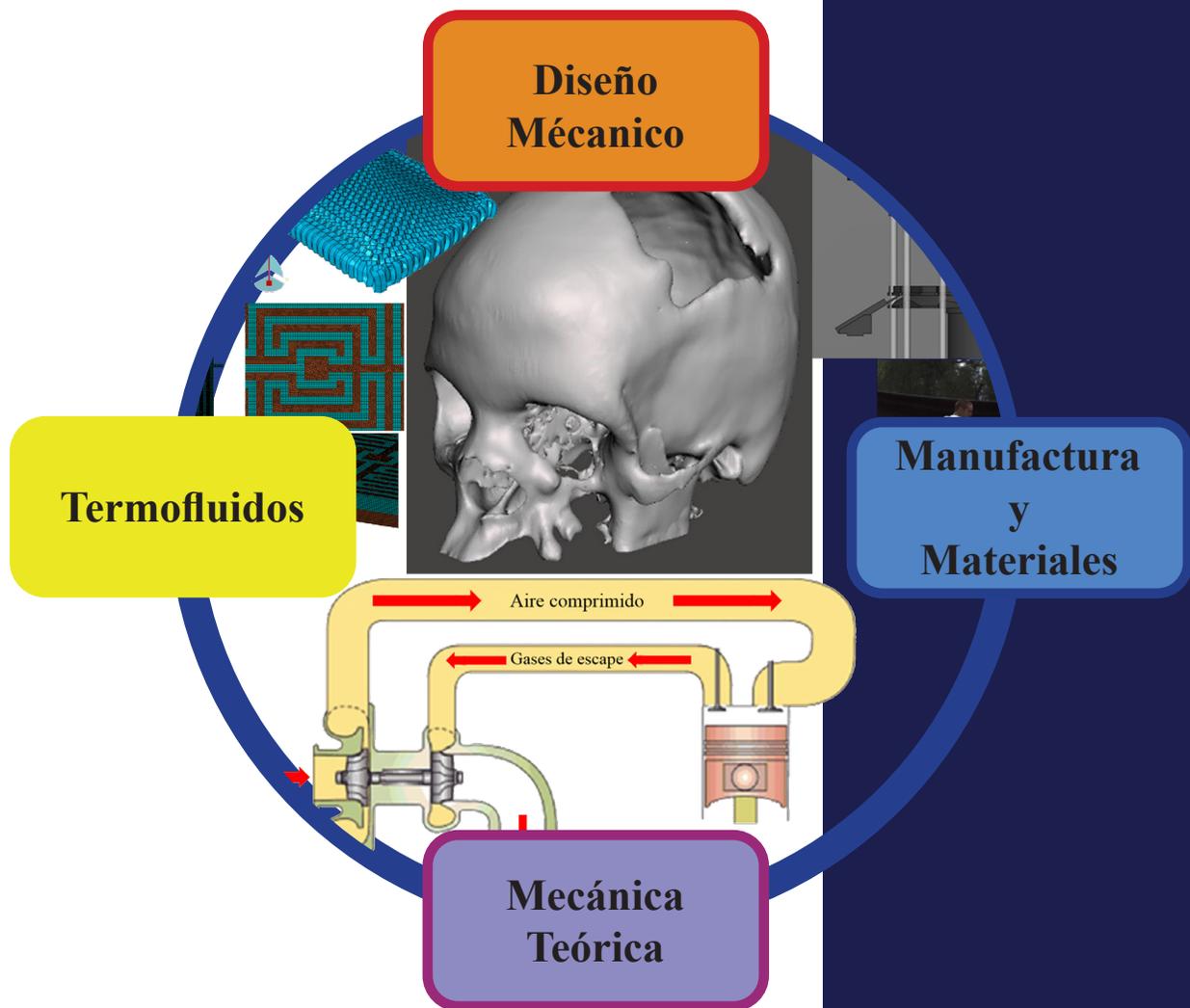


La Ingeniería Mecánica Impulsando el Desarrollo Nacional y la Innovación



La Ingeniería Mecánica Impulsando el Desarrollo Nacional y la Innovación



Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C.

Calle YUCALPETEN, Mz 30 Lt 8, Col. Cuchilla de Padierna, C. P. 14220 Del. Tlalpan, Ciudad de México

Copyright © SOMIM. Todos los derechos reservados.

Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación, o cualquier otro formato de almacenamiento, sin permiso expreso del editor.

Este libro y las contribuciones individuales contenidas en él están protegidos por copyright por el Editor

Avisos

Los conocimientos y las mejores prácticas en este campo cambian constantemente. A medida que nuevas investigaciones y experiencias amplíen nuestra comprensión de los fenómenos, puede ser necesario realizar cambios en los métodos de investigación y en la aplicación del conocimiento.

Los profesionales de la Ingeniería Mecánica y áreas afines, deben basarse en su experiencia y conocimientos para evaluar y utilizar la información, los métodos y/o los experimentos que se describen en el presente documento. No deben descuidar los aspectos de seguridad y asumir la responsabilidad en el uso de la información y métodos que se presentan.

En términos legales, ni la editorial ni los autores, colaboradores o editores asumen responsabilidad alguna por cualquier lesión y/o daño a personas o bienes como consecuencia de la responsabilidad de los productos, negligencia o del uso u operación de cualquier método, producto, instrucción o idea contenida en el material aquí expuesto.

Acceso abierto

Esta publicación proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global del conocimiento. Asimismo permite que se conozcan en forma abierta desarrollos tecnológicos e innovaciones de la Ingeniería Mecánica en México.

ISBN: 978-607-96746-7-0

CITACIÓN:

Se apreciará la citación del presente documento de la siguiente forma:

Jacobo V., Ayala A., Castro L., González L. Márquez U., Ramírez E., Ruiz O. (editores). La Ingeniería Mecánica Impulsando el Desarrollo Nacional y la Innovación. Ed. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C. ISBN 978-607-96746-7-0, Ciudad de México, octubre 2020

Diseño y validación de aspas para aerogeneradores de pequeña y mediana capacidad

1

Díaz Pacheco Jorge Alberto
Hernández Arriaga Isaac
González Canales Alejandro
Alvarado Medrano Isaías
Muñoz Hernández Guillermo

CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada

CONTENIDO

1 Resumen	3
2 Introducción	4
3 Antecedentes	5
4 Desarrollo Teórico	7
5 Metodología	16
6 Resultados y Análisis de Resultados	24
7 Conclusiones	34
Agradecimientos	35
Referencias	35

1. Resumen

En este capítulo, se presenta el diseño aerodinámico, el diseño estructural, el proceso de manufactura y los ensayos estáticos de un aspa híbrida para un aerogenerador de 30 kW, este aerogenerador es para una clase de viento III-S según la norma IEC 61400 (Comisión Electrotécnica Internacional, IEC por sus siglas en inglés). Las aspas se diseñaron aerodinámicamente bajo la teoría de momentos de elementos del aspa (BEM, blade element momentum) para obtener su geometría externa. La arquitectura estructural interna contiene una viga-I, la sujeción del aspa al cubo del aerogenerador es mediante tornillos T-bolts. Se le llama aspa híbrida ya que se utilizó una combinación de fibras de vidrio y fibras de carbono unidireccionales en las alas de la viga (spar caps) y núcleos estructurales. La manufactura del aspa, se consiguió con la planeación e implementación de 9 procesos principales, la técnica que se utilizó fue el Moldeo por Transferencia de Resina Asistida por Vacío (VARTM). Así mismo, el proceso tiene implementado herramientas de calidad como las 5's y la Planeación Avanzada de la Calidad del Producto (APQP) que permiten identificar y controlar variables críticas del proceso para su mejora continua, impactando directamente en reducción de tiempo y costos de producción. Por último, los ensayos estáticos fueron realizados conforme a la norma IEC 61400-23. Es importante mencionar que en este trabajo se presentan los avances realizados en la línea de investigación de “desarrollo de aspas” del CIATEQ A.C. y cuyos primeros resultados fueron publicados en el XXIII Congreso Internacional Anual de la Somim en el año 2017 con el artículo

A1_147 “Diseño, análisis y simulación estructural interna de un aspa para un aerogenerador de 30 kW”.

2. Introducción

El diseño estructural 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, los factores de seguridad, fabricación del aspa y validación del diseño en ensayos del aspa.

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 de 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 mismo, así mismo, se pueden evitar fallas catastróficas relacionadas a las frecuencias naturales del componente del aspa con el sistema del aerogenerador, incluso desprendimiento parcial o completo del componente debido a fallas internas. El diseño estructural del aspa ha ido evolucionando poco a poco, desde un aspa totalmente sólida 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 el Alma de Viga en I (shear web), la cual tienen como función soportar los esfuerzos cortantes producidos en la estructura del aspa, dichas componentes se pueden apreciar en la Fig. 1. 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 tanto de vidrio como de carbono ha tenido mayor auge que otros materiales en el desarrollo de aspas para aerogeneradores [1].

