



Title: Análisis Preliminar Estructural de un Álabo de Doble Raíz de Materiales Compuestos para una Turbina Eólica de 3Kw

Author: Víctor, LÓPEZ-GARZA, Isaac, HERNÁNDEZ-ARRIAGA, María
Guadalupe, NAVARRO-ROJERO, David, LOZANO-MANDUJANO

Editorial label ECORFAN: 607-8534
BCIERMMI Control Number: 2018-03
BCIERMMI Classification (2018): 251018-0301

Pages: 27
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.

244 – 2 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 | 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.

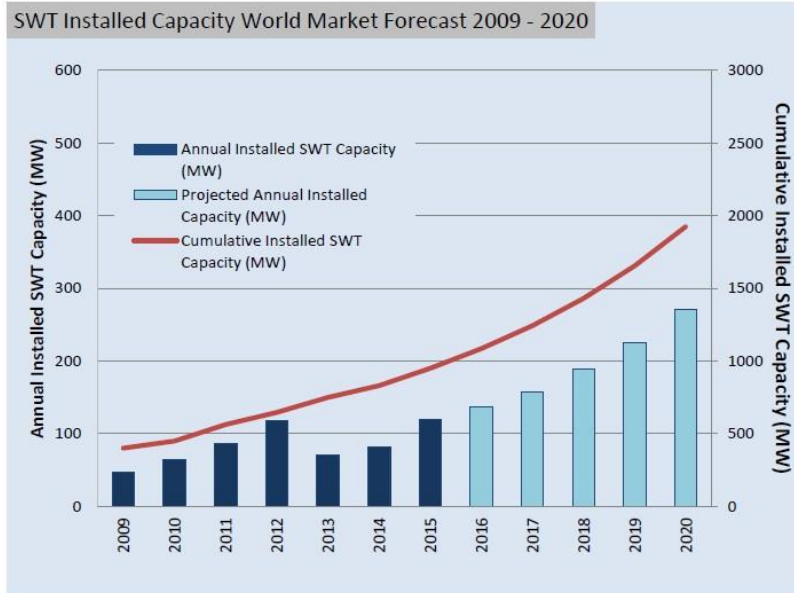
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic Republic
Spain	El Salvador	Republic of Congo
Ecuador	Taiwan	
Peru	Paraguay	Nicaragua

