f)) \tag{2.37}$$

Dentro de la matriz  $H$ , cada fila ( $X_F$ ) representa la influencia de los datos de entrada en los datos de salida del punto  $b$ , mientras que cada columna ( $X_C$ ) representa la influencia de los datos de entrada en los datos de salida del punto  $a$ .

Por otro lado, los datos de entrada de ruido blanco independientes están contenidos en una matriz diagonal,  $X$ , de  $N \times N$ , de las siguientes características:

$$X_{ab}(f) = \begin{cases} e^{i\theta_{km}}, & a = b \\ 0, & a \neq b \end{cases} \tag{2.38}$$

Donde  $i = \sqrt{-1}$  y  $\theta_{km}$  es el ángulo de fase asociado con el  $k$ -ésimo punto de entrada y la  $m$ -ésima componente de frecuencia, es una variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $(0,2\pi)$ . Lo anterior asegura que la serie de tiempo se aproximará a un proceso gaussiano conforme el número de componentes de frecuencia crece.

La ecuación matricial para obtener el vector de  $(N \times 1)$  de coeficientes complejos de Fourier para las velocidades simuladas de viento,  $\vec{V}$ , está dada por:

$$\vec{V} = HX1 \tag{2.39}$$

Donde  $1$  es un vector de unos de  $(N \times 1)$ , el cual permite sumar a través de cada fila de  $HX$ , puesto que  $X$  tiene la propiedad de aplicar una fase aleatoria a cada columna de  $H$ .

Para obtener las series de tiempo bastará con aplicar la transformada inversa de Fourier al vector  $\vec{V}$ . Lo que resultará en velocidades de viento simuladas para cada instante de tiempo para los  $N$  puntos en el espacio.

La figura 2.5 muestra esquemáticamente los puntos del campo de viento que se generan a partir del método del Laboratorio SANDIA alrededor de la estela de viento provocada por el movimiento de un aerogenerador de eje horizontal. La coordenada  $(0,0,0)$  es el punto en donde se encuentra el buje.

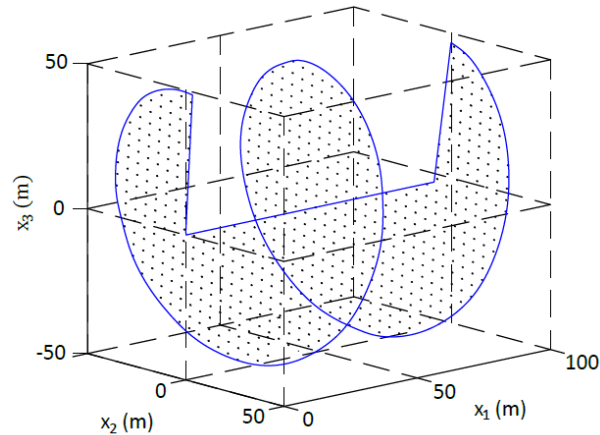


Figura 2.5 – Turbulencia generada alrededor de un rotor en movimiento.

### 2.5 – Obtención de fuerzas del viento en la estructura

Todos los efectos de carga actuantes sobre la estructura del rotor pueden atribuirse a los efectos de las fuerzas inerciales, producidas por el movimiento del rotor y por el peso propio de la estructura; y de las cargas aerodinámicas, generadas por la interacción del viento con la estructura.

Ambas pueden ser de carácter estático, cuando existe un flujo estable y una velocidad de viento uniforme; o dinámico cíclico, cuando el flujo de viento es estable, pero no es uniforme alrededor del área de barrido del rotor. Por otro lado, cuando el viento es turbulento, las fuerzas aerodinámicas presentan un comportamiento no cíclico, de naturaleza estocástica.

La figura 2.6 ilustra las fuerzas actuantes sobre el aerogenerador, clasificadas de acuerdo su variación respecto al tiempo.

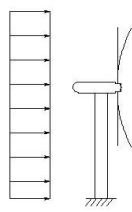

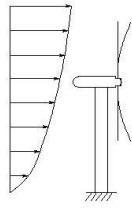
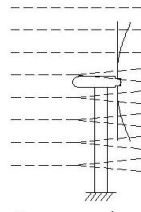
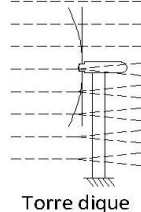
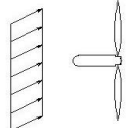
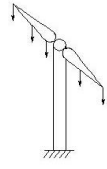
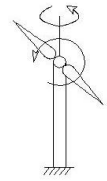
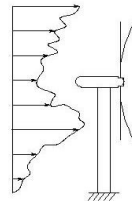
	Fuerzas aerodinámicas	Fuerzas inerciales y gravitacionales
Cargas estáticas	 <p>Velocidad media del viento</p>	 <p>Fuerzas centrífugas</p>
Cargas cíclicas (dinámicas)	 <p>Cortante vertical del viento</p>  <p>Torre sombra Viento bajo rotor</p>  <p>Torre dique Viento sobre rotor</p>  <p>Viento cruzado Ángulo de derrape</p>	 <p>Fuerza gravitacional</p>  <p>Fuerza giroscópica</p>
Cargas no cíclicas (dinámicas)	 <p>Turbulencia</p>	

Figura 2.6 – Fuerzas actuantes sobre el rotor (Hau, 2006).

La formulación general para obtener la fuerza “cuasi-estática” ejercida por un fluido en una estructura inmersa en éste, considerando solamente la dirección longitudinal de la velocidad, se describe con la ecuación 2.40:

$$F = \frac{1}{2} \rho_{aire} C_p V^2 A \tag{2.40}$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente de presión que depende de la forma de la estructura,  $V$  es la velocidad total del viento y  $A$  es el área expuesta perpendicular a la dirección del viento. La ecuación 2.40 es la base de los reglamentos de diseño, solo basta con agregar coeficientes de forma, parámetros específicos del sitio, o factores que adecuen el tipo de estructura. De igual manera, es la base para obtener las fuerzas dinámicas del viento, por ejemplo, al modificar el valor único de la velocidad del viento en una serie de

tiempo. Incluso es la base de teorías más sofisticadas para obtener las fuerzas en estructuras irregulares o en modelos que involucran momentos a flexión o torsión.

### 2.6 – Resolución del método “Blade Element Momentum” (BEM)

La teoría del BEM (*Blade Element Momentum*) desarrollada por Glauert (1935), proporciona un algoritmo sencillo para calcular las fuerzas del viento actuantes sobre el rotor. Tiene fundamento en dos modelos simples que aproximan las condiciones del flujo de viento: balance de momento en un anillo tubular que pasa por la turbina y en análisis bidimensional de elementos alares.

El primer modelo consta de un balance unidimensional de momento y energía, considerando que el flujo del viento pasa a través de la turbina como un tubo. Para su aplicación se discretiza a las palas del rotor en elementos anulares y se utiliza un esquema iterativo para aproximar las condiciones del flujo local en cada elemento diferencial (Landesberger, 2014). El diagrama de la discretización anular puede apreciarse en la figura 2.7.

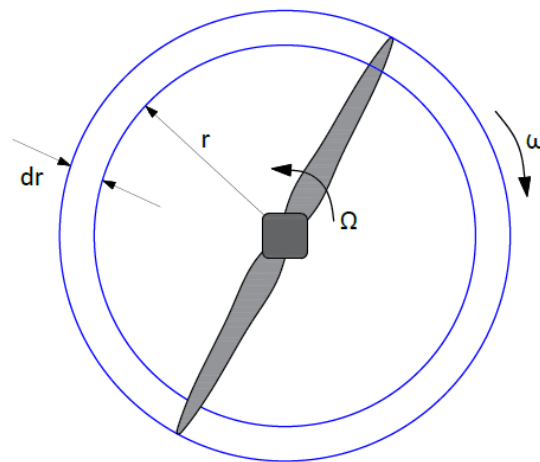


Figura 2.7 – Discretización anular de las palas (Ingram, 2011).

Los límites laterales del sistema se definen siguiendo las líneas de corriente del flujo de aire sobre el rotor. En la figura 2.8 se esquematiza una línea de corriente a través del volumen de control.

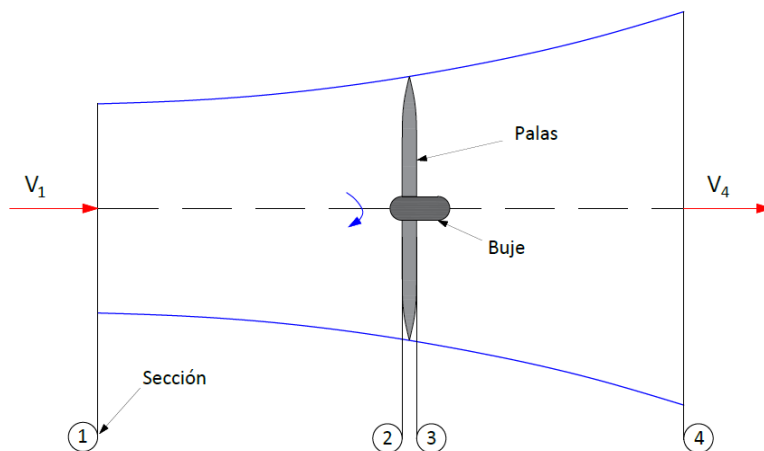


Figura 2.8 – Estela de flujo a través del rotor (Ingram, 2011).

En la entrada del flujo, sección 1, la velocidad rotacional del viento es 0; mientras que en la sección 4, después de haber recibido el impulso de la turbina, la velocidad rotacional será,  $\omega_4$ . De modo que la velocidad rotacional promedio del flujo en la estela es:  $\omega_4/2$  y la velocidad tangencial promedio en el rotor será:

$$\omega_{2,3} = \left( \Omega r + \frac{\omega_4 r}{2} \right) \quad (2.41)$$

En dónde  $\Omega$  es la velocidad de rotación de la turbina y  $r$  es la distancia del centro del rotor al punto de estudio. En tanto, se puede definir el cambio en la velocidad tangencial utilizando el factor de inducción rotacional,  $a'$ :

$$a' = \frac{\omega_4}{2\Omega} \quad (2.42)$$

$$\omega_{2,3} r = (1 + a') \Omega r \quad (2.43)$$

Por otro lado, la alteración en la velocidad axial está definida por el factor de inducción axial,  $a$ :

$$V_1 = (1 - a) V_\infty \quad (2.44)$$

$$a = 1 - \frac{V_1}{V_\infty} \quad (2.45)$$

Donde  $V_\infty$  es la velocidad axial del viento antes de interferir con el rotor y  $V_1$  es la velocidad axial del viento en el rotor.

Con base en lo anterior se pueden re-escribir las ecuaciones de conservación de momento y energía usando los factores de inducción, para obtener una primera aproximación de la fuerza de empuje,  $dT$ , y de la potencia o torque,  $dM$ , producidas en un anillo diferencial. El sistema de ecuaciones se plantea de la siguiente forma:

$$dT = 4\pi \rho_{aire} V_\infty^2 a(1 - a) r dr \quad (2.46)$$

$$dM = 4\pi \rho_{aire} V_\infty \Omega a'(1 - a) r^3 dr \quad (2.47)$$

La segunda aproximación para calcular las cargas en uno de los elementos anulares es a través del análisis de elementos tipo ala (*wing analysis*, en inglés), en el que se supone al elemento de la pala como un ala corta y se asume un flujo bidimensional alrededor del mismo.

En este caso se requerirá de coeficientes de arrastre,  $C_d$  y de levantamiento,  $C_l$ , que son dependientes del ángulo de ataque,  $\alpha$  y del tipo de perfil en estudio. Al procesar estos datos y proyectar el levantamiento y el empuje en el “ala”, se pueden obtener las fuerza de empuje,  $dT$  y la potencia o torque,  $dM$ , producidas por el anillo.

$$dT = 1/2 \rho_{aire} b W^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) c dr \quad (2.48)$$



$$dM = 1/2 \rho_{aire} b W^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (2. 49)$$

En donde  $b$  es el número de palas del rotor,  $c$  es la longitud de la cuerda y  $\varphi$  es el ángulo de caudal del afluente (*pitch angle*). Este ángulo se puede calcular a través de las componentes vectoriales de velocidad local en el rotor:

$$\tan(\varphi) = \frac{V_{\infty}(1 - a)}{r\Omega(1 + a')} = \frac{1 - a}{\lambda_r(1 + a')} \quad (2. 50)$$

Donde  $\lambda_r$  es la velocidad específica local:

$$\lambda_r = \frac{r\Omega}{V_{\infty}} \quad (2. 51)$$

Ambos sistemas de ecuaciones requieren  $a$  y  $a'$  como datos de entrada, aunque estos pueden no conocerse, el algoritmo de Glauert (1935) ajusta ambos modelos para poder obtener los factores de inducción con las siguientes ecuaciones iterativas:

$$a = \left[ 1 + \frac{4 \sin^2 \varphi}{\sigma_r (C_l \cos \varphi)} \right]^{-1} \quad (2. 52)$$

$$a' = \left[ -1 + \frac{4 \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma_r (C_l \sin \varphi)} \right]^{-1} \quad (2. 53)$$

Donde  $\sigma_r$  es la solidez local:

$$\sigma_r = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (2. 54)$$

Analizando el flujo que pasa por la turbina se puede obtener el diagrama del flujo del viento que actúa en una sección de la pala, como se muestra en la figura 2.9. En donde  $V$  es la velocidad axial del viento y  $\omega_1 r$  es la velocidad de rotación lineal. A la resultante de estas velocidades vectoriales se le conoce como velocidad resultante,  $W$ .

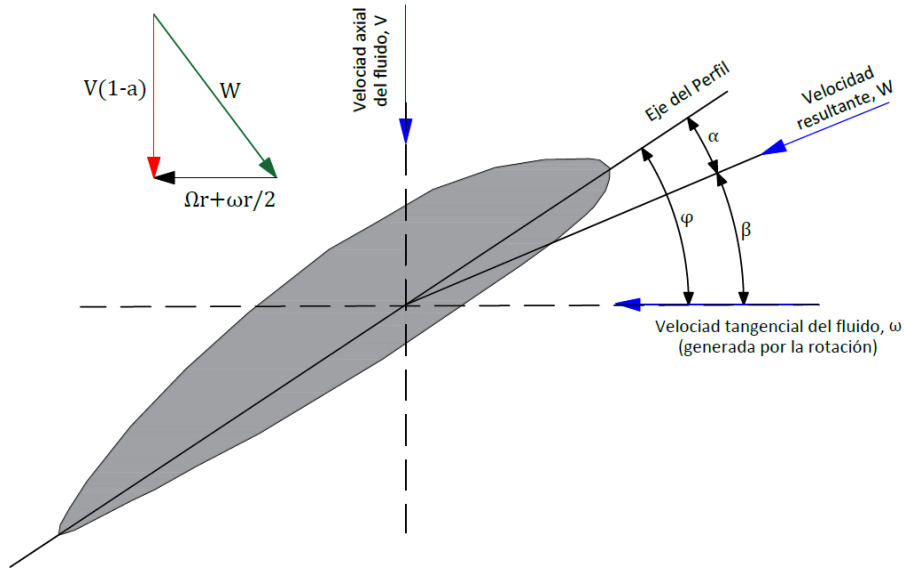


Figura 2.9 – Diagrama de flujo del viento en el rotor.

Como se aprecia en el diagrama anterior, el ángulo  $\varphi$  es dependiente del ángulo de ataque del viento,  $\alpha$ , y del ángulo de inclinación de la sección (*section pitch angle* o *twist angle*, en inglés),  $\beta$ . Su relación está dada por la siguiente expresión:

$$\alpha = \varphi - \beta \quad (2.55)$$

La velocidad resultante entre la velocidad axial y la tangencial es:

$$W = \sqrt{\omega^2 + V^2} \quad (2.56)$$

### 2.6.1 – Corrección de Glauert

La teoría clásica del momento muestra una relación directa entre el coeficiente de empuje,  $C_T$  y el factor de inducción axial,  $a$ , (Ec. 2.57).

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (2.57)$$

Por medio del análisis de datos experimentales se ha probado que para factores de inducción axial mayores a 0.5 dicha relación no se cumple. Bajo esta premisa, Glauert (1935) corrigió el cálculo del factor, fijando un límite empírico de validez, siendo  $a \leq 0.4$ .

Los factores de inducción,  $a$ , mayores que 0.5 se presentan cuando hay un estado de estela turbulenta en el flujo que atraviesa al rotor, usualmente durante el inicio o la finalización de la operación y muy raramente durante la operación continua.

Aunque los estados turbulentos no tienen un efecto significativo en la generación de energía, con tal de generar análisis más certeros, es necesario poder modelar las condiciones en que  $a > 0.4$ . La expresión de Buhl (2005) pretende eliminar las incertidumbres numéricas ocasionadas por el modelo de Glauert (1935) e incluir las pérdidas alrededor del eje y en la punta de la pala (Ec. 2.58):

$$C_T = \frac{8}{9} + \left(4F - \frac{40}{9}\right)a + \left(\frac{50}{9} - 4F\right)a^2 \quad (2.58)$$

Donde  $F$  es el coeficiente de pérdidas. Simplificando la ecuación anterior e igualando a cero:

$$(8 - 9C_T) + (36F - 40)a + (50 - 36F)a^2 = 0 \quad (2.59)$$

Aplicando formula general:

$$a = \frac{-(36F - 40) \pm \sqrt{(36F - 40)^2 - 4(50 - 36F)(8 - 9C_T)}}{2(50 - 36F)} \quad (2.60)$$

Resolviendo para la raíz positiva (lado derecho de la parábola) y simplificando la ecuación, el coeficiente de inducción axial se puede obtener con la siguiente expresión:

$$a = \frac{18F - 20 - 3\sqrt{C_T(50 - 36F) + 12F(3F - 4)}}{36F - 50} \quad (2.61)$$

La figura 2.10 muestra la curva clásica de Glauert, en color azul, su correlación con los datos reales, y la curva correctiva de Buhl, en color verde.

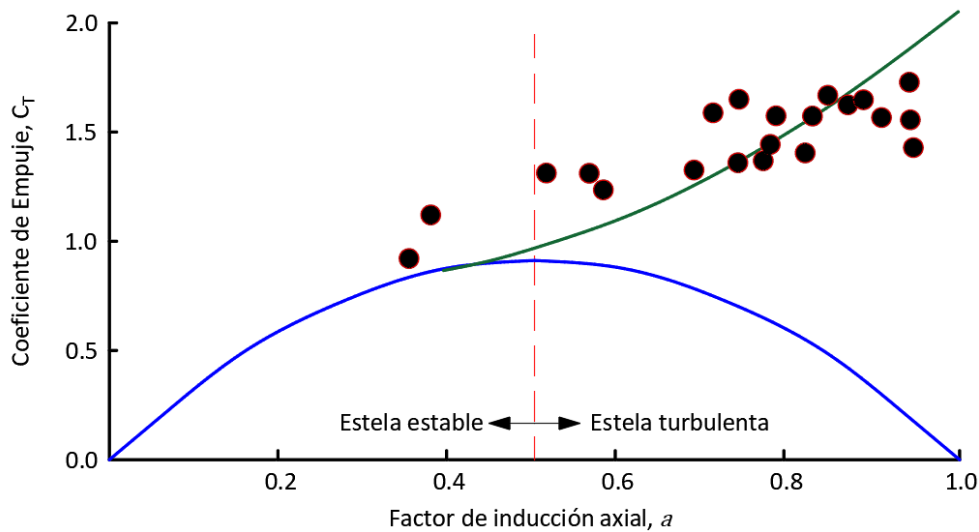


Figura 2.10 – Parábola clásica de Glauert y corrección con expresión de Buhl (Buhl, 2005).

### 2.6.2 – Corrección de Prandtl

Prandtl (1927) propuso un factor de corrección,  $Q$ , que toma valores entre 0 y 1, para el cálculo de las fuerzas cercanas a la punta de la pala y a su raíz, que considera las pérdidas consecuentes a la presencia de sistemas de vórtices helicoidales en dichas zonas. Este factor puede calcularse por la expresión propuesta por Ingram (2011), como sigue:

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( e^{-\frac{B(R-r)}{2(r \sin \phi)}} \right) \quad (2.62)$$

### 2.6.3 – Proceso iterativo del BEM

El proceso iterativo que debe seguir para obtener los coeficientes de empuje del método BEM se describe a continuación:

1. Moriarty y Hansen (2005) proponen que para la primera iteración se suponga lo siguiente: el valor del ángulo del caudal de afluente,  $\varphi$ , es muy pequeño y  $\sin(\varphi) \approx \varphi$ ; el coeficiente de inducción rotacional,  $a'$  es cero; el coeficiente de pérdidas,  $F$  es 1.0; el coeficiente de arrastre,  $C_d$  es cero; y el coeficiente de levantamiento,  $C_l$  es  $2\pi\alpha$ . Suponiendo lo anterior, se llega a la siguiente expresión:

$$a = \frac{1}{4} \left[ 2 + \pi\lambda_r\sigma_r - \sqrt{4 - 4\pi\lambda_r\sigma_r + \pi\lambda_r^2\sigma_r(8\beta + \pi\sigma_r)} \right] \quad (2.63)$$

2. Utilizando la ecuación anterior (Ec. 2.63), donde el ángulo de inclinación de la sección,  $\beta$ , es un dato dependiente del diseño de la pala y calculando la velocidad específica local,  $\lambda_r$  y la solidez local,  $\sigma_r$ , con las ecuaciones 2.51 y 2.54, respectivamente, se obtiene el primer valor del coeficiente de inducción axial,  $a = a_0$ . El coeficiente de inducción tangencial se supuso como cero,  $a' = a'_0 = 0$ .
3. Con estos coeficientes se pueden aproximar los valores del ángulo de caudal de afluente,  $\varphi$ , y del ángulo de ataque,  $\alpha$ , utilizando las ecuaciones 2.50 y 2.55 respectivamente.
4. También se pueden obtener el coeficiente de empuje,  $C_T$ , con la ecuación 2.57, y el coeficiente de levantamiento,  $C_l$ , con la geometría del perfil y el ángulo  $\alpha$ .
5. Posteriormente, el factor de inducción axial debe recalcularse para obtener su valor corregido correspondiente a la primera iteración,  $a = a_1$ . Cuando  $C_T > 0.96Q$ , se considera que el elemento de análisis tiene una sobrecarga y se aplica la corrección de Glauert, utilizando la ecuación 2.61. Cuando  $C_T \leq 0.96Q$ , se utiliza la ecuación 2.52. En ambos casos,  $Q$ , es la corrección de Prandtl de la ecuación 2.62.
6. También se recalculará el factor de inducción tangencial para obtener su valor correspondiente a la primera iteración,  $a' = a'_1$ , haciendo uso de la ecuación 2.53.
7. Los valores supuestos:  $a_0$  y  $a'_0$ , se comparan con los calculados:  $a_1$  y  $a'_1$ . El proceso iterativo debe repetirse hasta alcanzar el nivel de error aceptable entre valores iniciales y calculados. En las iteraciones consecutivas se supone que los valores calculados al final de la iteración anterior serán los valores de entrada para la siguiente.
8. Cuando las iteraciones convergen se pueden obtener las fuerzas de empuje que actúan en la pala, sustituyendo el coeficiente de empuje,  $C_T$ , en la ecuación 2.46, y realizando una integración por toda la cuerda de la pala. La expresión para obtener la fuerza de empuje será:

$$\int_0^R dT = \int_0^R \pi\rho_{aire}V_\infty^2[4a(1-a)]rdr \quad (2.64)$$

$$dT = \int_0^R \pi\rho_{aire}V_\infty^2C_T r dr \quad (2.65)$$

### 2.7 – Método BEM simplificado

La metodología BEM tradicional supone que la turbina se encuentra en movimiento y que las fuerzas calculadas corresponden a las que se presentan bajo velocidades de operación del aerogenerador.

Por otro lado, cuando la turbina está detenida, es posible calcular la fuerza que ejerce el viento sobre las palas de manera similar a como se calcula en estructura estáticas, con una formulación análoga a la del Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2008) para chimeneas y torres de celosía. De modo que la fuerza que actúa en una sección de la pala estática es:

$$F = \frac{1}{2} \rho_{aire} V^2 A C_d \tag{2.66}$$

Donde  $A$  es el área de contacto que tiene la pala con el flujo de viento, correspondiente al producto de la cuerda promedio del perfil de análisis,  $c$ , con el radio de afectación del perfil,  $\bar{r}$ .

El coeficiente de arrastre,  $C_d$ , puede obtenerse a partir de la información del perfil o por medio de las expresiones desarrolladas por Timmer (2010), que permiten obtener los coeficientes para ángulos de ataque con poca información relativa al perfil:

$$C_d = C_{d_{m\acute{a}x}} \sin^2 \alpha \tag{2.67}$$

Donde  $C_{d_{m\acute{a}x}}$  representa el máximo coeficiente de arrastre, localizado en la ordenada  $y/c$  que corresponde a la coordenada abscisa  $x/c = 0.0125$  del perfil:

$$C_{d_{m\acute{a}x}} = 1.994 - 5.437 y/c \tag{2.68}$$

La figura 2.11 señala los valores de la coordenada  $(x/c, y/c)$  para un perfil DU99W350LM.