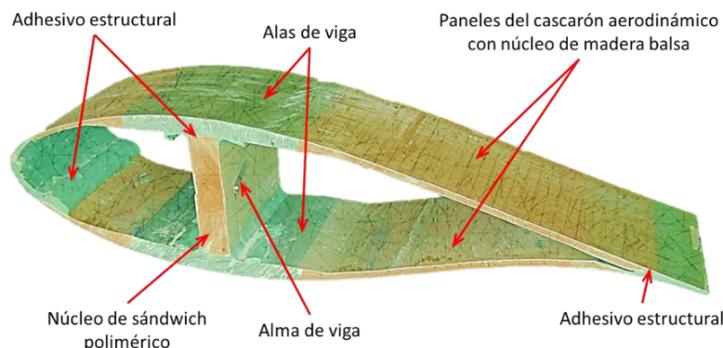


Figura 1. Componentes estructurales de un asa [1].

Con el desarrollo de estándares y guías de diseño por parte de institutos de investigación internacionales, ha sido posible tener un panorama más amplio para el diseño de este componente, como las Normas de la Comisión Electrotécnica Internacional, en la serie 61400-1, la cual ha establecido las pautas de diseño de todo el sistema de una turbina eólica [2] y la 61400-23 [3].

Se cuentan con otro tipo de guías de diseño para aspas, 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 ser más rigurosas en el diseño, en el proceso de manufactura y en los ensayos mecánicos, permitiendo llegar a una certificación del componente.

3. Antecedentes

El mercado de las energías renovables, y en particular el de la energía eólica, crece cada vez más en nuestro país. Este hecho coincide con la Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026, realizada por la Secretaría de Energía (SENER), la cual estima una participación de pequeñas instalaciones (en baja y mediana tensión) de autoabastecimiento en el mismo sitio de consumo de 10.5% de la capacidad adicional instalada con energías renovables y grandes hidroeléctricas, i.e. de 1.9 GW a 2.4 GW. Este componente de autoabastecimiento en pequeña escala se denomina energía distribuida, y dentro de las proyecciones se estima que 21.4% (461 MW) provenga de aerogeneradores. Esta participación se dimensionó en base a proyecciones de evolución de los costos unitarios de las tecnologías, de las tarifas eléctricas y de factores de aceptación y adopción de los usuarios a estas opciones. [4]

Con este crecimiento irán apareciendo nuevos actores en el sector de la industria eólica, incluyendo desarrolladores de proyectos y fabricantes de turbinas eólicas y de sus componentes. Actualmente, los aerogeneradores más grandes que se producen en nuestro país son de 10 kW, fabricados por las empresas *Aeroluz* y *Potencia Industrial*. Ambas diseñan y fabrican la mayoría de los componentes de sus aerogeneradores. Una de las

partes esenciales de los sistemas de conversión de la energía del viento son las aspas del rotor. En el caso de *Aeroluz*, ellos diseñan y fabrican sus aspas. *Potencia Industrial* las fabrica en México, pero el diseño es importado, realizado en E.U.A. Bajo este contexto, existe la necesidad en nuestro país 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 se desarrolló el *LAB-Eólica* de *CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada*, un laboratorio dedicado a realizar investigación aplicada, innovación y desarrollo tecnológico para mejorar las aspas, tanto de las turbinas eólicas que actualmente están en el mercado como de los nuevos diseños de turbinas que serán fabricadas en nuestro país; para poder ofrecer soporte técnico-científico y atender las necesidades de esta rama de la emergente industria eólica en México. Este laboratorio se puso en marcha a partir del 2014, dentro del marco del Fondo Sectorial Sustentabilidad Energética-CONACYT-Secretaría de Energía de la convocatoria 2013-03 “Centros Mexicanos de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico)” y es el resultado del proyecto estratégico El Proyecto P09 “Desarrollo de aspas para pequeños aerogeneradores (hasta 50 kW)”, cuyo objetivo general fue realizar el desarrollo tecnológico, manufactura y pruebas mecánicas de aspas para turbinas eólicas de baja potencia [5]. Este desarrollo atiende tres acciones estratégicas del mapa de ruta tecnológica de la energía eólica en tierra [6], a saber:

1. Desarrollar soluciones tecnológicas para la optimización de la operación y el mantenimiento de centrales eólicas.
2. Formar especialistas competentes (capacitados y certificados) para diseñar, instalar, operar y dar mantenimiento a las centrales eólicas.
3. Desarrollar cadenas de suministro nacionales enfocadas en la fabricación de componentes y prestación de servicios especializados para proyectos eólicos.

Las aspas desarrolladas en el *LAB-Eólica* para el proyecto P09, incluyeron diseño aerodinámico, estructural, manufactura y ensayos estáticos de aspas de 6 metros de longitud. Estas aspas fueron desarrolladas en el *LAB-Eólica* para el rotor del aerogenerador de 30 kW, Clase III-S, del proyecto estratégico P07 del CEMIE-Eólico “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 30 kW”.

Para el desarrollo de estas aspas se utilizaron materiales, estructuras y métodos de manufactura del estado de la técnica actual de la industria eólica global, lo cual ha permitido la creación de capacidades y la asimilación de la tecnología utilizada en grandes aerogeneradores. Esto abre la brecha para la introducción de nuevas empresas en la cadena de valor de la industria eólica en México, e.g. ofreciendo servicios de mantenimiento de aspas de gran envergadura de los parques eólicos nacionales. Esta es una gran oportunidad de mercado, tomando en cuenta que actualmente se han instalado 1,935 aerogeneradores,

dentro de 42 parques eólicos; que la vida útil de las aspas es de 20 a 25 años; y que el primer parque eólico en México fue instalado en 2007 [7].

Esta oportunidad está siendo atendida por del proyecto de Desarrollo de Tecnologías Locales en México (DETELM), financiado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, *Global Environment Fund*), a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El objetivo general es posibilitar el desarrollo local de turbinas eólicas para generación distribuida y contribuir a incrementar las capacidades locales de México, en materia de energía eólica. Se estructuró un programa que incluye el desarrollo de las aspas del proyecto Máquina Eólica Mexicana (MEM), que lo lleva a cabo un consorcio que incluye a la empresa privada Tecnología en Materiales Compuestos (TEMACO) y los centros de investigación; Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), CIATEQ A.C. y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) y Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de España y quien figura con Tecnólogo. Estas aspas en desarrollo tienen una envergadura de 30 metros y el rotor será capaz de producir 1.2 MW de potencia nominal.

4. Desarrollo Teórico

El análisis del comportamiento aerodinámico del aerogenerador puede comenzar sin ningún diseño previo de la turbina, tan solo considerando el proceso de extracción de energía. Un modelo simple, mejor conocido como “Modelo de Disco Actuador”, puede ser utilizado para calcular la potencia de salida del rotor de una turbina ideal y el empuje del viento sobre el rotor. [3] Existen otros métodos para el diseño de aerogeneradores:

- Teoría del Momento Unidimensional.
- Teoría del Elemento del Aspa.
- Teoría del Momento del Elemento del Aspa (por sus siglas en inglés BEM, Blade Element Momentum).

La Teoría del Momento del Elemento del Aspa (BEM), es usada para determinar la forma o geometría óptima del aspa y también predecir los parámetros de desempeño para un rotor ideal y condiciones de operación estacionaria. Esta teoría combina 2 métodos para un análisis de desempeño aerodinámico de un aerogenerador [3].

Con la combinación de estas teorías, se obtienen una serie de ecuaciones que pueden resolverse por medio de iteraciones. Actualmente existen programas que tienen programadas ambas ecuaciones. De las más representativas se enuncian a continuación [8]:

Ángulo de torsión

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \dots\dots\dots (1)$$

Cuerda

$$c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3BC_l \lambda_r} \dots\dots\dots (2)$$

Coefficiente de potencia

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \dots\dots\dots (3)$$

Coefficiente de levantamiento

$$C_L = \frac{2L}{\rho V_r^2 c} \dots\dots\dots (4)$$

Coefficiente de arrastre

$$C_D = \frac{2D}{\rho V_r^2 c} \dots\dots\dots (5)$$

Donde: λ_r = Relación de velocidad en la punta local [-]

r = Radio del aspa [m]

B = Número de aspas [-]

ρ = Densidad [kg/m³]

A = Área de barrido del rotor [m²]

V = Velocidad del viento [m/s]

L = Fuerza de levantamiento [N]

C_l = Coeficiente de levantamiento [-]

D = Fuerza de arrastre [N]

V_r = Velocidad relativa del viento [m/s]

P = Potencia [W]

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 [9]. 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 [2].