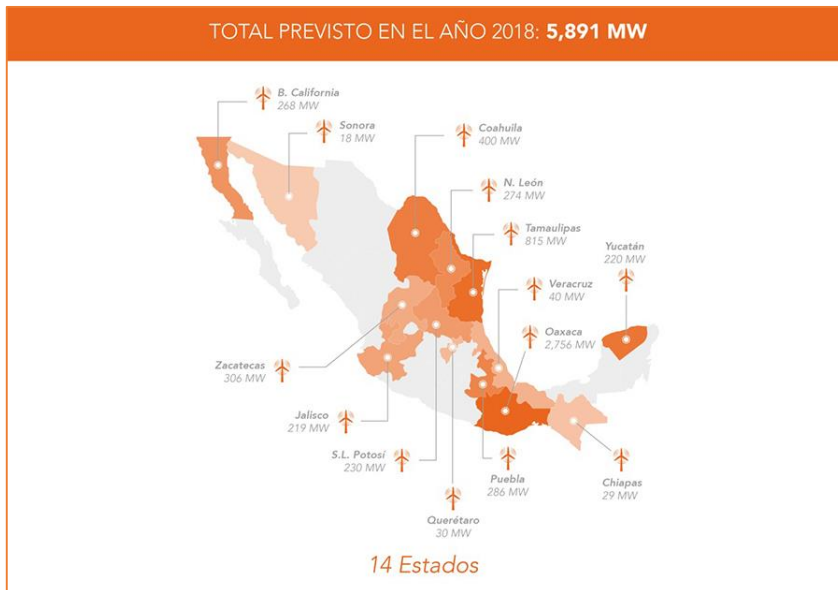
Introducción



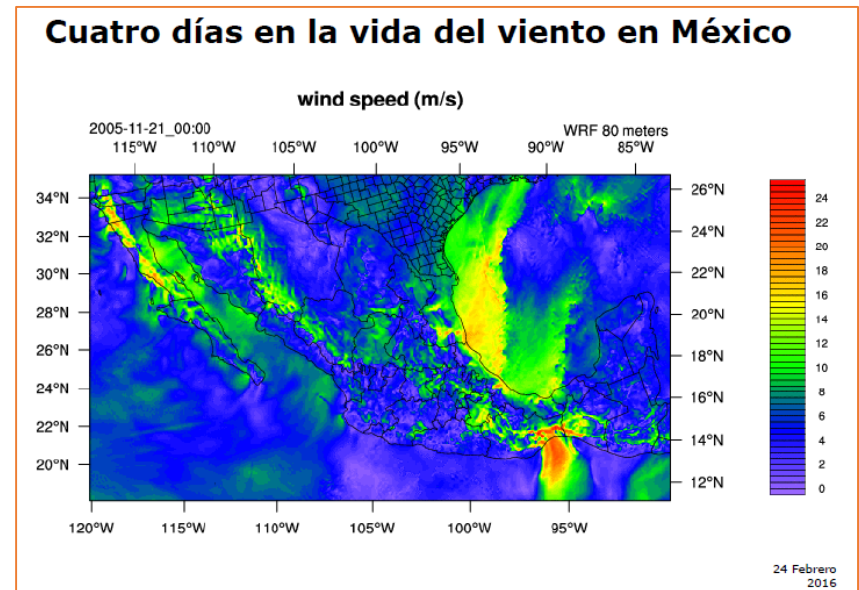
2017 Small Wind World Report Summary. World Wind Energy Association

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].

Introducción



Fuente: Asociación Mexicana de Energía Eólica. <https://www.amdee.org/mapas/parques-eolicos-mexico-2018>



Fuente: El Atlas Eólico Mexicano (AEM), Andrea N Hahmann

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 y logre una capacidad acumulada instalada de aproximadamente 1,9GW para 2020 [3].

Introducción

- 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.**
- En el presente estudio, se muestra por primera vez un **álabe 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.**

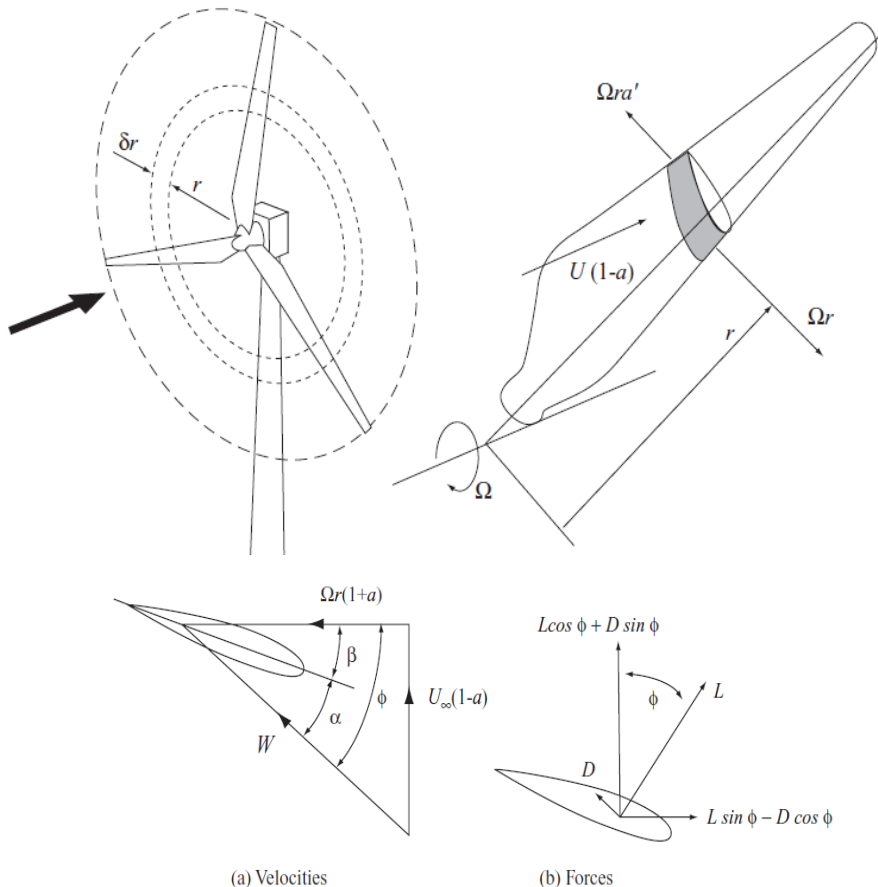
Objetivos

- Realizar el diseño aerodinámico y el análisis estructural por medio de Elemento Finito de un álabe de doble raíz de baja capacidad para bajas velocidades de viento.
- 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 álabe de doble raíz** de baja capacidad para bajas velocidades de viento **mediante Elemento Finito**.

