

Análisis preliminar estructural de un álabe de doble raíz de materiales compuestos para una turbina eólica de 3Kw

Preliminary structural analysis of a blade of double root of composite materials for 3Kw wind turbine

LOPEZ-GARZA, Victor†*, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac, NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe y LOZANO-MANDUJANO, David

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

ID 1^{er} Autor: Victor, Lopez-Garza / ORC ID: 0000-0001-9090-9119, Researcher ID Thomson: H-6969-2018, CVU CONACYT ID: 554311, Open ID: 107470673007841597382

ID 1^{er} Coautor: Isaac, Hernández-Arriaga / CVU CONACYT ID: 45617

ID 2^{do} Coautor: María Guadalupe, Navarro-Rojero / CVU CONACYT ID: 95394

ID 3^{er} Coautor: David, Lozano-Mandujano / ORC ID: 0000-0002-5535-2260, Researcher ID Thomson: I-5594-2018, CVU CONACYT ID: 208446, Open ID: 117168298506215049383

Recibido: Septiembre 22, 2018; Aceptado: Diciembre 12, 2018

Resumen

Investigadores del gobierno y la industria, anticipan el incremento en un futuro muy cercano de parques eólicos de baja velocidad de viento en Estados Unidos, Canadá, Europa, China, India y Brasil. Además, el fabricante de turbinas eólicas Siemens ha declarado que "espera que un tercio del desarrollo global de la energía eólica en los próximos años tenga lugar en áreas con velocidades del viento de medias a bajas"[1]. El escenario anterior bien puede aplicarse a cualquier parte del mundo, pues la búsqueda del aprovechamiento eólico no puede limitarse a rangos de velocidades de viento altos. Los vientos de media y baja velocidad, bien pueden explotarse con tecnología diseñada para las características propias de ese recurso específico. El presente trabajo, muestra el análisis estructural mediante el Método de Elemento Finito de un álabe de doble Raíz de baja capacidad para bajas velocidades de viento (patente en trámite ante el IMPI). El álabe, se considera fabricado con materiales compuestos. Para justificar el diseño, se consideran los casos de la metodología de carga simplificada contemplada en la norma IEC 61400-2. Los resultados arrojan evidencia sobre la viabilidad de estos álabes para su aplicación comercial.

Álabe, Turbina, Eólica

Abstract

Researchers from the government and industry are anticipating the increase in the near future of wind farms with low wind speeds in the United States, Canada, Europe, China, India and Brazil. In addition, the manufacturer of wind turbines Siemens has declared that "it expects that a third of the global development of wind energy in the coming years will take place in areas with medium to low wind speeds" [1]. The previous scene can be applied to any part of the world, since the search for wind power can not be limited to ranges of high wind speeds. The medium and low speed winds can be exploited with technology designed for the specific characteristics of that specific resource. The present work, shows the structural analysis by means of the Method of Finite Element of a blade of double Root of low capacity for low speeds of wind (patent in proceeding before the IMPI). The blade is considered manufactured with composite materials. To justify the design, the cases of the simplified loading methodology contemplated in the IEC 61400-2 standard are considered. The results show evidence on the viability of these blades for commercial application.

Blade, Turbine, Wind

Citación: LOPEZ-GARZA, Victor, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac, NAVARRO-ROJERO, María Guadalupe y LOZANO-MANDUJANO, David. Análisis preliminar estructural de un álabe de doble raíz de materiales compuestos para una turbina eólica de 3Kw. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018. 5-17: 22-30.

* Correspondencia del Autor (Correo Electrónico: nepesh@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

A fines del 2017 México instaló 478 MW de nueva capacidad para alcanzar un total de 4005 MW, suministrando aproximadamente el 4% de la electricidad del país. La Reforma Energética de México introdujo la licitación de energía eólica y otras energías renovables, la última de las cuales resultó en un precio récord de US \$ 0,017 / kWh para un proyecto [2].

En específico, y en relación a las turbinas de baja capacidad, se espera que continúe una tasa de crecimiento mínima del 12%. Se prevé que la industria alcance aproximadamente 270MW de nueva capacidad instalada agregada anualmente en 2020 y logre una capacidad acumulada instalada de aproximadamente 1,9GW para 2020 [3].

En este tenor, analizar y proponer mejoras en el funcionamiento de las turbinas eólicas de baja capacidad, para bajas velocidades de viento puede ofrecer muchas ventajas, sobre todo si pensamos en máquinas eólicas que operan en zonas geográficas cuyas velocidades promedio de viento son bajas (3 a 8 m/s) y por periodos largos de tiempo. Aunque el objeto de estudio del presente proyecto se enfoca a las turbinas eólicas de baja capacidad, es de resaltar que cualquier esfuerzo realizado a elevar la eficiencia energética de una máquina eólica puede repercutir en el desempeño de cualquier máquina eólica independientemente de su capacidad.