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 unidireccional, bidireccional y triaxial; 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. 2, los cuales cumplen cierta función:

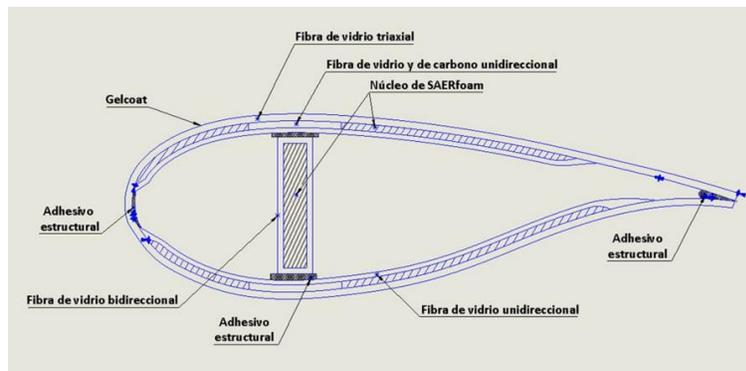
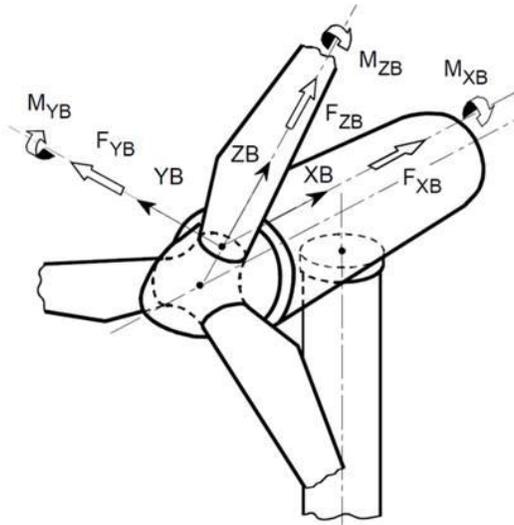


Figura 2. Definición del concepto estructural, Fuente propia.

-
- 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 le 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, etc., 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. 3 [2].



XB – En dirección del eje del rotor.
 ZB – Radialmente.
 YB – Por lo tanto XB. YB y ZB rotan en sentido de las manecillas del reloj.

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

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 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. 4.



Figura 4. Relación de fuerzas de la aeroelasticidad [9].

4.1 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 métodos de modelos de viga “*Beam Models*”, modelos de elemento finito y similar, en la Fig. 5 se muestra como es la deflexión de la punta del aspa.

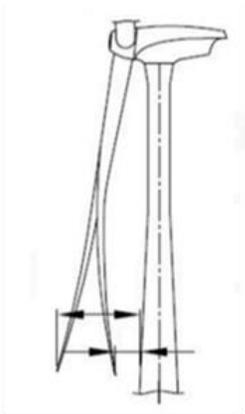


Figura 5. Deflexión en la punta del aspa durante su operación debido a las cargas presentes [9].

4.2 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 [9]. 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.

4.3 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 [10].

$$N = \left[\frac{R_{k,t} + |R_{k,c}| - |2\gamma_{Ma} S_{k,M} - R_{k,t} + |R_{k,c}||}{2 \left(\frac{\gamma_{Mb}}{C_{1b}} \right) S_{k,A}} \right]^m \dots\dots\dots (6)$$

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. γ_{Ma} y γ_{Mb} son los factores de seguridad parciales y finalmente m es la pendiente del Diagrama de Goodman, como se muestra en la Fig. 6 [10].

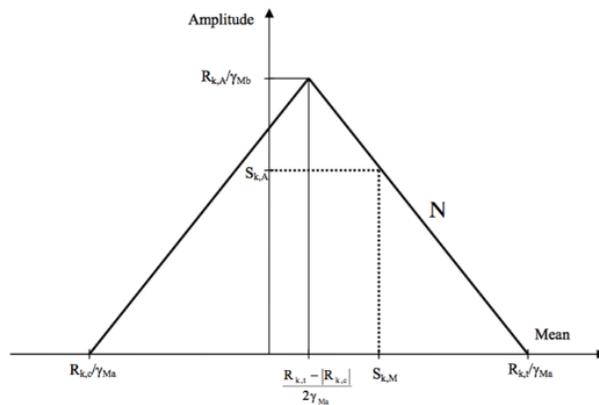


Figura 6. Diagrama de Goodman [10].

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.

4.4 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 aspa 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 [11]. Los modos de vibración más comunes se muestran en la Fig. 7.

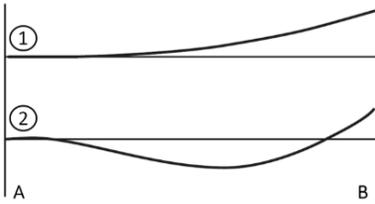


Figura 7. Diagrama de los dos primeros modos de vibración de un asa en una dirección (flapwise), empotrada del lado A y libre del lado B [11].

Un aerogenerador puede tener ciertos modos de vibración, como los que se muestran en la Fig. 8. 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 [12].

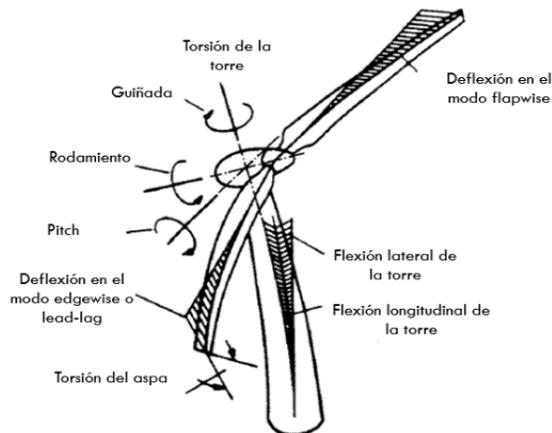


Figura 8. Grados de libertad de vibración para un aerogenerador [12].

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, se aprecia la frecuencia de excitación, denominada 1P, 2P y 3P, la cual se grafica contra la Velocidad del rotor” denominada n/n_r como se muestra en la Fig. 9 [12].

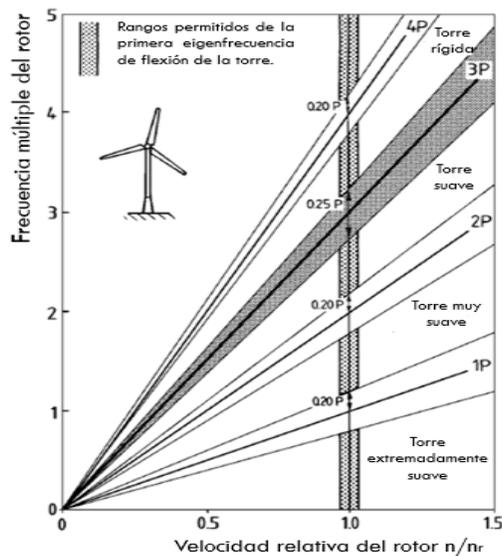


Figura 9. Rigidez de una torre en el diagrama de Campbell de resonancia para un aerogenerador de tres aspas [12].

Los modos de vibración principal y de mayor interés son [8]:

- 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 debe existir un balance peso-rigidez que lleve a un diseño económico y a la vez rígido.

4.5 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 *sándwich*, 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. 10 se observa el cambio en la geometría del aspa al estar expuesta a este tipo de fenómeno estructural.

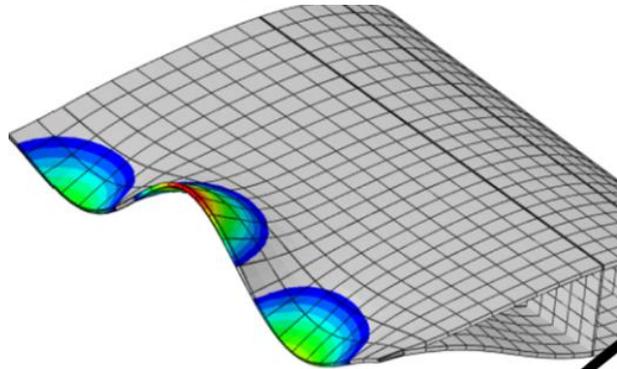


Figura 10. Visualización del pandeo en una sección transversal de un aspa [13].

4.6 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 efectúe sobre ellos, los análisis que se realizan 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.

Símbolo	Falla por resistencia última	Falla por fatiga	Falla por pandeo	Falla por deflexión
γ_t	1.35	1	1	1.35
γ_m	1.2	1.12	1.2	1
γ_n	1.0	1.15	1.15	1
$\gamma_{diseño}$	1.62	1.38	1.38	1.35

4.7. Fabricación del aspa

Una vez que los factores de seguridad han pasado satisfactoriamente se procede a realizar los planos de fabricación del aspa, para que los ingenieros de manufactura realicen la fabricación del aspa. Este proceso está basado en el proceso convencional y por excelencia de manufactura de materiales compuestos, es decir, el proceso de Moldeo por Transferencia de Resina Asistida por Vacío (VARTM, por sus siglas en inglés Vacuum Assistance Resin Transfer Molding), dicho proceso se realiza bajo directrices especificadas en el estándar DNVGL-ST-0376 Rotor blades for wind turbines [14]. En la Fig. 11 se ejemplifica a manera de esquema dicho proceso.