Diseño aerodinámico del álabe



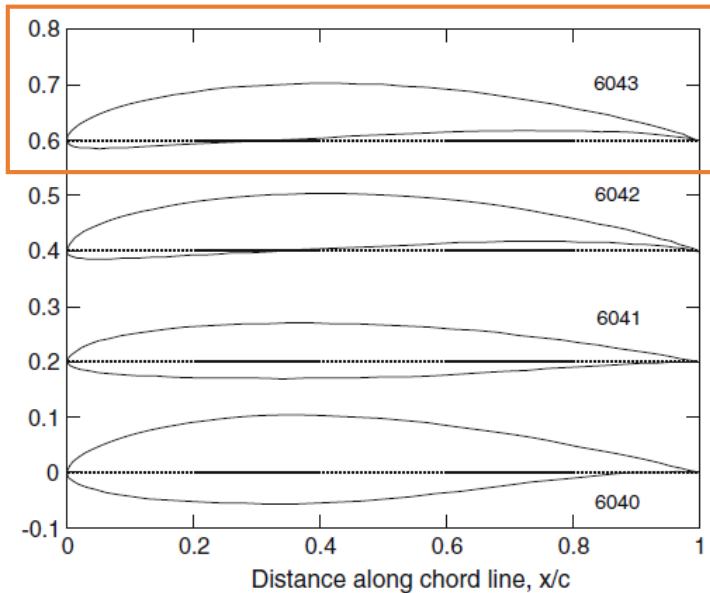
- Como la teoría clásica de la aerodinámica del rotor de la turbina eólica, el método BEM (también conocido como teoría de momento de elemento pala o método Glauert/Wilson) combina la teoría de Momentum y la teoría del Elemento de la Pala.

Donde:

Radio (r)
 Elemento anular (δr)
 Coeficiente de Sustentación (C_D) , Coeficiente arrastre (C_L)
 Cuerda (c)
 Ángulo de ataque (α), de paso (β), y de torsión o flujo (φ)
 Velocidad de corriente libre del viento (U_∞)
 Velocidad angular (Ω)
 Factor de inducción axial (a)
 Factor de inducción radial (a')
 Velocidad relativa del viento (W)
 Sustentación (L), arrastre (D)

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

Diseño aerodinámico del álabe



Aerofoil	t/c (%)	Camber (%)	Design C_l	Design Re
SG6040	16	2.5	1.1	200,000
SG6041	10	2	0.6	500,000
SG6042	10	3.8	0.9	333,333
SG6043	10	5.5	1.2	250,000

- **Selección del Perfil aerodinámico**

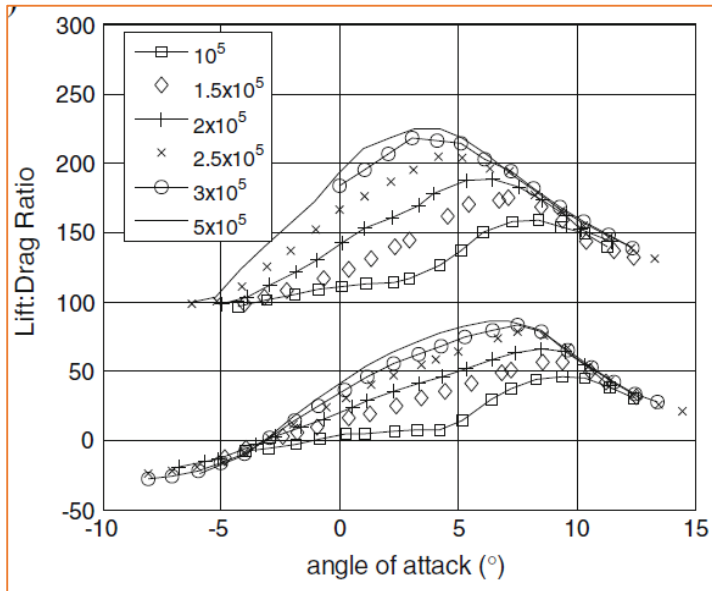
- Giguere y Selig [6] han experimentado la aplicabilidad de las superficies de sustentación delgadas de la serie **SG (SG6040-SG6043)** para operaciones de turbinas eólicas a pequeña escala. Estas superficies aerodinámicas operan bajo un rango de números de Reynolds de $1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$. Si $Re = (U_\infty \times c) / \nu$, c es la cuerda del perfil aerodinámico (se toma en la punta del álabe)

- **El perfil seleccionado es el SG6043**

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

[15] David Wood, Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. Springer-Verlag London Limited 2011.