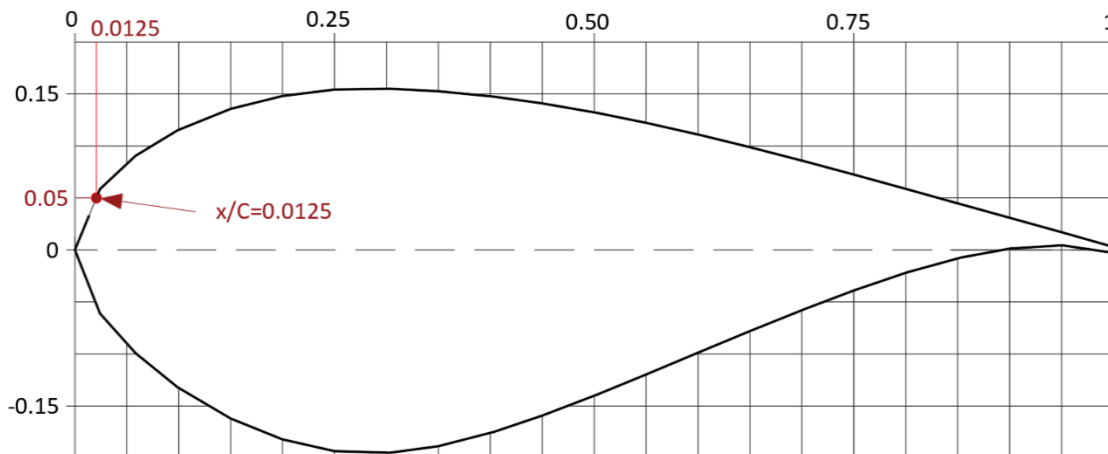


Figura 2.11 – Coordenada  $x/c=0.0125$  de un perfil DU99 W 350 LM.

### III – Estructura de análisis

La pala de un aerogenerador de eje horizontal es un elemento con forma similar al ala de un aeroplano. Funciona a través del principio de levantamiento utilizado para lograr la conversión de la energía del viento en energía mecánica (Schubel y Crossley, 2012).

#### 3.1 – Componentes de un aerogenerador

Para comprender el funcionamiento de una pala, es necesario conocer el sistema general de un aerogenerador. Los rotores de triple pala se consideran los de diseño más eficiente con respecto a las limitantes ambientales, económicas y comerciales. La figura 3.1 muestra el diagrama de la configuración típica de un aerogenerador de este tipo.

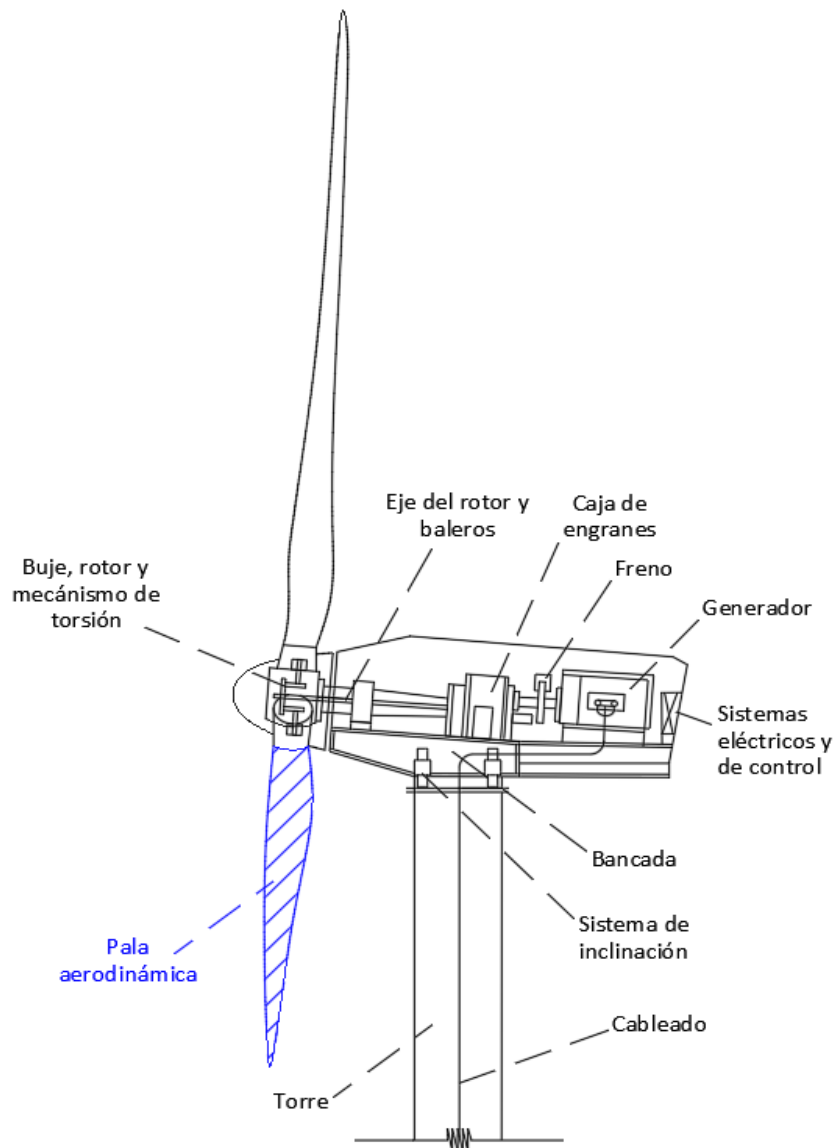


Figura 3. 1 – Componentes de una turbina de eje horizontal (Hau, 2006).

Las componentes principales del mismo se describen a continuación:

- a) Torre: funge como estructura de soporte con la única función de sostener al rotor y transmitir las cargas hacia la cimentación.
- b) Rotor: formado por las palas y el buje, que es la unión de éstas.
- c) Eje del rotor: conectado al buje, gira sobre baleros para transmitir la energía mecánica aprovechada hacia la caja de engranes.
- d) Caja de engranes: mientras que el rotor gira a una velocidad aproximada de 20 a 400 RPM, los engranes de transmisión en su interior incrementan la velocidad a unas 1800 RPM para aumentar la generación eléctrica.
- e) Generador: transforma la energía mecánica en eléctrica y la conduce por el cableado hacia una unidad transformadora.
- f) Mecanismo de torsión (*pitch mechanism*): gira a las palas alrededor de su eje longitudinal para reducir los coeficientes de levantamiento y proteger a la estructura bajo la acción de vientos fuertes.
- g) Freno de acción mecánica: actúa como unidad de respaldo para desacelerar a las palas o, en su caso, detener totalmente el rotor para darle mantenimiento.
- h) Sistema de inclinación (*yaw sistem*): gira o inclina la turbina para mantenerla en la dirección favorable del viento.

### 3.2 – Generalidades de la geometría de la pala

La sección transversal de una pala está compuesta por perfiles aerodinámicos o alares (*airfoils*), que son formas curvas que adoptan los cuerpos para generar una fuerza aerodinámica cuando atraviesan un fluido.

Su sección longitudinal, conocida como vista plana (*plan form*), es un perfil curvo compuesto por dos parámetros: el radio,  $r$ , que es la distancia que hay de la base de la pala, ubicada en el buje, a cualquier punto; y la cuerda,  $C$ , que es la longitud del eje del perfil en la sección transversal de ese punto.

El método de Betz (1966) proporciona una expresión para obtener el mejor trazo de la vista plana, calculando la longitud de cuerda óptima,  $C_{opt}$ , utilizando como parámetros la velocidad local del viento,  $V$ , los coeficientes de levantamiento del perfil,  $C_l$ , y la velocidad específica local,  $\lambda_r$ , como se muestra en la ecuación 3.1:

$$C_{opt} = \frac{2\pi r}{n} \frac{8}{9C_l} \frac{V}{W\lambda_r} \quad (3.1)$$

De acuerdo con Schubel y Crossley (2012), una pala puede dividirse en tres áreas de estudio según su función estructural:

- a) La raíz: es la transición entre la montura circular y el primer perfil alar. Es la sección que soporta las cargas más fuertes. Se compone de perfiles muy gruesos, de una eficiencia aerodinámica muy baja y que se ajustan a los altos requerimientos estructurales.

- b) La envergadura o parte media (*mid span*): la sección de mayor significancia aerodinámica; en la que la relación de empuje-arrastre debe maximizarse y deben utilizarse los perfiles más delgados posibles que los requisitos estructurales permitan.
- c) La punta: la sección de desempeño aerodinámico crítico, en la que la relación de empuje-arrastre debe llevarse a su mayor valor y deben utilizarse perfiles alares muy delgados, con un diseño especializado que ayude a evitar las pérdidas y el ruido de viento.

La figura 3.2 muestra la sección longitudinal usual de una pala, proyectada como vista plana y dividida en sus secciones de estudio estructural.

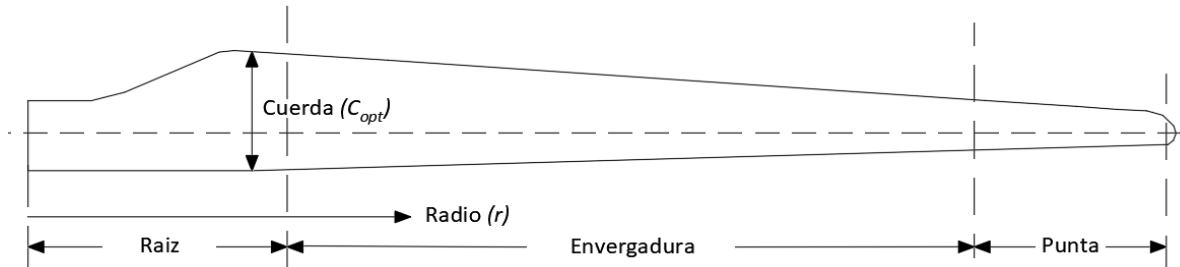


Figura 3.2 – Proyección plana de una pala típica de un aerogenerador de eje horizontal.

### 3.2.1 – Torcedura de la pala

Los empujes generados en un perfil de la pala están en función del ángulo de ataque,  $\alpha$ , formado con la corriente de viento que lo atraviesa y que es dependiente del ángulo de torcedura o inclinación de cada perfil,  $\beta$ .

La forma más eficiente de la pala se adopta cuando la dirección de los perfiles en la envergadura apunta de forma paralela a la dirección del viento, y los perfiles de la punta apuntan en una dirección normal, generando una estructura torcida. La torcedura total que se alcanza en una pala suele reducirse con tal de mejorar los costos de fabricación. La figura 3.3 es un boceto de la forma típica de una pala. En él se puede apreciar la sección transversal torcida.

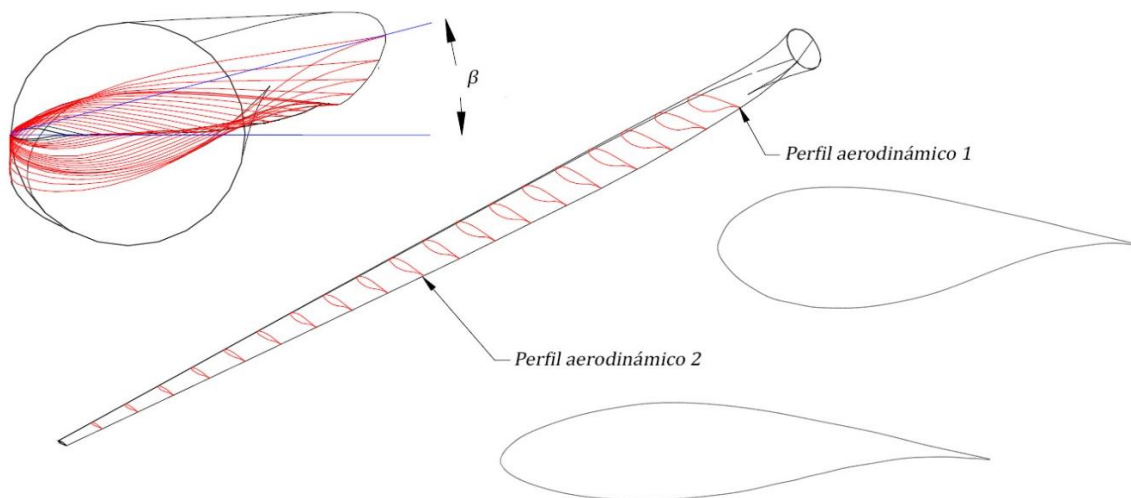


Figura 3.3 – Isométrico de la pala típica de un aerogenerador de eje horizontal (Schubel y Crossley, 2012).



### 3.2.2 – Flecha de la pala

Otro aspecto importante del diseño de una pala, es la flecha o pre-pandeo (*prebending*),  $\Delta y$ , la cual garantiza que durante la operación del aerogenerador exista una distancia suficiente entre las palas del rotor y la torre, evitando las colisiones.

La forma flechada de la pala debe ser tal que cuando sea sujeta a las fuerzas del viento y a las fuerzas inerciales, se enderece y alcance su configuración original (Bazilevs *et al.*, 2012).

La figura 3.4 es una vista lateral de la pala en la que se aprecia el pre-pandeo.

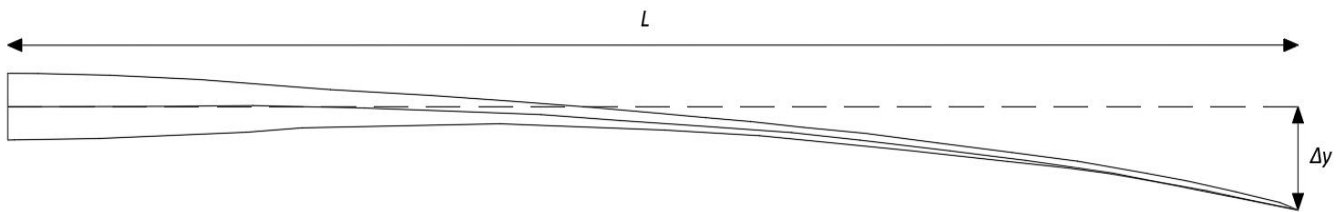


Figura 3.4 – Vista lateral de una pala.

### 3.3 – Caracterización de perfiles aerodinámicos

La geometría de un perfil está compuesta por dos superficies actuantes, un arco superior y un arco inferior. De acuerdo con lo propuesto por Anderson (2007), un perfil está formado por las siguientes secciones:

- a) El borde de ataque: el punto que entra en contacto con la corriente de viento provocando su bifurcación.
- b) El borde de salida: el punto de confluencia y salida de las corrientes provenientes de intradós y el extradós.
- c) El intradós: la parte superior del perfil, por encima del arco superior.
- d) El extradós: la parte inferior del perfil, por debajo del arco inferior.

Al mismo tiempo, los parámetros descriptivos de su geometría son:

- a) La longitud de la cuerda,  $C$ , que corresponde a la línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida
- b) El espesor,  $T$ . Medido de forma perpendicular a la cuerda.
- c) La línea de curvatura media (mean camber line, en inglés) que es la resultante de la asimetría entre los arcos.
- d) La relación de espesor cuerda,  $T/C$ , que se obtiene con la ecuación 3.2.

$$T/C = \frac{AB}{CD} \% \quad (3.2)$$

e) La relación máxima de la línea de arco (Max Camber Ratio),  $MCR$ , que es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil, que se obtiene con la ecuación 3.3.

$$MCR = \frac{AB}{CD} \tag{3.3}$$

El parámetro que define su desempeño aerodinámico es la relación de empuje-arrastre (*lift to drag ratio*, en inglés),  $LDR$ . En el diseño de palas se busca que sea lo más grande posible.

$$LDR = \frac{C_l}{C_d} \tag{3.4}$$

La figura 3.5 es un esquema de las regiones y parámetros que componen un perfil alar.

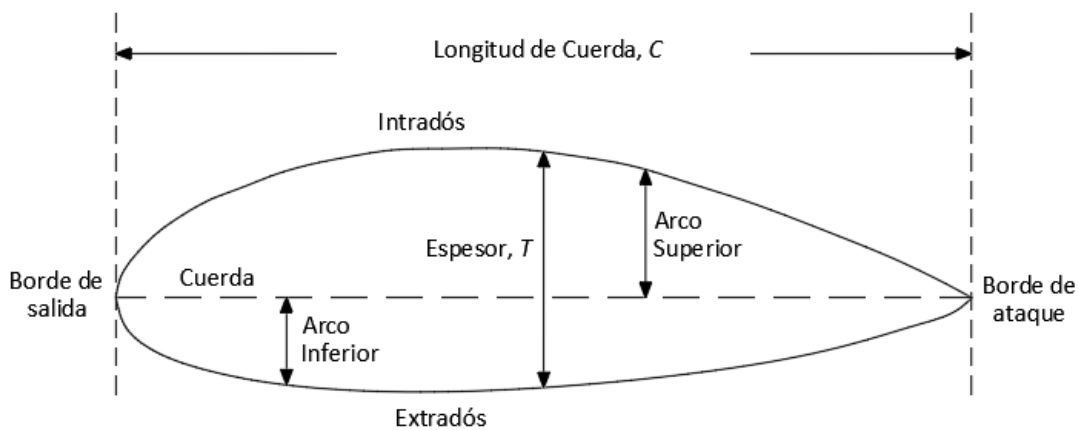


Figura 3. 5 - Partes de un perfil alar.

En la figura 3.6 se muestran los parámetros con los que se calculan las relaciones  $T/C$ , y  $MCR$ .

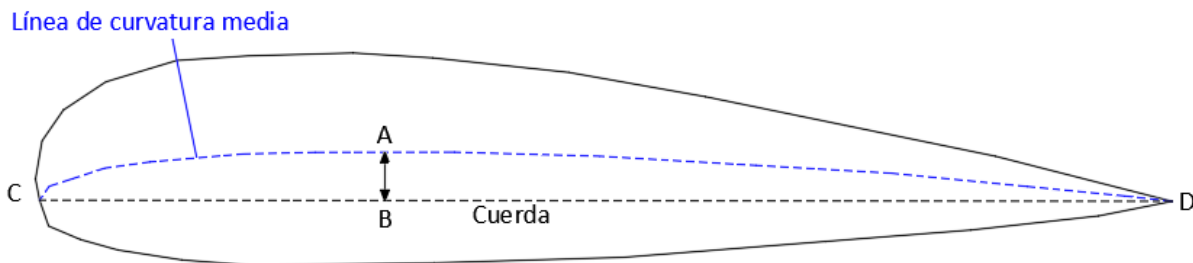


Figura 3. 6 – Localización de los parámetros para obtener la relación  $T/C$  y  $MCR$ .

Los coeficientes de levantamiento y arrastre se pueden obtener a través de aplicaciones computacionales como *XFOIL* (Drela, 2013), que simulan resultados aceptables para cualquier forma de perfil dada; o a través de pruebas experimentales con las que se obtienen los coeficientes para diferentes números de Reynolds y ángulos de ataque.

La figura 3.7 contiene las curvas de valores del coeficiente de arrastre,  $C_d$ , experimentales y los obtenidos con *XFOIL* para un perfil tipo NACA2412.

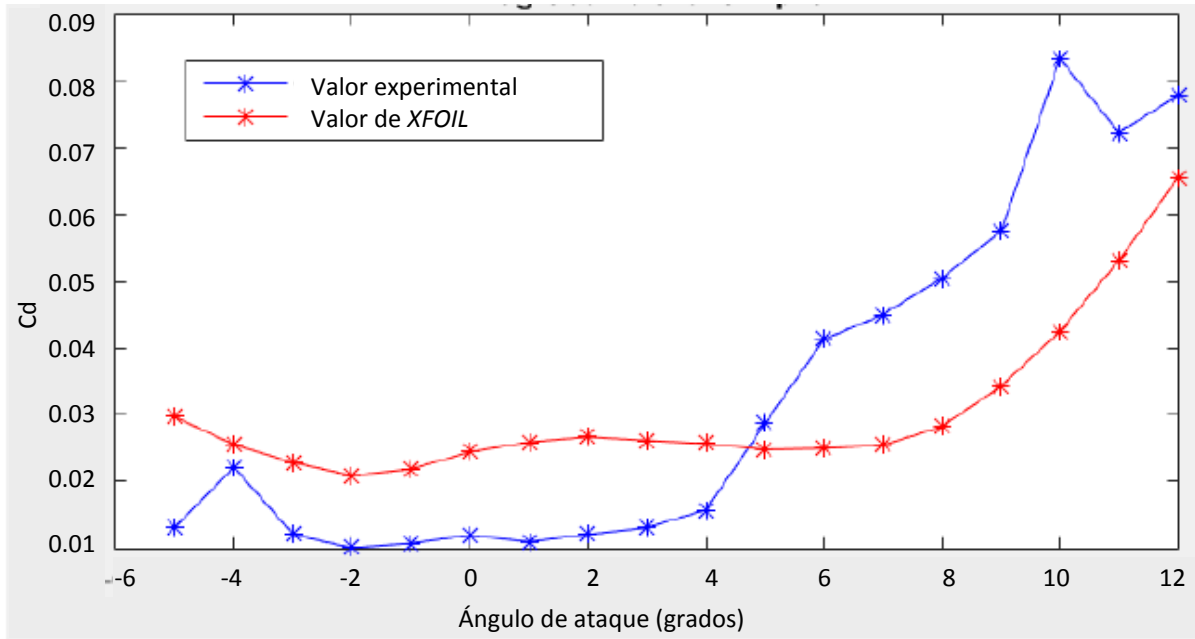


Figura 3.7 – Determinación del LDR utilizando el software XFOIL (Konuk et al., 2017)

### 3.3.1 – Perfiles aerodinámicos en palas

Usualmente en el diseño de aerogeneradores se utilizan perfiles aerodinámicos contruidos originalmente para tecnologías aeroespaciales, que se ajustan a los requerimientos de una operación constante a altitudes bajas y a las demandas estructurales, maximizando el *LDR* para relaciones de espesor cuerda altas. La tabla 3.1 muestra los criterios de selección de perfiles para cada región de la pala.

Tabla 3. 1 – Requerimientos del perfil para las regiones de la pala (Schubel y Crossley, 2012).

Parámetro	Región de la pala		
	Raíz	Envergadura	Punta
Relación de espesor cuerda, T/C (%)	>27	27-21	21-15
Requerimientos estructurales de carga	Alto	Medio	Bajo
Compatibilidad geométrica	Medio	Medio	Medio
Máximo $C_l$ de diseño	-	Bajo	Medio
Entrada de pérdidas	-	Bajo	Alto
Bajo ruido generado por el perfil alar	-	-	Alto

Las series de perfiles alares más utilizados para el diseño de palas son:

- a) Los desarrollados por el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA, por sus siglas en inglés), clasificados con 4 y 5 dígitos (Pinzón-Paz, 2013). En su nomenclatura el primer dígito se refiere al máximo *MCR*; el segundo denota la posición de la línea de arco medio en décimas de la longitud de cuerda; y los últimos indican la relación de espesor cuerda, *T/C*.
- b) Los diseñados por la Universidad de Delft (DU, por sus siglas en inglés) especialmente para palas, acotados con los prefijos LS, SERI-NREL, FFA y RISO (Timmer y Rooij, 2003).

La geometría de este tipo de perfiles puede consultarse en bases de datos especializadas, como la de la *University of Illinois Urbana-Champaign* (UIUC, 2018).

#### 3.4 – Distribución de esfuerzos en la pala

Existen estudios prácticos de fatiga que demuestran que la región más esforzada en palas pertenece a la zona de transición entre la raíz y la zona aerodinámica (Marín *et al.*, 2009), esto es debido a una concentración local de esfuerzos, producto de los cambios abruptos de rigidez.

Con base en lo anterior, la raíz de la pala se diseña bajo un criterio estructural, mientras que la envergadura y la punta se diseñan bajo un criterio aerodinámico. La figura 3.8, muestra los esfuerzos generados en una pala sometida al efecto de fatiga, calculados por medio de software ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013).