En el presente estudio, se muestra por primera vez un ábabe de doble raíz para bajas velocidades de viento cuyo número de solicitud ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial es: MX/E/2017/091166.

Explicación de las secciones del Artículo

Objetivos

1. Realizar el diseño aerodinámico y el análisis estructural por medio de Elemento Finito de un ábabe de doble raíz de baja capacidad para bajas velocidades de viento.
2. Contribuir a la integración de una base tecnológica suficiente para la futura explotación masiva del viento, como fuente de energía en México.

Hipótesis

Es posible realizar un diseño aerodinámico y el análisis estructural de un ábabe de doble raíz de baja capacidad para bajas velocidades de viento mediante Elemento Finito.

Diseño aerodinámico del ábabe

Como la teoría clásica de la aerodinámica del rotor de la turbina eólica, el método BEM (también conocido como teoría de momento de elemento pala o método Glauert/Wilson) combina la teoría de Momentum y la teoría del Elemento de la Pala. Como se muestra en la figura 1, el ábabe está dividido en varias secciones y cada sección barre un área anular cuando gira el rotor. Estos anillos están separados y no hay interacción entre ellos. En otras palabras, el tubo de corriente se descompone a lo largo de diferentes posiciones de radio (r) y cada anillo tiene su propio momento de equilibrio. Al dividir los ábabes de la turbina eólica en elementos anulares (δr) y aplicar una conservación de impulso lineal unidimensional a los elementos anulares, las fuerzas y la potencia se calculan e integran en función de los coeficientes de sustentación (C_D) y arrastre (C_L) del perfil aerodinámico, las cuerdas (c) y los ángulos de ataque (α), de paso (β), y de torsión o flujo (ϕ) de la geometría del ábabe. Los datos característicos aerodinámicos del perfil aerodinámico, es decir, los coeficientes de arrastre de sustentación y momento, a menudo se obtienen a partir de mediciones de túnel de viento [5].

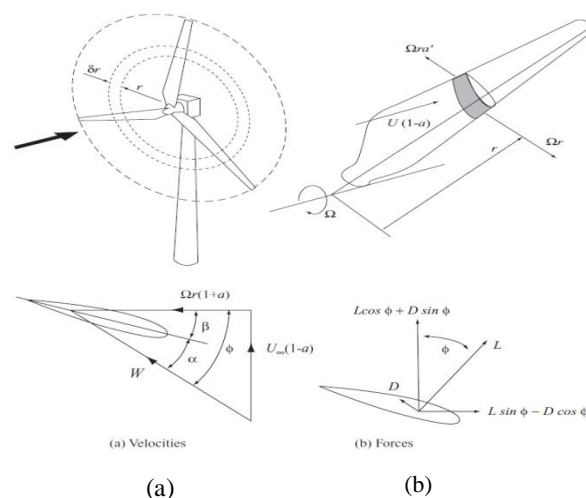


Figura 1 Teoría BEM. En la parte superior un elemento de ábabe barre un anillo anular. En la parte inferior, Velocidades (a) y Fuerzas (b) del Elemento Ábabe [5]
Fuente: Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2001). *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd.

De la Teoría BEAM obtenemos que, las fuerzas de sustentación y de arrastre en una longitud de envergadura de cada álabe normal a la dirección de W (velocidad relativa del viento), son:

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L \delta r \quad (1)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D \delta r \quad (2)$$

Dónde:

$$W = \sqrt{U_\infty^2 (1-a)^2 + \Omega^2 r^2 (1+a')^2} \quad (3)$$

Donde U_∞ es la velocidad de corriente libre del viento y Ω es la velocidad angular.

El factor de inducción axial $a = 1/3$ para un estado ideal en el que el Coeficiente de potencia o Límite de Betz (que es la relación de la potencia extraída entre la disponible en el viento) $C_p = 0.5926$, esto es el valor máximo y el factor de inducción radial a' es:

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (4)$$

Donde λ , la velocidad específica esta definida por:

$$\lambda = \Omega R / U_\infty \quad (5)$$

y se mide hasta la punta del álabe, esto es $r=R$. Por su parte la relación de radios $\mu = r/R$.

Las fuerzas en la dirección de flujo F_N y perpendiculares a la dirección de flujo F_T , se obtienen:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho W^2 N (C_L \cos \phi + C_d \sin \phi) c \delta r \quad (6)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho W^2 N (C_L \sin \phi + C_d \cos \phi) c \delta r \quad (7)$$

Las ecuaciones anteriores relacionan la geometría del álabe con las fuerzas de empuje y potencia usando los coeficientes de sustentación y arrastre y proporcionan el principio para diseñar una geometría de álabe óptimo.

