

## Tema A1a Diseño Mecánico: Energía Eólica

# “Diseño, análisis y simulación estructural de un aspa para un aerogenerador de 30 kW”

*Jorge Alberto Díaz Pacheco, Isaac Hernández Arriaga, Alejandro González Canales, Isaias Alvarado Medrano*

*CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A, El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500.  
jorge.diaz@ciateq.mx, isaac.hernandez@ciateq.mx, alejandro.gonzalez@ciateq.mx, isaias.alvarado@ciateq.mx*

---

## RESUMEN

---

En este artículo, se presenta el diseño estructural de un aspa de 6 metros de longitud mediante el uso del software FOCUS 6.3. Esta aspa se utiliza en un aerogenerador de eje horizontal con una potencia nominal de 30 kW. El diseño se realiza mediante el Metodo de Análisis Aeroelástico, el cual está definido en la “Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño” de la Comisión Electrotécnica Internacional. El presente estudio comprende una simulación aeroelástica inicial bajo ciertos casos de carga calculados de acuerdo al diseño del aspa. En base a los primeros resultados de la simulación se realiza el rediseño estructural interno del aspa. Se realiza una segunda simulación aeroelástica con nuevos casos de carga, con la finalidad de alcanzar los Factores de Seguridad Parciales de la Norma IEC 61400-1 para la deflexión, las deformaciones, la fatiga y el pandeo.

---

*Palabras Clave: Aeroelástico, cargas, frecuencia natural, viga en I, fatiga y fibras compuestas*

## ABSTRACT

---

In this article, we present the structural design of a 6 meters length blade with the use of the software FOCUS 6.3. This blade is used in a 30 kW horizontal axis wind turbine. The design is done with the Aeroelastic Analysis Method, which is defined in the standard "IEC 61400-1 Part 1: Design Requirements" of the International Electrotechnical Commission. The present study comprises an initial aeroelastic simulation under certain cases of load calculated according to the blade design. Based on the first simulation results, the internal structural redesign of the blade is done. A second aeroelastic simulation is carried out with new load cases, in order to reach the Partial Safety Factors according to the IEC 61400-1 standard for deflection, deformation, fatigue and buckling.

---

*Keywords: Aeroelastic, loads, natural frequency, shear web, fatigue and composite fibers,*

---

## 1. Introducción

El diseño interno de aspas de turbinas eólicas ha tenido una evolución marcada en cuanto a su configuración estructural, desde los materiales empleados hasta las topologías internas dependiendo del tamaño, con el fin de lograr una geometría óptima en cuanto a la cantidad de material y los factores de seguridad.

El diseño de aspas ha sido un reto, ya que estos elementos deben ser muy resistentes debido a las cargas que están

expuestos durante su operación o su estado estacionario, pero a la par deben ser ligeras, años atrás muy pocos materiales contaban con estas dos características. Con el desarrollo de materiales compuestos en la ingeniería aeroespacial, se comenzó a utilizar la fibra de vidrio y carbono, las cuales son muy resistentes además de mitigar el peso, aunque la fibra de carbono es más costosa, es utilizada en aspas de mayor tamaño debido a la gran concentración de cargas en diferentes zonas del aspa.

El diseño adecuado de un aspa es muy importante, ya que este elemento transmite las cargas producidas por el viento al

mismo sistema del aerogenerador y sus demás componentes, pudiendo reducir el tiempo de vida del aerogenerador. El diseño estructural del aspa ha ido evolucionando poco a poco, desde un aspa totalmente solidada hasta un aspa casi hueca con una estructura diseñada para soportar los esfuerzos normales (tensión y compresión) y esfuerzos cortantes, inducidos por las cargas del viento. Estas mejoras permitieron reducir los costos de manufactura, pero al mismo tiempo evoluciona el proceso de manufactura.

Sin embargo, no solo se han utilizado fibras de vidrio y/o de carbono, se emplean espumas de poliuretano o madera balsa, como núcleo para la Viga en I (*shear web*), la cual tienen como función soportar los esfuerzos cortantes producidos en la estructura del aspa. Los materiales que se utilizaban podían resistir altas magnitudes de cargas, pero por un tiempo limitado. Las aspas están sujetas a altos ciclos de carga identificados como fatiga (3-5 millones de ciclos), es por esto que el uso de fibras compuestas ha tenido mayor auge que otros materiales en el desarrollo de aspas para aerogeneradores [2].

Al paso de los años se han desarrollado nuevos conceptos, como *paneles sandwich*, conformando nuevos elementos estructurales para el aspa, el panel sándwich permite aumentar la rigidez en el aspa, además de evitar el pandeo de la pieza debido a la geometría y misma cantidad de capas de materiales.

Con el desarrollo de estándares y guías de diseño por parte de institutos de investigación, ha sido posible tener un panorama más amplio para el diseño de estos sistemas, como las Normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (por sus siglas en inglés IEC), en la serie 61400-1 la cual ha establecido las pautas de diseño de todo el sistema de una turbina eólica [3].

Se cuentan con otro tipo de guías de diseño, tales como:

- Germanischer Lloyd for Design of Wind Turbines de DNV/RISO
- Guideline for the Certification of Wind Turbines Edition 2010 de DNV/RISO
- DNCGL-ST-0376 Rotor Blades for Wind Turbines de DNV-GL

Aunque no son tan reconocidas como las Normas IEC, pero tienden a exigir un poco más en el diseño y el proceso de manufactura, permitiendo llegar a una certificación.

Gracias al desarrollo y los avances en el campo de la energía eólica, se ha logrado el desarrollo de softwares especializados para el diseño de aspas y/o el sistema de un aerogenerador, permitiendo el diseño y análisis de los perfiles aerodinámicos, la estructura del aspa, el control del sistema de orientación y protección, entre otras. Entre los que destacan en la industria son: FAST (NREL), QBlade, DeepLines Wind, FOCUS 6.3 solo por mencionar algunos

de ellos. La mayoría de estos softwares hacen uso de un código aeroelástico, el cual nos permite realizar un análisis aeroelástico (análisis dinámico, aerodinámico y elástico del aspa) por medio del Método de Elemento Finito.

---

## 2. Antecedentes

Dentro de las ramas del sector de la industria eólica mexicana, una de las que más lentamente se ha desarrollado es la de la fabricación de equipos y componentes para la energía eólica, particularmente la manufactura de turbinas eólicas. La tecnología que hasta ahora se ha desarrollado en México es la de pequeña escala, propicia para la generación distribuida de electricidad. Se define como pequeña escala a las turbinas eólicas cuya área de barrido es menor o igual a los 200m<sup>2</sup> y que corresponde a la generación de 10 kW a 50 kW de potencia. Tan solo dos esfuerzos de desarrollo de aerogeneradores han logrado tocar el terreno comercial. Uno de ellos es de la empresa Aeroluz y el otro de la empresa Potencia Industrial, ambas diseñan y fabrican pequeñas turbinas eólicas de 5 kW y 10 kW.

En México, la mayoría de los desarrollos de turbinas eólicas se han encaminado a la fabricación de prototipos de pequeña potencia, sin embargo, no se cuenta con registros de unidades vendidas. Bajo este contexto, existe en México la necesidad de desarrollar tecnología propia que permita tanto la independencia tecnológica del extranjero como el aumento de la competitividad a nivel mundial de la industria eólica nacional en el área del diseño y la fabricación de turbinas eólicas de baja y mediana potencia.