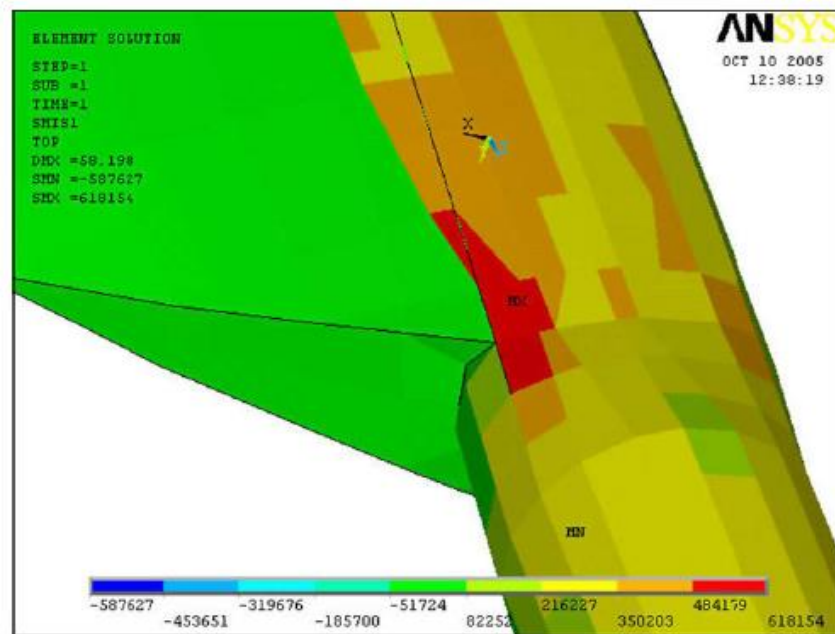


Figura 3.8 – Mapa de esfuerzos de la pala de un aerogenerador (Marín *et al.*, 2009).

#### 3.5 – Componentes estructurales de la pala

Debido a su forma esbelta y larga, una pala se puede modelar como una viga en cantilever, bajo esta suposición la pala tendrá un efecto de deflexión y desplazamiento en dos sentidos:

- En la dirección del viento (*flapwise deflection*), por efecto de las fuerzas aerodinámicas.
- Y en la dirección del campo gravitacional (*edgewise deflection*), por efecto de las fuerzas gravitacionales.

La figura 3.9 muestra la modelación de la pala para las condiciones anteriores:

- “flapwise” y b) “edgewise”

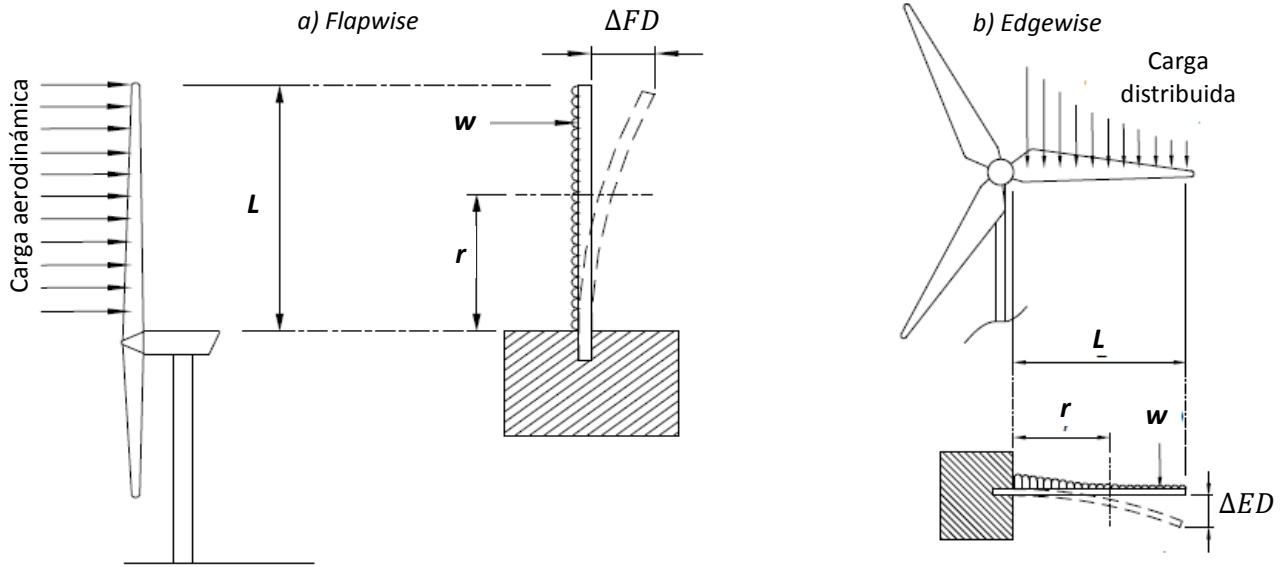


Figura 3.9 – Deflexión de la pala en dos direcciones (Schubel y Crossley, 2012).

Estrictamente, los efectos de las cargas gravitacionales o inerciales tienen una acción despreciable sobre la pala, a excepción de los casos en que la pala sea muy grande y se demuestre que tendrán un peso importante en los resultados.

La fuerza y el momento resultantes son tomados por un sistema estructural en el interior de la coraza de la pala con forma de mástil (*spar*), el cual está formado por refuerzos en el contorno de la pala (*flanges*), para absorber los efectos de flexión, y por almas (*webs*) que toman el cortante (Syed-Shahrukh, 2013).

Para el dimensionamiento de las almas se utiliza la expresión de Timoshenko (1957) para la deflexión por cortante, ajustada a una carga por unidad de longitud:

$$N = \frac{\pi^2 k_s E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t_s}{h_s}\right)^2 t_s \tag{3.5}$$

Donde  $k_s \approx 5$  para paneles largos,  $E$  es el módulo de Young del material,  $\nu$  es la relación de Poisson del material,  $h_s$  es la altura de las almas (propuesta) y  $t_s$  el grosor de las almas.

Para el cálculo de los refuerzos para tensión y compresión, se adopta la fórmula del esfuerzo (Syed-Shahrukh, 2013):

$$\sigma_{cr} = \frac{M}{A_f h_s} \tag{3.6}$$

$$A_f = d_f t_f \tag{3.7}$$

Donde  $M$  es el momento actuante,  $\sigma_{cr}$  es el esfuerzo crítico de compresión o tensión, según sea el caso,  $A_f$  es el área del refuerzo,  $d_f$  es el ancho del refuerzo (propuesto) y  $t_f$  su grosor.

La figura 3.9 señala las variables involucradas en las ecuaciones 3.5 a 3.7, correspondientes a los componentes de una sección aerodinámica de la pala.

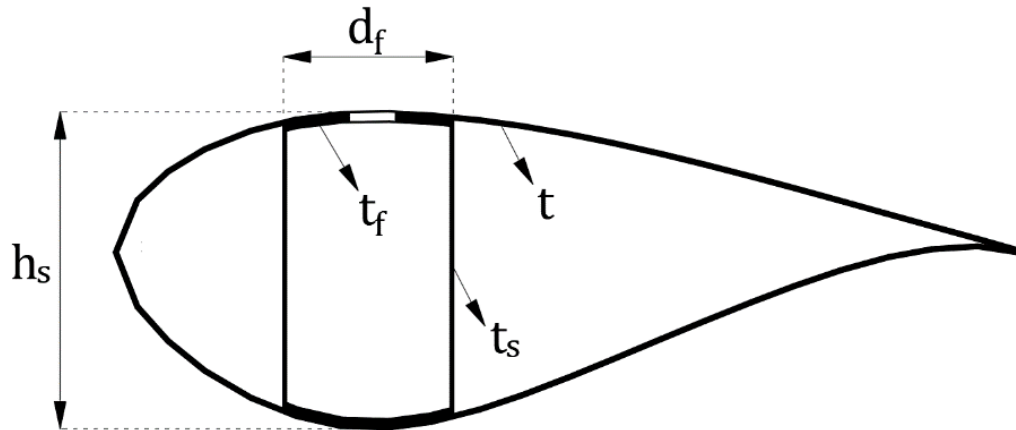


Figura 3.9 – Corte transversal de la pala.

La figura 3.10 muestra un corte transversal del mástil que ejemplifica esquemáticamente la distribución de los refuerzos estructurales en la pala.

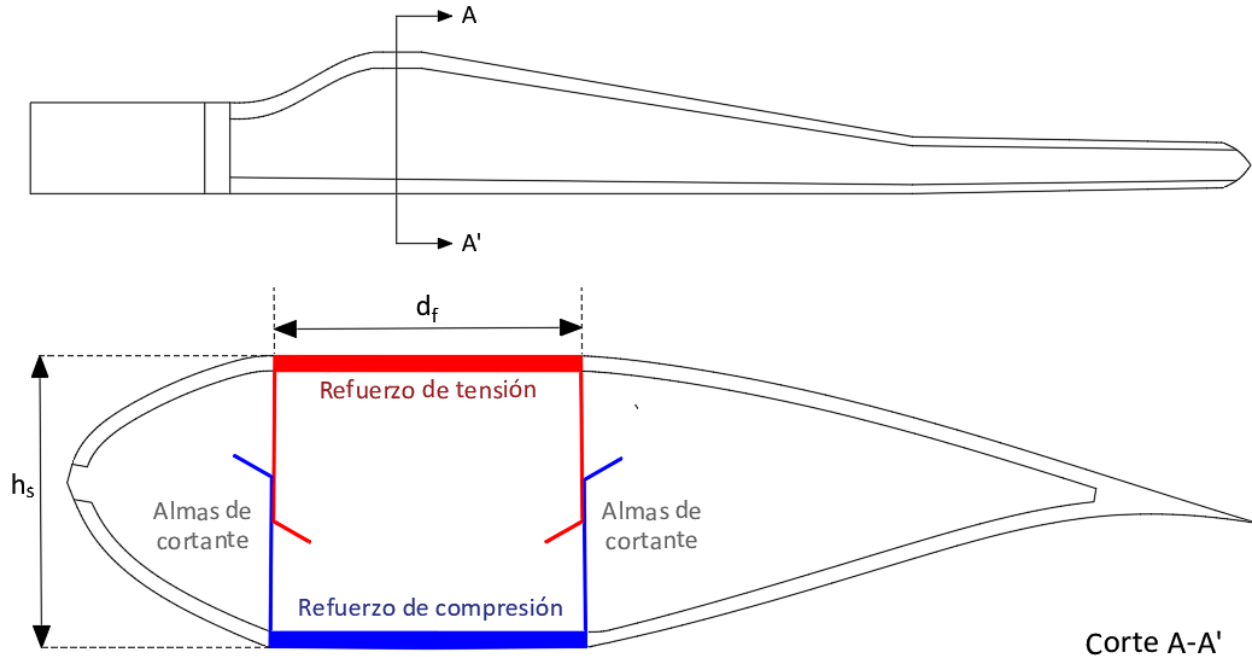


Figura 3.10 – Corte transversal del mástil.

### 3.6 – Materiales utilizados en palas

Actualmente los materiales estructurales más utilizados para la construcción de palas son los conocidos como materiales compuestos, formados por la unión de dos materiales distintos como: el plástico reforzado con fibra de vidrio (*GRP*, por su acotación en inglés), el plástico reforzado con fibra de carbono (*CFRP*, por su acotación en inglés) o epóxidos de madera especiales. Estos materiales son ligeros y poseen una alta resistencia estructural, especialmente ante los efectos de la fatiga.

Las propiedades de resistencia a la fatiga en los materiales de las palas son muy importantes, pues durante su ciclo de vida se someten a grandes esfuerzos cíclicos, incluso mayores que los que se estiman para el diseño de otras estructuras como: aeroplanos, automóviles o puentes (Ancona y McVeigh, 2001).

Además de los materiales compuestos que integran el refuerzo estructural, también se utilizan otros materiales en menor medida, como rellenos de espuma reforzados en el cuerpo de la pala para aligerar el elemento, o el *Gel-coat* que es un compuesto reforzado con fibra muy resistente a la intemperización y funcional como recubrimiento de alta calidad.

La figura 3.11 muestra la configuración de materiales en una pala moderna.

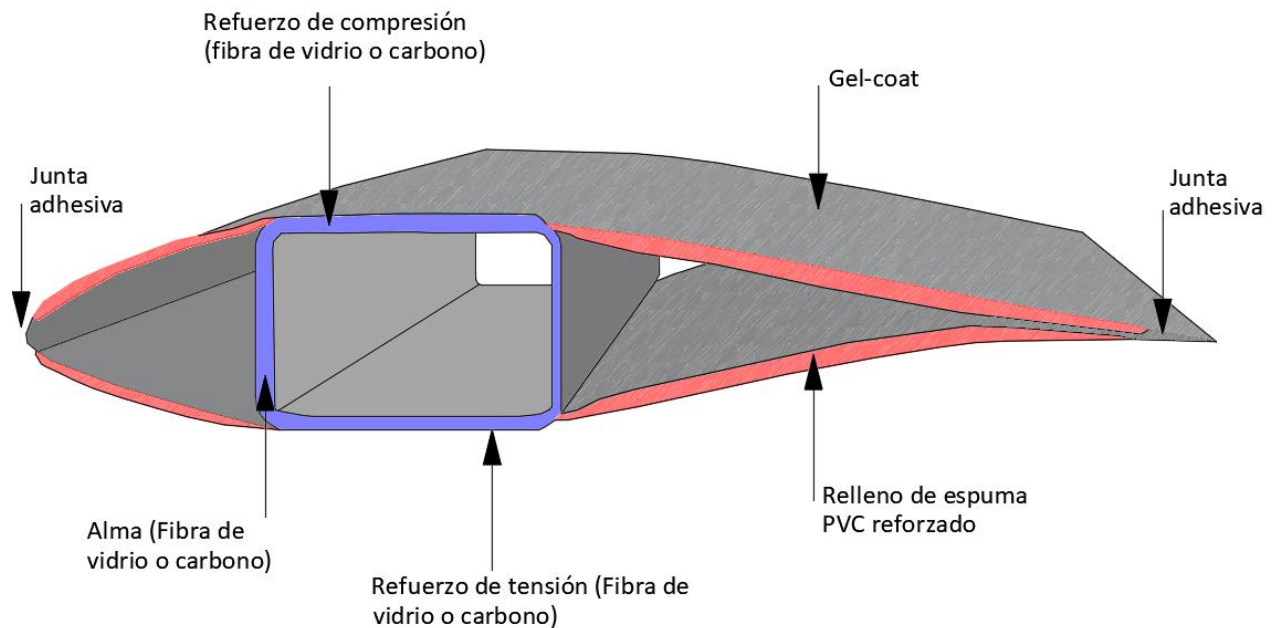


Figura 3.11 – Esquema de la sección de la pala.

### 3.7 – Factores de falla en la pala

La mayoría de fallas en palas ocurren bajo situaciones específicas, como la existencia de un mal diseño, el uso de materiales inadecuados o bajo un de daño estructural severo, como el que se provoca por fatiga.

Las causas principales de la falla de una pala son:

- a) Factores de geometría desfavorable, asociados con el pandeo, deflexiones grandes o aplastamiento.
- b) Factores del material, asociados con la plasticidad, la fragilidad (baja ductilidad) o la rotura total o parcial.
- c) Factores de fabricación, como la presencia de imperfecciones, esfuerzos residuales o errores en la producción.
- d) Factores de temperatura, como las temperaturas muy bajas cuando se opera en climas fríos o las temperaturas altas causadas por el fuego y/o explosiones.
- e) Factores dinámicos, asociados con el impacto de una masa de aire provocado por el cambio de presión proveniente de una explosión o el choque con objetos.
- f) Factores relacionados con la edad de las palas, asociados a grietas de fatiga.

Para comprobar la efectividad del diseño de una pala y estudiar los posibles modos de daño y el rigor real del mismo, se han fabricado distintos modelos de tamaño real que se han sometido a pruebas y ensayos (Branner y Ghadirian, 2014).

El esquema de la figura 3.12, ejemplifica los modos de falla encontrados en palas de aerogeneradores.

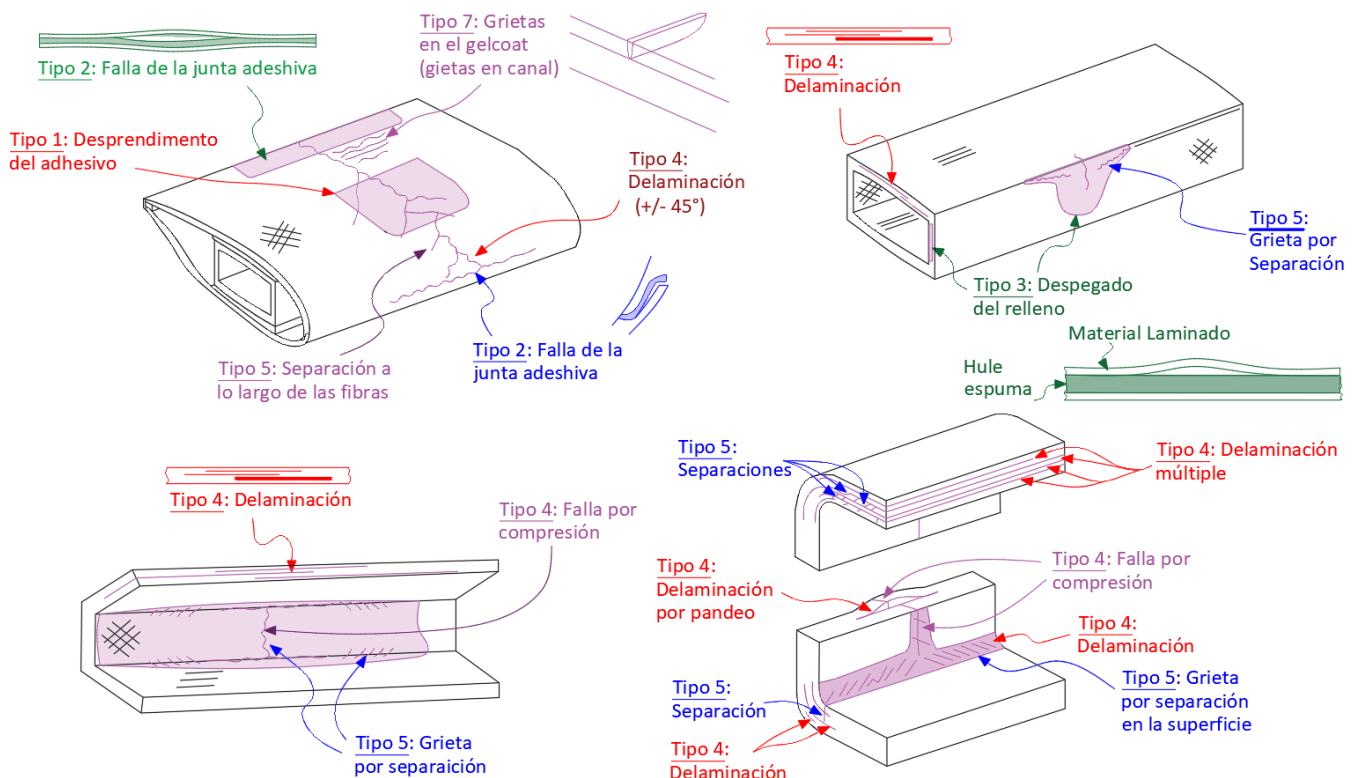


Figura 3.12 – Tipos de falla en la pala (Branner y Ghadirian, 2014).



### III –Estructura de análisis

La tabla 3.2 relaciona las causas o factores de falla con los modos de falla encontrados en las pruebas. Se categoriza el daño de acuerdo con lo propuesto por Skriver (2011). Donde V0 indica que no hay daño, V1 indica que el daño se debe reparar cuando se tenga una oportunidad, V2 indica que el daño debe repararse cuanto antes, y V3 indica que la turbina debe detenerse.

*Tabla 3.2 – Modos de falla en palas, clasificación y causas (Branner y Ghadirian, 2014).*

Modo de falla	Categoría	Causa de la falla
Falla interlaminar	V2-V3	Momento de flexión, efecto Brazier
Delaminación	V1	
Pelado/desgaste	V1	Desgaste
Erosión del sello en la raíz	V2	
Desconchado del recubrimiento	V1	Burbujas de aire incursionadas durante la manufactura / calidad pobre
Colisión con objetos externos	V2-V3	Impacto con objetos partículas producto del desprendimiento y ajenas a la turbina
Grietas finas en el recubrimiento	V1	Baja calidad de los materiales
Grietas transversales en el borde de ataque	V2-V3	Mal diseño
Grietas transversales en la superficie de la pala	V2-V3	Mal diseño
Grietas en el borde de salida (transversales y longitudinales)	V3	
Falla en el alma (refuerzo estructural)		Momento de flexión, efecto Brazier, mal diseño
Falla por fatiga en la conexión de la raíz	V3	Mal diseño
Falla por fatiga en el área de transición de la raíz	V1-V2	
Falla por fatiga en las uniones, grietas longitudinales en el borde de ataque	V1-V2	Distorsión por cortante transversal, deformación de los paneles en el borde de ataque, pandeo en el borde de ataque
Efecto de rayos UV en las fibras	V1	Desgaste y desprendimiento
Daño por relámpago	V3	Impacto de relámpagos
Golpeo de la torre con la pala	V3	Deflexiones grandes en la punta
Agrietamiento del material compuesto (transversal y longitudinal)		
Daño por transporte	V0-V3	
Separación completa de materiales	V3	

### 3.8 – Modelado de la pala por diferentes métodos

Las cargas fluctuantes del viento y las diferencias significativas de tamaño que existen entre los modelos de túnel de viento y los ejemplares reales de palas de aerogeneradores, complican en gran medida la extrapolación de datos y su utilización en estudios posteriores. Para lograr un análisis de desempeño funcional de una pala, se requiere un modelo tridimensional de diseño computacional, analizado por el método de elemento finito (Schubel y Crossley, 2012).

#### 3.8.1 – Modelado con AutoCAD de Autodesk

El diseño asistido por computadora, *Computer Aided Design and Drafting* (CAD), es el proceso de utilización de una computadora para diseñar y dibujar un modelo bajo ciertas especificaciones y estándares.

Uno de los servicios de software más populares de CAD es el de AutoCAD (AutoDesk, 2016), que ofrece buenas herramientas para diseño 3D ingenieril (Hooper, 2017). Cuando se trata del diseño de palas, la interfaz gráfica de este programa es relativamente fácil de utilizar, permite realizar un dibujo bidimensional por secciones planas, para posteriormente integrarlas en un elemento tridimensional. El proceso de modelado es el siguiente:

- a) Importar la geometría de las secciones de la pala: las coordenadas para un perfil con cuerda unitaria,  $C = 1$ , se pueden colocar en una hoja de cálculo, separadas por comas (ej; 0.991,0), y copiarse al portapapeles. Activando el comando “*spiline*” en la interfaz de dibujo (línea de comando: *sp/*) y asignando (pegando) las coordenadas copiadas a la curva, se dibujará la superficie del perfil.
- b) Posteriormente, se pueden dibujar los ejes del perfil para tener un sistema de referencia y asignar el desplazamiento en dirección  $Y$ , la flecha de la pala, y el ángulo de torsión preestablecido,  $\beta$ . Este procedimiento se debe repetir para todos los perfiles.
- c) Para darle profundidad al modelo se debe asignar una coordenada en la dirección  $Z$ , sobre el eje de la pala, a todos los perfiles dibujados.
- d) Transfiriendo el diseño de la interfaz 2D a la interfaz 3D, se debe utilizar el comando “*Loft*” para conectar las curvas de los perfiles y originar la superficie de la pala.
- e) El modelo generado se podrá exportar al formato “.igs”, para utilizar las superficies modeladas en programas de análisis estructural por elemento finito (FEA por su nombre en inglés) o de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por su nombre en inglés).

Una de las desventajas que representa utilizar AutoCAD (AutoDesk, 2016) para el modelado de palas, es el nivel de detalle relativamente bajo que se puede proporcionar al modelo, por ejemplo, es complicado variar parámetros como el grueso de la pala.

Asimismo, el tiempo computacional que se requiere para la generación del modelo es muy grande y se debe disponer de recursos tecnológicos bastos como memoria gráfica alta y un procesador rápido, pues el software tiene un aprovechamiento bajo de los mismos cuando se realizan operaciones booleanas.

Las figuras 3.13 a la 3.15 muestran un ejemplo del modelado de palas en AutoCAD (AutoDesk, 2016).



Figura 3.13 - Vista isométrica del modelo de la pala generado en AutoCAD.