Selección del Perfil aerodinámico

Lissaman [6] ha llevado a cabo un estudio detallado sobre superficies bajas con número de Reynolds y ha afirmado que un pequeño grado de rugosidad debe asociarse con superficies aerodinámicas que operan a bajas condiciones de número de Reynolds. Giguere y Selig [6] han experimentado la aplicabilidad de las superficies de sustentación delgadas de la serie SG (SG6040-SG6043) para operaciones de turbinas eólicas a pequeña escala. Estas superficies aerodinámicas operan bajo un rango de números de Reynolds de $1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$. Si $Re = (U_\infty \times c) / \nu$, c es la cuerda del perfil aerodinámico (se toma en la punta del álabe) y ν es la viscosidad cinemática, que al nivel del mar tiene un valor de $1.4393 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

El perfil seleccionado es el SG6043 ya que comprende los rangos de Re a las que opera la turbina diseñada a $U_\infty \leq 7 \text{ m/s}$.

Diseño Aerodinámico

Para el diseño aerodinámico básico se emplea el software Timeo®, que es un software para el diseño aerodinámico de álabes de turbinas de viento que utiliza la Teoría BEM para sus diseños. El programa se alimentó con las siguientes condiciones: Potencia = 3000w, número de álabes = 3, $\lambda = 9$, rendimiento mecánico = 90%, rendimiento eléctrico = 95%, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $U_\infty = 7 \text{ m/s}$. Perfil aerodinámico: SG6043. Número de divisiones del álabe: 25 (ver figura 2). El radio final del álabe es 3.19 m.

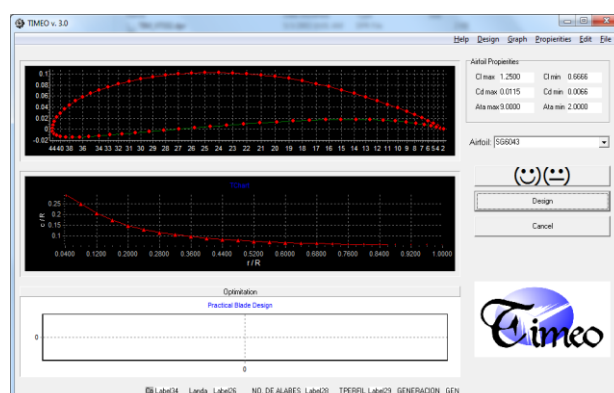


Figura 2 Software Timeo

Fuente: Software Timeo

Diseño del Ábabe de doble raíz

Algunas turbinas eólicas de baja capacidad son de autoarranque, es decir, comienzan su funcionamiento de manera independiente cuando existen condiciones de viento idóneas. El arranque de una turbina eólica se produce cuando el torque generado por el rotor en estado estático, debido a la incidencia del viento, supera el torque opositor producido por la caja de engranes (si la hay) y el generador eléctrico.

Para efectos de medición se considera que la fase de arranque terminó cuando el rotor experimenta cambios importantes en la velocidad de rotación y este comienza a producir electricidad.

Es justamente esta característica de autoarranque la que provoca una deficiencia operacional, ya que en algunas de las regiones donde se instalan estas turbinas no se suelen tener las mejores condiciones de corrientes de viento todo el tiempo y muchas de las veces no se completa la fase de arranque provocando que no se genere energía eléctrica.

El ábabe que se propone y presenta aquí, es una invención que permite generar mayor torque aerodinámico de arranque con bajas velocidades de viento (figura 3). Esta invención, mejora el torque aerodinámico de arranque de las turbinas eólicas y además reduce el tiempo que invierten estas en completar dicha fase de arranque.

El ábabe tiene dos raíces en el cuerpo, entendiendo por raíz a la sección del ábabe más próxima al eje de rotación de la turbina, las cuales se unen en su base (figura 3 parte 3) para poder ser sujetadas mediante una brida (figura 3 parte 4) al buje (figura 3 parte 5), que es el elemento mecánico que une los álabes con la flecha principal (figura 3 parte 6) de la turbina eólica.

La segunda raíz (figura 3 parte 2) surge frente a la primera raíz o raíz principal (figura 3 parte 1) a una distancia que está en función de la velocidad específica. Dicha segunda raíz, está elaborada en un plano inclinado con respecto al plano de la raíz principal, de tal manera que la segunda raíz se intersecta y se une con la primera raíz a una distancia igual a un tercio de la longitud total del ábabe.