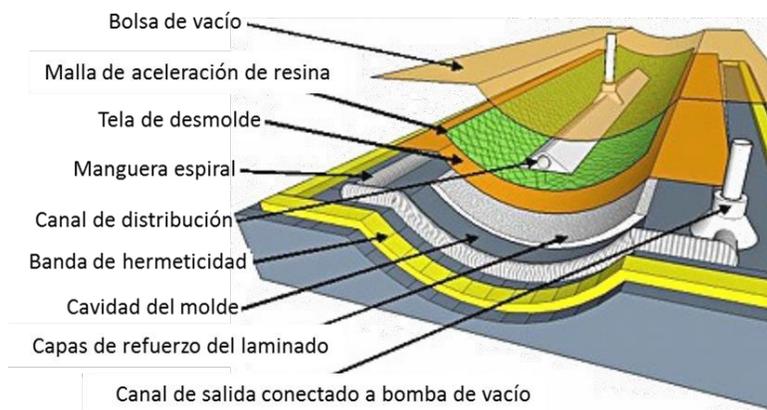


Figura 11. Proceso de Moldeo por Transferencia de Resina Asistida por Vacío (VARTM).

4.8. Ensayo estático del aspa

Una vez fabricada el aspa se tiene que someterá a ensayos mecánicos, en el cual las especificaciones técnicas de la prueba se encuentran normadas que dependiendo del tamaño del aspa se aplicará la IEC 61400-2 Pequeñas turbinas eólica y la IEC 61400-23 Pruebas estructurales a escala completa de aspas de rotores, donde se detalla la ejecución de la prueba, interpretación y evaluación de los resultados como verificación del diseño. Se consideran 3 pruebas:

- Pruebas estáticas
- Pruebas de fatiga
- Pruebas de propiedades del aspa

Se asume que los datos necesarios para la realización de la prueba están disponibles, tales como: cargas de diseño, materiales del aspa y deformaciones las cuales permitirán la evaluación del comportamiento de diseño con respecto al comportamiento real del componente. Dentro de las pruebas estáticas se encuentran las pruebas en sentido Flap y Lead (o Edge), dichas pruebas se relacionan a las direcciones del aspa tal como se muestra en la Fig. 12.

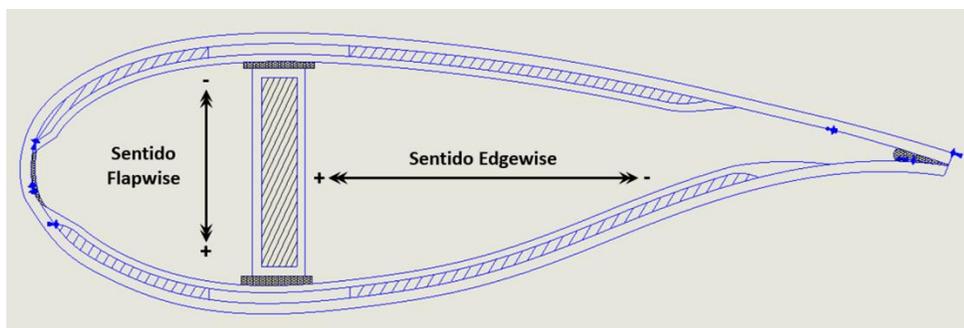


Figura 12. Posiciones de prueba de un aspa.

5. Metodología

La metodología aplicada se basó en el siguiente proceso definido por CIATEQ A.C., tal como se muestra en la Figura 13. Dicha metodología se especificó en base a constante capacitación y soporte técnico de empresas especializadas en el sector eólico, tales como: Snelwind (diseño aerodinámico y análisis aeroelástico), Fraunhofer IWES (cargas aerodinámicas y diseño estructural), WMC (simulación de casos de carga), We4Ce (manufactura del aspa) y CEDER-CIEMAT (Pruebas estáticas).

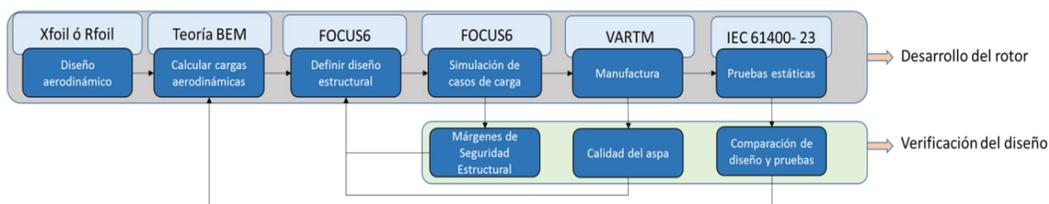


Figura 13. Metodología aplicada al desarrollo del aspa.

Mediante actividades de desarrollo y de verificación se logró cada uno de los pasos que contribuyen al desarrollo del aspa híbrida.

5.1 Análisis aerodinámico

La metodología aplicada al diseño aerodinámico implica 4 partes tal como se muestra en la Fig. 14, las cuales se describen a continuación.

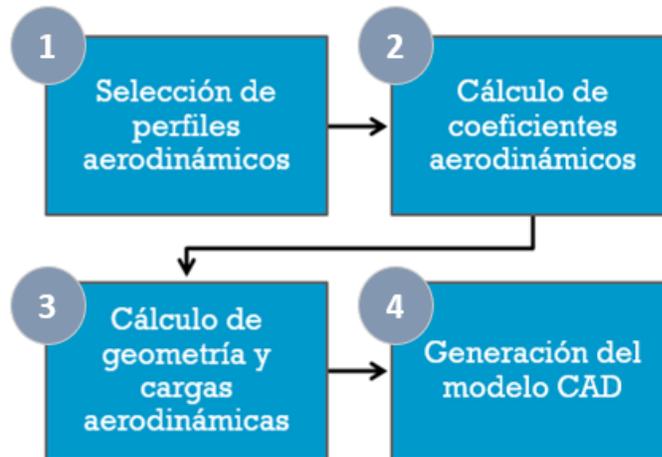


Figura 14. Metodología de diseño aerodinámico de rotores eólicos.

1. La selección de los perfiles aerodinámicos concierne la selección en cuanto a su aplicación, si bien existen diferentes familias de perfiles, muy pocas fueron diseñadas específicamente para la utilización de diseños aerodinámicos para aspas de turbinas eólicas, o incluso fueron diseñadas para el sector aeronáutico, las que pueden utilizarse en esta aplicación, por mencionar algunas familias se tienen las siguientes: NACA, NREL, FFA, FX & AH, DU airfoil y RISOE

2. Una vez seleccionados los perfiles, se procede al cálculo de las propiedades aerodinámicas con software de análisis de perfiles aerodinámicos, para obtener los coeficientes aerodinámicos que rigen dicho perfil.

3. Para el cálculo de geometría y cargas aerodinámicas se definirán los parámetros de entrada para el cual va a ser utilizado el rotor, es decir, los parámetros de funcionamiento de la turbina eólica y consecuentemente se aplica la teoría de BEM. El alcance de este punto es la obtención de la geometría final del aspa.

4. Una vez generados los datos geométricos del aspa se procede a generar el modelo CAD y verificar que exista una superficie congruente en base a los resultados.

5.2 Simulación aeroelástica

Partiendo de la geometría aerodinámica, se continúa con la creación a nivel simulación de la estructura interna del aspa, la cual define el acomodo y cantidad de material que existirá en las componentes del aspa. Previamente se realizó una simulación aeroelástica de la turbina completa 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

De acuerdo con el diseño estructural del aspa, es posible obtener una visualización más clara por medio de cortes transversales, como se observa en las Fig. 15 (a)-(b).

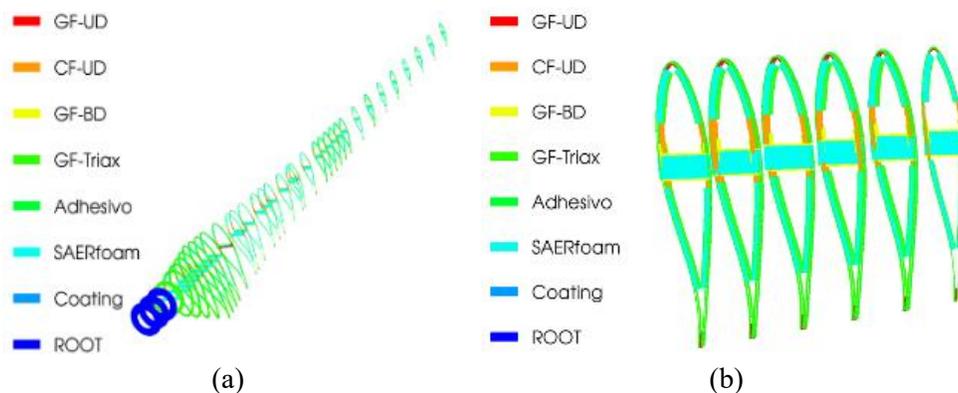


Figura 15. (a) Aspa en secciones transversales; (b) Cortes transversales del aspa.

5.1.1 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. 16.

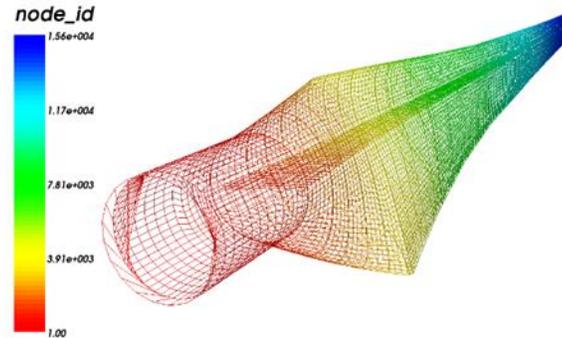


Figura 16. Mallado de Elemento Finito con el software FOCUS 6.3.