Para cubrir esta necesidad CIATEQ A.C. está desarrollando una turbina eólica con una potencia eléctrica nominal de 30 kW dentro del marco del Fondo Sectorial CONACYT-SECRETARÍA DE ENERGÍA-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA-Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico). Dentro de este desarrollo se incluye el diseño, la manufactura y pruebas de un aspa de 6 metros de longitud, es por ello que se está desarrollando este análisis estructural del aspa y objetivo principal de este artículo.

---

## 3. Desarrollo Teórico

Con base a la “Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño”, la cual menciona que uno de los métodos para el diseño de aspas es por medio de un Análisis Aeroelástico, el cual permite analizar los tipos de cargas que afectan el desempeño del aerogenerador, permitiendo obtener los valores de las fuerzas y momentos ejercidos sobre las aspas. De igual manera se menciona que el tiempo de vida de un aerogenerador es de aproximadamente 20 años, por lo que el diseño estructural del aspa se convierte imprescindible la realización de una simulación y análisis, tomando en cuenta el diseño aerodinámico, el diseño

estructural y los materiales empleados en la manufactura del aspa [3].

Previamente al diseño es indispensable tener la caracterización de los materiales a utilizar, es decir, conocer las propiedades mecánicas de los materiales compuestos de la resina utilizada y el respectivo refuerzo de fibra. Actualmente en México no existen materiales caracterizados y que sea de uso específico para aspas de turbinas eólicas, por lo que se tiene que recurrir a adquirir material del extranjero del cual ya existen bases de datos de la caracterización de estos materiales.

Una vez conocidas las propiedades se procede a realizar la configuración de material, de los cuales el aspa estará compuesta por: Resina (epoxi o polyester), adhesivo estructural, gel-coat, Fibra de vidrio Triaxial, bidireccional y unidireccional; fibra de carbono unidireccional y espuma para paneles sándwich; los cuales se adaptarán a la topología seleccionada, el diseñador dará los espesores, longitudes y número de capas de los materiales a utilizar los cuales estarán limitados al espacio disponible dentro del aspa.

Los elementos estructurales de un aspa y los que son más comunes se pueden observar en la Fig. 1, los cuales cumplen cierta función:

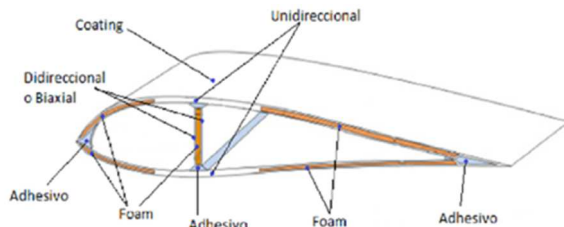


Figura 1 – Definición del concepto estructural [3].

- Caparazones del aspa (shells): dan la forma aerodinámica que permite generar las fuerzas de levantamiento y arrastre, permitiendo el giro de las aspas. Estos caparazones también forman lo que se conoce como lado succión y la presión del aspa. Están fabricado por lo general de fibra de vidrio triaxial, la cual forman un sandwich, el cual tiene la misma cantidad de capas e fibra en la parte interna y externa, lo que permite una mayor resistencia al pandeo que podría generarse en el aspa.
- Alma de la Viga I (Shear web): es el larguero principal del aspa, es la parte central del cuerpo de la Viga I, este elemento sostiene las cargas cortantes, por lo que sus refuerzos están orientados a  $\pm 45^\circ$  con respecto al eje Z del aspa.
- Alas de la viga (Spar caps): son los elementos que conforman la Viga I, se utilizan como refuerzos que permiten soportan los esfuerzos normales, evitando los movimientos de aleteo del aspa, por lo general se utiliza

fibra de carbono, lo que le proporciona una mayor rigidez al aspa.

- Refuerzos para el borde de ataque y el borde de salida del aspa, los cuales permiten la unión del lado succión y lado presión del aspa.
- Espuma o madera balsa (Foam or balsa Wood): este tipo de material se utiliza para la fabricación del alma de la Viga I, además de que se utiliza para refuerzo para el lado succión y lado presión, en la parte interna del aspa, incluso se puede utilizar madera balsa, por su ligereza.
- Coating: es el acabado que se le proporciona a la superficie de los caparazones del aspa, protegiéndolos de las condiciones ambientales a las que está expuesta el aspa.

Con la ayuda de un análisis aeroelástico se conoce el comportamiento estructural de los materiales tales como: deformaciones, fatiga, pandeo de secciones, deflexión, modos de vibración, estos resultados se comparan con los valores de diseño permisibles y se obtiene el factor de seguridad correspondiente que asegure la integridad del aspa durante su funcionamiento.

El sistema de un aerogenerador es complejo, este cuenta con una gran cantidad de subsistemas que actúan en conjunto, los sistemas prioritarios para un análisis de cargas son: las aspa el eje de baja velocidad y la torre, cada uno de estos elementos cuenta con un sistema de coordenadas, el cual permite entender como son ejercidas las fuerzas y los momentos en cada uno de los ejes, para el sistema de coordenadas del rotor y de las aspas, se puede observar en la Fig. 2 [3].

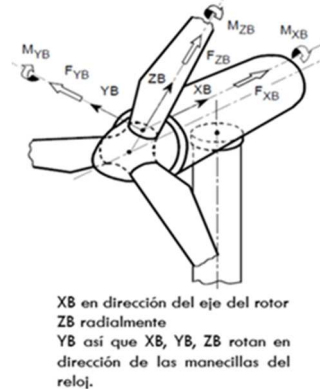


Figura 2 – Sistema de coordenadas del rotor de un aerogenerador [3].

Estos sistemas son útiles para identificar como las cargas actúan sobre cada eje. Están definidos tres métodos para el diseño de aerogeneradores, los cuales son especificados en la Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño y la 61400-2: Pequeños aerogeneradores, dichos métodos son:

- Diseño de Cargas Simplificadas
- Diseño con Análisis Aeroelástico
- Pruebas en físico

El método de Cargas Simplificada hace uso de ecuaciones, que permiten obtener las fuerzas y momentos, y tener un diseño preliminar de los elementos de la turbina, pero cabe mencionar que este método ofrece un diseño robusto, con factores de seguridad sobredimensionados, brindando mayor seguridad al sistema. Este método es explicado con más detalle en la “Norma IEC 61400-2 Parte 2: Pequeños Aerogeneradores”.

El segundo método, es el diseño de análisis aeroelástico, con el cual se obtienen resultados muchos más precisos que el método de casos de carga simplificada, ya que involucra para el análisis el funcionamiento de sistemas activos y de control.

La aeroelasticidad es una rama de la ingeniería aeronáutica la cual estudia la interacción mutua entre las fuerzas aerodinámicas, dinámicas y elásticas, como se muestra en la Fig. 3.



Figura 3 – Relación de fuerzas de la aeroelasticidad [4].

Dentro de la Norma 61400-1, se especifican las situaciones de diseño y los casos de carga. Estos casos de carga se obtienen de la combinación de las condiciones de operación del aerogenerador con las condiciones ambientales del lugar, estos son utilizados para determinar la integridad estructural del aerogenerador, las combinaciones son las siguientes [3]:

- El aerogenerador en operación con falla y con condiciones externas normales.
- El aerogenerador en operación con falla con condiciones externas extremas.
- El aerogenerador en operación con falla y condiciones externas apropiadas.
- El transporte, instalación y mantenimiento y condiciones externas apropiadas.