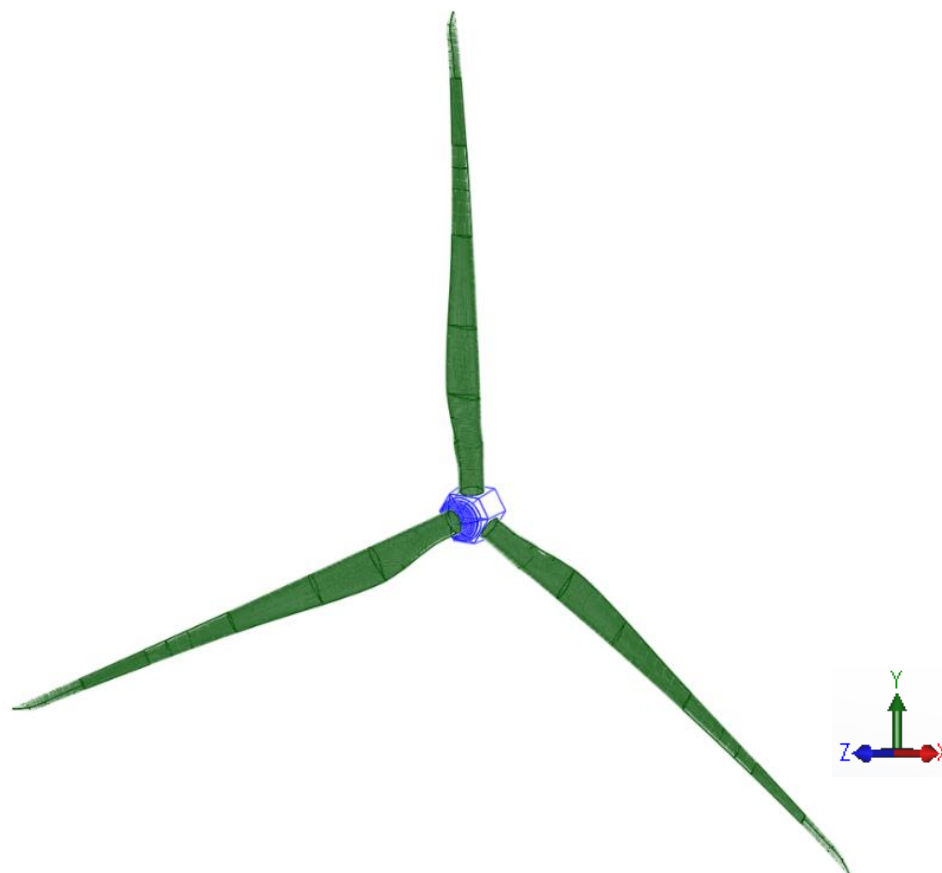


Figura 3.14 – Vista isométrica del modelo del rotor generado en AutoCAD.

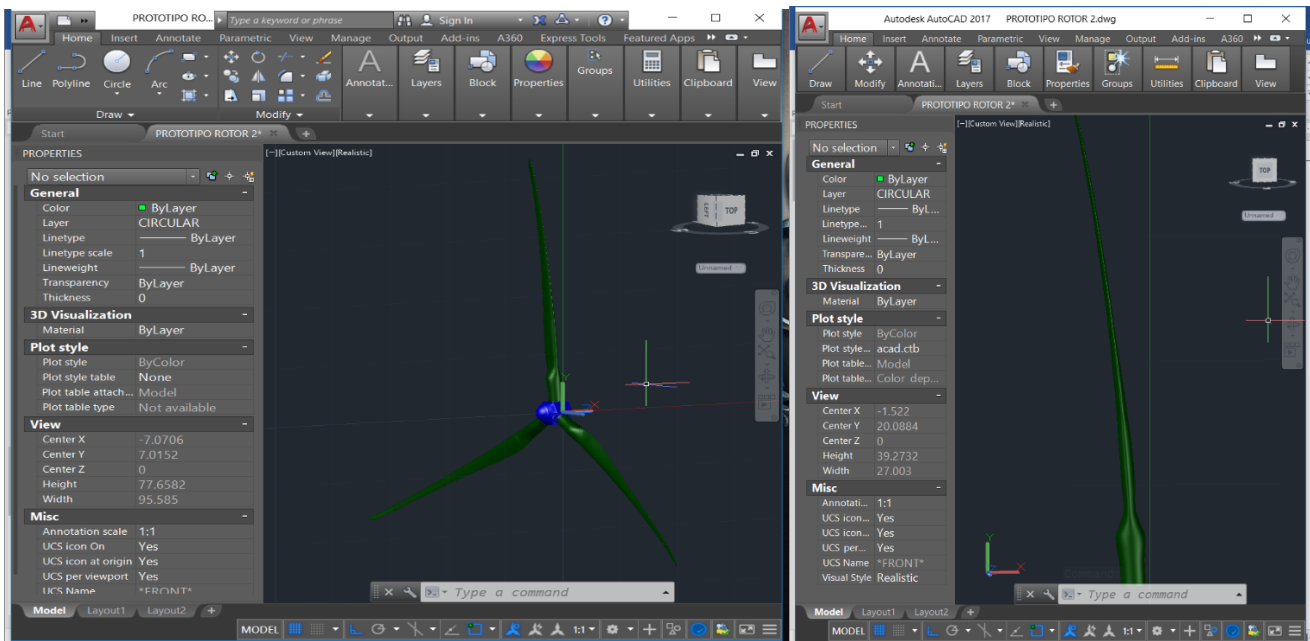


Figura 3.15 – Proceso de modelado del rotor y la pala en AutoCAD.

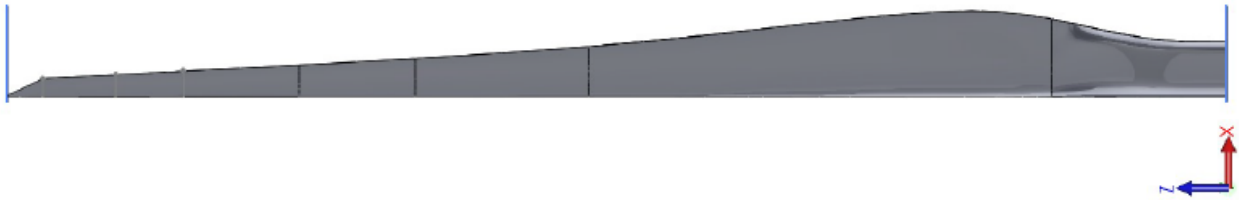
#### 3.8.2 – Modelado con Solid Works Professional

SolidWorks *Professional* (Dassault Systèmes, 2015) es otra aplicación muy popular para el modelado CAD en 3D, que presta herramientas potentes de diseño y aprovecha al máximo los recursos computacionales disponibles (Hooper, 2017).

Su interfaz gráfica sumamente sencilla, funcional a través de un sistema de planos, permite proporcionar al modelo de la pala un nivel de detalle grande de forma fácil y el tiempo computacional que requiere para la generación del modelo en general, es muy bajo. El proceso de modelado es el siguiente:

- a) Se deben definir tantos planos (geometrías de referencia) como secciones de la pala se desean dibujar.
- b) Las coordenadas  $X$ ,  $Y$  de los perfiles se deben colocar de forma individual en archivos de texto “.txt” o en archivos de coordenadas de SolidWorks “.slcrv” y exportarse a la interfaz por medio del menú de exportación de curvas.
- c) Para poder realizar un modelado más eficiente se debe asignar cada curva exportada a uno de los planos definidos previamente. Es posible asignar una coordenada  $Z$  y un nombre a cada uno.
- d) Una vez que se han exportado todas las curvas a la interfaz y se han asociado a un plano, se pueden asignar las características de la flecha (desplazamiento en el eje  $Y$ ) y torsión (rotación alrededor de su eje).
- e) Para crear la superficie de la pala se utiliza el comando “loft”, seleccionando las curvas que se desean conectar en orden.
- f) El modelo se podrá exportar a los formatos “.igs” e “.iges”, para su posterior utilización en software de Análisis de Elemento Finito (FEA, por su nombre en inglés) o CFD.

Las figuras 3.16 a la 3.18 muestran un ejemplo del modelado de palas en SolidWorks.



*Figura 3. 16 – Vista en planta (ZX) del modelo generado en Solid Works.*



*Figura 3. 17 – Vista en planta (ZY) del modelo generado en Solid Works.*

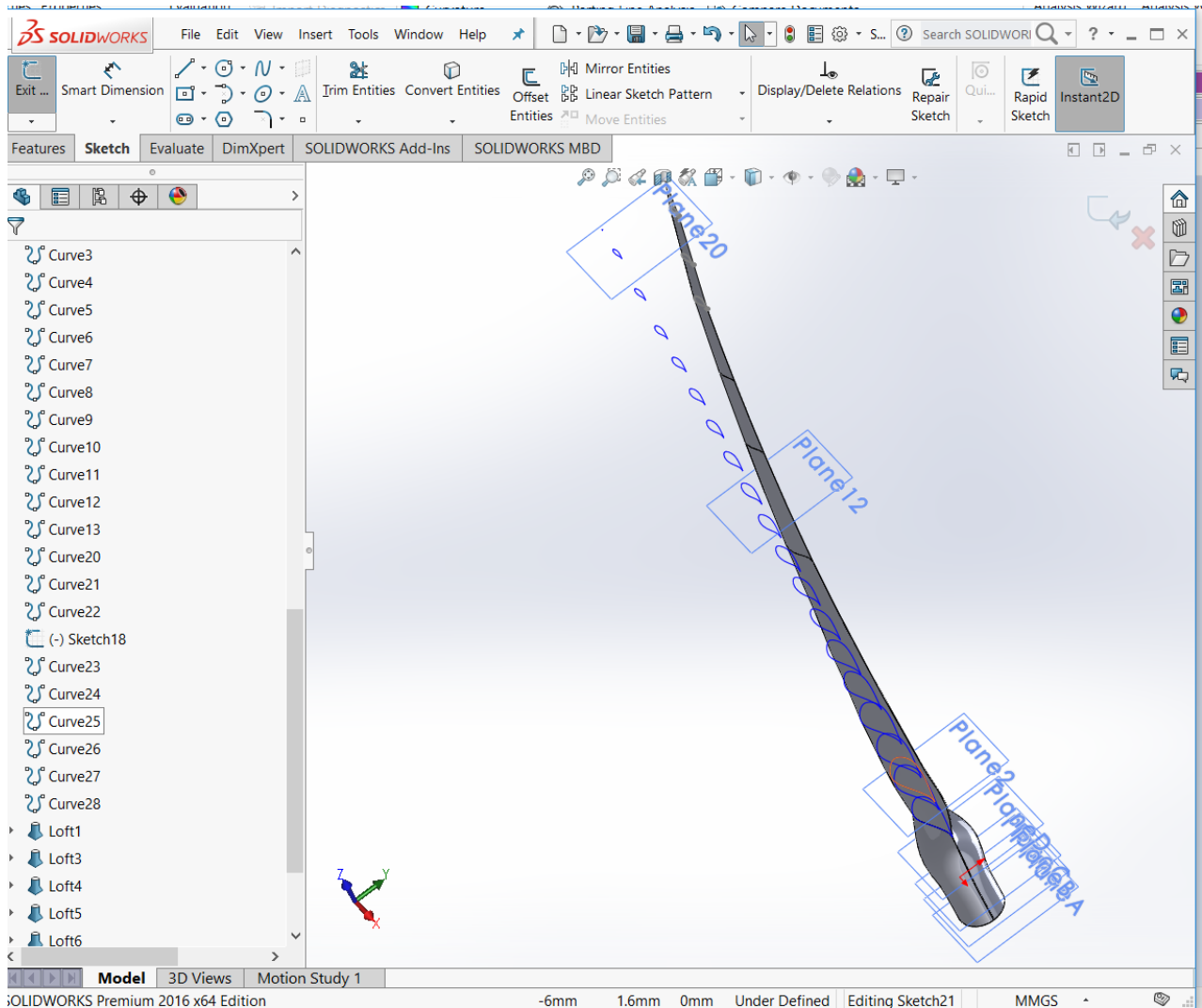


Figura 3. 18 – Proceso de modelado de la pala en Solid Works.

Opciones de modelado computacional similares a AutoCAD y SolidWorks *Professional*, que proporcionan una buena alternativa para el modelado de palas son PATRAN (MacNeal-Schwendler Corporation, 2014) o Rhinoceros 3D (Robert McNeel & Associates, 2017).

### 3.9 – Modelado de la pala en ANSYS APDL

Además del modelado por CAD es posible hacer un modelado manual, a través del lenguaje propio programación del software de análisis de elemento finito ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013).

A pesar de que este método es más complicado, permite cargar al modelo de un nivel de detalle muy adecuado, al mismo tiempo que garantiza su compatibilidad y buena respuesta con los comandos y métodos de análisis del programa.

El orden de programación debe ser el siguiente:

- i. Indicar título e inicio del pre-procesamiento.

- ii. Definir los elementos.
- iii. Asignar los espesores.
- iv. Definir los nodos.
- v. Asignar los nodos a los elementos.
- vi. Indicar el mallado.
- vii. Finalizar la programación

El modelado se realiza por medio de comandos de programación de la manera siguiente:

- a) Se deben generar todas las coordenadas,  $X$ ,  $Y$  y  $Z$ , de todos los perfiles correspondientes a las secciones de la pala. Dichas coordenadas ya deben considerar la rotación y flecha. Cada punto representa un nodo en el modelo,  $N$ , al cual se le asigna un número específico. En la programación del nodo, el primer dígito representa el número de nodo, y los siguientes tres, las coordenadas del nodo. El nodo número 1, en la posición (0,0,1) será:  $N,1,0,0,1$
- b) Los nodos se conectarán por medio de elementos,  $E$ , placa triangular. Para definir el elemento en el programa, se utiliza el comando  $ET$ , seguido del número de elemento y el tipo de elemento placa. En el modelado de palas se sugiere utilizar elementos  $SHELL63$ , que tienen propiedades tipo membrana, con seis grados de libertad y permiten la deflexión y la aplicación de cargas adyacentes y normales. El elemento número 1 será:  $ET,1,SHELL63$ .
- c) Para asignar los nodos a los que conecta el elemento se utiliza el comando  $E$ . El elemento triangular 1, que conecta a los nodos 1, 2 y 3, será:  $E,1,2,3,3$ .
- d) Para asignar el espesor de las placas se utilizará el comando  $R$ . El espesor se debe introducir en un sistema unitario: si el espesor son 10 mm, en el modelo se indicará como 0.01 m, con tal de respetar la congruencia de unidades, por ejemplo:  $R,1,0.01$
- e) Se recomienda utilizar el comando  $SMRTSIZE$  al final de la programación de la geometría, pues favorece la generación de un mallado computacional inteligente, que se ajusta a la geometría de los elementos placa, lo cual minimiza el intervalo de error en los análisis, sobre todo cuando se tienen elementos muy esbeltos o con geometrías muy irregulares.
- f) Al inicio de la programación se debe indicar el título del archivo, con el comando  $/TITLE$ , y el inicio de la fase de pre-procesamiento con el comando  $/PREP7$ . Al finalizar la programación de la estructura se debe indicar el comando  $FINISH$ .
- g) La programación se debe de hacer en un archivo de texto “.txt”, y exportarse a la interfaz de ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013) utilizando los botones de comando de la interfaz.

La descripción completa de los comandos y la base teórica de la programación puede encontrarse en bases de datos en línea, como la de la Shared Hierarchical Academic Research Computing Network (SHARCNET,2019).

## IV – Fatiga

La fatiga, en mecánica de materiales, es el proceso por el cual el daño acumulado, producto de la aplicación periódica de cargas en el elemento, puede ocasionar la fractura de un material. Este proceso no presenta efectos inmediatos a la aplicación de las cargas, por lo que suele ser ignorado en los análisis de esfuerzos tradicionales, pudiendo dar lugar a diseños inseguros.

Para el estudio de la fatiga se acuñe el concepto de “ciclo de carga”, que es la aplicación repetitiva de un esfuerzo variable con respecto al tiempo. Los parámetros utilizados para caracterizarlo son: el esfuerzo máximo aplicado,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , el esfuerzo mínimo aplicado,  $\sigma_{m\acute{i}n}$ , el intervalo de esfuerzos,  $\Delta\sigma$ , el esfuerzo medio,  $\sigma_m$ , la amplitud de esfuerzos,  $\sigma_a$ , y el cociente de esfuerzos,  $R$ , representados en las ecuaciones 4.1 a 4.4 (Roylance, 2001).

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (4.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (4.4)$$

De manera gráfica, el punto máximo de la curva y el esfuerzo más grande durante un ciclo de carga es  $\sigma_{m\acute{a}x}$  (ver fig. 4.1). El punto mínimo de la curva y el esfuerzo mínimo inducido durante el ciclo es  $\sigma_{m\acute{i}n}$ . La diferencia entre estos dos es el intervalo de esfuerzos que se aplica al ciclo. La mitad del intervalo es la amplitud de esfuerzos, que también es la altura de un valle o una cresta sinusoidal. El promedio de los esfuerzos aplicados es  $\sigma_m$ . El parámetro  $R$  no tiene representación gráfica. La figura 4.1 representa una carga de tipo senoidal, en la cual se pueden observar los conceptos antes mencionados.

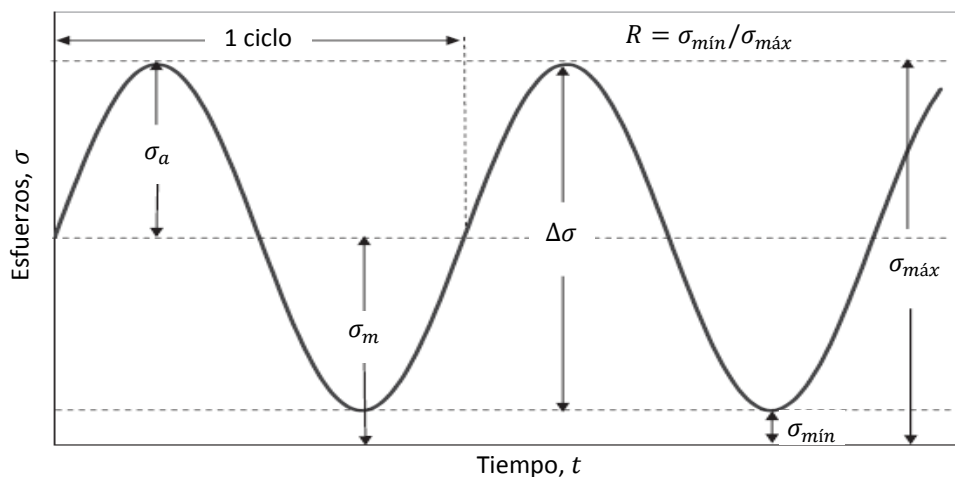


Figura 4. 1 – Ciclo de carga sinusoidal de fatiga (Quiao y Yang, 2006).



El tiempo de vida por fatiga se obtiene con la metodología propuesta por Do *et al.* (2014), la cual consiste en simular las velocidades que se presentan para todo el tiempo de vida de la estructura, para posteriormente aplicar el esfuerzo equivalente que corresponde a esa velocidad y calcular el daño generado en ese instante con algún modelo de fatiga.

### 4.1 – Curva S-N

La curva S-N es una metodología empírica desarrollada para entender y cuantificar el daño que presenta un material bajo el efecto de fatiga. Son curvas obtenidas de manera experimental que representan de manera gráfica el esfuerzo máximo permisible,  $\sigma$ , para una determinada cantidad de ciclos de carga,  $N$ . Por lo regular este número de ciclos es muy grande, y el eje de las abscisas se grafica en escala logarítmica.

En la mayoría de los materiales la curva S-N alcanza un límite asintótico, de modo que por debajo de cierto esfuerzo límite de resistencia,  $\sigma_e$ , la falla nunca llega a ocurrir sin importar el número de ciclos de carga a los que se someta el material.

La figura 4.2 es una curva S-N esquemática para un material con un límite de resistencia,  $\sigma_e$ .

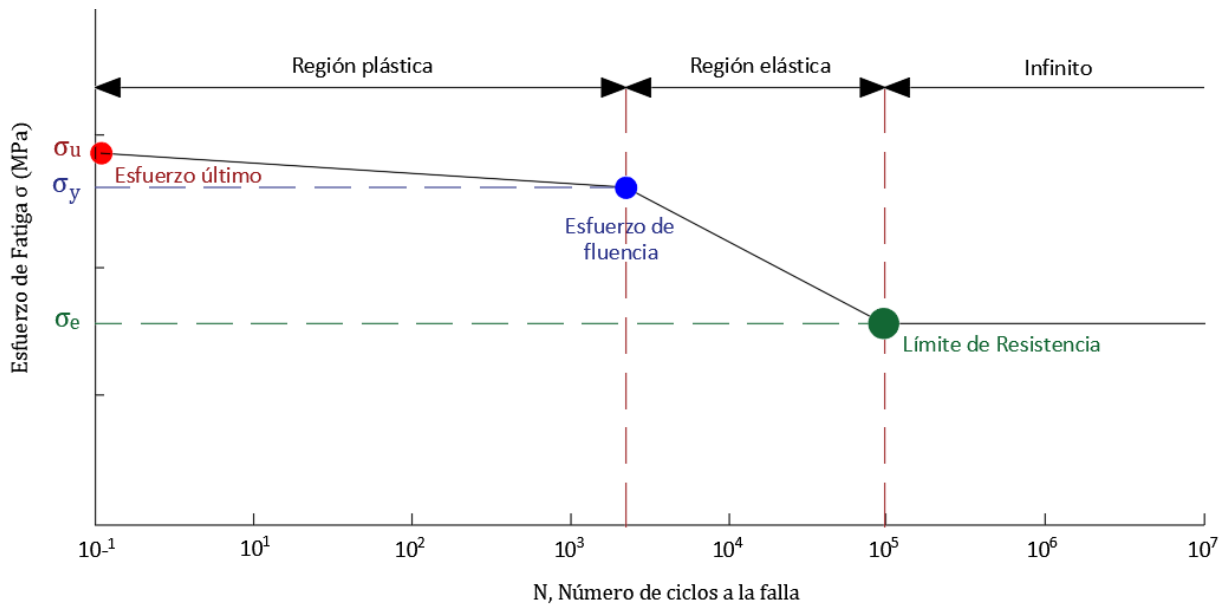


Figura 4. 2 – Esquema de curva S-N con escala lineal en los ejes y límite de resistencia,  $\sigma_e$ .

### 4.2 – Método de “Rainflow”

El método de Rainflow de Matsuishi y Endo (1968) es un procedimiento aceptable para el conteo de los ciclos reales de fatiga que existen en una historia de esfuerzos. La *American Society For Testing and Materials* (ASTM, 1997) proporciona un algoritmo sencillo para su aplicación.

Los datos de entrada son las historias de esfuerzos durante la vida útil de la estructura, ajustadas a una media cero (historia de extremos) y el dato de salida es el histograma de esfuerzos, que representa la probabilidad de ocurrencia de un intervalo de esfuerzos.

La aplicación del histograma de esfuerzos es equivalente a un intervalo de esfuerzos efectivo,  $Reff$ , aplicado el número total de ciclos de fatiga contabilizado,  $n$ . El intervalo de esfuerzos efectivo se calcula aplicando la regla de Miner (1945), donde  $n$  depende de las características del material (para fibra de vidrio le corresponde un valor de 10):

$$Reff = \left( \sum f_i S_i^{10} \right)^{1/10} \quad (4.5)$$

Donde,  $f_i$  es la probabilidad de ocurrencia y,  $S_i$  es el intervalo de esfuerzos del histograma de esfuerzos.

### 4.3 – Modelos de diseño por fatiga

Existen metodologías distintas para el diseño estructural por fatiga que, según la filosofía de diseño adoptada, ofrecen un cálculo aceptable para el enfoque previsto. Los modelos de crecimiento de grieta y daño acumulado son aplicables al análisis de aerogeneradores.

#### 4.3.2 – Modelo de crecimiento de grieta

Los materiales compuestos son susceptibles a la falla por deslaminación, es decir, la separación de las pilas de fibra que lo conforman, debido a la baja resistencia de la resina que las mantiene adheridas y por la aparición de los efectos de fatiga (Rafiullah, 2013). El modelo de crecimiento de grieta permite estudiar este fenómeno desde el punto de vista de la mecánica de fractura.

La figura 4.3 es una curva esquemática del crecimiento de grieta por deslaminación. Como se puede observar, la región 2 se caracteriza por obedecer a la ley de Paris, dada por la ecuación 4.6.

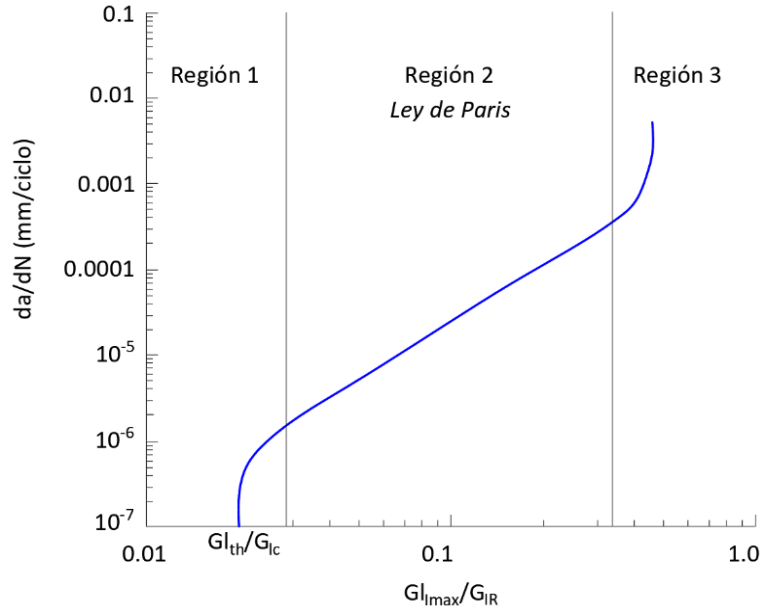


Figura 4. 3 – Curva esquemática de la propagación de grieta (Hadavinia et al., 2015).

$$\frac{da}{dN} = Cf(G)^m \tag{4.6}$$

En donde  $(da/dN)$  es la tasa de crecimiento de grieta,  $C$  y  $m$  son constantes únicas del material.  $f(G)$  es la función de la energía de Griffith, la energía que se libera por la rotura de los enlaces de la estructura atómica del material tras la aparición de la grieta, que dependerá del material, el modo de fractura en estudio y de las consideraciones tomadas para la determinación de  $C$  y  $m$ .