5.1.2 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. (7) es posible determinar la frecuencia del rotor.

$$f = \frac{(RPM)(F.S.)}{60s} \dots\dots\dots(7)$$

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. (7), obtenemos que la frecuencia natural del rotor es:

$$f = \frac{(120RPM)(1.2)}{60s} = 2.4 Hz \dots\dots\dots(8)$$

Para determinar la frecuencia del aspa, la cual no debe de coincidir con la frecuencia rotacional del rotor y de la torre, se emplea la Tabla 2, la cual indica los RPM nominales y máximos del rotor diseñado, dichos valores se obtienen del Diagrama de Campbell.

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:

$$f = 4 \times 1.15 = 4.6 \text{ Hz} \dots\dots\dots(9)$$

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. 17 (a)-(b).

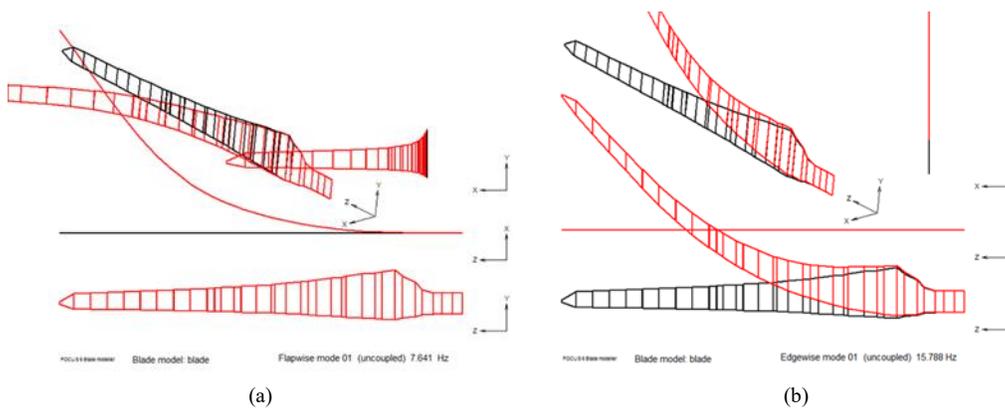


Figura 17. (a) Modo flapwise [7.6 Hz]; (b) Modo edgewise [15.7 Hz].

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.

5.1.3 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 aspa.

Los momentos y fuerzas que se calculan son:

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

- Fuerza de aleteo cortante en el aspa (N)
- Fuerza de canto cortante en el aspa (N)
- Fuerza de tensión en el aspa (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.

5.1.4 Cálculo de eigenfrecuencias

Para el post-proceso de la deflexión del aspa 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 aspa 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 aspa es lo suficientemente adecuada.

La Fig. 18, 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.

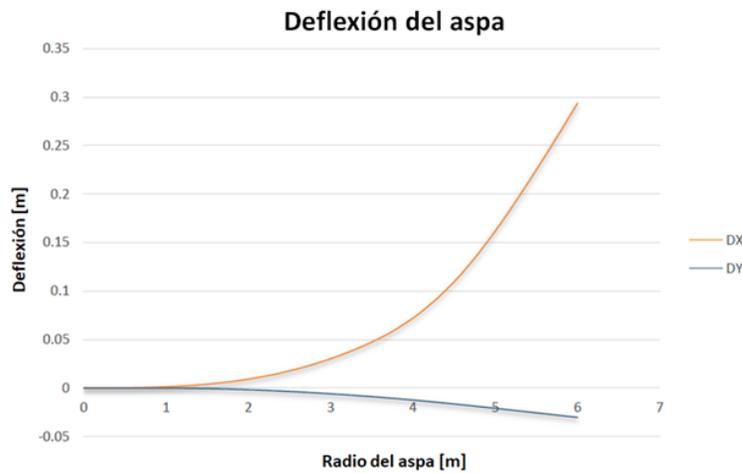


Figura 18. Deflexión del aspa en la coordenada X y Y de la primera simulación aeroelástica.

5.1.5 Análisis estructural

Para el post-proceso de las deformaciones sobre el aspa, 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 y en la Fig. 19 (a)-(b).

Tabla 3. Valores permisibles de tracción y compresión de los materiales del aspa.

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%

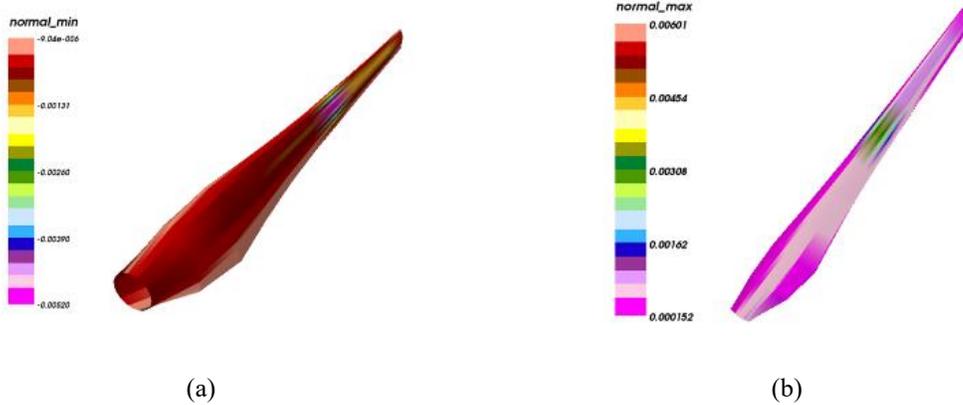


Figura 19. (a) Deformación mínima y (b) Deformación máxima del lado succión del aspa.

5.1.6 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 la Fig. 20 (b) y Fig. 21 (b) se nota daño por fatiga con los casos de carga simulados, por lo que se requiere reforzar dichas zonas. En la Fig. 20 (a) y Fig. 21 (a) se muestra poca presencia de fatiga, por lo que requerirá de una menor cantidad de capas de fibra de vidrio, en comparación de los demás elementos.

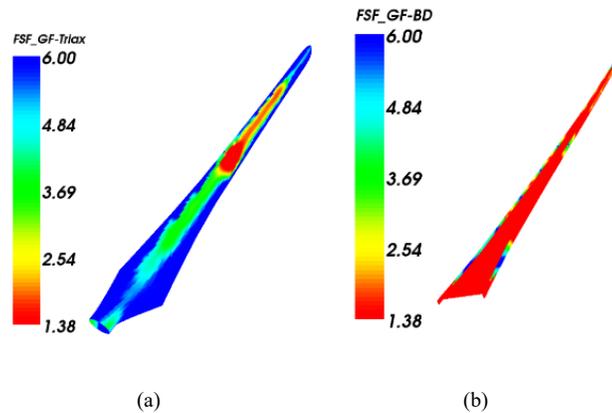
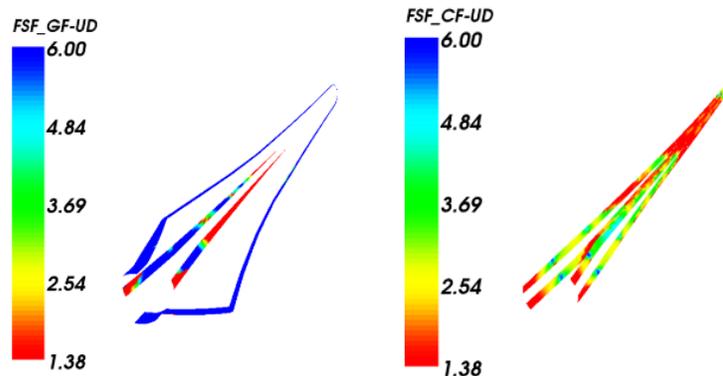


Figura 20. (a) Fatiga en los shells del aspa; (b) Fatiga en el shear web del aspa.



(a) (b)

Figura 21. (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 modulo *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
62092	6.59
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 mas 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.

5.2 Rediseño estructural interno del aspa

De acuerdo a los resultados obtenidos con la primera simulación aerodinámica, 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 Fig. 21(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 se realiza con el caso de carga crítica. 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 proporcionará una mayor rigidez y resistencia ante las cargas críticas a las que está expuesta.

Con ayuda del visualizador del post-proceso de la malla de elemento finito, es posible observar 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.