### 3.1 Deflexión del aspa

Una de las más importantes consideraciones es verificar la no interferencia estructural entre la torre y el aspa. el cálculo de deflexión es realizado con las magnitudes máximas para los casos de carga último y de fatiga. La deflexión causada puede ser calculada mediante metodos de modelos de viga “*Beam Models*” modelos de elemento finito

y similares, en la Fig. 4 se muestra como es la deflexión de la punta del aspa.

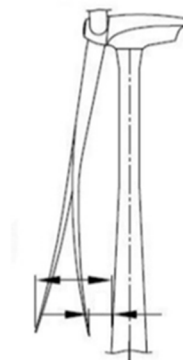


Figura 4- Deflexión en la punta del aspa durante su operación debido a las cargas presentes [4].

### 3.2 Estabilidad estructural

El aspa estará sometida a una carga variable dependiendo directamente de la velocidad del viento, esta generará fuerzas y momentos sobre toda la componente, por lo que es necesario un análisis estructural del aspa, esto permite observar el comportamiento de los materiales ante la presencia de los esfuerzos internos generados por las cargas, Cabe mencionar que la estructura no es completamente sólida, es hueca, por lo que dicho análisis se vuelve más complejo [4].

La estabilidad estructural comprende un análisis de deformaciones de los materiales con porcentajes de referencia previamente definidos y comúnmente dadas en micro-deformaciones normales mínimas y máximas que se obtienen mediante pruebas de caracterización de material.

Actualmente para el diseño de aspas, se usan los polímeros reforzados con fibras de vidrio y/o carbono los cuales mediante la orientación de las fibras se pueden alinear en la dirección de las fuerzas y de esta manera atacar dos problemas al mismo tiempo, el primero es aumentar la rigidez y disminuir el peso.

### 3.3 Fatiga

Es importante identificar los casos de carga críticos que puedan afectar el tiempo de vida del aerogenerador, principalmente los casos de carga de fatiga, ya que al ser un sistema con varios sistemas mecánicos en funcionamiento al mismo tiempo esto puede provocar que algún subsistema pueda fracturarse debido al daño acumulado por fatiga.

La fatiga es producida por los ciclos de carga constantes a los que están expuestos los materiales, para el caso del aspa, el cual se considera un elemento delgado, la fatiga se puede generar por las fuerzas de gravedad, fuerzas giroscópicas o las fuerzas producidas por el viento.

Para determinar el número de ciclos de carga para un aerogenerador durante su tiempo de vida se puede estimar con ayuda del diagrama de Goodman se encuentra definido y estandarizado por Germanischer Lloyd. La siguiente ecuación denota al diagrama empleado [6].

$$N = \left[ \frac{R_{k,t} + |R_{k,c}| - |2\gamma_{Ma} S_{k,M} - R_{k,t} + |R_{k,c}|}{2 \left( \frac{\gamma_{Mb}}{C_{1b}} \right) S_{k,A}} \right]^m \quad (1)$$

Donde N es el número de ciclos a tolerar, mientras que  $S_{k,M}$  y  $S_{k,A}$  son los valores medio y de amplitud del evento.  $R_{k,t}$  y  $R_{k,c}$  son las resistencias mecánicas a tensión y a compresión en corto plazo.  $\gamma_{Ma}$  y  $\gamma_{Mb}$  son los factores de seguridad parciales y finalmente  $m$  es la pendiente del Diagrama de Goodman, como se muestra en la Fig. 5 [6].

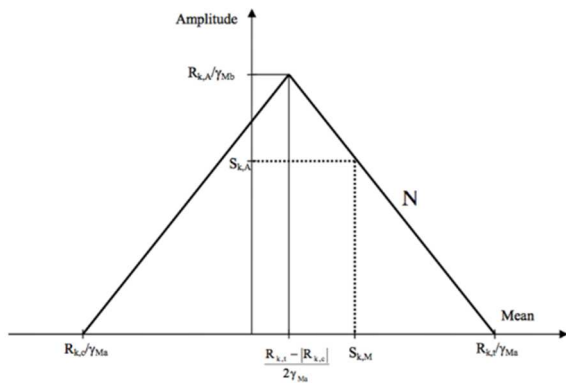


Figura 5- Diagrama de Goodman [4].

Esta ecuación es empleada para obtener la degradación de la resistencia mecánica de cada material, con base en resultados experimentales y la predicción del efecto de un ciclo (o carga oscilante) en la resistencia mecánica. Como resultado del diagrama de Goodman se puede predecir cuál es la resistencia mecánica de un material después de cierta carga y así predecir cuál será la expectativa de vida de cierto material.

### 3.4 Modos de vibración

Otro punto a destacar en el diseño de un aerogenerador son los modos de vibraciones producidas por el mismo sistema, estos deben estar bajo un minucioso análisis para que los modos de vibración natural no entren en problemas de resonancia entre sistemas.

El asa de un aerogenerador es una estructura flexible que vibrará con las fuerzas que actúan sobre la misma, tiene una infinidad de frecuencias naturales que provocan cierta cantidad de modos de vibración [7]. Los modos de vibración más comunes se muestran en la Fig. 6 [7].

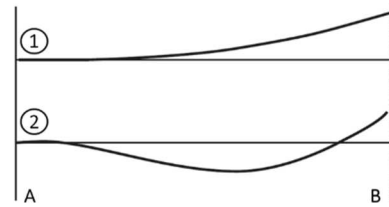


Figura 6 – Diagrama de los dos primeros modos de vibración de un asa, empotrada del lado A [7].

Un aerogenerador puede tener ciertos modos de vibración, como los que se muestran en la Fig. 7. Una parte importante de análisis de vibraciones en turbinas eólicas es un subsistema llamado Rotor-Torre, esto es el acoplamiento de vibraciones entre el rotor y la torre, el cual está sujeto constantemente a una autoexcitación [8].

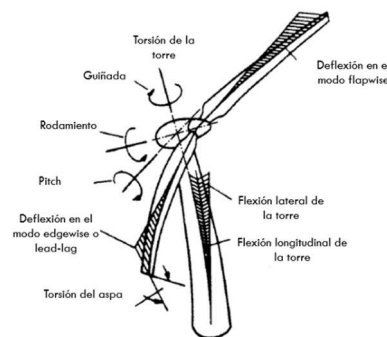


Figura 7 – Grados de libertas de vibración para un aerogenerador [8].

Con ayuda del Diagrama de Campbell, se puede observar el valor de la frecuencia que se tiene que evitar alcanzar o llegar entre la frecuencia del rotor y la torre, como se muestra en la Fig. 8 [8].

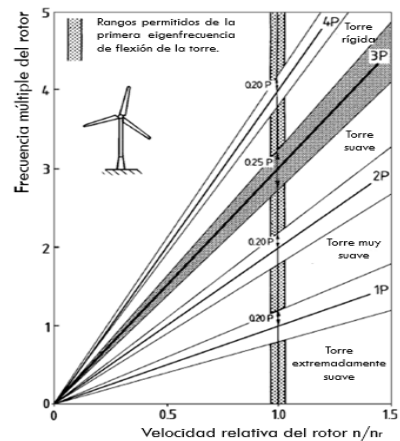


Figura 8 – Rigidez de una torre en el diagrama de Campbell de resonancia para un aerogenerador de tres palas [8].