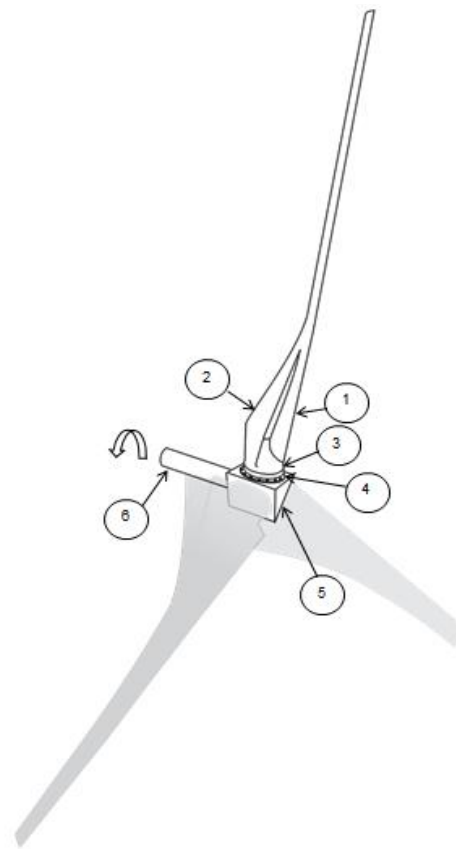


Figura 3 Esquema del ábabe de doble raíz para bajas velocidades de viento

Fuente: Elaboración propia

Selección del Material del Ábabe

Existe una buena diversidad de métodos de selección de materiales, en general parten de las exigencias más relevantes del componente diseñado. En el caso del ábabe estas son: resistencia a la flexión, resistencia a la torsión, resistencia a la fatiga, resistencia al medio ambiente y ligereza. Para el caso en particular el método de selección de materia es el método tradicional, para lo cual se propone una tabla de materiales compuestos sugeridos en [9] donde el gelcoat epoxi se trata como un material isotrópico. La Tabla 1 presenta las propiedades mecánicas de estos materiales. Se asume una unión perfecta entre las capas del laminado y no se considera la ondulación de la capa o la desviación de la dirección de alineación [9] que podría conducir a la falla de la fibra.

La versión 2D del criterio de falla de tensión máxima [10-12] se usa en este trabajo para verificar las tensiones en cada capa de la cuchilla. Se producirá una falla en el laminado si cualquiera de las tensiones normales o de corte en los ejes locales de una capa determinada es igual o superior a las resistencias finales correspondientes de la capa.

Se considera que el laminado ha fallado si se viola cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$-X_C < \sigma_1 < X_T \quad (8)$$

$$-Y_C < \sigma_2 < Y_T \quad (9)$$

$$-S < \tau_{12} < S \quad (10)$$

Donde X_T es la resistencia a la tracción longitudinal máxima, X_C es la resistencia a la compresión longitudinal máxima, Y_T es la máxima resistencia a la tracción transversal, Y_C es la máxima resistencia a la compresión transversal, y S es la máxima resistencia al corte.

El álabe se modela con Fibra de Vidrio Reforzada con Plástico (GFRP), las propiedades de este material se muestran en la Tabla 1.

Propiedad Mecánica	+45° fibra/epoxico
Mod. Elast. E_1 [GPa]	25
Mod. Elast. E_2 [GPa]	25
Mod. Elast. E_3 [GPa]	18
Poisson	0.38
Resist. Tracción σ_{1t} [MPa]	511
Resist. Compresión σ_{1c} [MPa]	628
Resist. Tracción σ_{2t} [MPa]	511
Resist. Compresión σ_{2c} [MPa]	628
Resist. Tracción σ_{3t} [MPa]	28
Resist. Compresión σ_{3c} [MPa]	138
Densidad [Kg/m ³]	1900
Esfuerzo cortante τ_{12} [MPa]	72

Tabla 1 Propiedades mecánicas del material GFRP

Fuente: Barnes RH, Morozov EV; Shankar K, (2014), *Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades*, *Composite Structures*, vol. 119, pp. 677 – 684.

Metodología

La metodología del presente análisis, parte de una propuesta de diseño de álabe para una turbina de 3kW que se instalará en el campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en Morelia Michoacan, de dicha propuesta se derivan las variables de diseño que se citan en la sección de Diseño Aerodinámico del presente artículo. El resto de la metodología de análisis y diseño se muestra la figura 4.

La Norma IEC 61400-2

La norma IEC 61400-2, no exige un ensayo de fatiga del álabe, sin embargo, requiere hacer ensayos de flexión utilizando la carga última a la que será expuesto el álabe, de la cual se puede obtener mucha más información valiosa [13].