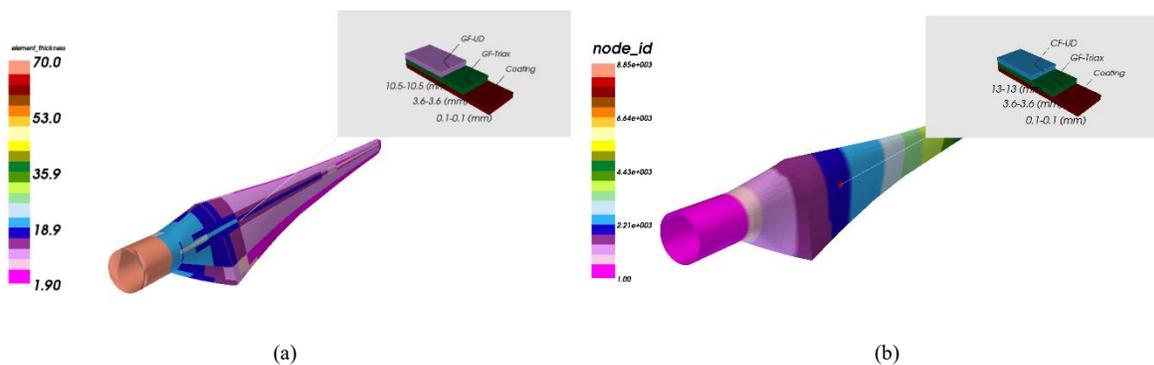


Figura 22. Espesor de las capas de los materiales del aspa con el primer y segundo diseño

Como se observa en la Fig. 22 (a), el cual muestra el diseño del aspa en la primera simulación aeroelástica, se aprecia el espesor de las capas de las fibras del aspa, donde se destaca 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.

6. Resultados y Análisis

Como recomendación del Dr. Herman Snel experto internacional con 35 años de experiencia en el tema aerodinámico, la selección de perfiles se basó en la familia DU por su excelente comportamiento aerodinámico en las siguientes características:

- Mayor valor de la relación entre los coeficientes CL/CD.
- Mayor espesor del perfil aerodinámico.
- Pendiente suave en la gráfica CL/CD vs Ángulo de ataque

Por lo anterior, los perfiles seleccionados son los siguientes: DU250 y DU210 los cuales tienen las siguientes geometrías tal como se muestra en la Figs. 23 (a)-(b) y sus prestaciones aerodinámicas descritas en la Tabla 5.

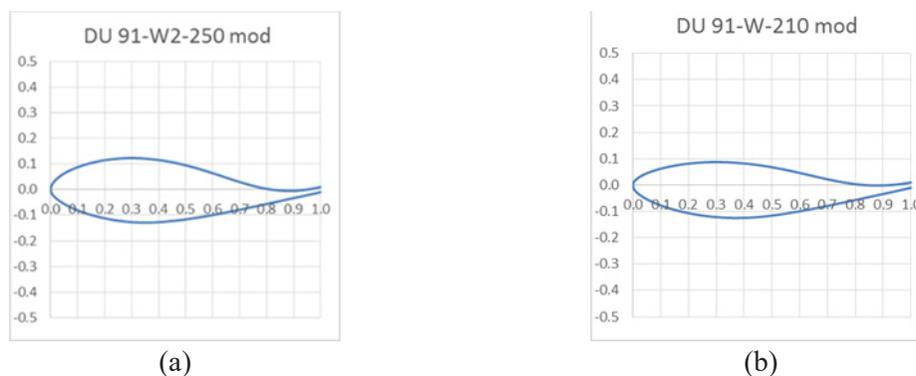


Figura 23. Polares del perfil aerodinámico (a) DU 91-W2-250 mod. y (b) DU 91-W2-210 mod.

Tabla 5. Características generales de los perfiles aerodinámicos seleccionados.

Perfil	DU 91-W2-250 mod	DU 93-W-210 mod
Espesor máximo [%]	25.03	21.04
Ubicación del espesor máximo [% c]	32.4	33.4
Camber máximo [%]	2.7	2.85
Ubicación del Camber máximo [% c]	78.2	71.9
Apertura del borde de salida [% c]	2	2
Distancia de combinación desde el borde de ataque [% c]	80	80
Cl/Cd max @ Re = 500,000	89.3	97.5
Alfa en Cl/Cd max @ Re = 500,000 [°]	9.5	8.0
Cl/Cd max @ Re = 1'000,000	111.4	118.3
Alfa en Cl/Cd max @ Re = 1'000,000 [°]	8.0	7.0

6.1 Cálculo de geometría y cargas aerodinámicas

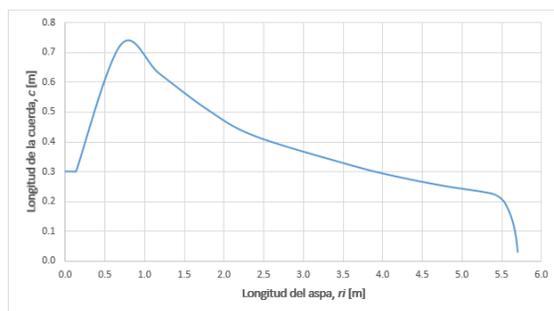
El cálculo de cargas aerodinámicas correspondiente a los perfiles seleccionados se desarrolló con el método BEM en ayuda con el software QBlabe, el cual se alimentó con los datos de entrada mostrados en la Tabla 6, para aplicar la teoría de BEM.

Tabla 6. Datos de entrada para aplicar la teoría BEM.

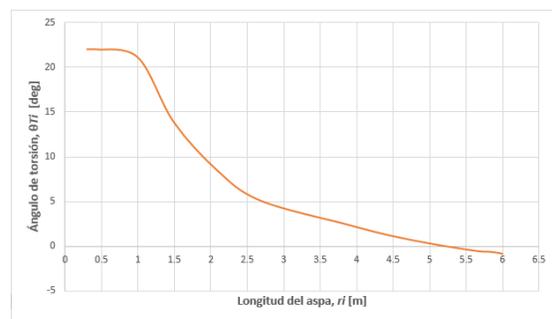
Características	Símbolo	Valor	Unidad
-----------------	---------	-------	--------

Velocidad del viento anual promedio U_{ave} (10, 8.5, 7.5, 6, otra)	U_{ave}	7.5	m/s
Clase		Clase III	
Parámetro de diseño para velocidad del viento	x	1.4	
Velocidad del viento de diseño (U_{dis})	U_{dis}	10.5	m/s
Potencia de salida (nominal)	P	30.00	kW
		30,000	W
Coefficiente de desempeño (<0.5926)	C_p	0.4830	-
Eficiencia (mecánica)	η	0.95	-
Eficiencia (eléctrica)	η	0.95	-
Eficiencia (mecánica + eléctrica)	η	0.90	-
Densidad del viento @25°C, 1 atm	ρ	1.18	kg/m ³
Viscosidad cinemática del aire @25°C, 1 atm	ν	1.55E-05	m ² /s
Radio de punta (para diseño)	R	5.95	m
Diámetro del rotor (para diseño)	D	12	m
Área de barrido del rotor (para diseño)	A	111.10	m ²
Longitud del aspa	L_{aspa}	5.70	m
Diámetro de la raíz	D_{raiz}	0.30	m
Número de aspas	B	3	-
RPM	-	100.00	rpm
	-	1.67	Hz
Velocidad angular (ω)	Ω	10.47	rad/s
Velocidad en punta	ΩR	62.27	m/s
Razón de velocidad en punta (TSR)	λ	5.93	

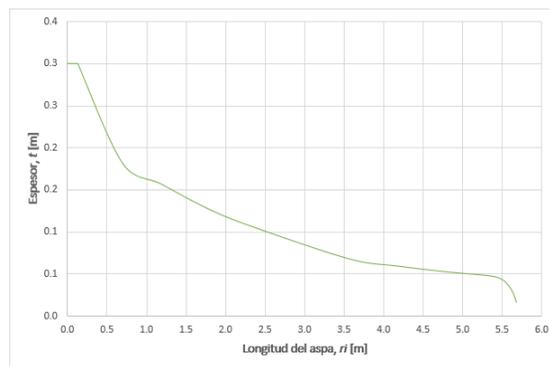
Como resultado del método BEM se obtuvieron las 3 gráficas representativas que definen la geometría aerodinámica del aspa: distribución de la cuerda vs longitud del aspa, ángulo de torsión vs longitud del aspa y espesores máximos vs longitud del aspa, estas se muestran en las Figs. 24(a)-(c), respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 24. (a) Distribución de la cuerda, (b) ángulo de torsión y (c) máximo espesor a lo largo del aspa de 30 kW

6.2 Modelo de superficie CAD del aspa.

Con los resultados obtenidos por el método BEM se procede a la generación del modelo CAD, el modelo se genera como una sola superficie, la cual servirá de base para la generación de los moldes correspondientes. En la Fig. 25(a) se aprecia el modelo CAD del aspa, en la Fig. 25 (b) se destaca el borde de salida representando el gap y en la Fig. 25 (c) se adiciona una superficie de punta al modelo.