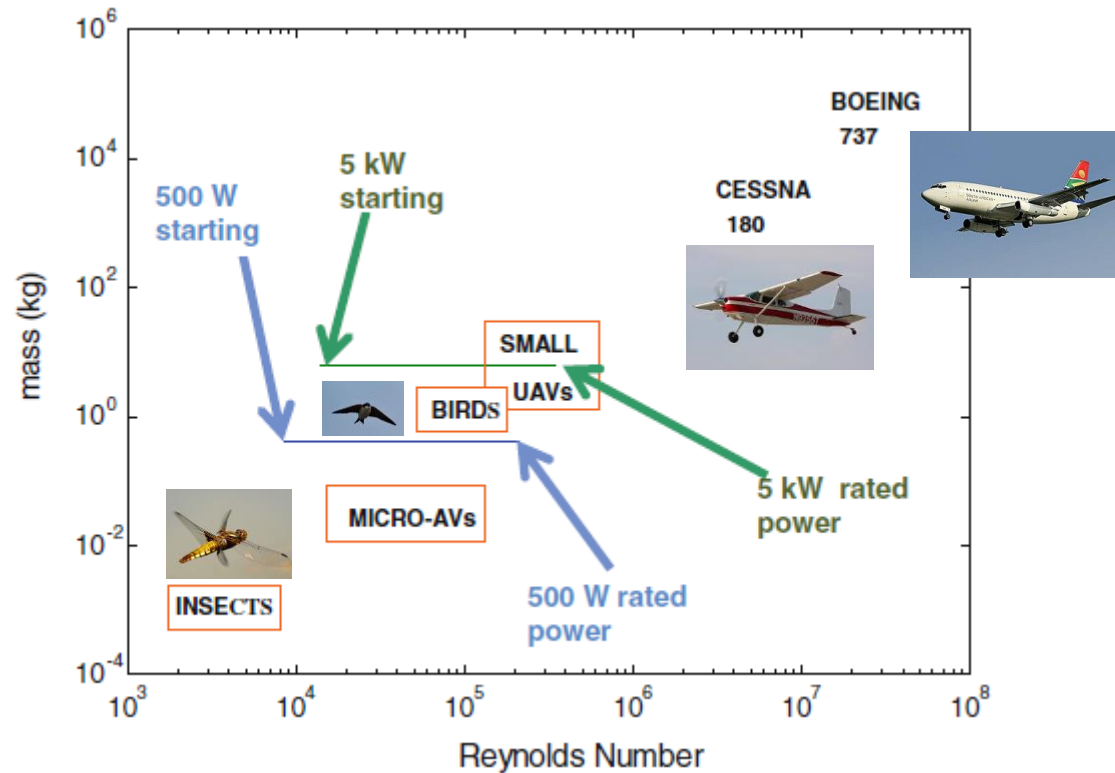
Diseño aerodinámico del álabe



[15] David Wood, Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. Springer-Verlag London Limited 2011.

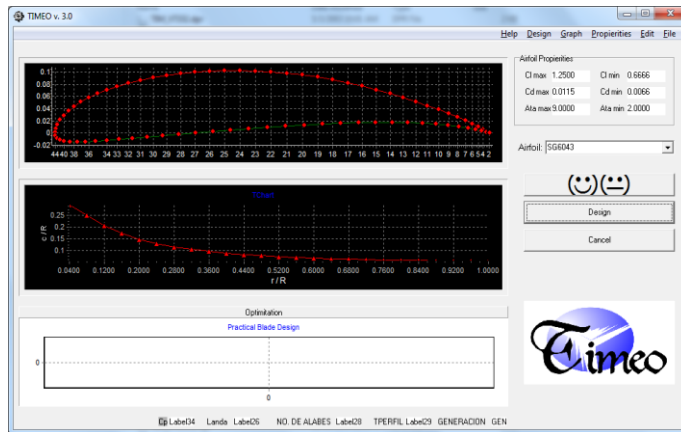
- **Selección del Perfil aerodinámico**
- Giguere y Selig [6] han experimentado la aplicabilidad de las superficies de sustentación delgadas de la serie **SG (SG6040-SG6043)** para operaciones de turbinas eólicas a pequeña escala. Estas superficies aerodinámicas operan bajo un rango de números de Reynolds de $1 \times 10^5 - 5 \times 10^5$. Si $R_e = (U_\infty \times c) / \nu$, c es la cuerda del perfil aerodinámico (se toma en la punta del álabe)
- **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 del álabe



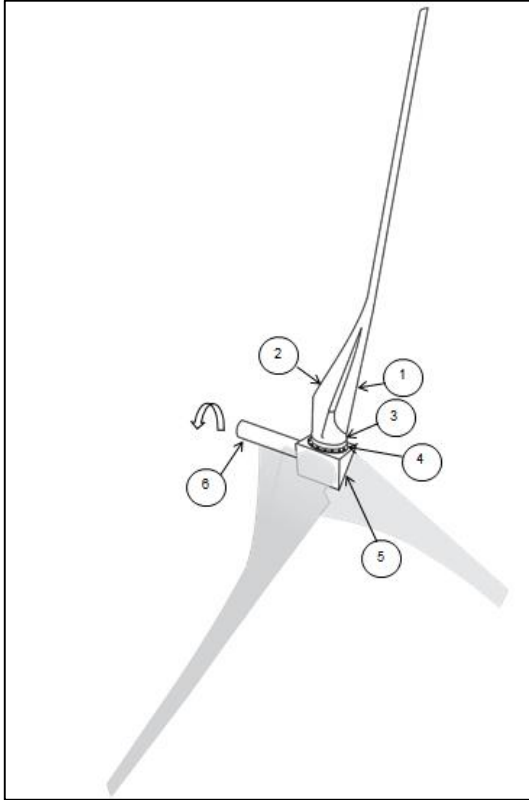
Rangos de números de Reynolds para aerogeneradores pequeños y otros cuerpos aerodinámicos [15]