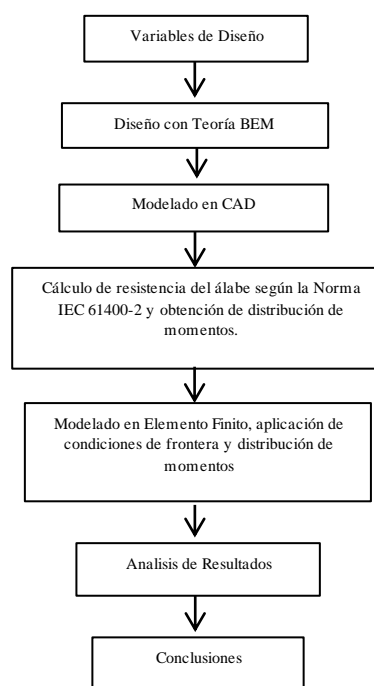


Figura 4 Metodología empleada en el diseño y análisis

Fuente: Elaboración propia

La norma indica tres formas para determinar las cargas de diseño de la turbina eólica, estas son: A) Ecuaciones de carga simplificada. B) Modelo aerolástico y c) Ensayo de cargas mecánicas [14].

Pruebas de resistencia para un álabe simple

Ensayo de Deflexión en operación normal. El ensayo de deflexión, requiere como primer paso determinar el momento de flexión (en posición de flap) en la raíz, mediante la ecuación:

$$M_{xB} = \frac{\lambda - Q_d}{B} \quad (11)$$

Donde B , es el número de álabes, Q_d es el torque de diseño y está determinado por la ecuación:

$$Q_d = \frac{P}{w_d} \quad (12)$$

Donde P , es la potencia y $w_d = \Omega$, la velocidad angular de diseño (rad/seg). De la ecuación (5) se obtiene w_d y se sustituye, junto con el valor de la potencia de diseño, en la ecuación (12), lo que da como resultado un $Q_d = 151.9 \text{ Nm}$.

Por lo tanto, el momento de flexión se obtiene de la ecuación (11), el cual da como resultado: $M_{xB} = 455.7 \text{ Nm}$. Este momento actúa a $2/3$ del radio i.e. a 2.12 m desde la raíz del álabe. Es práctica común, en la técnica del ensayo de laboratorio, emplear bolsas de arena de 20 kg para colocarlas en la posición y en la cantidad requerida por el ensayo particular.

Deflexión en carga extrema. En relación a la Tabla 2, de la norma IEC 61400-2 y a la velocidad promedio de viento ($A_{ave} = 7 \text{ m/s}$) la turbina del presente análisis se clasifica como clase III. Con referencia a [13] se toma como carga extrema una ráfaga de viento de $v_{e50}^2 = 64 \text{ m/s}$. Por lo que el coeficiente de sustentación debe tomarse $C_L = 1.2$ (para condiciones extremas) a todo lo largo del álabe. La fórmula para calcular la fuerza de sustentación es:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot V^2 \cdot A \quad (13)$$

El código de la hipótesis de carga H, del anexo F de la norma IEC 61400-2, se refiere al viento de supervivencia de la turbina y supone a la turbina inmovilizada generando un momento de pandeo que se calcula con la ecuación:

$$M_{yB} = c_D \frac{1}{2} \rho v_{e50}^2 A_{proj,B} \frac{1}{2} R \quad (14)$$

Donde c_D , es el coeficiente de arrastre y para esta hipótesis debe tomarse el valor máximo de $c_D = 1.5$, $A_{proj,B}$, es el área de la parte plana del álabe.

El resultado de aplicar la ecuación (13) a lo largo del álabe se muestra en la gráfica 3.

Deflexión al daño. En la práctica, esta prueba de laboratorio consiste en agregar bolsas de arena paulatinamente de tal manera que se aumenta el momento en el álabe lo más posible (con una distribución de carga dada en los cálculos previos) hasta que se escuche un "crack", momento en el que se para la prueba.

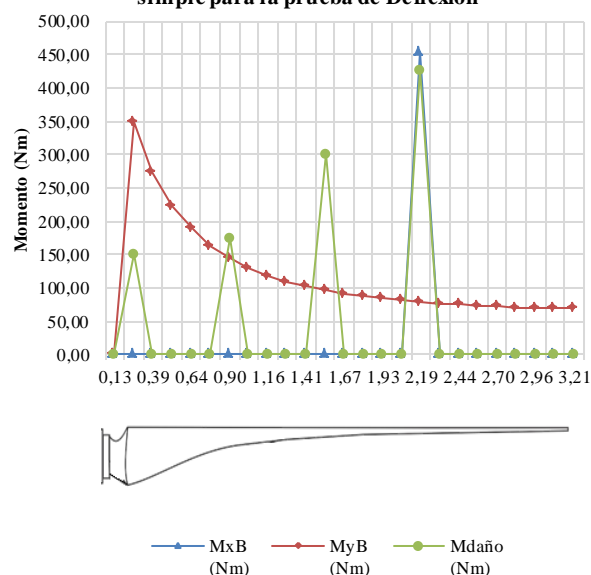
Debido a que el presente análisis solo se realiza de forma virtual se toma como referencia [13] y se supone que se agregan otras 6 bolsas de arena de 20 kg cada una distribuida uniformemente según los cálculos previos. El resultado de aplicar esta carga a lo largo del álabe se muestra en la gráfica 1.