La expresión propuesta por Hadavinia et al. (2015), para  $f(G)$ , está diseñada considerando el modo uno de fractura, por tensión, para plástico reforzado con fibra de vidrio tipo E:

$$f = \frac{G_{I_{máx}}}{G_{IR}} \tag{4.7}$$

En donde  $G_{I_{máx}}$  es la energía máxima de deformación (Ec 4.8) y  $G_{IR}$  es la energía de resistencia del material (Ec 4.9).

$$G_{I_{máx}} = G_{IC}(\log n_{eq} + 1)^{-0.93} \tag{4.8}$$

$$G_{IR} = G_{IC} + 20.2(a - a_0)^{0.64} \tag{4.9}$$

$G_{IC}$  es la rigidez de fractura del material,  $a_0$  es la longitud de grieta inicial, que es un parámetro que se determina de forma experimental,  $a$  es la longitud instantánea que adquiere la grieta y  $n_{eq}$  son los ciclos de fatiga equivalentes para el intervalo de esfuerzos que se presenta en el paso de carga analizado, calculados con la ecuación 4.10:

$$n_{eq} = \frac{Reff}{Reff_{máx}} n \tag{4.10}$$

Donde  $Reff_{m\acute{a}x}$  es el esfuerzo efectivo máximo de diseño;  $Reff$  y  $n$  son el esfuerzo efectivo y los ciclos calculados por el método de Rainflow para la velocidad a la que se somete la estructura.

Despejando el crecimiento diferencial de la grieta,  $da$ , de la Ley de Paris ajustada. y suponiendo al diferencial de los ciclos,  $dN$ , como el número ciclos de fatiga equivalentes,  $n_{eq}$  se obtiene la siguiente expresi3n:

$$da = C \left( \frac{G_{I_{m\acute{a}x}}}{G_{IR}} \right)^m n_{eq} \quad (4.11)$$

Si el paso o etapa de carga inicial se le asigna el subíndice  $j$ , la longitud de la grieta será:

$$a_j = a_0 + da_j \quad (4.12)$$

Al ser un efecto acumulativo, la longitud de la grieta para la siguiente etapa será:

$$a_{j+1} = a_j + da_{j+1} \quad (4.13)$$

La evaluaci3n del crecimiento de grieta debe continuarse hasta el  $n$ -ésimo paso de carga, en el cual la grieta iguale la totalidad del espesor del material, es decir:

$$a_n = t_h \quad (4.14)$$

Donde  $t_h$  es el grosor de la placa de análisis.

#### 4.3.2 – Modelo de daño acumulado

El modelo de fatiga por daño acumulado, propuesto por Aeran *et al.* (2017), es de origen relativamente nuevo y muy sencillo; utiliza solamente la informaci3n de la curva S-N, sin la necesidad de determinar otros parámetros experimentales del material.

La metodología indica que, suponiendo que el material es expuesto a una cierta amplitud de esfuerzos,  $\sigma_i$ , para un número de ciclos,  $n_i$ , en una etapa de carga,  $i$ ; el índice de daño,  $D_i$ , puede determinarse con la expresi3n 4.15.

$$D_i = 1 - \left[ 1 - \frac{n_i}{N_i} \right]^{\delta_i} \quad (4.15)$$

En d3nde  $n_i$  es el número de ciclos calculado con el método de Rainflow para la amplitud de esfuerzos de la etapa de carga;  $N_i$  es el número de ciclos a la falla obtenido de la curva S-N, y  $\delta_i$  es un parámetro especial del modelo, dado por la expresi3n 4.16.

$$\delta_i = - \frac{1.25}{\ln N_i} \quad (4.16)$$

Para transferir el daño calculado en una primera etapa de carga,  $i$ , a la siguiente,  $i + 1$ , se utiliza un factor de interacci3n entre etapas,  $\mu_i$ , con el cual se obtiene un número efectivo de ciclos,  $n_{(i+1),ef}$ , (ecuaciones 4.17 y 4.18, respectivamente) correspondiente al que se tendría bajo la amplitud de

esfuerzos de la segunda etapa de carga,  $\sigma_{i+1}$ , pero considerando que el daño de la primera etapa,  $D_i$ , se encontraba presente desde el inicio.

$$\mu_{i+1} = \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} \right)^2 \quad (4.17)$$

$$n_{(i+1),ef} = \left[ 1 - (1 - D_i)^{\mu_{i+1}} \right] N_{i+1} \quad (4.18)$$

Entonces, se puede expresar al número total de ciclos para el paso de carga  $i + 1$  de la siguiente forma:

$$n_{(i+1),total} = n_{(i+1),ef} + n_{i+1} \quad (4.19)$$

Subsecuentemente, el daño acumulado para el paso de carga  $i + 1$  es:

$$D_{i+1} = 1 - \left[ 1 - \frac{n_{(i+1),total}}{N_{i+1}} \right]^{\delta_i} \quad (4.20)$$

Y el daño correspondiente por fatiga es:

$$D = |D_{i+1}| \quad (4.21)$$

La transferencia de daño debe continuarse hasta que  $D$  alcance el valor de uno,  $D = 1$ , lo que denotará la falla total por fatiga.

## V – Curva de fragilidad

Una forma de estimar el nivel de confiabilidad de la estructura es a través del concepto de fragilidad. Se puede definir a la fragilidad como la probabilidad condicional de excedencia de cierta demanda estructural dada una intensidad (Jalayer y Cornell, 2003). La fragilidad se expresa como:

$$P[EL] = \sum P[D \geq d_{EL}|u] \quad (5.1)$$

Donde  $D$  es una variable aleatoria que representa la demanda impuesta al sistema, en este caso, el espesor de grieta;  $P[D \geq d_{EL}|u]$  es la probabilidad condicional de que se exceda la demanda relacionada al estado límite,  $EL$ , dada una intensidad,  $u$ , es decir la fragilidad.

Se supone que la distribución de la demanda,  $D$ , es lognormal con mediana  $\lambda$  y desviación estándar logarítmica  $\xi$ , la fragilidad se puede expresar en términos de la función de distribución Gaussiana estándar:

$$Fr(u) = \Phi \left[ \frac{\ln(u) - \lambda}{\xi} \right] \quad (5.2)$$

Donde  $\Phi$  es la función de distribución acumulativa de una distribución normal, la mediana y la desviación son calculadas como:

$$\lambda_R = e^{\frac{\sum \ln(D)}{n_D}} \quad (5.3)$$

$$\xi_R = \left[ \frac{\sum (\ln(D) - \ln(\lambda_D))^2}{n_D - 1} \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

$n_D$  representa el número de datos que se tienen para un mismo periodo de tiempo o número de ciclos de 10 minutos, que dependerá de la cantidad de simulaciones probabilísticas que se hagan para el análisis.

## VI – Caso de estudio

En este trabajo se estudia el comportamiento estructural bajo efectos de fatiga de la pala genérica de un aerogenerador tipo *HAWT*, localizado en la zona de La Ventosa, Oaxaca.

### 6.1 – Características de la pala

Existen relativamente pocos datos públicos acerca de la geometría real de modelos comerciales de palas, por ello se ha decidido utilizar el diseño del aerogenerador propuesto por Berny (2015) y Berny y Ruiz (2016), basado en la especificación de la patente europea EP 2 593 670 B1 (Madsen *et al.*, 2013), que guarda una buena similitud con los aerogeneradores representativos de los parques eólicos en México.

En la tabla 6.1 se muestran las características generales del rotor. La tabla 6.2 contiene las propiedades de la pala; en donde  $r$  es el radio de la sección,  $C$  es la cuerda del perfil,  $\beta$  es el ángulo de torcedura del perfil y  $\Delta y$  es la flecha proporcionada a la pala.

Tabla 6.1 – Características del rotor (Berny, 2015).

Característica	Valor	Unidad
Capacidad de generación	1.7 - 2	MW
Número de palas	3	m
Diámetro del rotor	84.26	m
Longitud de cada pala	42.13	m
Altura del rotor	80	m
Velocidad del rotor	9	rpm
Peso del rotor	15200	kg
Peso de cada pala	5900	Kg

Tabla 6.2 – Información de la geometría de la pala (Madsen *et al.*, 2013; Berny, 2015).

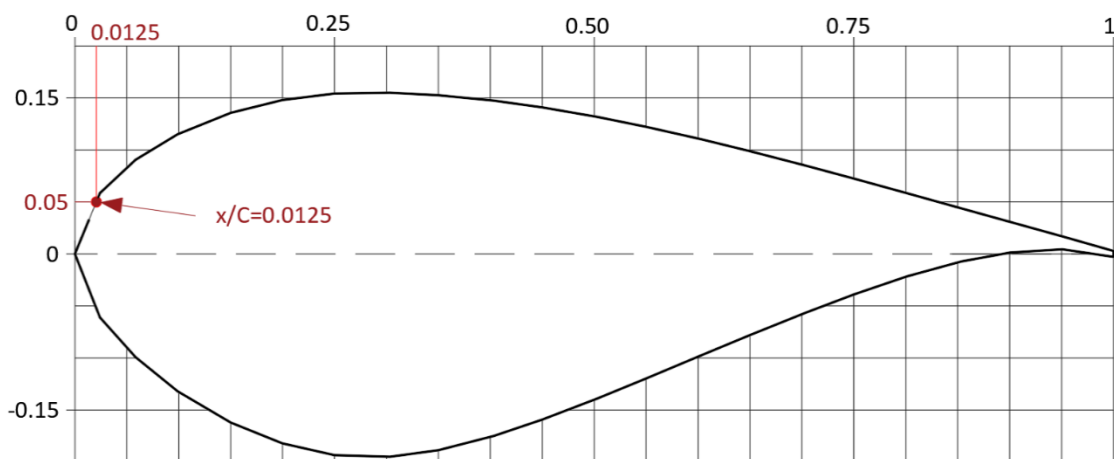
Número de Perfil	$r$ (m)	$C$ (m)	$\beta$ (°)	$\Delta y$ (m)	Tipo de Perfil
0	0	1.893	0	0	CIRCULAR
1	1	1.893	0	0	
2	2	1.925	0	0	
3	4	2.238	0	0	
4	6	2.678	0	0	DU 99 W 350 LM
5	8	2.958	10.8	0.001	
6	8.5	2.975	10.8	0.00475	
7	10	2.927	8.23	0.016	
8	12	2.773	7.72	0.052	DU 97 W 300 LM
9	14	2.569	7.21	0.105	
10	16	2.337	6.69	0.178	DU 91 W2-250 LM
11	18	2.107	6.18	0.268	
12	20	1.906	5.67	0.376	

13	22	1.731	5.16	0.502	
<i>Tabla 6. 2 (continuación)– Información de la geometría de la pala (Madsen et al., 2013; Berny, 2015).</i>					
Número de Perfil	$r$ (m)	$C$ (m)	$\beta$ (°)	$\Delta y$ (m)	Tipo de Perfil
14	24	1.578	4.64	0.645	DU 91 W2-250 LM
15	26	1.443	4.13	0.806	S814
16	28	1.32	3.62	0.985	
17	30	1.206	3.11	1.18	
18	32	1.097	2.59	1.393	
19	34	0.991	2.08	1.622	
20	36	0.893	1.57	1.873	
21	38.35	0.793	0.96	2.223	DU 93 W210 LM
22	40.86	0.634	0.32	2.701	
23	42.13	0.04	0	3	NACA64618

En la tabla 6.3 se indican las coordenadas del punto del perfil en donde se localiza el coeficiente de arrastre máximo,  $C_{d,máx}$ , correspondiente a la Ec. 2.67. En la figura 6.1 se ejemplifica la ubicación de este punto para un perfil DU99 W 350 LM de cuerda unitaria.

*Tabla 6.3 – Valores de  $y/C$  para  $x/C=0.125$  de los perfiles (Berny, 2015).*

Perfil	$x/C$	$y/C$
Circular	0.0125	0.287
DU 99 W 350 LM	0.0125	0.05
DU 97 W 300 LM	0.0125	0.03
DU 91 W2-250 LM	0.0125	0.026
S814	0.0125	0.022
DU 93 W210 LM	0.0125	0.02
NACA64618	0.0125	0.02



*Figura 6.1 – Coordenada  $x/C=0.0125$  de un perfil DU99 W 350 LM.*

Los coeficientes de arrastre y levantamiento se determinaron utilizando *QBlade* (Technical University of Berlin [TUB], 2014), que es una aplicación que extrapola los datos de XFOIL para 360°. En el caso del



perfil circular se consideran los coeficientes:  $C_d = 0.5$  y  $C_l = 0$ . La figura 6.2 muestra de manera gráfica los coeficientes de levantamiento para todos los perfiles alares de la pala.

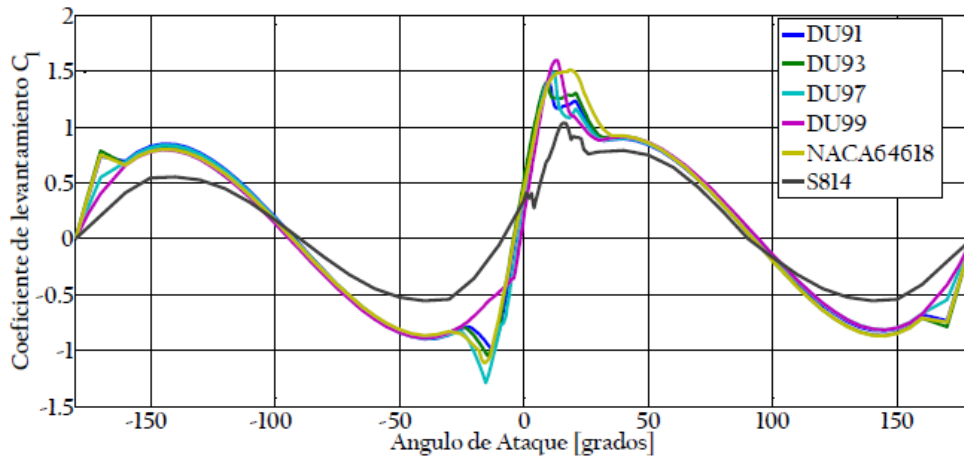


Figura 6. 2 – Coeficientes de levantamiento,  $C_l$ , obtenidos con QBlade para los perfiles de la pala (Berny, 2015).

Con la finalidad de representar adecuadamente el ángulo de torsión en el modelo computacional, es necesario obtener las coordenadas del centro de cortante de cada perfil, el cual fue calculado con el software ShapeBuilder (IES Inc., 2017), tal como se muestra en la figura 6.3. La tabla 6.4 contiene la coordenada  $x/C$  del centro de cortante para cada perfil.

Tabla 6.4 – Valor de  $x/C$  para el dentro de cortante de los perfiles.

Perfil	$x/C$
Circular	0.000
DU 99 W 350 LM	0.335
DU 97 W 300 LM	0.337
DU 91 W2-250 LM	0.350
S814	0.325
DU 93 W210 LM	0.361
NACA64618	0.380

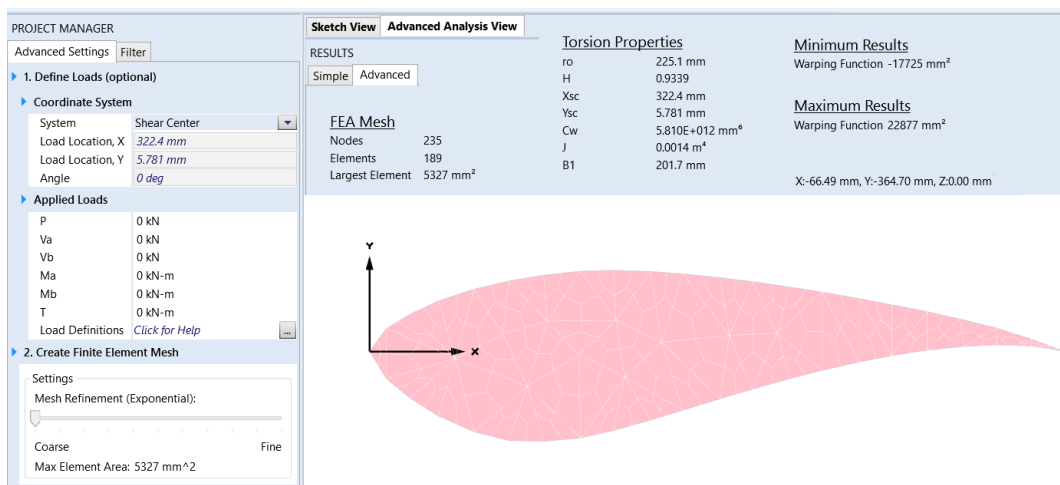


Figura 6.3 - Obtención del centro de cortante para un perfil S18 de cuerda unitaria.

Las características geométricas del refuerzo estructural se obtuvieron con lo dispuesto en la sección 3.5 de esta tesis. El cálculo de los espesores del alma se hizo para la simulación de fuerzas BEM más desfavorable y únicamente para el radio  $r=8.5$  m, donde se encuentra la cuerda máxima del perfil y la zona de transición de la pala.

La longitud de los refuerzos del alma se ajustó proporcionalmente a las características de la pala de acuerdo con lo obtenido para la sección de  $r=8.5$  m. El espesor de la sección no estructural se calculó con base en el peso total de la pala (tabla 6.1) y la densidad del material (tabla 6.6).

La tabla 6.5 contiene las dimensiones propuestas de la sección estructural, en donde  $h_s$  es la altura de las almas,  $d_f$  es el ancho del refuerzo por cortante,  $t_s$  es el grosor de las almas,  $t_f$  es el grosor del refuerzo por cortante y  $t$  es el grosor de la sección en su parte no estructural.

Tabla 6.5 – Dimensiones de la sección transversal para el radio con la cuerda mayor,  $r = 8.5$  m.

Dimensión	Valor	Unidad
$h_s$	0.9	m
$d_f$	0.5	m
$t_s$	7	mm
$t_f$	30	mm
$t$	12	mm

El material de la pala se consideró como un plástico reforzado con fibra de vidrio tipo E con matriz de material epóxico E722 (*E-glass fibre/E722 epoxy matrix*), cuyas propiedades se obtuvieron de los resultados reportados por Hadavinia et al. (2015), y se indican en la tabla 6.5.

Tabla 6.6 – Propiedades de epóxico reforzado con fibra de vidrio tipo E.

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de Young, $E$	38.9	GPa
Relación de Poisson, $\nu$	0.24	-
Resistencia última a la tensión, $\sigma_u$	619	MPa
Densidad, $\rho$	1.9	Mg/m <sup>3</sup>

## 6.2 – Características del sitio

Se ha elegido a La Ventosa, Oaxaca, como lugar de estudio por ser una de las regiones del país con más recursos eólicos aprovechables, con una potencia nominal instalada de más de 100 MW y un potencial de hasta 2000 MW (Elliott et al., 2003).

La Ventosa es uno de los sitios con más registros estadísticos existentes, lo que permite la caracterización de su velocidad ajustándola a una distribución de probabilidad conocida; en este caso, la distribución de *Weibull & Weibull*, como proponen Jaramillo y Borja (2004).

La tabla 6.7 muestra los parámetros típicos de la zona seleccionada; la variable  $\bar{V}$  representa la velocidad media anual,  $\sigma$  es la desviación estándar de la velocidad, mientras que  $k$  y  $c$  son parámetros de forma de la distribución.

Tabla 6.7 – Parámetros de la distribución de Weibull & Weibull a 32 m, para La Ventosa, Oaxaca (Jaramillo y Borja, 2004).

Pico Izquierdo	Pico Derecho	Unidades
$\bar{V}_1 = 3.603$	$\bar{V}_2 = 14.818$	m/s
$\sigma_1 = 2.212$	$\sigma_2 = 3.256$	m/s
$k_1 = 1.674$	$k_2 = 5.232$	-
$c_1 = 4.034$	$c_2 = 16.097$	m/s
$p = 0.3799$		-

Considerando los datos anteriores se puede obtener la velocidad media en el pico izquierdo y derecho considerando una velocidad media general,  $\bar{V}$ , y adecuando las ecuaciones 2.12 y 2.13, se obtienen las expresiones que permiten simular las velocidades pico de la distribución:

$$\bar{V}_2 = 4.084 \bar{V}_1 \tag{6.1}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}/2.89 \tag{6.2}$$

$\bar{V}_1$ , se presentará durante los primeros 19967 ciclos de 10 minutos del año, mientras que  $\bar{V}_2$  durante los 32,593 ciclos restantes, correspondientes a un año de vida.

### 6.3 – Generación de historias de fuerzas en el tiempo

Aplicando los algoritmos explicados en capítulos anteriores, el campo de viento turbulento se modeló por medio del método de Veers. Posteriormente se aplicó el método BEM para obtener las historias de fuerzas aerodinámicas actuantes sobre la estructura.

El número de instantes de tiempo para los que se simuló el campo de viento es la frecuencia,  $f$ , que es la cantidad de veces que el diferencial de tiempo,  $\Delta t$ , cabe en un periodo de 10 minutos, correspondiente a la duración de un ciclo de cargas de viento. El diferencial de tiempo se define como el cociente de la unidad entre el doble de una frecuencia de corte propuesta,  $f_{corte}$ , es decir,  $\Delta t = 1/2 f_{corte}$ .

El intervalo de velocidades en el cual se realizaron las simulaciones es de 1 m/s a 40 m/s. Cuando la turbina se encuentra en operación, es decir  $\bar{V} \in [5, 25]$  m/s, se aplica el algoritmo normal del BEM; sin embargo, cuando la turbina se encuentra detenida,  $\bar{V} \in [1, 4]$  m/s y  $\bar{V} \in [26, 40]$  m/s, se aplica el método BEM simplificado.

El BEM calcula la fuerza que se presenta en cada sección de la pala para cada instante de tiempo bajo el que se simula el campo de viento. Este conjunto de datos, para cada velocidad de operación, será la historia en el tiempo de fuerzas aerodinámicas. Los datos propuestos para su ejecución se encuentran

en la tabla 6.7. La figura 6.4 muestra una simulación de fuerzas para una velocidad de viento de 18 m/s, en la cuerda  $r=8.5$  m.

Tabla 6.7 – Datos utilizados para la generación de historias en el tiempo.

Variable	Valor	Unidad
Ángulo de latitud del sitio, $\phi$	16°34.748'	-
Longitud de rugosidad, $z_0$	0.1	$m$
Frecuencia de corte, $f_{corte}$	5	$Hz$
Diferencial de tiempo, $t$	0.1	$s$
Frecuencia, $f$	6000	-
Densidad del aire, $\rho_{aire}$	1.223	$kg/m^3$

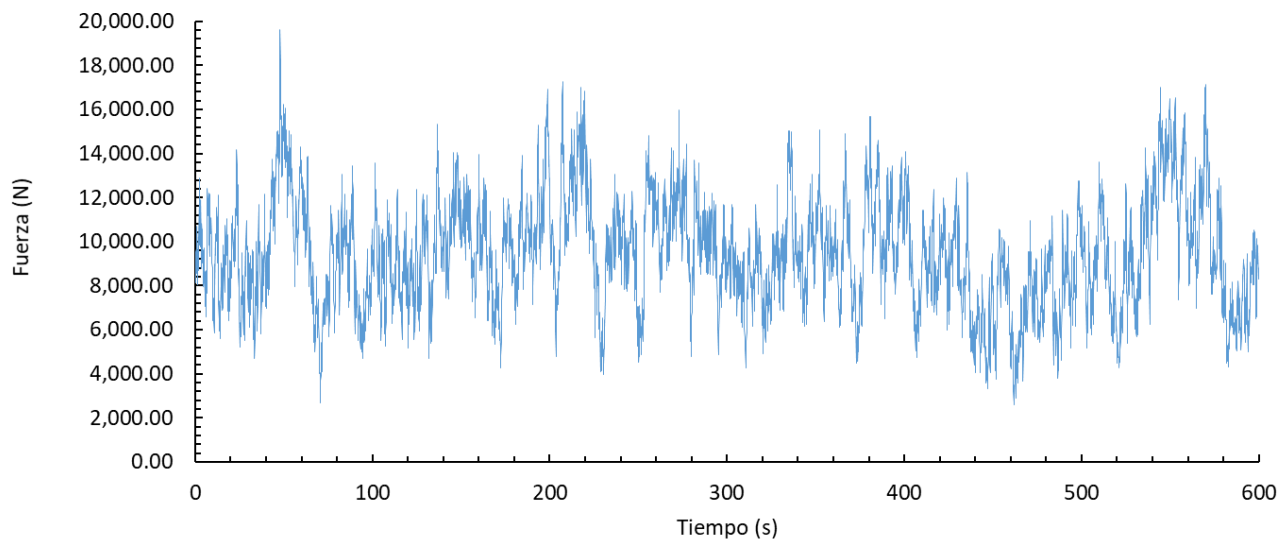


Figura 6.4 – Simulación de fuerzas

## 6.4 – Simulaciones en ANSYS APDL

Los primeros modelos tridimensionales generados para la pala en estudio se hicieron con el software AutoCAD (AutoDesk, 2016), y posteriormente con SolidWorks *Professional* (Dassault Systèmes, 2015). Debido al grado de complicación de la pala, con muchos cambios de perfil y con una longitud, flecha y torsión relativamente grandes, los resultados obtenidos no fueron favorables para el análisis estructural.