Diseño aerodinámico del álabe



- 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**, **numero de álabes = 3**, $\lambda = 9$, **rendimiento mecánico = 90%**, **rendimiento eléctrico = 95%**, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $U = 7 \text{ m/s}$. **Perfil aerodinámico: SG6043**. **Numero de divisiones del álabe: 25**. El radio final del álabe es 3.19 m.

Diseño del Álabes de doble raíz



Donde: Base (3) , Brida (4), Buje (5), Flecha principal (6) Segunda raíz (2), Primera raíz o raíz principal (1).

- Algunas turbinas eólicas de baja capacidad son de autoarranque.
- 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.
- El álabes que se propone y presenta aquí, es una invención que permite generar mayor torque aerodinámico de arranque con bajas velocidades de viento.

Diseño del Álabes de doble raíz



Ejemplo de un álabes de doble raíz en una turbina de 25 w

Selección del Material del Álabes.

Propiedad Mecánica	+45° fibra/epóxido
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 córtate τ_{12} [MPa]	72

- 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 álabes estas son: resistencia a la flexión, resistencia a la torsión, resistencia a la fatiga, resistencia al medio ambiente y ligereza..
- El álabes se modela con Fibra de Vidrio Reforzada con Plástico (GFRP), las propiedades de éste material se muestran en la Tabla.

Selección del Material del Álabe.

- 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:

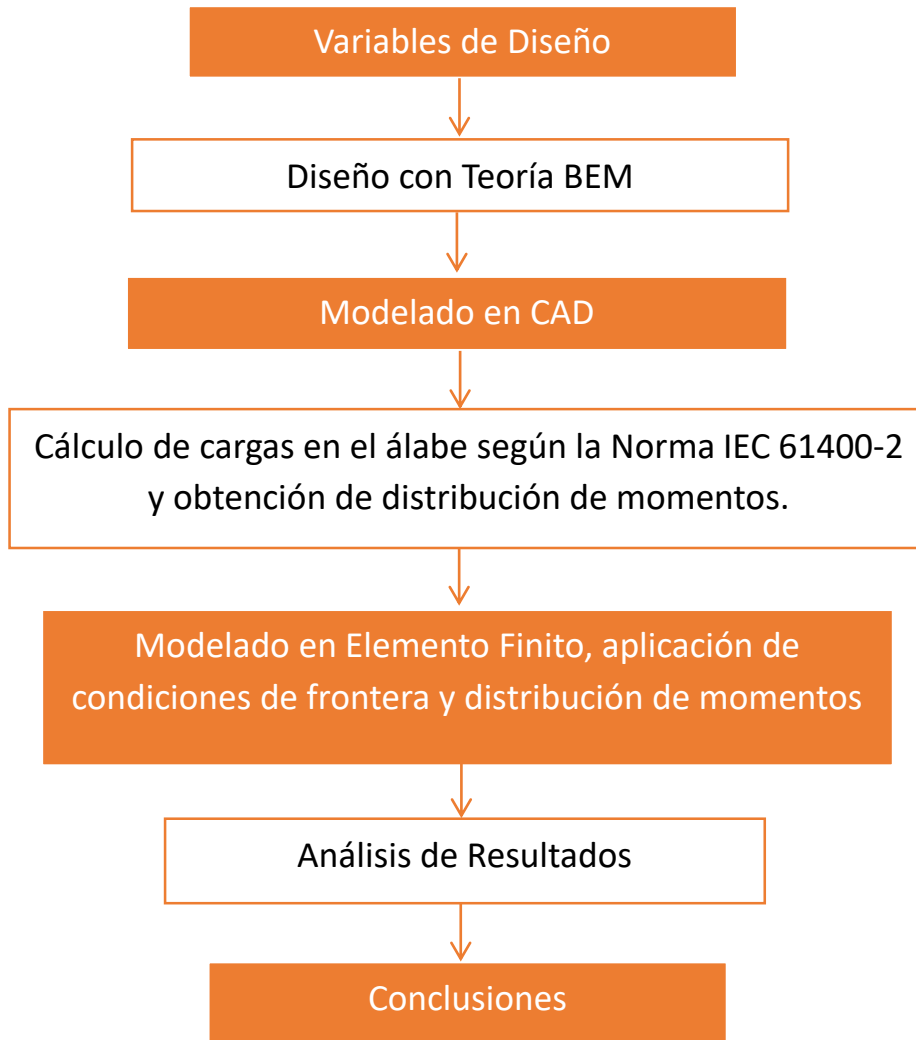
$$-X_C < \sigma_1 < X_T$$

$$-Y_C < \sigma_2 < Y_T$$

$$-S < \tau_{12} < S$$

- 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.