Los modos de vibración principal y de mayor interés son [10]:

- Deformación en dirección de aleteo del aspa, fuera del plano de rotación (flapwise).
- Deformación en dirección de canto del aspa, dentro del plano de rotación (edgewise).
- Momento de torsión sobre el mismo eje del aspa, deformación torsional.

Estos modos de vibración pueden ser evitados o reducirse por medio de un diseño rígido del aspa, pero esto provocaría un aumento de peso en la misma por lo que deber existir un balance peso-rigidez que lleve a un diseño económico y a la vez rígido.

### 3.5 Pandeo

El pandeo es un modo de falla que se caracteriza por un cambio súbito en la configuración del aspa donde se adquiere un nuevo estado de equilibrio tras experimentar una carga superior a la carga crítica. Para solucionar el problema, se recurre a métodos como el de Roark, Megson, entre otros típicos; FOCUS 6 utiliza el método de *Finite Strip Method* para la solución FEM adquiera una solución o un modo (forma) de pandeo al asumir un determinado número de longitudes medias de onda en cada dirección, donde al sustituir dicha suposición, se puede encontrar el estado crítico de pandeo en un locación, este proceso se auxilia de un análisis de eigen-valores para establecer las cargas críticas y modos de pandeo.

El pandeo puede afectar la configuración del diseño del *sandwich*, el cual deformara la superficie aerodinámica del aspa y los elementos estructurales internos del aspa, provocando un tiempo de vida menor al que se ha diseñado, en la Fig. 9 se observa el cambio en la geometría del aspa al estar expuesta a este tipo de fenómeno estructural.

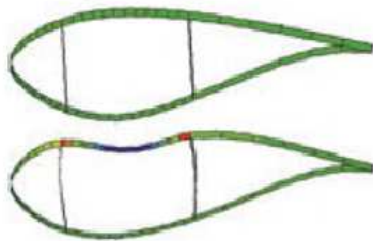


Figura 9 – Visualización del pandeo en una sección transversal de un aspa.

### 3.6 Factores de seguridad

Por medio de los Factores de Seguridad es posible determinar si los valores obtenidos con el Análisis Aeroelástico son adecuados para obtener la certificación para el aspa.

Los Factores de Seguridad empleados en el diseño de componentes para el aerogenerador son resultado del producto de los factores de seguridad parciales por carga, material y por consecuencias de falla.

Los factores de seguridad parciales son variables, los cuales dependen del tipo de componente y del análisis que se efectuó sobre ellos, los análisis que se efectúan son:

- Resistencia última
- Falla por fatiga
- Estabilidad (pandeo)
- Deflexión crítica (aspa en dirección de la torre)

La Tabla 1 muestra los factores de seguridad parciales y el factor de seguridad total para los diferentes análisis.

Tabla 1 – Factores de seguridad.

	Falla por resistencia última	Falla por fatiga	Falla por pandeo	Falla por deflexión
$\gamma_r$	1.35	1	1	1.35
$\gamma_m$	1.2	1.12	1.2	1
$\gamma_n$	1.0	1.15	1.15	1
$\gamma_{diseño}$	1.62	1.38	1.38	1.35

## 4. Metodología

Para el proceso de diseño del aspa, previamente se realizó una simulación aeroelástica con ayuda del software FOCUS 6.3, el cual hace uso de un código aeroelástico llamado, Phatas (*Program for Horizontal Axis wind Turbine Analysis and Simulation*) y con ayuda del Método de Elemento Finito permite realizar la simulación con resultados precisos sin la necesidad de realizar numerosas iteraciones para verificar un cambio en los resultados.

FOCUS 6.3 mediante un módulo llamado *Blade Modeler* permite realizar la simulación de varios post-procesos, los cuales son los cálculos requeridos para determinar si el aspa cumple con los Factores de Seguridad establecidos por la “Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño”. La mayoría de los resultados calculados dependen de los materiales seleccionados para el aspa y las estructura de cada uno de los elementos del aspa.

Los post-procesos para la simulación aeroelástica se mencionan a continuación:

- Generación de Malla de Elemento Finito
- Cálculo de eigenfrecuencias
- Casos de carga críticos
- Cálculo de la deflexión del aspa
- Análisis estructural
- Análisis de fatiga
- Análisis de pandeo



#### 4.1. Simulación aeroelástica

De acuerdo con el diseño estructural del aspa, es posible obtener una visualización más clara por medio de corte transversales, como se observa en las Fig. 10 (a)-(b).

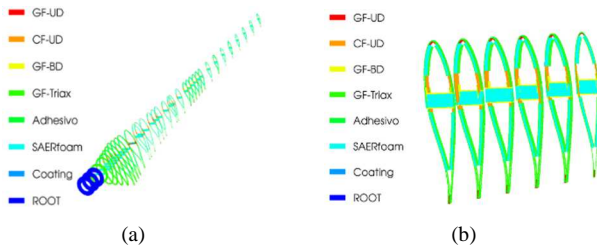


Figura 10 - (a) Aspa en secciones transversales; (b) Cortes transversales del aspa.

##### 4.1.1 Generación de Malla de Elemento Finito

Para la elaboración de la malla de elemento finito dentro del software, se definen la cantidad de puntos circunferenciales y radiales, de este post-proceso dependerán el resto de los cálculos para la simulación aeroelástica. Como se muestra en la Fig. 11.

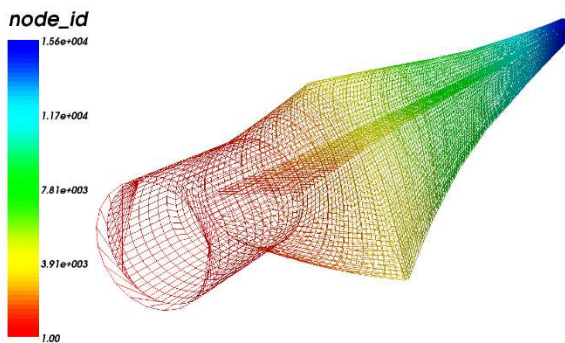


Figura 11 – Mallado de Elemento Finito con el software FOCUS 6.3.

##### 4.1.2 Cálculo de eigenfrecuencias

Para el cálculo de las eigenfrecuencias, arroja resultados de las frecuencias naturales del aspa para cada uno de los modos de vibración del aspa, dichos modos son:

- Deformación del aspa fuera del plano de rotación (*Flapwise*)
- Deformación del aspa dentro del plano de rotación (*Edgewise*)
- Deformación sobre el mismo eje del aspa (*Torsion*)

Es importante saber el valor de dichas eigenfrecuencias, para evitar que entren en resonancia con la frecuencia natural del rotor, al igual que la frecuencia de la torre, con la ec. (2) es posible determinar la frecuencia del rotor.

$$f = \frac{(RPM)(F.S.)}{60s} \quad (2)$$

Donde el RPM son el número máximo de revoluciones posibles, F.S. es un factor de seguridad y  $f$  es la frecuencia natural.

Sustituyendo los valores en la ec. (2), obtenemos que la frecuencia natural del rotor es:

$$f = \frac{(120RPM)(1.2)}{60s} = 2.4 \text{ Hz}$$

Para determinar la frecuencia del aspa nos basamos con la Tabla 2, los cuales se obtienen del Diagrama de Campbell, el cual nos indica el rango de frecuencias que debemos evitar.