Clases de aerogeneradores pequeños	I	II	III	IV	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30	Valores a especificar por el proyectista
V_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	6	
I_{15} (-)	0.1	0.1	0.1	0.1	
a (-)	2	2	2	2	

Tabla 2 Parametros básicos para las clases de aerogeneradores pequeños [14]

Fuente: Norma de IEC 61400-2

Distribución de Momentos a lo largo del álabe simple para la prueba de Deflexión



Gráfica 1 Distribución de Momentos a lo largo del álabe para la prueba de deflexión considerando las tres pruebas de deflexión

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la carga depende de la velocidad del viento al cuadrado, por tanto se puede estimar la velocidad del viento a la que ocurrirá el daño mediante la ecuación [14]:

$$\frac{v_{daño}^2}{v_{extrema}^2} = \frac{M_{daño}}{M_{extremo}} \quad (15)$$

Por lo que la velocidad de viento de daño es $v_{daño} = 74.73 \text{ m/s}$.

El factor de seguridad se puede establecer mediante los momentos con la ecuación:

$$S_M = \frac{M_{daño}}{M_{extremo}} = \frac{3970.8461 Nm}{2911.6942 Nm} = 1.36 \quad (16)$$

Pruebas de resistencia para un álabe de doble raíz

Ensayo de Deflexión en operación normal

El momento de deflexión se obtiene de la ecuación (11), esta ecuación no involucra alguna consideración adicional para una turbina de doble raíz, por lo que: $M_{XB} = 455.7$ Nm el cual actúa a $2/3$ del radio i.e. a 2.12 m desde la raíz del álabe.

Deflexión en carga extrema

Al igual que en el álabe simple, la velocidad promedio de viento $A_{ave} = 7$ m/s y como carga extrema una ráfaga de viento de $v_{e50}^2 = 64$ m/s. Por lo que el coeficiente de sustentación debe tomarse $C_L=1.2$ (para condiciones extremas) a todo lo largo del álabe, esto es incluyendo la raíz extra. La fórmula para calcular la fuerza de sustentación (13).

El código de la hipótesis de carga H, del anexo F de la norma IEC 61400-2, se refiere al viento de supervivencia de la turbina y supone a la turbina inmovilizada generando un momento de pandeo que se calcula con la ecuación (14).

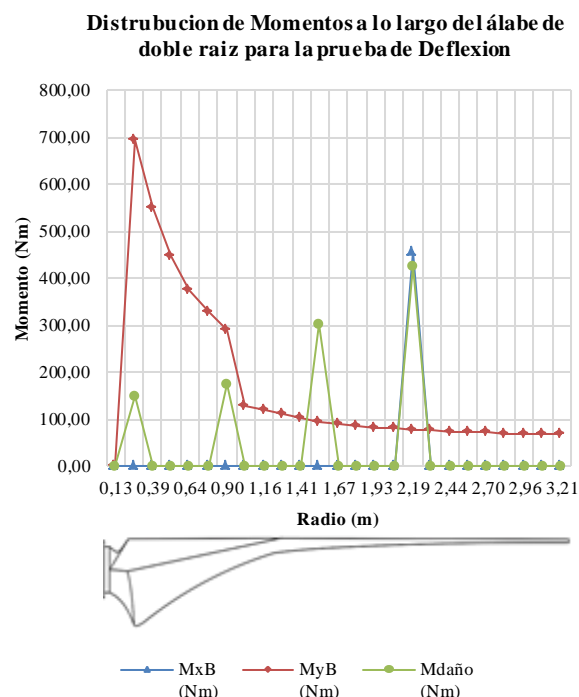
Donde c_D , es el coeficiente de arrastre y para esta hipótesis debe tomarse el valor máximo de $c_D = 1.5$, $A_{proj,B}$, es el área de la parte plana del álabe, que en el caso del álabe de doble raíz se agrega el área de la raíz extra. El resultado de aplicar la ecuación (13) a lo largo del álabe se muestra en la gráfica 2.