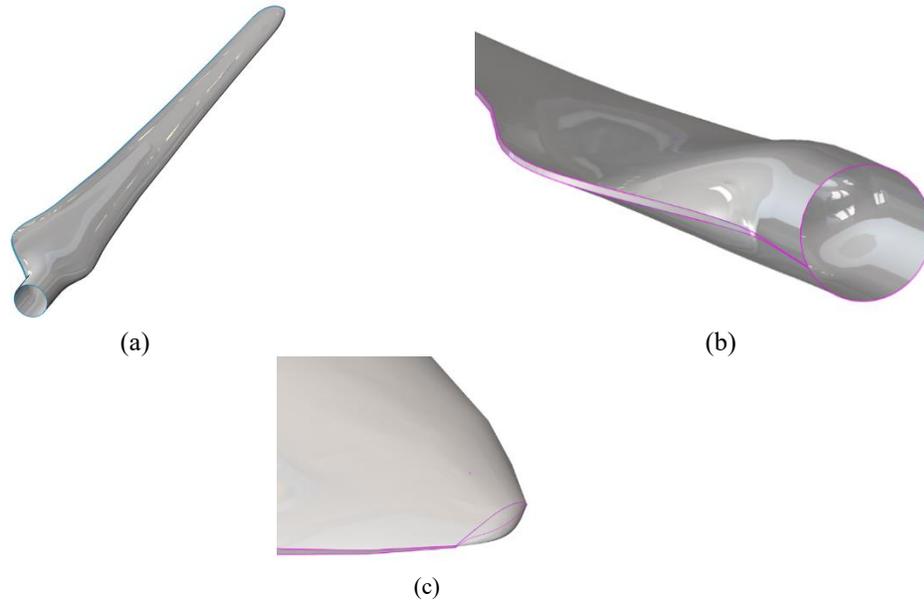


Figura 25. (a) CAD de la superficie aerodinámica, (b) representación del gap en el borde de salida y (c) diseño de punta del aspa de 30 kW.

Para el análisis de los resultados obtenidos en ambas simulaciones, se consideró los 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.

6.3 Peso del aspa

La Tabla 7, muestra el peso de cada uno de los materiales empleados para la fabricación del aspa, cabe mencionar que este cálculo 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 involucran la cantidad de resina y catalizador correspondiente para cada uno de los materiales.

Tabla 7. 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
Peso final del aspa	74	93.7

Se puede notar que el peso en el adhesivo y el núcleo de espuma no cambian, ya que esos materiales no sufren modificaciones. Sin embargo, el cambio de peso fue notorio, pero esto se debe principalmente al rediseño que se realizó para alcanzar el Factor de Seguridad del aspa ante el análisis de fatiga.

6.4 Eigenfrecuencias

Para los resultados obtenidos del post-proceso de las eigenfrecuencias, se obtienen dos tipos de frecuencias, las acopladas y no acopladas, éstas se presentan en la Tabla 8. 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 entrar en resonancia.

Tabla 8. 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 9. la cual contiene la frecuencia en la que se presenta cada uno de los modos de vibración de manera independiente, y tanto en la primera simulación como en la segunda, los valores son mayores a 4.6 Hz, por lo que no hay problema de resonancia.

Tabla 9. 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

6.5 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 Centro de Conocimientos WMC, para la segunda simulación, se utilizaron todos los casos de carga que FOCUS proporciona, y para los casos de carga extremos se seleccionaron 6 como en la primera simulación tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Casos de carga extremos y de fatiga utilizados en cada simulación.

Casos de carga	Simulación 1	Simulación 2
	13205	22363
	13269	62092
Casos de carga extremos	61004	22366
	61101	62000
	62044	22587
	62092	62030
Casos de carga de fatiga	12130	Todos los casos de carga de fatiga proporcionados por el software FOCUS 6.3
	12221	
	18090	
	64900	

6.6 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 aumento debido a que se agregaron más capas de fibra de vidrio y de carbón durante el rediseño estructural interno.

En la Tabla 11 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 11 se muestran la comparación de los resultados en la simulación 1 y 2.

Tabla 11. 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

6.7 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 12, se observa el porcentaje de las deformaciones máximas y mínimas de la primera y la segunda simulación. Se observa 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 12. 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%

6.8 Fatiga

Como se observa en la Fig. 20 y Fig. 21 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 carbón unidireccional en los spar caps, además de cambiar su longitud y moviéndolos 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.

6.9 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 sándwich con las fibras compuestas (de vidrio y de carbono).

La Tabla 13 y Tabla 14, 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 13. 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 14. 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.

6.10 Manufactura del aspa

En cuanto a manufactura del aspa se siguió el siguiente proceso global de manufactura, adoptando las mejores prácticas usadas en la industria, dicho proceso se aprecia en la Fig. 26, la cual consta de 9 procesos clave.

Así mismo, la implementación de herramientas de calidad como las 5's y APQP permiten la estandarización del proceso y una planeación avanzada de la calidad del producto permitiendo que cada vez que se fabrique un aspa se vean reducidos los tiempos y costos de fabricación.

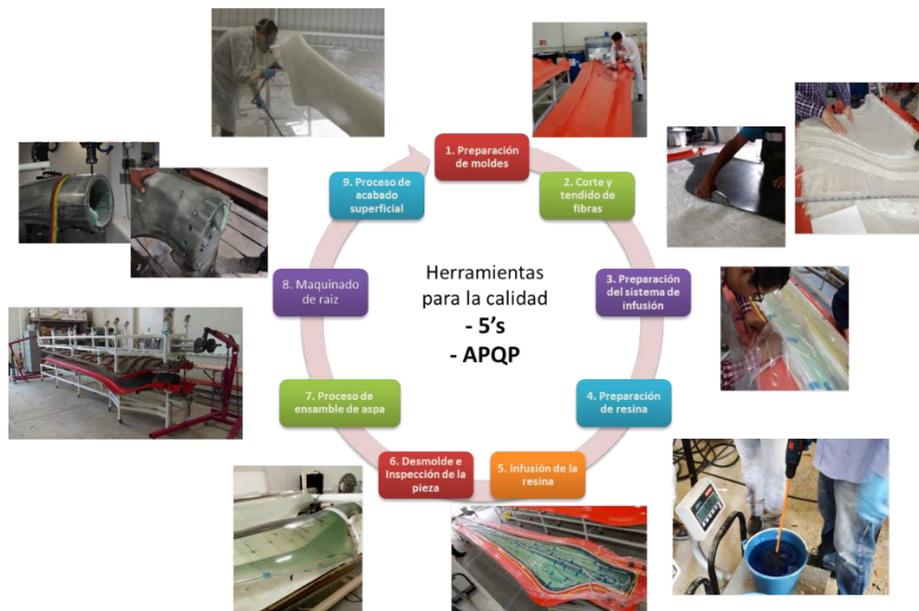


Figura 26. Proceso de manufactura del aspa

6.11 Ensayos estáticos

Durante la fabricación del aspa al término del paso 8 previo a dar el acabado superficial final del aspa, se realizan las pruebas de propiedades y ensayos estáticos. Dichas pruebas se realizaron en un banco de ensayos mecánicos de aspas dentro de CIATEQ tal como se evidencia en las Figs. 27 (a)-(b).

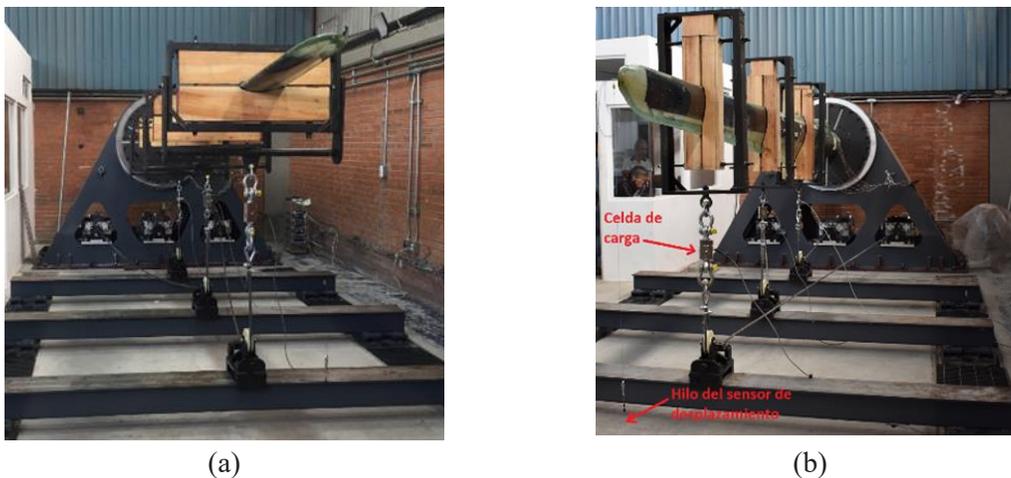


Figura 27. Pruebas estáticas del aspa en sentido Posición (a) flap positivo y posición (b) edge negativo

Los resultados de estas pruebas se comparan con el diseño y la manufactura para su validación. En la Tabla 15 se muestra la validación de 4 propiedades características del aspa tales como: peso, centro de gravedad, primera frecuencia en flap, primera frecuencia en lead-lag. Los pasos previos a la realización del ensayo estático requirieron de la instrumentación de la pala de acuerdo a la normativa, se pegaron una serie de 12 galgas extensométricas a lo largo del aspa, ubicadas bajo las recomendaciones de la normativa IEC.