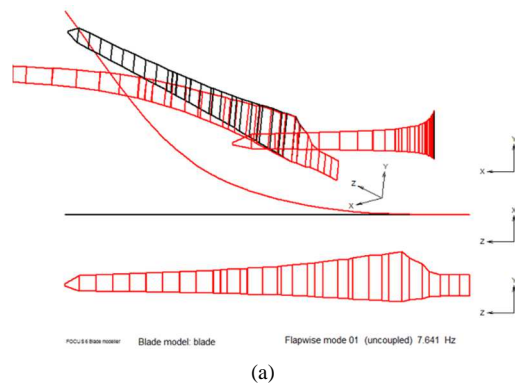
Tabla 2 – Frecuencia rotacional del rotor.

RPM	1P (Hz)	2P (Hz)
100 (Nominal)	1.667	3.333
120 (Máxima)	2	4

Como recomendación de la empresa consultora Snel Wind, se propone un Factor de Seguridad de 1.15, el cual se multiplica por la frecuencia 2P máxima, dando:

$$f = 4 \times 1.15 = 4.6 \text{ Hz}$$

De los resultados obtenidos de las eigenfrecuencias, se obtiene que la frecuencia natural de los dos primeros modos de vibración del aspa son los que se muestran de las Figs. 12 (a)-(b).



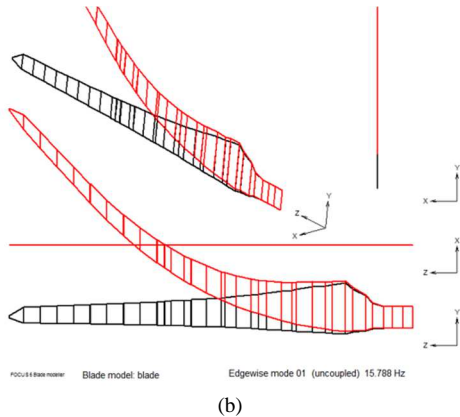


Figura 12 – (a) Modo flapwise [7.6 Hz]; (b) Modo edgewise [15.7 Hz].

Por lo tanto, se confirma que las frecuencias naturales de los dos primeros modos de vibración no se acercan a los 4.6 Hz, evitando la resonancia.

#### 4.1.3 Casos de carga críticos

El software proporciona un total de 2000 casos de carga, a los cuales el sistema del aerogenerador puede estar expuesto durante su funcionamiento y/o estado estacionario, por lo que con uno de los post-procesos denominados LOADex, permite simular dichas condiciones de cargas con las características del aerogenerador y del viento, proporcionando los casos de carga críticos, los cuales serán seleccionados para la simulación del resto de los post-procesos.

Los resultados del análisis aeroelástico de las cargas críticas proporcionan valores de fuerzas y momentos en cada uno de los ejes del sistema de coordenadas del asa.

Los momentos y fuerzas que se calculan son:

- Momento resultante en el asa (Nm)
- Momento de flexión de aleteo en el asa (Nm)
- Momento de flexión de canto en el asa (Nm)
- Momento torisonal en el asa (Nm)
- Fuerza resultante cortante en el asa (N)
- Fuerza de aleteo cortante en el asa (N)
- Fuerza de canto cortante en el asa (N)
- Fuerza de tensión en el asa (N)

Como resultado de este proceso, se obtuvieron 10 casos de carga críticos de los cuales 6 corresponden a casos de carga extrema y 4 a casos de fatiga.

#### 4.1.4 Cálculo de eigenfrecuencias

Para el post-proceso de la deflexión del asa se utilizaron los 10 casos de carga críticos calculados con el LOADex, con este cálculo es posible determinar la distancia que se desplaza la punta del asa hacia la torre, en dirección del viento (coordenada x), esto permite evitar el choque entre

ambos componentes en un estado de operación del aerogenerador. De esta manera determinar si la rigidez del asa es lo suficientemente adecuada.

La Fig. 13, muestra la deflexión en la coordenada X y para la coordena Y, dando un desplazamiento máximo de 28 cm en la coordenada X, esta deflexión es generada con el caso de carga más crítico, de los 10 casos de carga calculados.

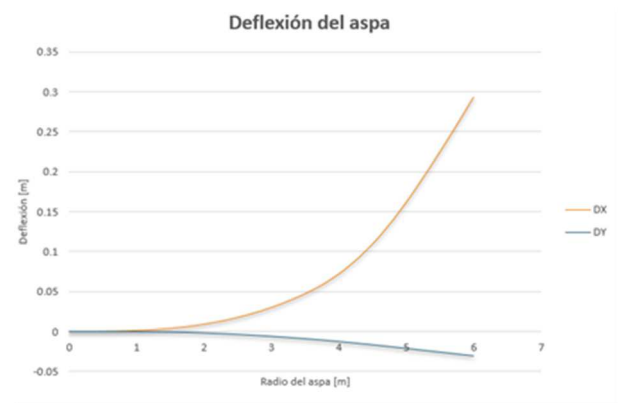


Figura 13 – Deflexión del asa en la coordenada X y Y de la primera simulación aeroelástica.

#### 4.1.5 Análisis estructural

Para el post-proceso de las deformaciones sobre el asa, se consideran las deformaciones máximas y mínimas, se debe de cuidar que dichas deformaciones de tensión y compresión normal máxima y mínima para cada material no sean mayores a los valores permisibles. Los valores de EPS se pueden observar en la Tabla 3.

Tabla 3 – Valores permisibles de tracción y compresión de los materiales del asa

Material	EPS_T	EPS_C
Fibra de vidrio UD	1.83%	1.47%
Fibra de vidrio BD	4.77%	2.52%
Fibra de vidrio TRIAX	2.58%	1.43%
Fibra de carbono UD	1.25%	0.71%

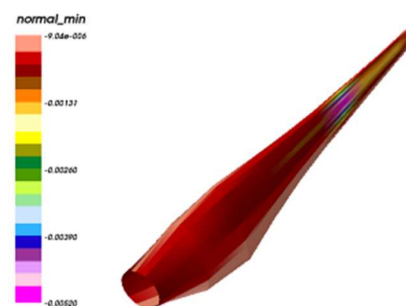


Figura 14 – Deformación mínima del lado succión del asa.



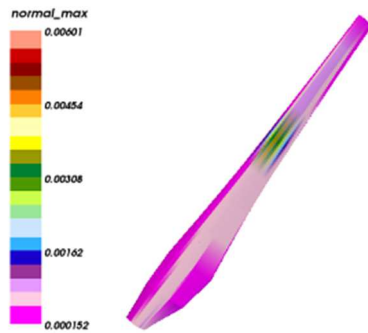


Figura 15 – Deformación máxima del lado succión del aspa.

#### 4.1.6 Análisis de fatiga

Para el post-proceso de la fatiga, es posible visualizar en FOCUS las zonas donde se produce mayor fatiga, para el caso del aspa, las zonas rojas como se observa en las Figs. 14 y Fig. 15 se nota daño por fatiga con los casos de carga simulados, por lo que se requiere reforzar dichas zonas. En la Fig. 16(a)-(b) y Fig. 17(a)-(b) se muestra poca presencia de fatiga, por lo que requiera de una menor cantidad de capas de fibra de vidrio, en comparación de los demás elementos.