Metodología



La Norma IEC 61400-2

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

Pruebas de resistencia para un álabe simple.

Deflexión operación normal.

$$M_{xB} = \frac{\lambda - Q_d}{B}$$

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

$$Q_d = \frac{P}{w_d}$$

Donde P, es la potencia y $w_d = \Omega$, la velocidad angular de diseño (rad/seg).

Deflexión en carga extrema.

• Deflexión en carga extrema.

Con referencia a [13] se toma 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. La formula para calcular la fuerza de sustentación es:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot V^2 \cdot A$$

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:

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

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.

Deflexión al daño.

• Deflexión al daño.

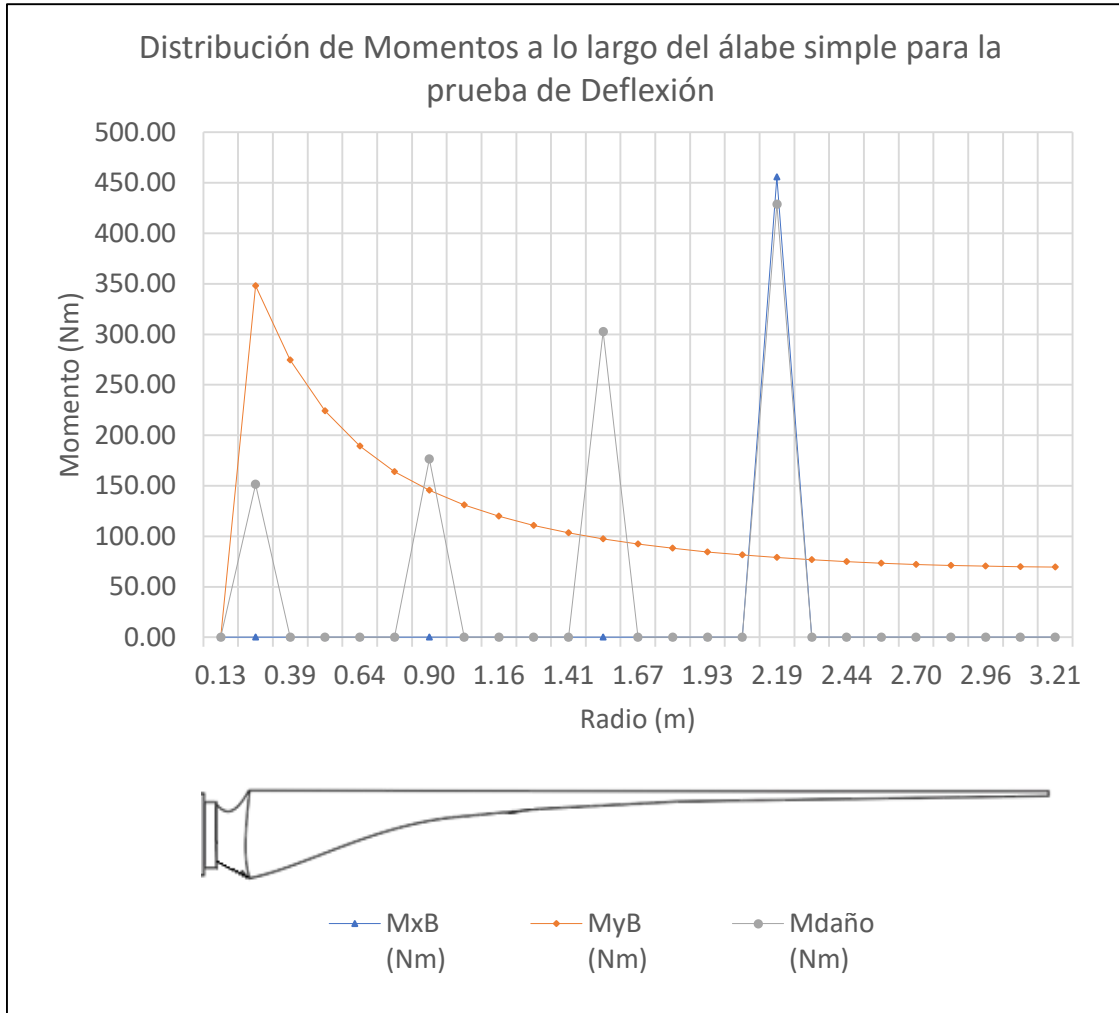
En la práctica, ésta prueba de laboratorio consiste en agregar carga paulatinamente de tal manera que se aumenta el momento en el álabe lo mas posible hasta que se escuche un "crack", Debido a que la carga depende de la velocidad del viento al cuadrado, por tanto se puede estimar la velocidad del viento a la que ocurrirá el daño mediante la ecuación [14]:

$$\frac{v_{daño}^2}{v_{extrema}^2} = \frac{M_{daño}}{M_{extremo}}$$

Por lo que la velocidad de viento de daño es $v_{daño} = 74.73$ m/s. El factor de seguridad se puede establecer mediante los momentos con la ecuación:

$$S_M = \frac{M_{daño}}{M_{extremo}}$$

Pruebas de resistencia para un álabe simple.

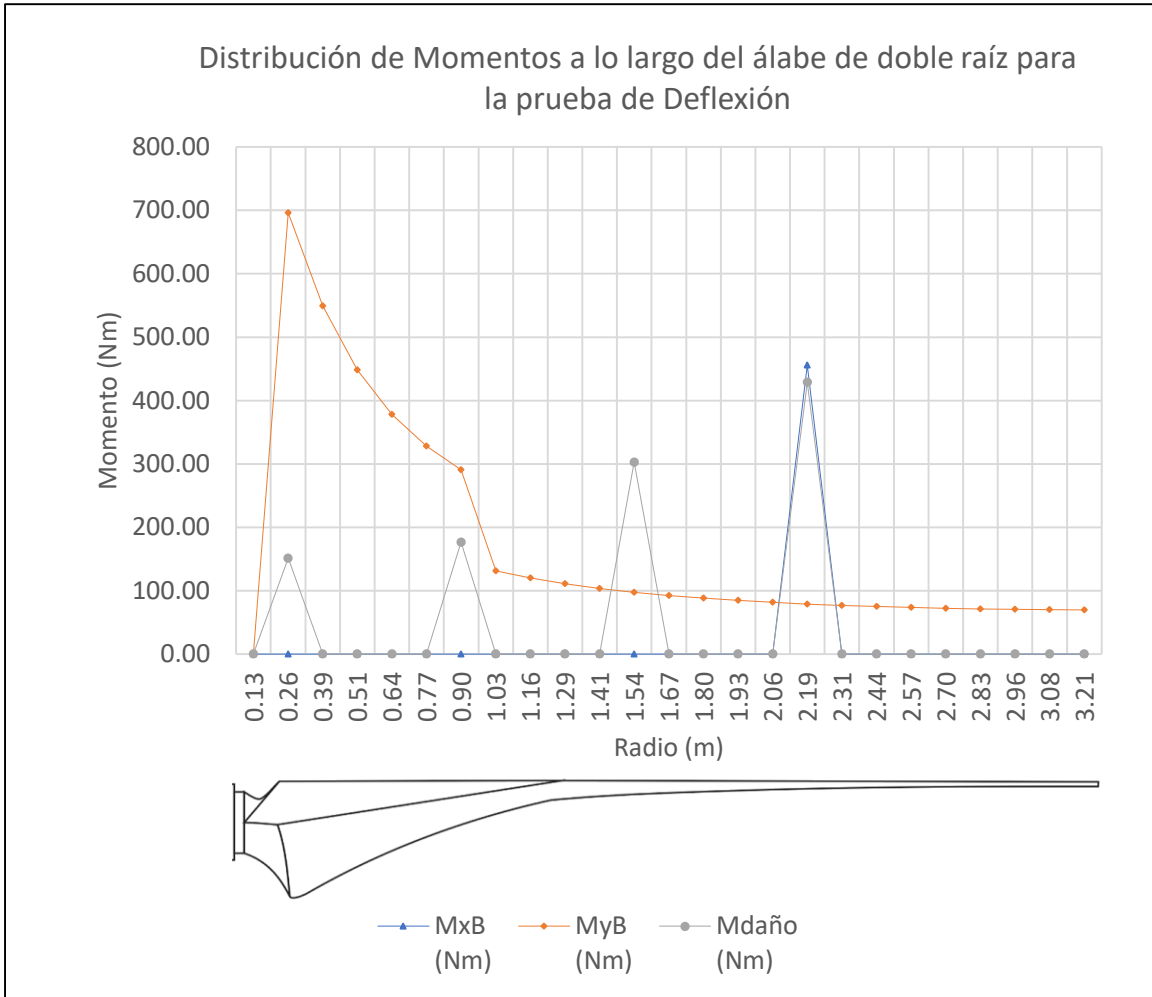


- Deflexión en operación normal.