Deflexión al daño

Al igual que en el álabe simple se supone que se agregan otras 6 bolsas de arena de 20kg cada una distribuida uniformemente según los cálculos previos. El resultado de aplicar la esta carga a lo largo del álabe se muestra en la gráfica 2.

Por su parte, la velocidad del viento a la que ocurrirá el daño se calcula mediante la ecuación (15) y es igual a $v_{daño} = 71.52$ m/s.

El factor de seguridad se puede establecer mediante los momentos con la ecuación (16) y es igual $s_M = 1.24$.



Grafica 2 Distribución de Momentos a lo largo del álabe de doble raíz para la prueba de deflexión considerando las tres pruebas de deflexión

Fuente: *Elaboración propia*

Resultados

La figura 5, muestra el resultado del análisis en elemento finito del alabe de doble raíz con la prueba de Deflexión en carga extrema, las unidades están en mm y en ella se muestran las deformaciones totales.

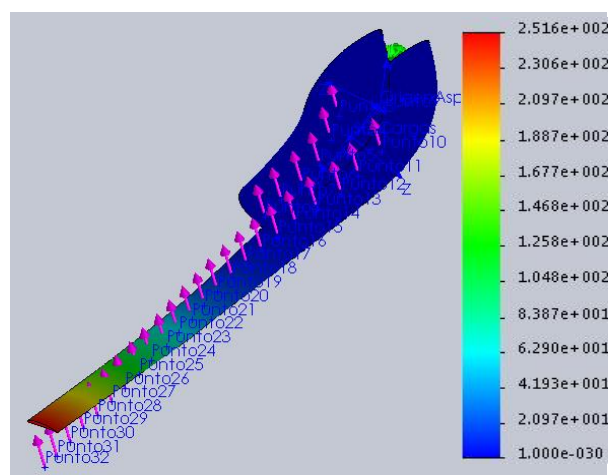


Figura 5 Prueba de Deflexión en carga extrema del álabe de doble raíz en el Elemento Finito, deformaciones (mm)

Fuente: *Solidworks*

La figura 6, muestra el resultado del análisis en elemento finito del ábabe de doble raíz con la prueba de Deflexión en carga extrema y en ella se muestra el resultado del análisis de la teoría de fallo de von Mises, las unidades son N/m^2 .

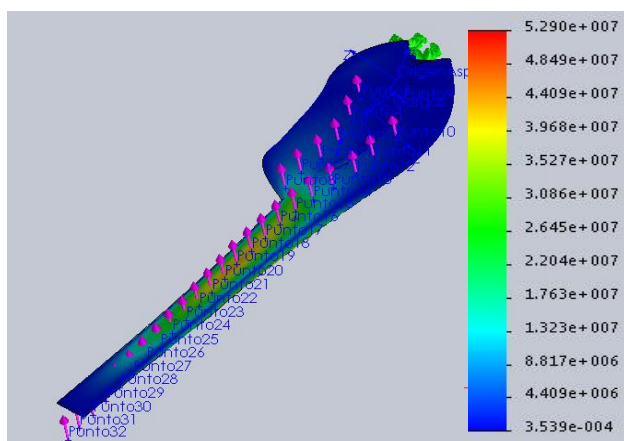


Figura 6 Prueba de Deflexión en carga extrema del ábabe de doble raíz en el Elemento Finito, von Mises (Nm^2)

Fuente: Solidworks

La figura 7, muestra el resultado del análisis en elemento finito del ábabe de doble raíz con la prueba de Deflexión al daño, las unidades están en mm y en ella se muestran las deformaciones totales.

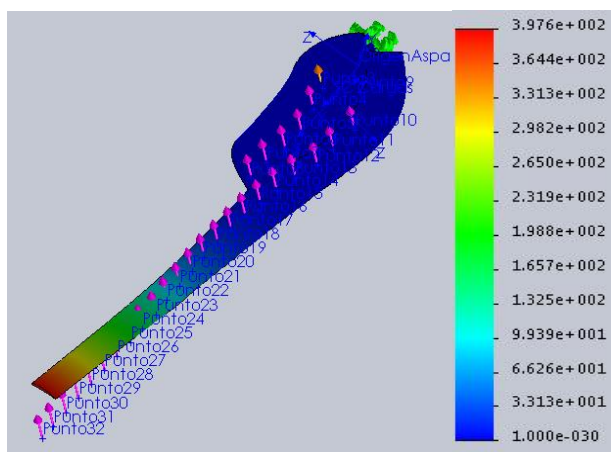


Figura 7 Prueba de Deflexión al daño del ábabe de doble raíz en el Elemento Finito, deformaciones (mm)

Fuente: Solidworks

La figura 8, muestra el resultado del análisis en elemento finito del ábabe de doble raíz con la prueba de Deflexión al fallo y en ella se muestra el resultado del análisis de la teoría de fallo de von Mises, las unidades son N/m^2 .