Debido a lo anterior, se decidió realizar la totalidad del modelado en lenguaje de programación ANSYS APDL. El modelo tridimensional de la pala programado por éste método, consta de 1032 nodos y 1958 elementos triangulares tipo SHELL 63. Es similar al generado por Jureczko *et al.* (2005) para una pala de características semejantes y estudios de fatiga.

Los nodos de la base están restringidos en sus tres direcciones, para actuar como un empotramiento de la pala, que no toma en cuenta efectos de amortiguamiento. Se consideran los aspectos

importantes de la geometría, como son la flecha,  $\Delta y$ , la torsión,  $\beta$ , alrededor del eje de cortante de los perfiles. así como los cambios de espesor en la sección transversal.

La figura 6.5 contiene cuatro vistas, en diferentes perspectivas, del modelo de la pala diseñado en ANSYS APDL.

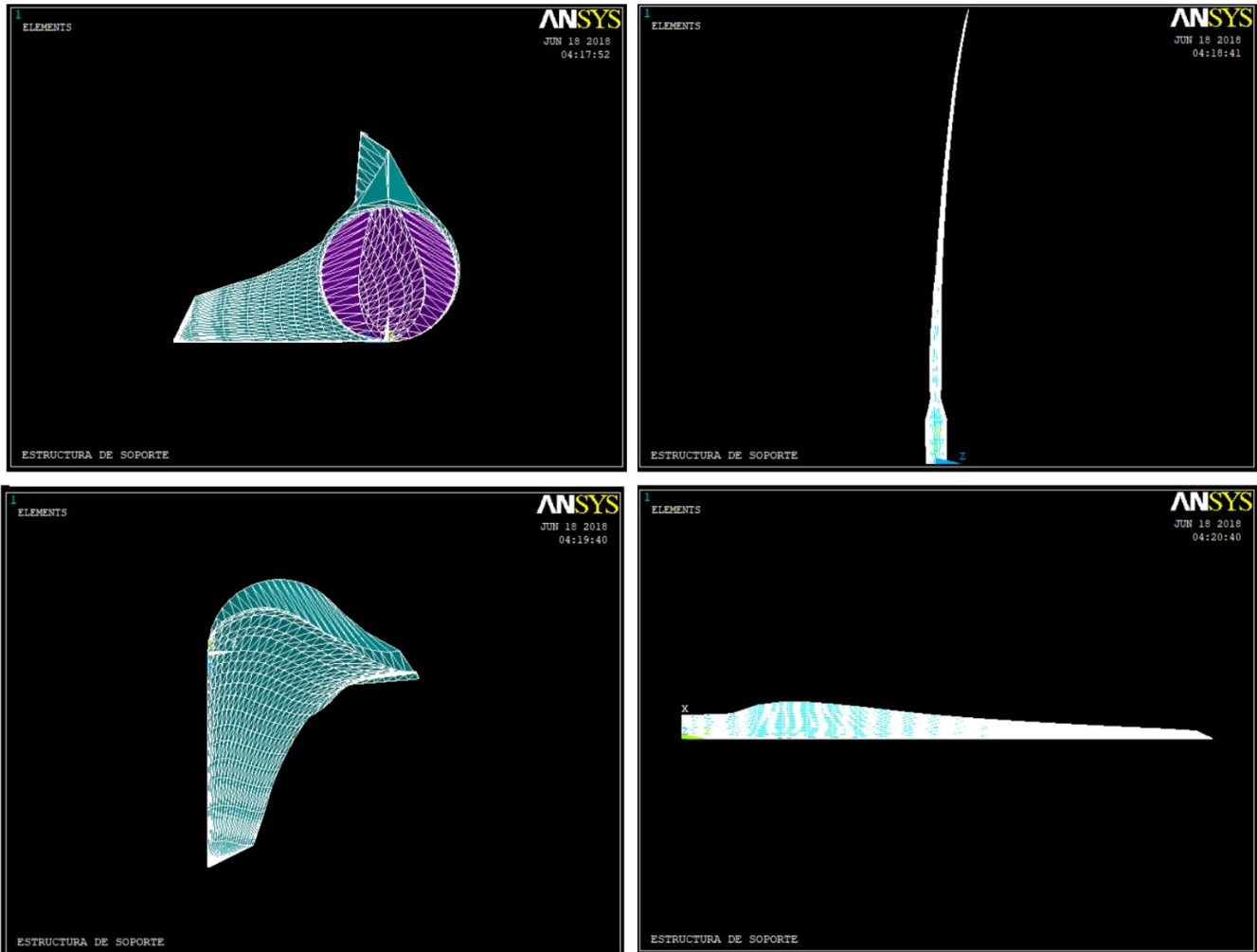


Figura 6.5 –Modelo de la pala elaborado en ANSYS APDL

Las historias de fuerzas obtenidas con el método BEM se aplicaron como vectores en los nodos que corresponden a la coordenada  $x/c = 0.0125$  de cada perfil y se procedió a realizar el análisis de elemento finito de la pala.

Con estas consideraciones aplicadas al modelo, en su análisis modal se obtiene un peso de 5,837 kg, que coincide con los datos del aerogenerador propuesto, y un periodo estructural para el primer modo de vibración (aleteo) de 0.9 segundos (frecuencia de 1.10 Hz), que, comparándolo con el periodo de estructuras similares (Halfpenny, 1998; Larsen *et al.*, 2002; Jonkman *et al.*, 2009), se considera congruente para las características de la pala, y verifica la efectividad del modelo.

Las figuras 6.6 y 6.7 muestran la configuración deformada de la pala y de las concentraciones de esfuerzos en la pala, respectivamente, para una simulación en ANSYS APDL considerando una velocidad de 18 m/s.

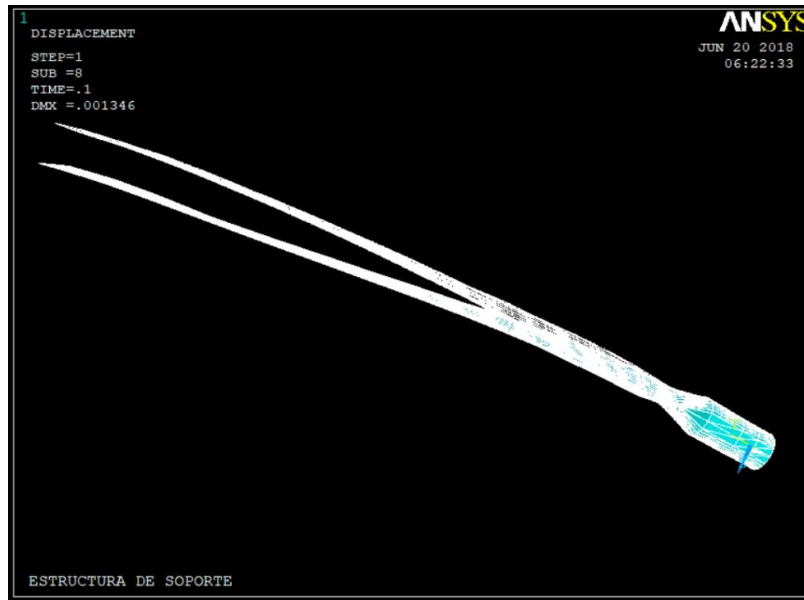


Figura 6.6 – Configuración deformada de la pala en ANSYS APDL.

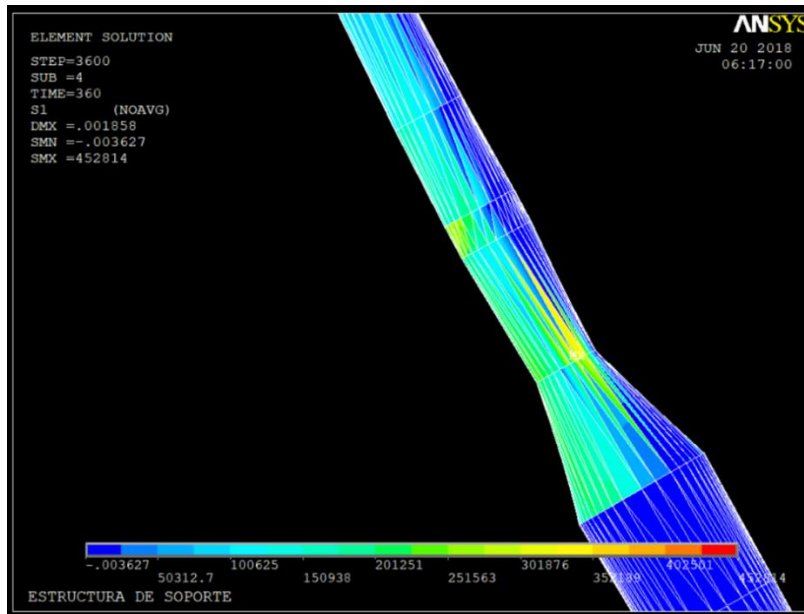


Figura 6.7 – Concentración de esfuerzos en la pala en ANSYS APDL.

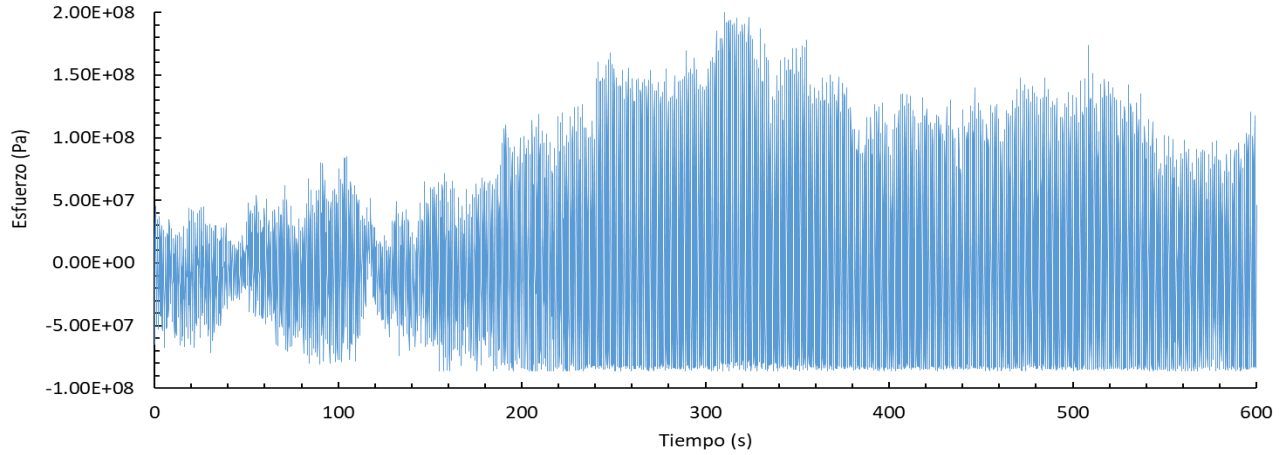
## 6.5– Análisis por fatiga

Para aplicar el método de conteo de esfuerzos de Rainflow es necesario que las historias de esfuerzos obtenidas tengan una media igual a 0. Una vez filtradas las señales, se puede aplicar el método y calcular los ciclos reales de fatiga,  $n$ , y el esfuerzo equivalente correspondiente,  $Reff$ .

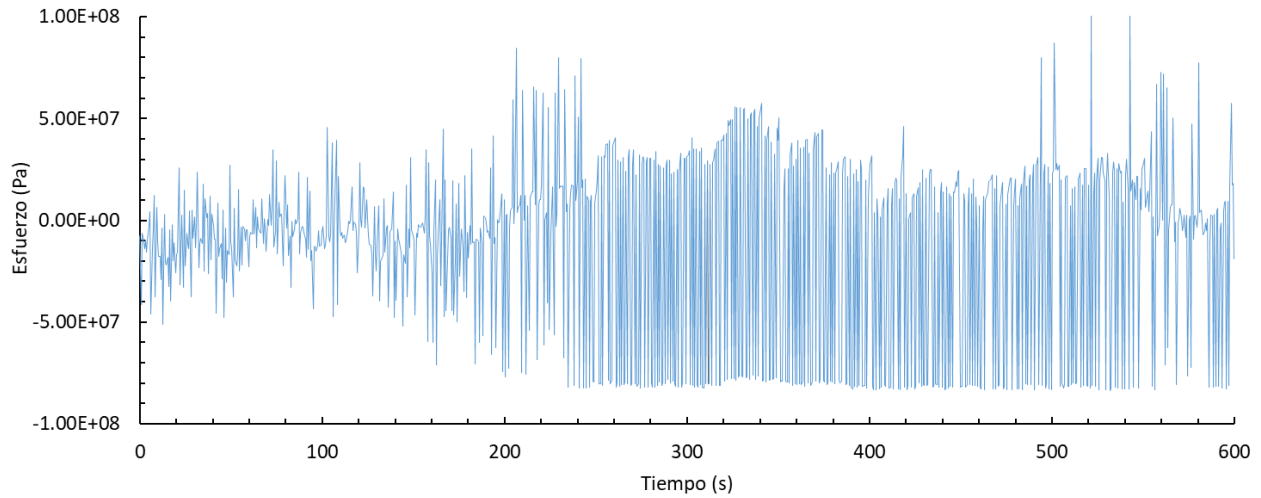
## VI – Caso de estudio

---

La figura 6.8 muestra una historia de esfuerzos obtenida de los análisis de ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013), para una velocidad de viento de 25 m/s, en la zona de transición de la pala y ajustada a una media cero. La figura 6.9 describe la misma historia de esfuerzos una vez aplicado el conteo de ciclos, y la figura 6.10 muestra su histograma de esfuerzos correspondiente.



*Figura 6.8 – Historia de esfuerzos.*



*Figura 6.9 – Historia obtenida con el método de Rainflow.*

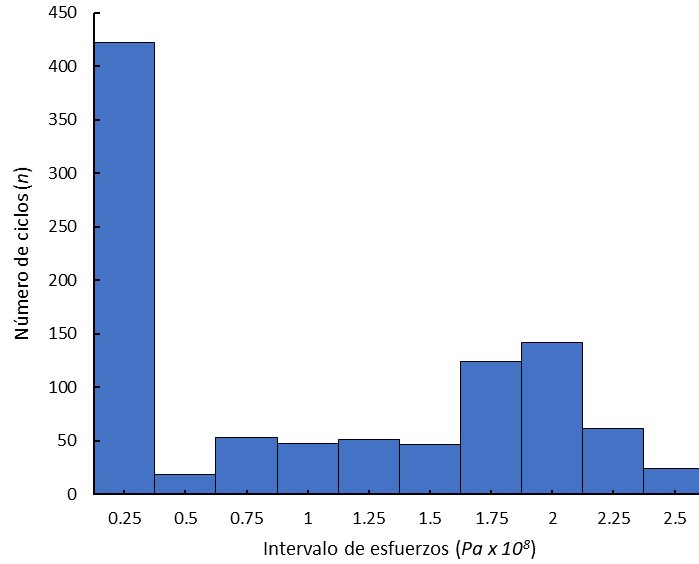


Figura 6.10 – Histograma de esfuerzos de Rainflow.

Los resultados obtenidos del conteo de ciclos de Rainflow para velocidades de 1 a 40 m/s se utilizan como datos de entrada para los modelos de fatiga. Para el modelo de fatiga de crecimiento de grieta se utilizan adicionalmente los valores de los parámetros involucrados en las ecuaciones 4.8 y 4.9, contenidos en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 – Constantes utilizadas en la ley de Paris para el plástico reforzado con fibra de vidrio tipo E

Constante	Valor	Unidad
<b>C</b>	4.47	$x 10^{-2}$
<b>m</b>	5.27	-
<b>G<sub>IC</sub></b>	764	J/m <sup>2</sup>

Así mismo, para el modelo de daño acumulado se considera la curva S-N típica del plástico reforzado con fibra de vidrio tipo E; la cual se puede calcular con la ecuación propuesta por Qiao y Yang (2006) en términos del esfuerzo actuante en el material (Ec. 6.3), y representada en la figura 6.11.

$$N = \frac{288,484,643,148.533}{10^{\left(\frac{Reff}{50.4485}\right)}} \tag{6.3}$$



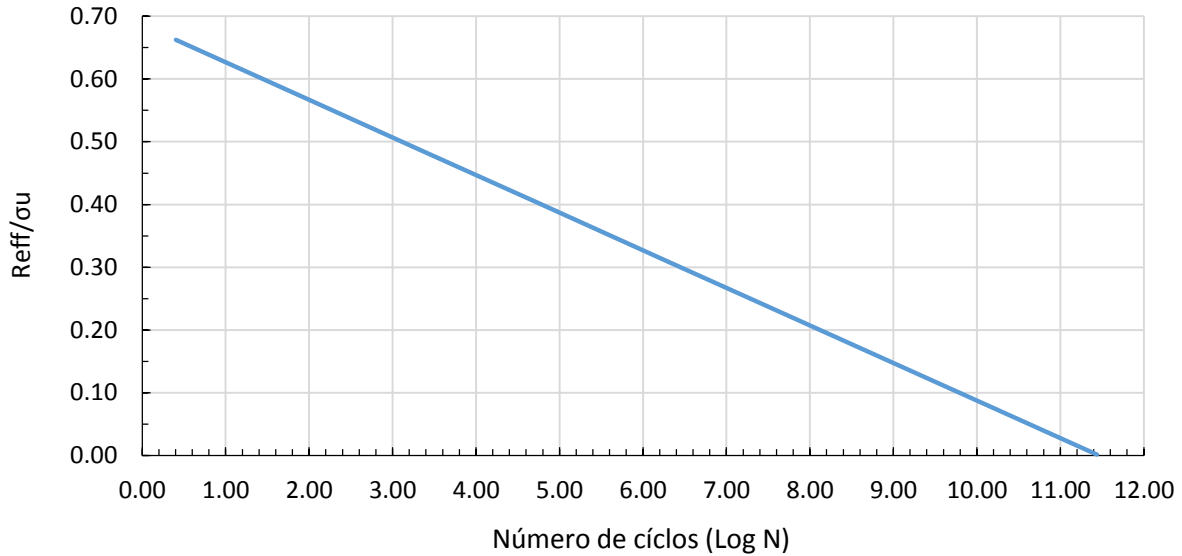


Figura 6.11 – Curva S-N para E-glass fibre/E722 epoxy matrix.

La figura 6.12 muestra la curva de crecimiento de grieta considerando una velocidad media en el sitio de 25 m/s. Se puede apreciar que el modelo de crecimiento de grieta tiene el comportamiento esperado de acuerdo a lo dispuesto en la sección 4.3.2, presentando un crecimiento lineal en el primer año de vida, para seguir con un crecimiento que se ajusta a la ley de Paris, como se muestra en la figura 4.3.

La figura 6.13 muestra la curva de daño acumulado para una velocidad media de 25 m/s. Se puede observar que con este modelo de fatiga se tienen daños mínimos durante los primeros años de vida de la estructura hasta llegar a un índice de daño entre 0.30 y 0.40, a partir del cual el daño crece exponencialmente.

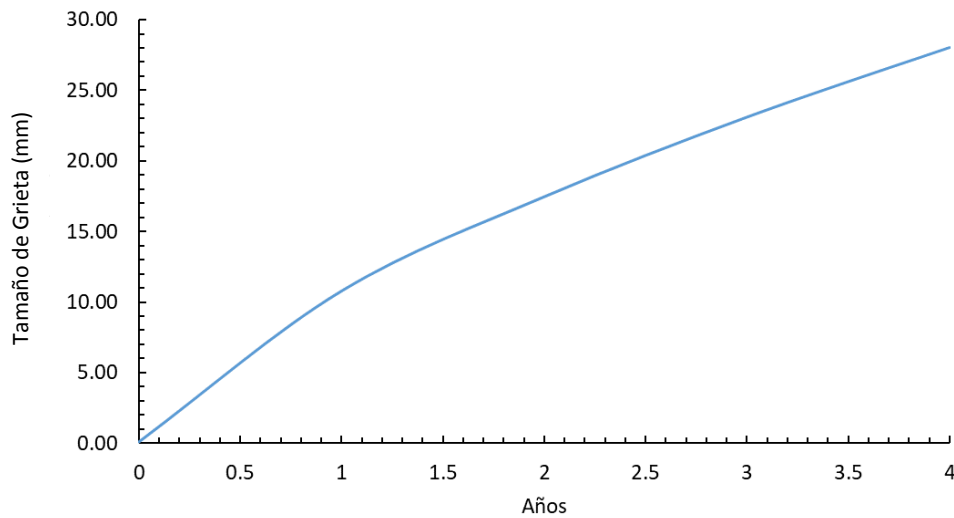


Figura 6.12 – Tamaño de grieta a través del tiempo para grieta inicial,  $a_o = 0.1 \text{ mm}$  y  $\bar{V} = 25 \text{ m/s}$

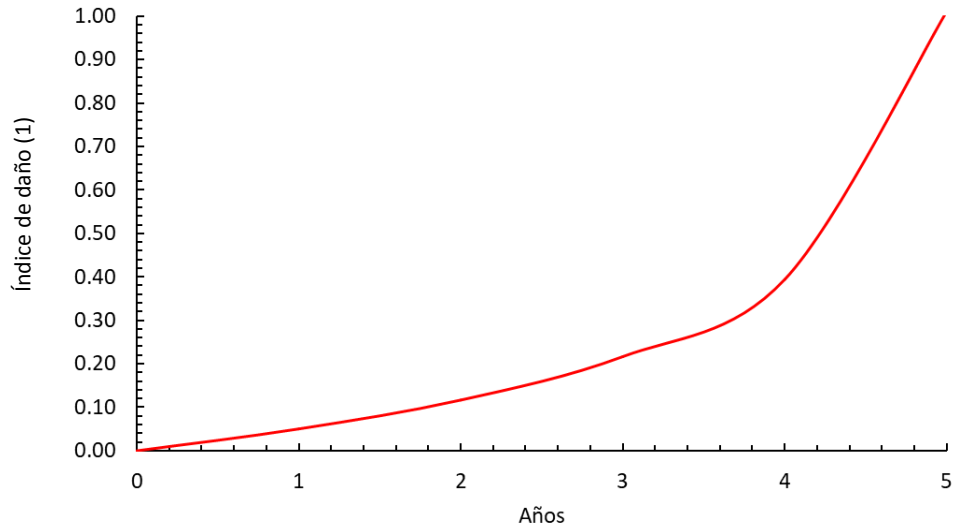


Figura 6.13 – Daño acumulado a través del tiempo para  $\bar{V} = 25 \text{ m/s}$

## 6.6 – Análisis de fragilidad

En esta sección se calculan las curvas de fragilidad de acuerdo con lo dispuesto en el capítulo 5. El estado límite,  $EL$ , se determinó como la disminución máxima permisible del espesor total. Está dado en términos de  $t$ , que es el espesor inicial de la placa más esforzada en la pala, la cual tiene un valor de  $30 \text{ mm}$ .

Para este estudio se han planteado tres estados límites diferentes:

1. El estado límite  $a_l = 0.5 t$  es el caso más conservador, pues solo admite que la grieta alcance la mitad del espesor del material.
2. El estado límite  $a_l = 0.75 t$  es un criterio más conveniente, pues se ajusta a los requerimientos reales de diseño de palas.
3. El estado límite de  $a_l = t$  representa que el tamaño de la grieta es equivalente al espesor total de la placa, ocasionando la falla total de la estructura.