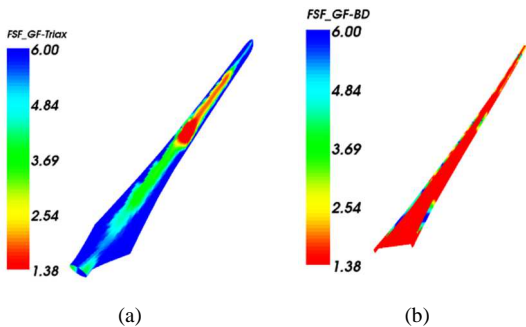


Figura 16 – (a) Fatiga en los shells del aspa; (b) Fatiga en el shear web del aspa.

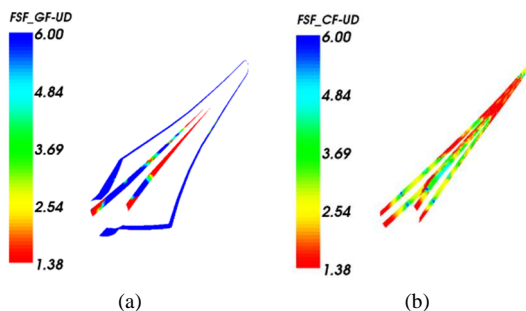


Figura 17 – (a) Fatiga en los spar caps de fibra de vidrio unidireccional; (b) Fatiga en los spar caps de fibra de carbono unidireccional.

Para el post-proceso del pandeo del aspa, se define en el software cierta cantidad de secciones las cuales están expuestas al pandeo debido a las cargas extremas, las cuales son modeladas como paneles. Estas secciones se definen con el módulo *Blade Modeler*, el cual lo hace por medio de líneas a lo largo de toda el aspa, desde la raíz hasta la punta.

Para el análisis del pandeo, se requiere conocer el Factor de Reserva, el cual es de 1.38 para este análisis, dicho valor es obtenido de la “Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño”. Los resultados obtenidos en este análisis proporcionan las cargas más representativas, para cada sección puede ser un caso de carga diferente, además de que proporciona un Factor de Carga Crítico, el cual debe ser mayor al Factor de Reserva ya mencionado.

El post-proceso se realizó a tres distancias, a una de 800 mm, 1800 mm y 2800 mm, medidos desde la raíz a la punta del aspa, ya que a estas distancias es donde hay mayor cantidad de capas de fibras de vidrio y de carbono. En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos de los factores de carga críticos y el caso de carga correspondiente a una distancia de 1800 mm.

Tabla 4 – Factores de carga crítica del post-proceso de pandeo a una distancia de 1800 mm.

Distancia a 1800 mm	
Caso de Carga	Factor de carga crítico
13205	13.32
61101	18.12
<b>62092</b>	<b>6.59</b>
61101	36.17
13205	20.94
61101	80.7
61101	28.91

Se observa que en el caso de carga 62092, se da un factor de carga crítico mínimo de 6.59, en comparación de los demás es el valor más pequeño, y a su vez es mucho mayor que el Factor de Reserva de 1.38, por lo que el diseño estructural del aspa tiene la suficiente cantidad de material para resistir al pandeo.

#### 4.2. Rediseño estructural interno del aspa

De acuerdo a los resultados obtenidos con la primera simulación aeroelástica, se pudo observar que los factores de seguridad para el post-proceso de fatiga no fueron adecuados, por lo que se realiza un rediseño en la estructura interna del aspa, donde se nota mayor fatiga producida.

Como se muestra en las Figs. 16(a)-(b), la fatiga se da en los spar caps de fibra de vidrio unidireccional, en la fibra de vidrio bidireccional y en los spar caps de fibra de carbono unidireccional.

Por lo que se agregan más capas de fibras de vidrio y de carbono, con la finalidad de reforzar las zonas donde la fatiga sea más notable, cabe mencionar que en este análisis de realiza con el caso de carga crítico. Este aumento de capas incrementa el peso del aspa, de 74 kg a 93.7 kg, la fibra de carbono unidireccional fue la que provoca en su mayoría el aumento de peso del aspa, pero esto le proporcionara una mayor rigidez y resistencia ante las cargas críticas a las que este expuesta.

Con ayuda del visualizador del post-proceso de la malla de elemento finito, es posible observa el cambio en los espesores de cada uno de los elementos del aspa debido al aumento de capas de fibra de vidrio y de carbono.

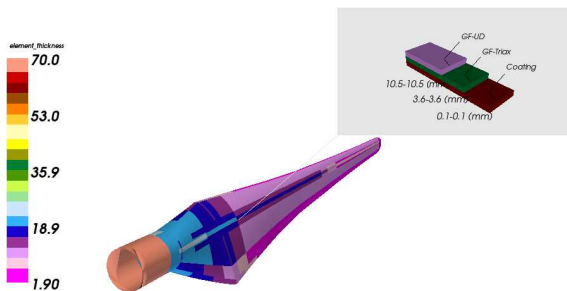


Figura 18 – Espesor de las capas de los materiales del aspa con el primer diseño.

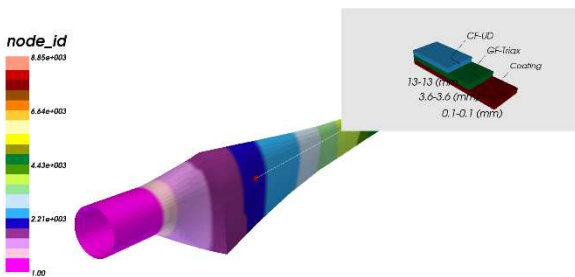


Figura 19 – Espesor de las capas de los materiales del aspa con el rediseño de la estructura interna del aspa.

Como se observa en la Fig. 18, el cual muestra diseño del aspa en la primera simulación aeroelástica, se muestra el espesor de las capas de las fibras del aspa, donde se observa que la fibra de vidrio unidireccional es de 10.5 mm y en la Fig. 19, con el rediseño estructural interno, se observa que ahora en lugar de la fibra de vidrio unidireccional, hay fibra de carbono unidireccional con un espesor de 13 mm.

Esto se debe a que se movieron de posición las capas de fibra de los spar caps de fibra de vidrio al igual que los spar caps de fibra de carbono, además de modificar la longitud de dichas capas.

El rediseño del aspa implica que se tiene que realizar una segunda simulación, donde se obtendrán nuevos casos de

carga, ya que los momentos y fuerzas ejercidos sobre el aspa cambian debido al rediseño, esto le da mayor rigidez al aspa, por ello se obtienen nuevos casos de carga.

## 5. Resultados y análisis de resultados

Para el análisis de los resultados obtenidos en ambas simulaciones, se consideró los cambios de masa del aspa, las eigenfrecuencias del aspa (acopladas y no acopladas), los diferentes casos de carga obtenidos en cada simulación aeroelástica, la deflexión del aspa, las deformaciones máximas y mínimas en cada uno de los elementos del aspa, la fatiga producida en el aspa y el pandeo producido en las fibras de vidrio y de carbono que conforman el *sandwich*.

Los resultados obtenidos de la fatiga producida en la primera simulación aeroelástica no satisfacen los valores de los Factores de Seguridad establecidos por la Norma IEC 61400-1, por lo que un rediseño en la estructura interna del aspa se realizó, reforzando las zonas de los elementos del aspa donde se produce fatiga. A continuación se muestran los resultados obtenidos de ambas simulaciones, donde se puede observar la mejora con el rediseño del aspa.