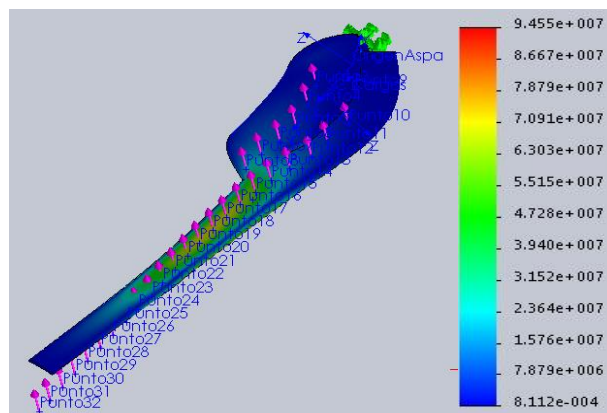


Figura 8 Prueba de Deflexión al fallo del ábabe de doble raíz en el Elemento Finito, von Mises (Nm^2)

Fuente: Solidworks

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, por el apoyo brindado para la culminación de este proyecto. A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el préstamo de sus instalaciones y equipos. A el Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP). Con un agradecimiento especial al Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica, CEMIE Eólico, por su incondicional apoyo en el desarrollo del presente.

Conclusiones

Se cumplió con el objetivo inicial del presente análisis, al realizar el diseño aerodinámico y el análisis estructural por medio de Elemento Finito de un ábabe de doble raíz de baja capacidad para bajas velocidades de viento.

En relación a los resultados obtenidos en el cálculo de los momentos según la norma IEC, es claro que los momentos, en el caso de los ábaves de doble raíz, se incrementan de manera importante en operación normal, lo que provoca que el factor de seguridad disminuya en relación al ábabe simple. De manera similar, la velocidad de viento de daño, para el caso del ábabe de doble raíz, se ve disminuida en comparación con la del ábabe simple. Lo anterior se atribuye al incremento del área del ábabe de doble raíz, ya que genera mayores momentos durante la operación.

Es de hacer notar que en el presente análisis se mantuvo la carga adicional de daño para ambos álabes, lo cual no necesariamente debe ser así, un ensayo real de laboratorio podría proporcionar datos más importantes.

Los resultados de las simulaciones en elemento finito, muestran que el material propuesto para la manufactura del álabes logra cumplir con los criterios mínimos de las pruebas de Deflexión que exige la norma; sin embargo, aún faltan por considerar algunos otros escenarios que exige la norma en un aspecto general del desempeño de la maquina eólica y no solo del álabes.

Como conclusión general diremos que si bien un álabes de doble raíz puede traer beneficios aerodinámicos y por tanto de incremento de potencia, plantea también un reto estructural que debe estudiarse a fin de encontrar una técnica de optimización adecuada que permita establecer de manera más amplia los beneficios de esta nueva tecnología

Referencias

[1] Barnes RH, Morozov EV;Shankar K, (2014), Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades, Composite Structures, vol. 119, pp. 677 - 684

[2] GWE (2018), Global Wind Energy Report, Annual Market Update 2017, Global Wind Energy Council.

[3] Jean-Daniel Pitteloud & Stefan Gsänger (2017), Small Wind World Report Summary 2017, WWEAWorld Wind Energy Assisiation.

[4] Xinzi Tang, Xuanqing Huang, Ruitao Peng, Xiongwei Liu (2015). A Direct Approach of Design Optimization for Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades. CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, Procedia CIRP 36 (2015) 12 – 16.

[5] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd.

[6] Lissaman PBS. Low-Reynolds-number airfoils. AnnuRevFluidMech 1983;15 (1):223–39.

[7] Giguere P, Selig MS. New airfoils for small horizontal axis wind turbines. J SolEnergy Eng1998;120(2):108–14.

[8] Barnaby Wainfan (2005), Understanding and choosing Airfoils for Light Aircraft, Barnaby Wainfan.

[9] Altmann A, Gesell P, Drechsler K. Strength prediction of ply waviness in composite materials considering matrix dominated effects. Compos Struct 2015;127:51–9.

[10] Barbero EJ. Introduction to Composite Materials Design. 2nd ed. CRC Press; 2011.

[11] Kaw AK. Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. CRC Press; 2006.

[12] Jones R. Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. Taylor and Francis; 1999.

[13] Sveden W. Enevoldsen (2015), Small Wind Turbine Engineering, from idea to certification, Lexinton, KY.

[14] IEC 61400-2