El procedimiento para obtener las curvas de fragilidad se explica en el diagrama de flujo de la figura 6.14:

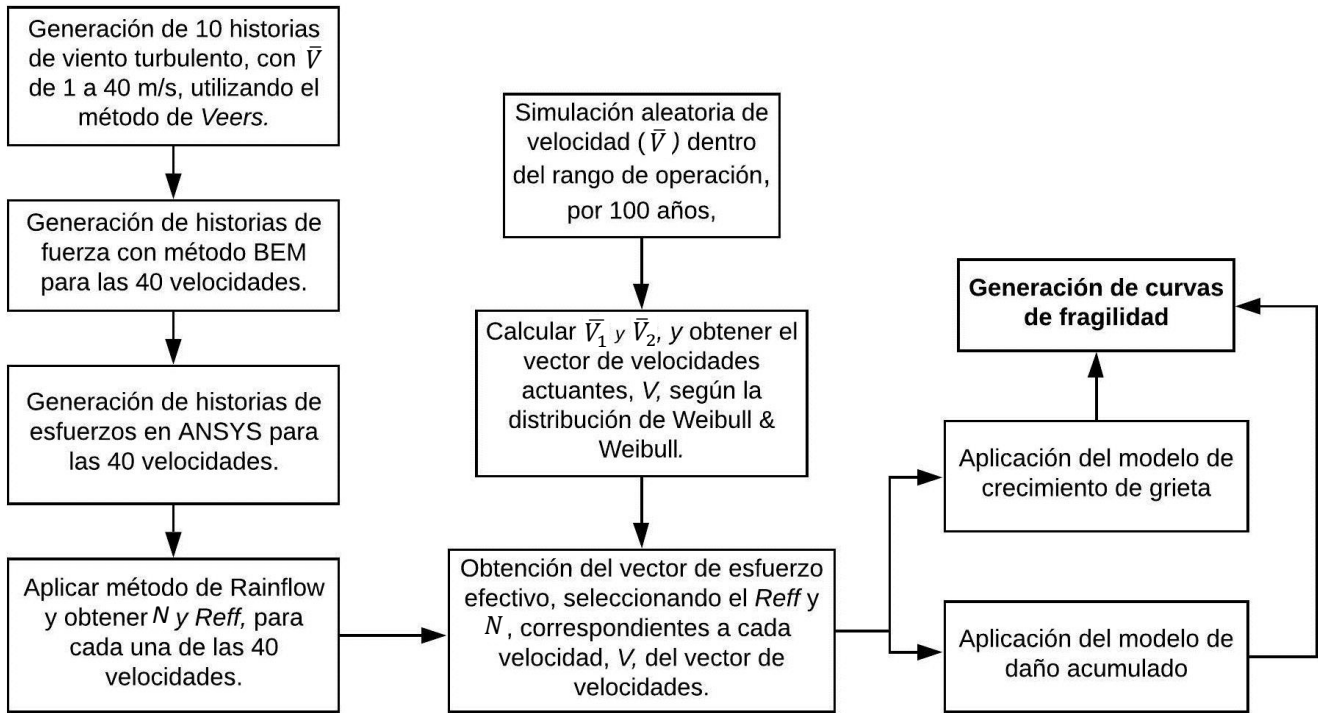


Figura 6.14 – Diagrama de flujo para cálculo de vida por fatiga.

### 6.6.1 – Vida por fatiga con el modelo de crecimiento de grieta

Para este modelo de fatiga se ha considerado variable la longitud de la grieta inicial,  $a_0$ , con el fin de observar la influencia de este parámetro en el comportamiento del material.

En las figuras 6.15, 6.16 y 6.17, se muestran las curvas de fragilidad para las velocidades de viento,  $V$ , de: 10, 15 y 20 m/s, respectivamente; para un estado límite de  $a_l = 0.5 t$  y una grieta inicial,  $a_0$ , variable de:  $t/300$ ,  $t/150$  y  $t/100$ .

Al analizar las curvas, es claro que la diferencia entre resultados para grietas iniciales diferentes es despreciable, es decir, la variación de las curvas cambiando el espesor de grieta inicial es mínima (cambio de probabilidades de excedencia de alrededor del 2%), por lo que no se considera necesario hacer curvas para grietas iniciales con distintos valores y se aceptará al caso crítico de grieta inicial como  $a_0 = [t/100]$ .

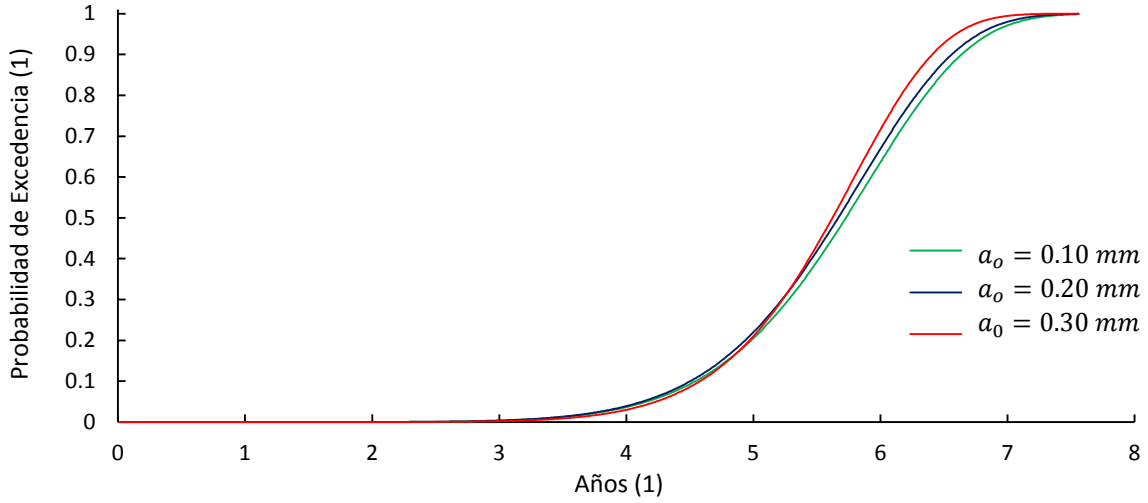


Figura 6.15 - Curvas de Fragilidad para  $a_l=0.5 t$ ,  $\bar{V}=5 \text{ m/s}$  y  $a_0=0.10, 0.20$  y  $0.30 \text{ mm}$ .

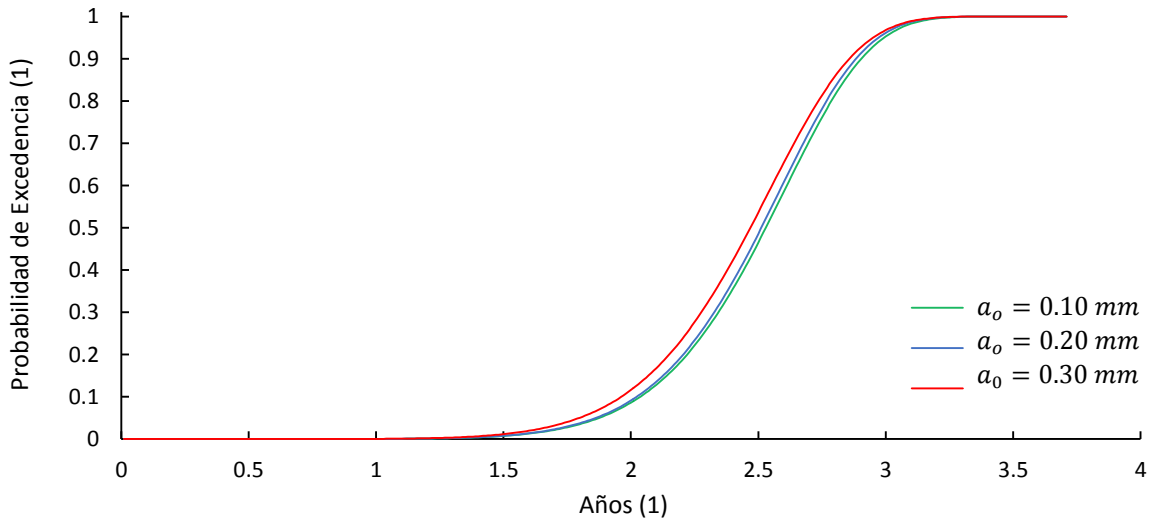


Figura 6.16 - Curvas de Fragilidad para  $a_l=0.5 t$ ,  $\bar{V}=10 \text{ m/s}$  y  $a_0=0.10, 0.20$  y  $0.30 \text{ mm}$ .

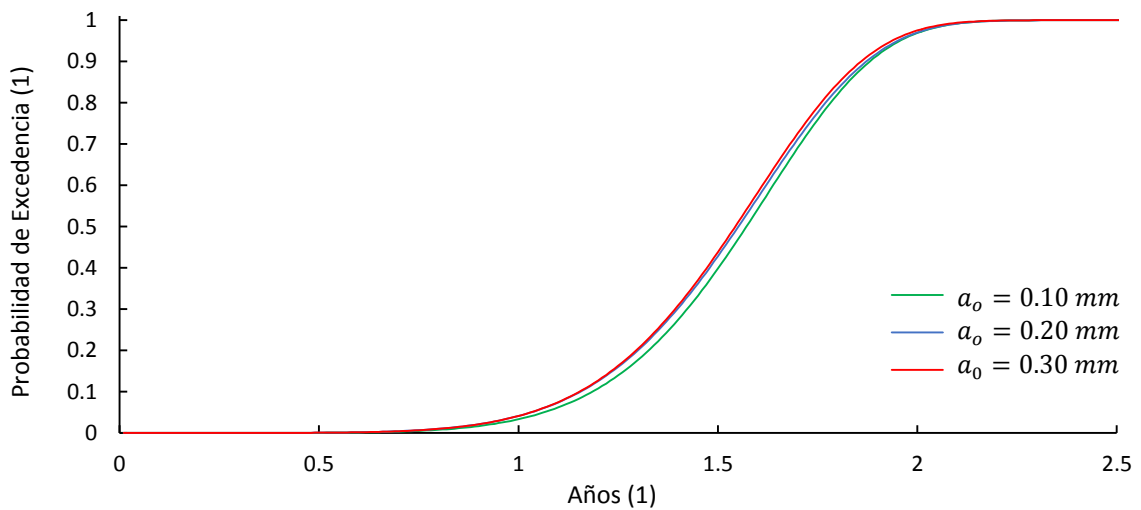


Figura 6.17 - Curvas de Fragilidad para  $a_l=0.5 t$ ,  $\bar{V}=20 \text{ m/s}$  y  $a_0=0.10, 0.20$  y  $0.30 \text{ mm}$ .

Por otro lado, en la figura 6.18 se aprecia que la fragilidad del material respecto a la velocidad varía drásticamente. Para el intervalo de velocidad media anual,  $\bar{V}$ , de 5 a 15 m/s, la probabilidad de excedencia respecto al tiempo aumenta conforme la velocidad aumenta; mientras que para el intervalo de velocidad media anual,  $\bar{V}$ , de 15 a 25 m/s, las variaciones en las probabilidades de falla son prácticamente nulas para probabilidades de excedencia mayores a 0.70.

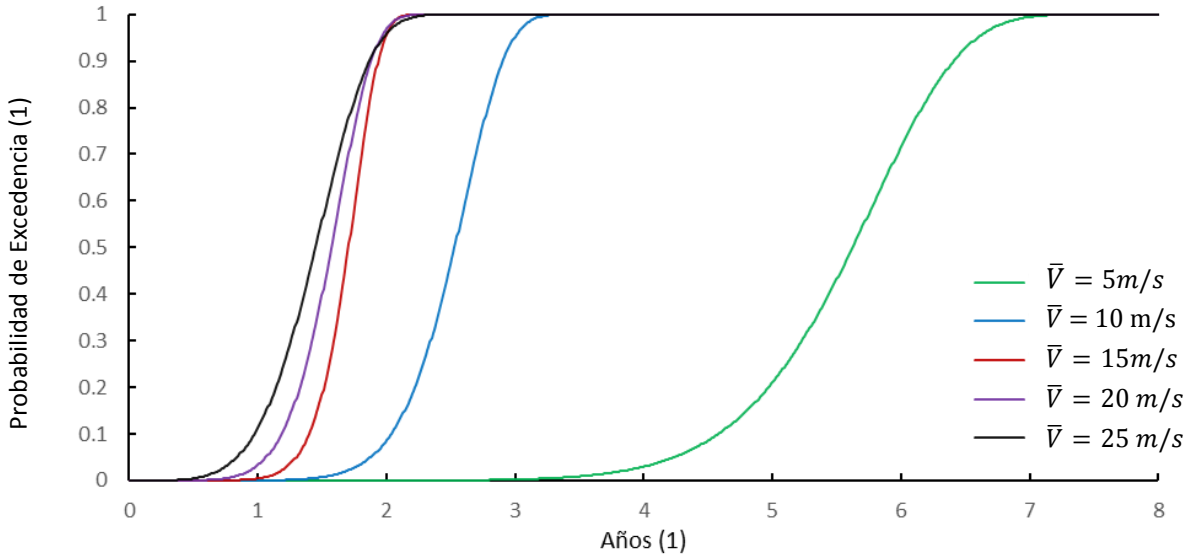


Figura 6.18 - Curvas de Fragilidad para  $a_l=0.5 t$ ,  $a_0=0.30$  y  $\bar{V}=5, 10, 15, 20$  y  $25 \text{ m/s}$ .

Las figuras 6.19 a la 6.22 contienen las curvas de fragilidad con  $a_0=0.3 \text{ mm}$ , para las velocidades de: 5, 10, 15 y 25 m/s y los tres estados límite mencionados previamente. De estas curvas se puede apreciar lo siguiente:

- a) El estado límite  $a_l = 0.5 t$  representa el escenario conservador, pues permite probabilidades de excedencia durante etapas tempranas en la vida de la pala.
- b) El estado límite  $a_l = 0.75 t$  es un criterio más conveniente, pues se ajusta a los requerimientos reales de diseño de palas.
- c) El estado límite de  $a_l = t$  representa la falla total de la estructura.

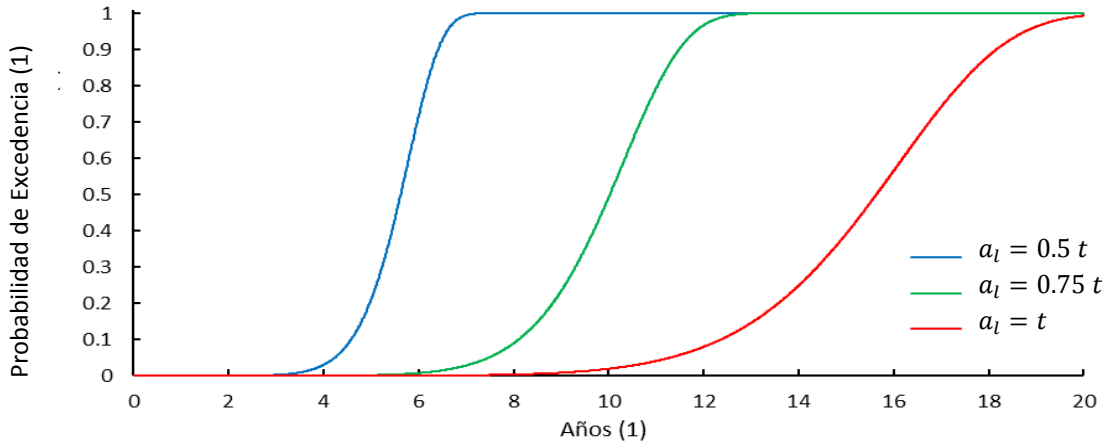


Figura 6.19 - Curva de Fragilidad para  $a_0=0.30 \text{ mm}$ ,  $\bar{V}=5 \text{ m/s}$  y  $a_l=0.5 t, 0.75 t$  y  $t$ .

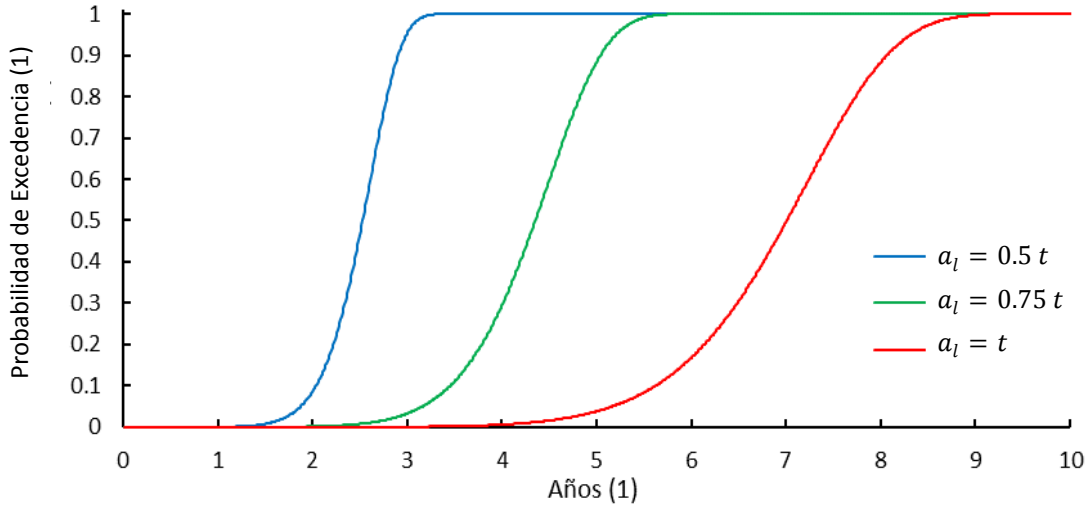


Figura 6.20 - Curva de Fragilidad para  $a_0=0.30$  mm,  $\bar{V}=10$  m/s y  $a_l=0.5 t$ ,  $0.75 t$  y  $t$ .

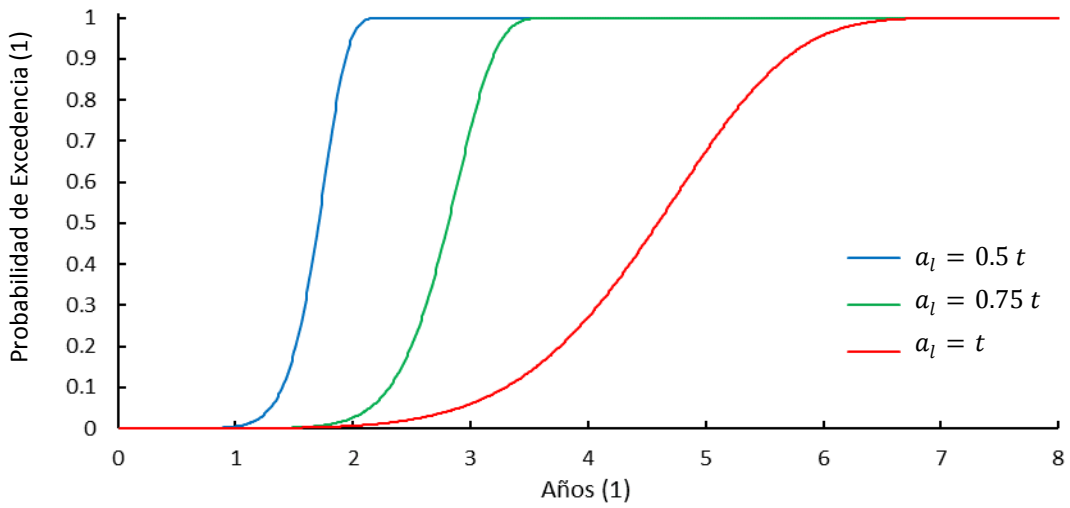


Figura 6.21 - Curva de Fragilidad para  $a_0=0.30$  mm,  $\bar{V}=15$  m/s y  $a_l=0.5 t$ ,  $0.75 t$  y  $t$ .

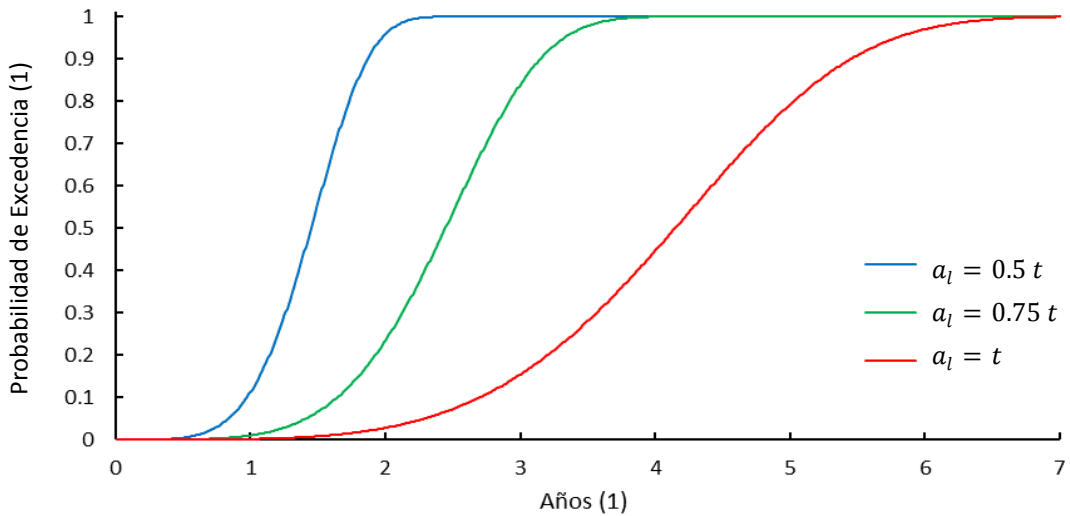


Figura 6.22 - Curva de Fragilidad para  $a_0=0.30$  mm,  $\bar{V}=25$  m/s y  $a_l=0.5 t$ ,  $0.75 t$  y  $t$ .

### 6.6.2 – Vida por fatiga con el modelo de daño acumulado

Este modelo proporciona un análisis alternativo con resultados mucho menos conservadores a los del modelo de crecimiento de grieta. De la información obtenida al aplicarlo, se puntualiza lo siguiente:

- La vida por fatiga para velocidades bajas es superior a los 100 años por lo que no se requiere generar curvas para velocidades menores a los 10 m/s. Ejemplo de esto es la curva de 5 m/s (figura 6.23) para su estado límite  $a_l = 0.5t$ .
- En el caso de las velocidades entre 10 y 15 m/s los tiempos de vida más esperados van de los 20 a los 80 años, como se aprecia en las figuras 6.24 y 6.25, para los 3 estados límite.
- Para las velocidades superiores a los 15 m/s, los tiempos de vida más probables son del orden de 4 a 12 años, como se puede observar en las curvas de 20 y los 25 m/s (figuras 6.26 y 6.27 respectivamente), en los 3 estados límite.

Las curvas obtenidas indican un tiempo de vida por fatiga muy grande, lo cual recae en las deficiencias del modelo para materiales compuestos, que, al estar pensado específicamente para materiales metálicos, no considera el efecto de la deslaminación.

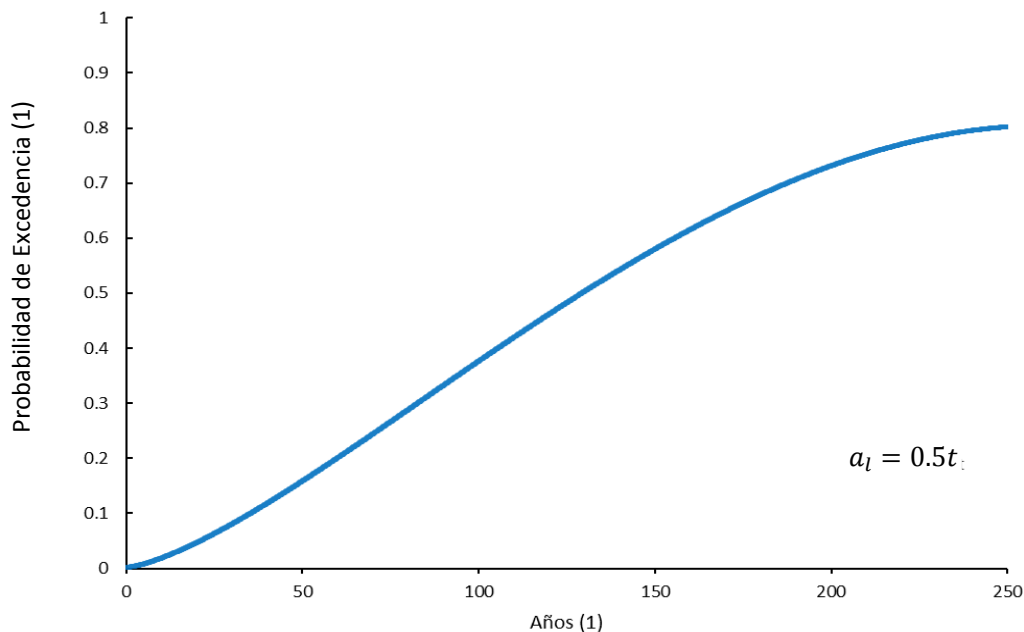


Figura 6.23 - Curvas de fragilidad para  $V = 5\text{m/s}$ . Con  $a_l = 0.5t$ .