### 5.1. Peso del aspa

La Tabla 5, muestra el peso de cada uno de los material empleados para la fabricación del aspa, cabe mencionar que este calculo lo proporciona FOCUS 6.3, el cual es posible gracias a las propiedades físicas y mecánicas que se le proporciona al software, además de que estos pesos ya involucra la cantidad de resina y catalizador correspondiente para cada uno de los materiales.

Tabla 5 – Comparación del peso de los materiales del aspa en ambas simulaciones.

Material	Simulación 1 - Peso (kg)	Simulación 2 - Peso (kg)
Fibra de Vidrio Unidireccional	3.6	7.1
Fibra de Vidrio Bidireccional	7.1	12.1
Fibra de Vidrio Triaxial	50.6	51.6
Fibra de Carbono Unidireccional	4.6	12.7
Adhesivo	0.9	0.9
Núcleo de espuma (SAERfoam)	7.2	7.2
<b>Peso final del aspa</b>	<b>74</b>	<b>93.7</b>

Se puede notar que el peso en el adhesivo y el núcleo de espuma no cambian, ya que esos materiales no sufren algún cambio. Como se observa, el cambio de peso fue grande, pero esto se debe principalmente al rediseño que se realice para alcanzar el Factor de Seguridad del aspa ante el análisis de fatiga.

## 5.2. Eigenfrecuencias

Para los resultados obtenidos del post-proceso de las eigenfrecuencias, se obtienen dos tipos de frecuencias, las acopladas y no acopladas, estas se presentan en la Tabla 6. Las acopladas no indican que los modos de vibración flapwise y edgewise interactúan al mismo tiempo, FOCUS nos proporciona más de 5 eigenfrecuencias, pero podemos notar que con el Modo 1, en la segunda simulación tiene un valor de 7.1 Hz, por lo que es mayor a 4.6 Hz como se había calculado anteriormente, por lo que no entrará en resonancia.

**Tabla 6 – Comparación de las eigenfrecuencias acopladas en ambas simulaciones.**

Eigenfrecuencias Acopladas	Simulación 1 (Hz)	Simulación 2 (Hz)
Modo 1	7.67	8.23
Modo 2	15.19	14.46
Modo 3	23.71	27.55
Modo 4	50.21	50.18
Modo 5	56.57	63.52

Para el otro conjunto de resultados del post-proceso, nos entrega valores de las frecuencias naturales no acopladas, para cada uno de los modos de vibración del aspa, se pueden observar en la Tabla 7. Esto quiere decir que muestra a que frecuencia se presenta un modo de vibración de manera independiente y como se observa, tanto en la primera simulación como en la segunda simulación el valor es mayor a los 4.6 Hz por lo que no hay problema de resonancia.

**Tabla 7 – Comparación de las eigenfrecuencias no acopladas en ambas simulaciones.**

Eigenfrecuencias No Acopladas	Simulación 1 (Hz)	Simulación 2 (Hz)
Flapwise 1	8.12	8.17
Flapwise 2	22.95	26.88
Lead-lag 1	16.22	14.90
Lead-lag 2	53.79	52.45
Torsión 1	71.19	68.27
Torsión 2	132.49	127.27

## 5.3. Casos de carga

Los casos de carga son diferentes tanto en la primera y segunda simulación, esto se debe a que al realizar el rediseño, las propiedades del aspa cambian, por lo que también los casos de carga. En la primera simulación se seleccionaron los de casos de carga de mayor impacto, 6 casos de carga extremos y 4 de fatiga.

Como recomendación del del Centro de Conocimientos WMC, para la segunda simulación, se utilizaron todos los casos de carga que FOCUS nos proporciona, y para los casos de carga extremos se seleccionaron 6 como en la primera simulación tal como se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8 – Casos de carga extremos y de fatiga utilizados en cada simulación.**

Casos de carga	Simulación 1	Simulación 2
Casos de carga extremos	13205	22363
	13269	62092
	61004	22366
	61101	62000
	62044	22587
Casos de carga de fatiga	62092	62030
	12130	
	12221	
	18090	
	64900	

## 5.4. Deflexión

Para la deflexión del aspa, se obtuvo una mejora notable en la segunda simulación aeroelástica en comparación de la primera, esto debido a que la rigidez del aspa aumentó debido a que se agregaron más capas de fibra de vidrio y de carbón durante el rediseño estructural interno.

En la Tabla 9 se muestra la deflexión en el eje X y eje Y en el sistema de coordenadas del aspa para ambas simulaciones. Se aclara que esta deflexión solo se presenta con un caso de carga extremo, el cual tiene un periodo de ocurrencia de hasta 50 años, como lo establece la Norma IEC.

La deflexión de interés es en la coordenada X, quiere decir que una carga extrema puede flexionarla en dirección del viento, provocando un impacto con la torre. En la Tabla 9 se muestran la comparación de los resultados en la simulación 1 y 2.

**Tabla 9 – Comparación de la deflexión del aspa en ambas simulaciones.**

Deflexión	Simulación 1 (m)	Simulación 2 (m)
Coordenada x (dx)	0.288	0.176
Coordenada y (dy)	0.027	0.032

### 5.5. Deformaciones

Para el post-proceso de deformaciones del aspa, ya se había mencionado que los valores EPS de tensión y compresión no deben ser menores a los resultados del post-proceso.

En la Tabla 10, se observa el porcentaje de las deformaciones máximas y mínimas de la primera y la segunda simulación.

Y se puede observar que dichos porcentajes de deformaciones son mucho menores en comparación de los porcentajes EPS de las fibras compuestas, por lo que los resultados cumplen los factores de seguridad para este post-proceso desde la primera simulación.

**Tabla 10 – Comparación de los porcentajes de deformación en ambas simulaciones.**

Material	Simulación 1		Simulación 2	
	Def_Máx (T)	Def_Mín (C)	Def_Máx (T)	Def_Mín (C)
Fibras compuestas	0.60%	0.52%	0.047%	0.042%

### 5.6. Fatiga

Como se observa en los resultados de la primera simulación del aspa para el post-proceso de fatiga, no se cumplen con los factores de seguridad. Para los *shells* o conchas, la fatiga no es muy notoria, sin embargo, en los spar caps y en la Viga en I, la fatiga tiene mayor presencia, por lo que se requiere una mayor cantidad de capas para aumentar la resistencia del aspa.

Con el rediseño de aspa, se agrega capas de fibra de vidrio en los shells en la parte de la raíz, de igual manera se agrega mayor cantidad de capas de fibra de carbon unidireccional en los spar caps, además de cambiar su longitud y moviendolos de posición inicial, lo mismo se realiza con los spar caps de fibra de vidrio unidireccional.

Ya que estos elementos presentaban un mayor daño por fatiga y los spar caps son considerados los refuerzos que soportan las cargas normales del aspa.

En la segunda simulación, como se observa en los resultados del post-proceso, el Factor de Seguridad de 1.38 es alcanzado con un valor de 1.39, lo cual indica que el rediseño proporcione mayor resistencia ante la fatiga para los 4 elementos estructurales internos del aspa.