La prueba estática incluye 2 posiciones del aspa tal como se muestran en las Figs. 28 (a)-(b). Una vez obtenidos los resultados de las deformaciones se procesan los datos para el análisis de datos obteniendo gráficas correspondientes tal como se muestran en las Figs. 23 (a)-(b)

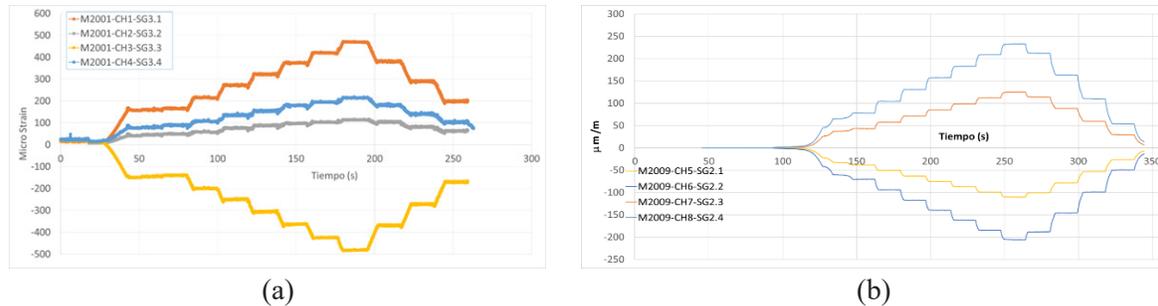


Figura 28. Deformaciones en pruebas estáticas en Posición (a) flap positivo y Posición (b) edge negativo.

Para finalizar la validación del diseño y manufactura del aspa se cuantifica la variación respecto al diseño aeroelástico y el ensayo tomando valores de referencia marcados en la Germanisher Lloyd 2010 (GL2010). Dichas validaciones de propiedades, deformaciones en flap positivo y lead-lag negativo se muestran en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17 respectivamente

Tabla 15. Resumen de resultados de los ensayos de propiedades

Propiedades	Banco de Ensayos	Valor de diseño y/o Manufactura	Variación	Variación máxima por GL2010
Peso (N)	1,239.90	1,196.82	3.47	+/- 3%
Centro de Gravedad CDG (m)	1.78	1.77	0.35	+/- 3%
1ra Frecuencia Flap (Hz)	8.40	8.92	-6.22	+/- 5%
1ra frecuencia Lead-Lag (Hz)	12.35	16.51	-33.68	+/- 5%

Tabla 16. Resumen de resultados en Flap positivo

Propiedades	Banco de Ensayos	Valor de diseño y/o Manufactura	Variación	Variación máxima por GL2010
Desplazamiento en punta (mm)	97.79	102.64	-4.96	+/- 7%
Deformación en Galga 3.1(µm/m)	471.00	493.00	-4.67	+/- 10%
Deformación en Galga 3.2(µm/m)	114.00	98.50	13.60	+/- 10%
Deformación en Galga 3.3(µm/m)	483.5	485.00	-0.31	+/- 10%
Deformación en Galga 3.4(µm/m)	214.17	193.00	9.88	+/- 10%
Deformación en Galga 2.1(µm/m)	331.4	361.5	-9.08	+/- 10%
Deformación en Galga 2.2(µm/m)	31.27	44.00	-40.71	+/- 10%
Deformación en Galga 2.3(µm/m)	356.00	339.00	4.78	+/- 10%
Deformación en Galga 2.4(µm/m)	99.90	33.00	66.97	+/- 10%

Tabla 17. Resumen de resultados en Lead-lag negativo

Propiedades	Banco de Ensayos	Valor de diseño y/o Manufactura	Variación	Variación máxima por GL2010
Desplazamiento en punta (mm)	40.98	42.08	-2.68	+/- 7%
Deformación en Galga 3.1($\mu\text{m}/\text{m}$)	-46.83	-66.00	-40.94	+/- 10%
Deformación en Galga 3.2($\mu\text{m}/\text{m}$)	-469.09	-476.00	-1.47	+/- 10%
Deformación en Galga 3.3($\mu\text{m}/\text{m}$)	-14.02	15	207.01	+/- 10%
Deformación en Galga 3.4($\mu\text{m}/\text{m}$)	247.76	255	-2.92	+/- 10%
Deformación en Galga 2.1($\mu\text{m}/\text{m}$)	-106.10	-170.00	-60.23	+/- 10%
Deformación en Galga 2.2($\mu\text{m}/\text{m}$)	-197.37	-272.00	-37.81	+/- 10%
Deformación en Galga 2.3($\mu\text{m}/\text{m}$)	11*.98	183.00	-52.53	+/- 10%
Deformación en Galga 2.4($\mu\text{m}/\text{m}$)	223.65	-	100	+/- 10%

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo, ha permitido la generación de conocimiento y asimilación de tecnología en el desarrollo de aspas (diseño, manufactura y pruebas), para pequeña y gran escala, ya que la topología de esta aspa pequeña es similar a las de gran capacidad.

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

A través de la metodología empleada se lograron definir los procesos necesarios para la manufactura del aspa de 30 kW en relación al segundo diseño estructural. Las etapas de esta metodología sirvieron de apoyo para identificar las actividades clave de cada proceso. Se logró la estandarización de una línea de manufactura sobre un entorno que considera las normas de seguridad, higiene y ergonomía.

La validación de las propiedades y micro-deformaciones del aspa manufacturada presentan variaciones dentro de los requerimientos aceptados por la GL2010, sin embargo, también existen valores que están fuera de los rangos máximos. Dichas desviaciones se orientan a la definición de la geometría dentro del modelo FEM, ya que el equivalente entre el modelo de FOCUS6 y el aspa real difieren en la geometría aerodinámica ocasionando estas discrepancias en las mediciones de las micro deformaciones.

El conocimiento aportado por el trabajo fomenta gran interés en el campo de la energía eólica y sirve de apoyo para el desarrollo de más investigaciones del área de diseño, manufactura y pruebas de aspas, presentándose como tecnología que forma parte de una solución a la cadena de valor favoreciendo el desarrollo de la industria de la energía eólica en México.

Agradecimientos:

Este trabajo es parte de las actividades del proyecto “P09 Desarrollo de aspas para pequeños aerogeneradores (hasta 50 kW)” 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.

Referencias

- [1] P. Brondsted, *Advanced in Wind Turbine Blade Design and Materials.*, Woodhead Publishing., 2013.
- [2] T. S. Burton, *Wind Energy Handbook*, JOHN WILEY & SONS, (2011).
- [3] E. Kulunk, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power.*, Rijeka, Croatia: INTECH, (2011).
- [4] Secretaría de Energía, SENER, «*Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026,*» SENER, Mexico, 2012.

-
- [5] Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica, 2017. [En línea]. Available: <http://www.cemieeolico.org.mx/>.
- [6] SENER, Secretaría de Energía, «*Mapa de ruta tecnológica: Energía eólica en México*,» 2017.
- [7] Asociación Mexicana de Energía Eólica, «AMDEE,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.amdee.org/>. [Último acceso: 19 10 2018].
- [8] J. M. Manwell, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Wiley, (2009).
- [9] Comisión Electrotécnica Internacional., *Norma IEC 61400-1 Parte 1: Requerimientos de Diseño*, Ginebra Suiza, (2014).
- [10] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH. , *Guideline for the Certification of Wind Turbines.*, Hamburg, Germany., (2010). .
- [11] M. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, EARTHSCAN., (2006).
- [12] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics*, Springer, (2006).
- [13] DTU Wind Energy, «dkvind,» [En línea]. Available: http://dkvind.dk/html/arrangementer/tidligere/021113_vindtraef/flemming_rasmussen.pdf. [Último acceso: 17 10 2018].
- [14] S. C. Nolet, *Composite Wind Blade Engineering and Manufacturing*. Massachusetts Institute of Technology, Warren,, Rhode Island: TPI Composites, Inc., (2011).
- [15] V. Nelson, *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment.*, CRC Prees, 2009.

El impulso de la Ingeniería Mecánica al desarrollo Nacional y la Innovación, se lleva a cabo en las instituciones de educación superior y en centros de investigación y desarrollo. Esta obra presenta aportaciones, a esta rama de la ingeniería, provenientes de entidades del centro e interior de la República Mexicana abarcando temáticas de los ámbitos de Diseño Mecánico, Manufactura y Materiales, Mecánica Teórica y Termofluidos.

La Ingeniería Mecánica es clave para el desarrollo que el país demanda en la actualidad. Esto se debe a que su principal enfoque es la generación de nuevos productos y procesos. Los trabajos aquí presentados son muestra de esa directriz.

Las colaboraciones provienen de profesionales de la Ingeniería Mecánica adscritos a instituciones como CIATEQ, UACJ, CENIDET, UASLP, TNM, UNAM, UGTO, UANL, IPN, U del Istmo, U del Papaloapan, U de C y A, U La Salle Noroeste y UT Nogales.

Los 19 capítulos de este libro fueron sometidos por profesionales de la Ingeniería Mecánica, siendo la mayor parte de ellos miembros de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C. organismo que edita la presente obra.



ISBN: 978-607-96746-7-0