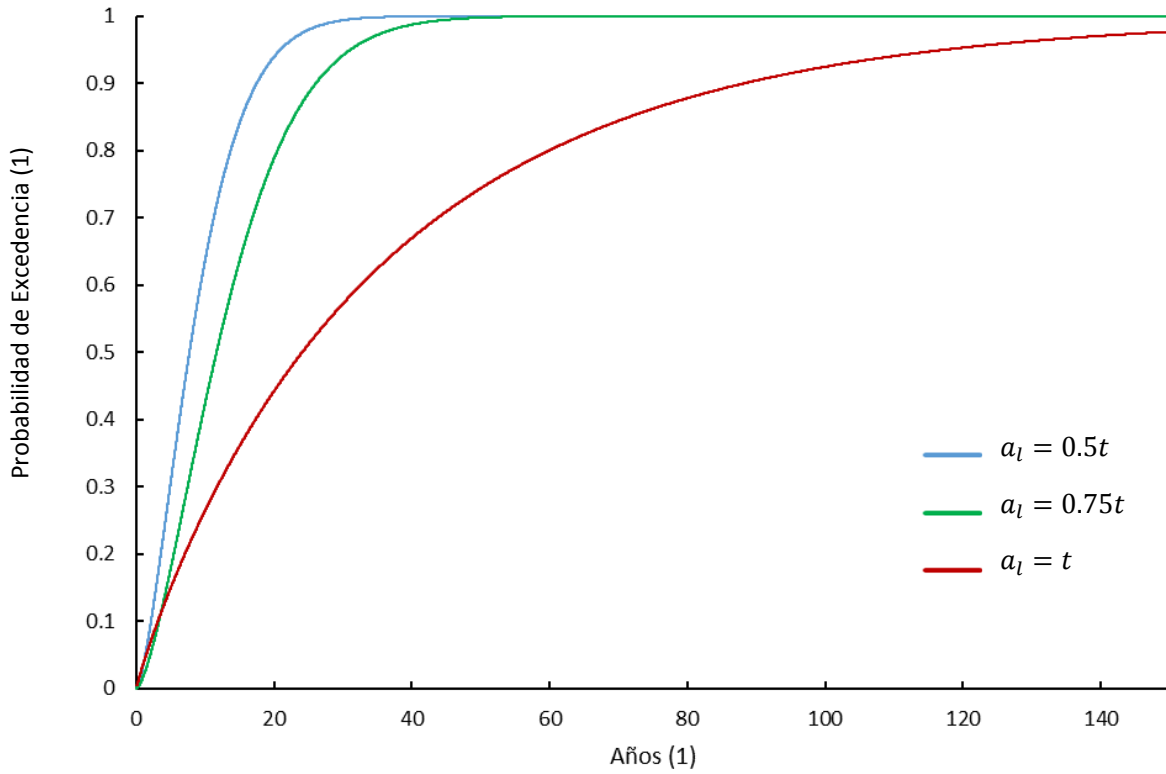


Figura 6.24 - Curvas de fragilidad para  $V = 10 \text{ m/s}$ . Con  $a_l = 0.5t, 0.75t, t$ .

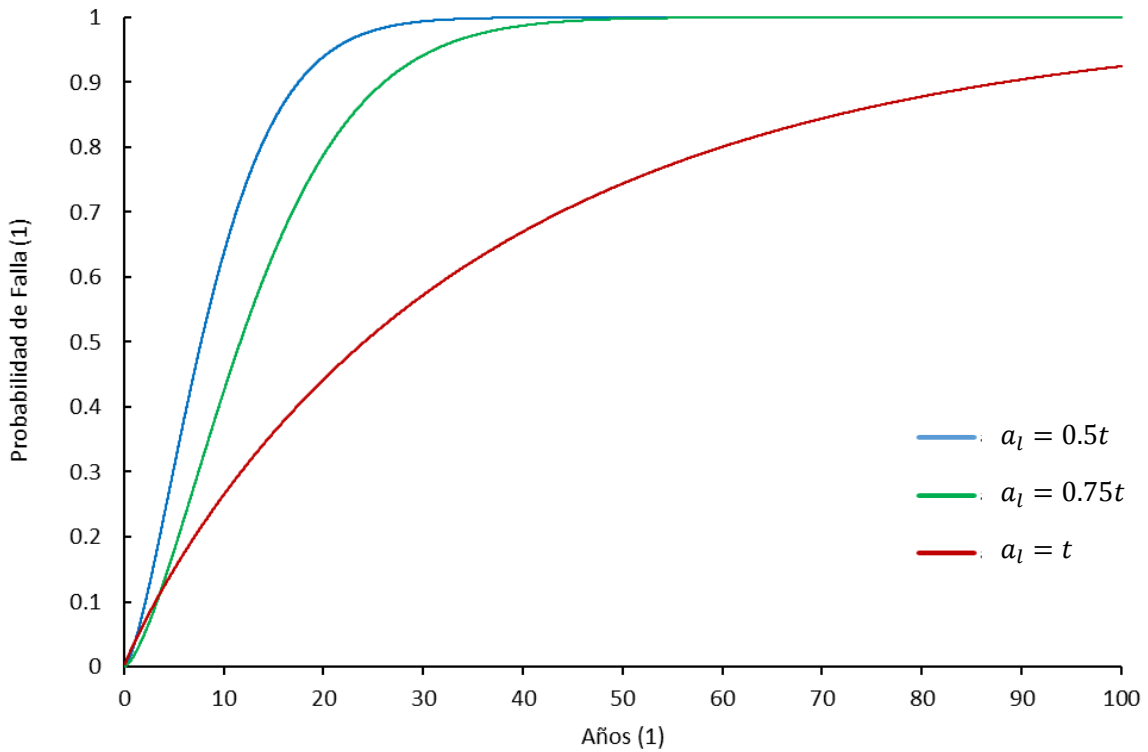


Figura 6.25 - Curvas de fragilidad para  $V = 15 \text{ m/s}$ . Con  $a_l = 0.5t, 0.75t, t$ .



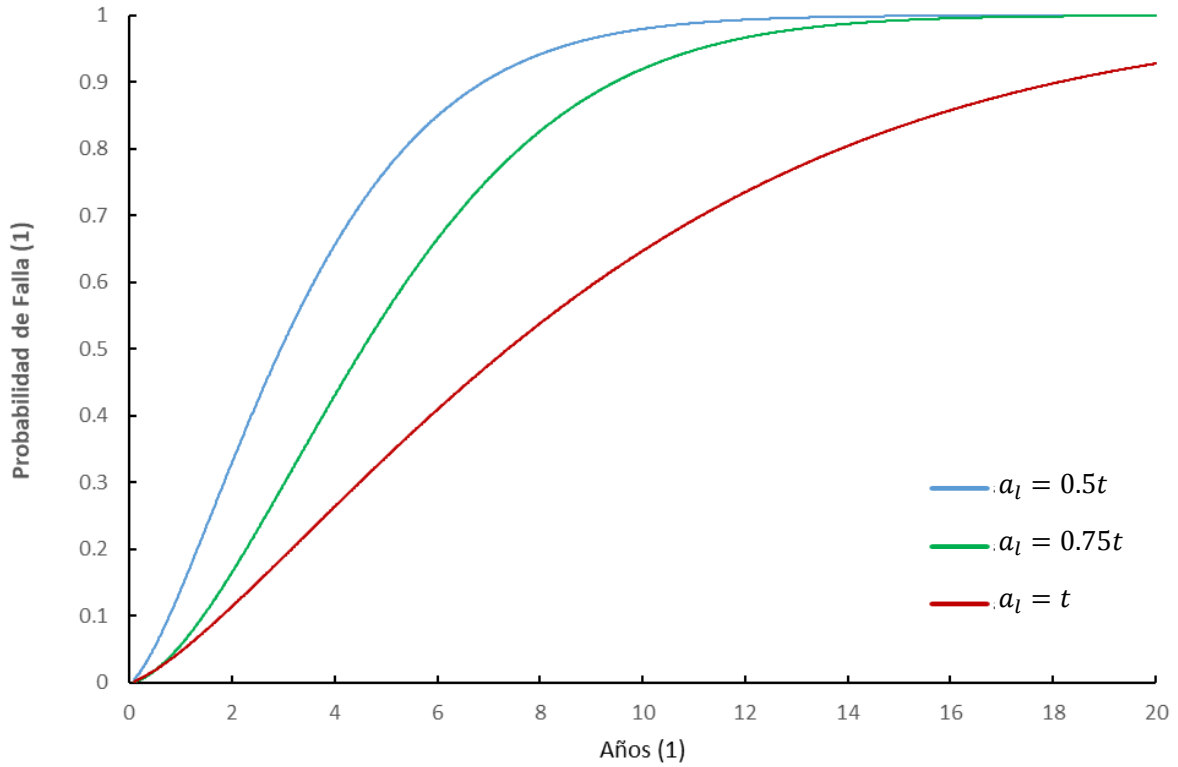


Figura 6.26 - Curvas de fragilidad para  $V = 20$  m/s. Con  $a_l = 0.5t, 0.75t, t$ .

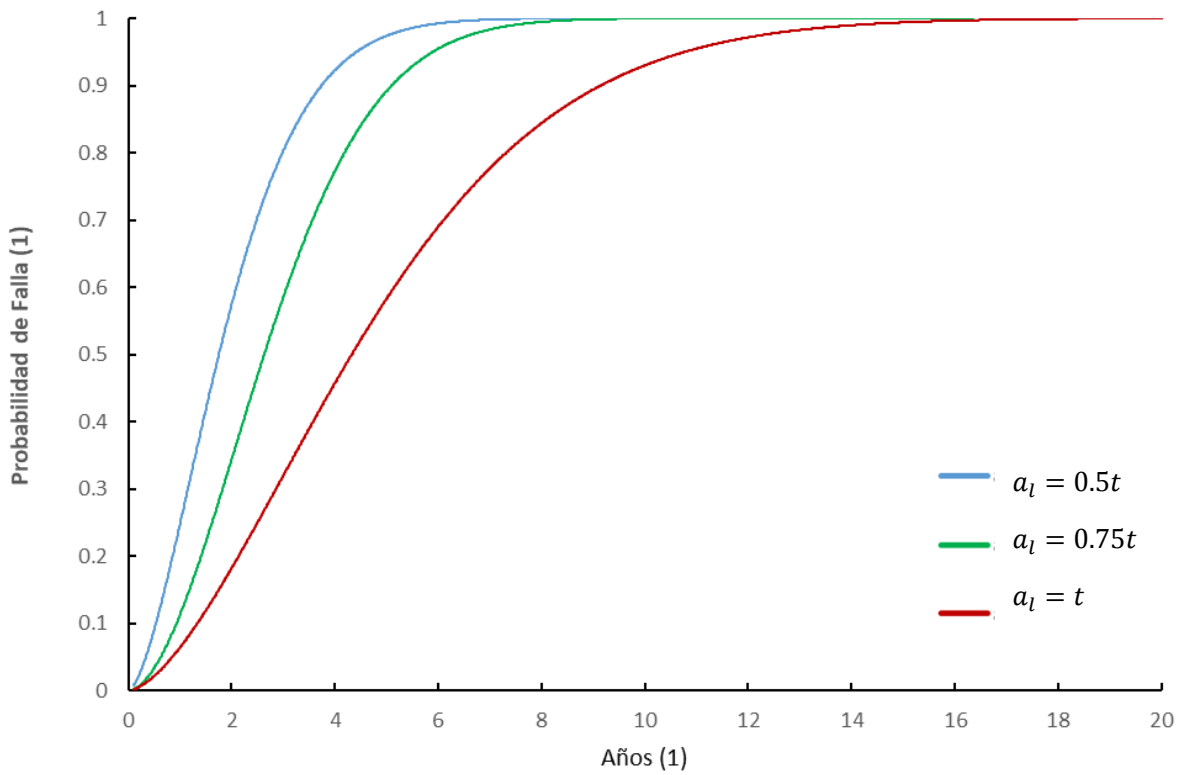


Figura 6.27 - Curvas de fragilidad para  $V = 25$  m/s. Con  $a_l = 0.5t, 0.75t, t$ .

# Conclusiones

Se ha construido un modelo computacional confiable, que considera todos los aspectos de la geometría y la composición de la pala propuesta y que permitió el análisis estructural con software de elemento finito, ANSYS APDL (ANSYS Inc., 2013), para el cálculo de los esfuerzos actuantes a causa del viento.

Para la creación de este modelo se experimentó con herramientas computacionales diferentes, como Solid Works (Dassault Systèmes, 2015) y AutoCad (AutoDesk, 2016), con lo que se obtuvieron modelos útiles para fines ilustrativos, de diseño o de análisis de mecánica de fluidos, pero ineficientes para los objetivos de este proyecto. Los mejores resultados se alcanzaron trabajando en el propio lenguaje de programación de ANSYS, puesto que éste permitió conferir al modelo un mayor nivel de detalle y la extracción de resultados más precisos.

El modelo de daño acumulado, propuesto por Aeran (2017), tiende a sobreestimar la durabilidad de la estructura. Por ende, se debe incluir un parámetro que considere el comportamiento de dichos materiales dentro de la formulación del método para probar su eficacia. Dicho esto, las curvas producto del modelo de daño acumulado, al no considerar los efectos de la delaminación, solo serían aplicables en palas con mantenimiento constante, es decir, una que no admita la aparición de grietas o el desprendimiento de las plaquetas del material.

En contraste con lo anterior, las curvas obtenidas con el modelo de crecimiento de grieta suponen escenarios más cercanos a los casos reales de vida por fatiga en palas; de modo que pueden aplicarse con seguridad a su diseño y a la planeación de su mantenimiento.

Finalmente, cabe destacar que a pesar de que el diseño de la pala modelada en esta tesis no pertenece a ningún modelo real instalado, está fundamentado en los estándares internacionales de diseño y sus características son muy similares a las de los modelos instalados en los proyectos de parques eólicos de la República Mexicana. Además, se ha situado en la zona con más potencial y desarrollo a nivel nacional, en materia de energía eólica, lo que denota la utilidad de los métodos aquí expuestos para su aplicación en proyectos de ingeniería reales.

# Referencias

- American Society for Testing and Materials (1997). E 1049 – 85: Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis. *1986 Annual Book of ASTM Standards Reprint*, 3(1).
- Ancona, D., y McVeigh, J. (2001). *Wind Turbine: Materials and Manufacturing Fact Sheet*. E.U.A.: Princeton Energy Resources International, LLC.
- Anderson, D. (2007). *Fundamentals of Aerodynamics* (3rd ed). Nueva York: McGraw-Hill.
- ANSYS Inc. (2013). ANSYS APDL [Software]. Canonsburg, Pensilvania.
- Archer, C., y Jacobson, M. (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-20. doi: 10.1029/2004JD005462.
- Asadi, E., y Sadjadi, S. (2017). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Uncertain Supply Chain Management*, 5(1), 1-26. doi:10.5267/j.uscm.2016.6.001
- Aeran, A., Sudath, C. S., Ove, M., y Ivar L. (2017). A new nonlinear fatigue damage model based only on S-N curve parameters. *International Journal of Fatigue*, 103, 327-341. doi: 10.1016.
- Asociación Mexicana de Energía Eólica. (2016). *El potencial eólico mexicano: oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico*. Recuperado de: <https://www.amdee.org>
- AutoDesk. (2016). Auto CAD [Software]. Recuperado de [www.autodesk.mx/AutoCAD](http://www.autodesk.mx/AutoCAD)
- Bañuelos-Ruedas, F., Camacho, C.A., y Rios-Marcuello, S. (2011). Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment. InTech.
- Bazilevs, Y., Hsu, M., Kiendl, J., y Benson, D. (2012). A computational procedure for prebending of wind turbine blades. *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 89, 323-336. doi: 10.1002/nme.3244
- Berny, E. A. (2015). *Influencia del daño por fatiga en la confiabilidad de aerogeneradores*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX.
- Berny, E. A. y Ruiz S.E. (2016). Reliability over time of wind turbines Steel towers subjected to fatigue. *Wind and Structures*, 23(1), 75-90. doi:10.12989/was.2016.23.1.075
- Betz, A. (1966). *Introduction to the Theory of Flow Machines* (Randall, T.). Oxford: Pergamon Press. doi: 10.1016/C2013-0-05426-6
- Bianchi, F., Battista H., y Mantz R. (2007). The Wind and Wind Turbines. En *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, 1st ed., p. 7-28. Berlin: AIC.
- BP Global. (2017). *BP Statistical Review of World Energy June 2017*. Londres: BP.
- Branner, K., y Ghadirian, A. (2014). Database about blade faults. *DTU Wind Energy*, 0067, 1-16.

- Buhl, M. L. (2005). *A New Empirical Relationship between Thrust Coefficient and Induction Factor for the Turbulent Windmill State* (NREL/TP-500-36834). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Campbell, S. (2015, mayo 14). Annual blade failures estimated at around 3,800. *Wind Power Monthly*. Recuperado 18 junio 2018, de <https://www.windpowermonthly.com/>
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento*. Ciudad de México: CFE.
- Dassault Systèmes. (2015). SolidWorks [Software]. Recuperado de <https://www.solidworks.com/es>
- Davenport, A. G. (1961), The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 87, 194-211. doi:10.1002/qj.49708737208
- Do, T., Lindt, J., y Mahmoud, H. (2014). Fatigue Life Fragilities and Performance-Based Design of Wind Turbine Tower Base Connections. *Journal of Structural Engineering*. 141 (7). doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001150
- Drela, M. (2013). XFOIL [Software]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Elliott, D., Schwartz, M., Scott, G., Haymes, S., Heimiller D., y George, R. (2003). *Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca* (NREL/TP-500-34519). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Engineering Sciences Data Unit. (2001). *ESDU 86010: Characteristics of atmospheric turbulence near the ground Part III: Variations in space and time for strong winds (neutral atmosphere)*. Londres: ESDU.
- Glauert, H. (1935). Airplane Propellers. En W. F. Durand (Ed.), *Aerodynamic Theory: A General Review of Progress Under a Grant of the Guggenheim Fund for the Promotion of Aeronautics*, p. 169-360. Berlin: Springer.
- Hadavinia, H., et al. (2015). Characterising mode I/mode II fatigue delamination growth in unidirectional fibre reinforced polymer laminates. *Materials and Design.*, 66 (1), 93-102. doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.038.
- Halfpenny, A. (1998). Dynamic Analysis of Both On and Offshore Wind Turbines in the Frequency Domain Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Faculty of Engineering, University of London
- Hau, E. (2006). *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (2nd ed.). Berlin: Springer.

## Referencias

---

- Hernández-Escobedo, Q., Espinosa-Arenal, F., Saldana-Flores, R., y Rivera-Blanco, C. (2012). Evaluación del Potencial Eólico para la Generación de Energía Eléctrica en el Estado de Veracruz, México. *Dyna Journal*, 79 (171), 215-221.
- Hooper, T. (2017, marzo 29). Top 3D CAD Modeling Software: The 50 Best CAD Tools for Ideation, Rendering, Prototyping and More for Product Engineers. *Pannam*. Recuperado 25 de julio de 2018, de <https://www.pannam.com/blog/best-3d-cad-modeling-software/>
- IES Inc. (2017). Shape Builder [Software]. Recuperado de <https://www.iesweb.com/products/shapebuilder/index.htm>
- Ingram, G. (2011), Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. *Note on the BEM method*, 1-21.
- International Electrotechnical Commission. (2009). "IEC 61400-3" *Wind Turbines Part 3: Design requirements for offshore wind turbines* (1 st ed.). IEC.
- Jalayer, F., y Cornell, C. A. (2003). *A Technical Framework for Probability-Based Demand and Capacity Factor Design (DCFD) Seismic Formats*. Berkeley, USA: Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- Jaramillo, O.A., y Borja, M.A. (2004). Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: A bimodal probability distribution case. *Renewable Energy*, 29, 1613-1630. doi: 10.1016/j.renene.2004.02.001.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., y Scott, G. (2009). Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development (NREL/TP-500-38060). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Jureczko, M., Pawlak, M., y Mężyk, A. (2005). Optimisation of wind turbine blades. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3). 463-471. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.055
- Konuk, E., Özcan, C., y Sertsoy, G. (2017). Viscous Flow Analyzation of 2D Airfoil by Using Boundary Layer Methods. *Old Dominion University*. doi: 10.13140/RG.2.2.33755.26401.
- Landesberger, J. (2014), *The Blade Element Momentum Theory* (Bachelor Thesis). Technische Universität München Lehrstuf, Munich.
- Larsen, G. C., Hansen, M.H., Baumgart, A., y Carlén, I. (2002). Modal analysis of wind turbine blades, Forskningscenter Risoe, Risoe-R, 1181 (EN).
- MacNeal-Schwendler Corporation (2014). Patran, Student Edition [Software]. Recuperado de <http://www.mscsoftware.com/page/msc-nastran-student-edition>
- Madsen, J., Andersen, C. F., y Fuglsang, P. (2013). *EP 2 593 670 B1*. Paris, FR: European Patent Office.
- Marín, J.C., Barroso, A., París, F., y Cañas, J. (2009). Study of fatigue damage in wind turbine blades, *Engineering Failure Analysis*, 16(2), 656-668. doi: /10.1016/j.engfailanal.2008.02.005

## Referencias

---

- Matsuishi, M., Endo, T. (1968). Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress. *Japan Society of Mechanical Engineers*, Jukvoka, Japan.
- Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue, *American Society of Mechanical Engineers - Journal of Applied Mechanics*, 12(1), 159–164.
- Moriarty, P. J., Hansen, A. C. (2005). *AeroDyn Theory Manual* (NREL/EL-500-36881). Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Pablo-Romero, M., y Pozo-Barajas, R. (2017). Global changes in total and wind electricity (1990–2014). *AIMS Energy*. 5(2). 290-312. doi: 10.3934/energy.2017.2.290.
- Paganini, L.C., y Solari, G. (1987). Turbulence Modeling for Gust Loading. *Journal of Structural Engineering-ASC*. 8, 1-26.
- Pfaffel, S., Faulstich, S., y Rohrig, K. (2017). Performance and Reliability of Wind Turbines: A Review. *Energies*, 10 (11), 1904-1930. doi:10.3390/en10111904
- Pinzón-Paz, S. (2013). El perfil alar y su nomenclatura NACA, *Revista Ciencia y Poder Aéreo*, 8(1), 26-32. doi: 10.18667/issn.1909-7050
- Prandtl, L. y Betz A. (1927). Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik, Gotinga: Göttinger Nachr.
- Qiao, P., y Yang, M. (2006). Fatigue Life Prediction of Pultruded E-glass/Polyurethane Composites. *Journal of Composite Materials*, 40(9), 815-837. doi: 10.1177/0021998305055549
- Rafiullah K. (2013). *Delamination Growth in Composites under Fatigue Loading*, Tesis Doctoral. Technische Universiteit, Delft, Países Bajos.
- Robert McNeel & Associates (2017). Rhinoceros 3D [Software]. Recuperado de <https://www.rhino3d.com/>
- Roylance, D. (2001). Fatigue. *MIT Open Courseware, Yield and Fracture*, 1-10. Recuperado de [https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/MIT3\\_11F99\\_fatigue.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/MIT3_11F99_fatigue.pdf)
- Schubel, P., y Crossley, R. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 10 (9), 3425-3449, doi: 10.3390/en5093425
- Shared Hierarchical Academic Research Computing Network. (2019). Mechanical APDL Theory Reference [Base de datos]. Recuperado de [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans\\_thry/ansys.theory.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/ans_thry/ansys.theory.html)
- Shokrieh, M., y Rafiee, R. (2006). Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade. *Composite Structures*, 74, 332-342. doi: 10.1016/j.compstruct.2005.04.027.
- Skriver, S. (2011). How long will a wind turbine live. *Naturlig Energi*, Enero 2012, 1-17.

## Referencias

---

- Syed-Shahrukh, Z. (2013), *Study of composite wind turbine spars*, Tesis de Maestria. Lehigh University, Bethlehem, Pensilvania.
- Technical University of Berlin (2014). QBlade [Software]. Berlin: TU.
- Timmer, W. A., y Rooij, R.P.J.O.M. (2003). Summary of the Delft University Wind Turbine Dedicated Airfoils. *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of The ASME*, 125(4), 488-496. doi: 10.1115/1.1626129
- Timmer, W.A. (2010). Aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoils at high angles-of-attack. *Journal of Physics Conference: The Science of Making Torque from Wind, TORQUE: 2010*, 71-78. doi: 10.1533/9780857097286.1.109
- Timoshenko, S. (1957). *Resistencia de Materiales: Primera Parte Teoría Elemental y Problemas*. Madrid: Espasa-Calpe, S.A.
- University of Illinois Urbana-Champaign, Applied Aerodynamics Group: Department of Aerospace Engineering. (2018). UIUC Airfoil Coordinates Database [Base de datos]. Recuperado de [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html#N](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#N)
- Veers, P. (1988). *Three-Dimensional Wind Simulation*. Albuquerque, Nuevo México, California: Sandia National Laboratories.
- Wood, D. et al. (2012). *Wind energy potential in Mexico's northern border states*. Washington D.C.: Woodrow Wilson International Center for Scholars, Mexico Institute.
- World Wind Energy Association. (2018). Wind Power Capacity Reaches 539 GW, 52,6 GW Added In 2017. *WWEA Press Releases*. Recuperado 20 mayo 2018, de <https://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/>