Se puede notar ciertas zonas de diferente color, pero esto se debe a que el mallado de elemento finito no cubre dichas zonas, por lo que se requiere una malla mucho más fina, que permita entregar datos más exactos, cubriendo toda la superficie del aspa.

### 5.7. Pandeo

Para la simulación del pandeo sobre el aspa, se realizó el análisis a tres distancias, de 800 mm, 1800 mm y 2800 mm, donde se presenta la mayor cantidad de capas y donde se forma el sandwich con las fibras compuestas (de vidrio y de carbono).

La Tabla 11 y Tabla 12, muestra los casos de carga más críticos e importantes con el Factor de Carga Crítico correspondiente, para cada una de las distancias ya mencionadas.

**Tabla 11 – Factores de cargas críticos para la primera simulación a diferentes distancias.**

Distancia a 800 mm		Distancia a 1800 mm		Distancia a 2800 mm	
Caso de Carga	Factor de carga crítico	Caso de Carga	Factor de carga crítico	Caso de Carga	Factor de carga crítico
13250	22.94	13205	13.32	13205	19.55
61101	31.88	61101	18.12	61101	25.07
61101	104.96	62092	6.59	61004	15.39
62092	78.31	61101	36.17	61101	57.65
13205	52.54	13205	20.94	13205	31.03
61101	116.35	61101	80.7	61101	128.78
61101	47.68	61101	28.91	61101	48.94

**Tabla 12 – Factores de cargas críticos para la segunda simulación a diferentes distancias.**

Distancia a 800 mm		Distancia a 1800 mm		Distancia a 2800 mm	
Caso de Carga	Factor de carga crítico	Caso de Carga	Factor de carga crítico	Caso de Carga	Factor de carga crítico
61100	31.42	61100	18.14	61100	23.61
61100	53.67	61100	24.31	61100	30.31
61100	422.53	61100	143.86	61100	208.35
61100	561.23	61100	190.91	61100	291.85
62000	103.56	62000	7.95	62000	16.29
62092	94.98	61100	40.55	61100	61.76
61100	69.22	61100	28.25	61100	41
61100	201.42	61100	123.46	61100	180.23
61100	76.77	62030	34.56	62030	57.17

El factor de seguridad para el pandeo es de 1.38, y como se puede notar en la Tabla 12, el Factor de Carga Crítica menor es de 7.95 a una distancia de 1800 mm, un valor más grande que el de 1.38, por lo que se cumple con el factor de seguridad.

## 6. Conclusión

Como ya se ha mencionado, las aspas son uno de los elementos más importantes que conforman al sistema del aerogenerador, además de la torre y del eje de baja velocidad del tren de potencia, ya que una gran cantidad de cargas extremas o de fatiga son soportadas por el aspa y a su vez puede transmitir esas cargas a los demás componentes del aerogenerador, lo que puede ocasionar que el tiempo de vida del aerogenerador sea mucho menor del que se ha establecido.

Los resultados que arroja el software FOCUS 6.3 de la simulación aeroelástica, permiten obtener la certificación para aerogeneradores, en conjunto con los Factores de Seguridad que marca la “Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño”, de la Comisión Electrotécnica Internacional.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la primera simulación aeroelástica, los factores de seguridad no se cumplían para los resultados obtenidos en la simulación de fatiga producida en cada uno de los elementos del aspa, para las deformaciones producidas en el aspa y el pandeo, los resultados obtenidos al parecer si cumplían con dichos factores de seguridad.

Por lo que se realizó un rediseño en la estructura interna del aspa en cada uno de los elementos que conforman el aspa, principalmente en las zonas donde se produce una mayor fatiga, agregando mayor cantidad de capas de fibra de vidrio triaxial en la parte de la raíz del aspa tanto para el lado succión como para el lado presión, dando un total de 26 capas de fibra de vidrio triaxial para cada uno de los lados, también agregando más capas de fibra de carbono unidireccional, cambiando la posición de los tapetes y su longitud para los Spar caps, para los Spar caps de fibra de [8]vidrio unidireccional se modificó su posición y la longitud de cada uno de los tapetes y para el shear web se agregaron mayor cantidad de capas de fibra de vidrio bidireccional que envuelven al shear web fabricado con el SAERfoam.

Estas modificaciones le proporcionaron al aspa una mayor rigidez en la raíz del aspa, lo cual nos permite obtener una mejor respuesta ante cargas extremas o de fatiga, así también evitando que la frecuencia natural de los modos del aspa entre en resonancia con la frecuencia de la torre, como desventaja esto provocó un aumento de peso en el aspa, de 75 kg hasta 95 kg, por el aumento de cantidad de capas de fibra de vidrio y de carbono, lo cual implica que se requiere mayor cantidad de resina y catalizador.

Con los resultados obtenidos en la segunda simulación aeroelástica, se logró alcanzar el factor seguridad mínimo, tanto para las deformaciones, la fatiga y el pandeo, además

de que la deflexión del aspa es de 17 cm en comparación de la primera simulación que se obtiene una deflexión de 28 cm, para un caso de carga extremo.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades del proyecto “P07 Integración y consolidación de capacidades nacionales para el desarrollo de pequeños aerogeneradores mediante el diseño, construcción y pruebas exhaustivas de un aerogenerador con capacidad de 30kW” que se desarrolla en el contexto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico) bajo los auspicios del Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética.

Los autores desean agradecer a los colegas investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas, por el apoyo y asesoramiento en el análisis de resultados obtenido con el software FOCUS 6.3. También agradecer al Ing. Remco Brood del Centro de Conocimientos WMC por su asesoría en el uso del software FOCUS 6.3. Además a cada uno de los colegas investigadores de CIATEQ del departamento de Turbomaquinaria del Grupo de Turbinas Eólicas, por su aportación para el desarrollo del proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Bir, G. & Migliore, P. (2004). Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two- and Three. Blade Rotors. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA. NREL/TP-500-31486.
- [2] Brondsted, P. (2013). *Advanced in Wind Turbine Blade Design and Materials*. Woodhead Publishing.
- [3] Burton, T. S. (2011). *Wind Energy Handbook*. JOHN WILEY & SONS.
- [4] Comisión Electrotécnica Internacional. (2014). *Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño*. Ginebra Suiza.
- [5] Cox, Kevin & Echtermeyer, Andreas. (2012). Structural design and analysis of a 10 MW wind turbine blade. ELSEVIER. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [6] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH. (2010). *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Hamburg, Germany.
- [7] Hansen, M. (2006). *Aerodynamics of Wind Turbines*. EARTHSCAN.
- [8] Hau, E. (2006). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics*. Springer.
- [9] Lanting, Zhang. (2012). Research on Structural Lay-up Optimum Design of Composite Wind Turbine Blade. ELSEVIER. Inner Mongolia University of Technology. Inner Mongolia, China.
- [10] Manwell, J. M. (2009). *Wind Energy Explained:*

*Theory, Design and Application.* Wiley.

- [11] Nelson, V. (2009). *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment.* CRC Press.
- [12] Nolet, Stephen C. (2011). *Composite Wind Blade Engineering and Manufacturing.* Massachusetts Institute of Technology, Warren, Rhode Island. TPI Composites, Inc.
- [13] Song, Fangfang., Ni, Yihua., & Tan, Zhiqiang. (2011). *Optimization Design, Modeling and Dynamics Analysis for Composite Wind Turbine Blade.* ELSEVIER. Zhejiang University, Hangzhou, China.