- Deflexión en carga extrema.

- Deflexión al daño.

Pruebas de resistencia para un álabe de doble raíz.

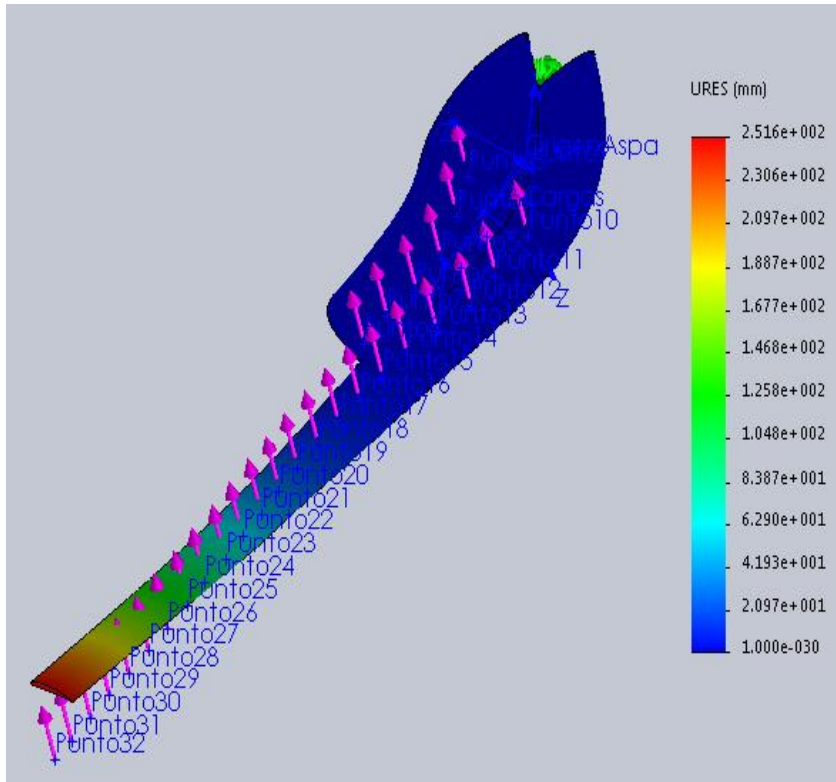


- Deflexión en operación normal.

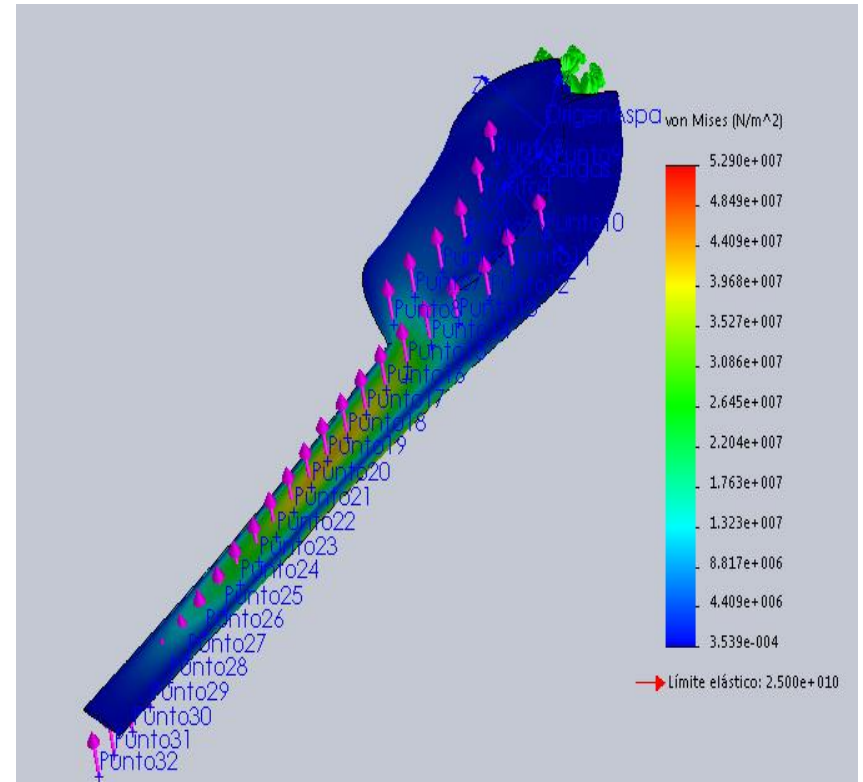
- Deflexión en carga extrema.

- Deflexión al daño.

Resultados

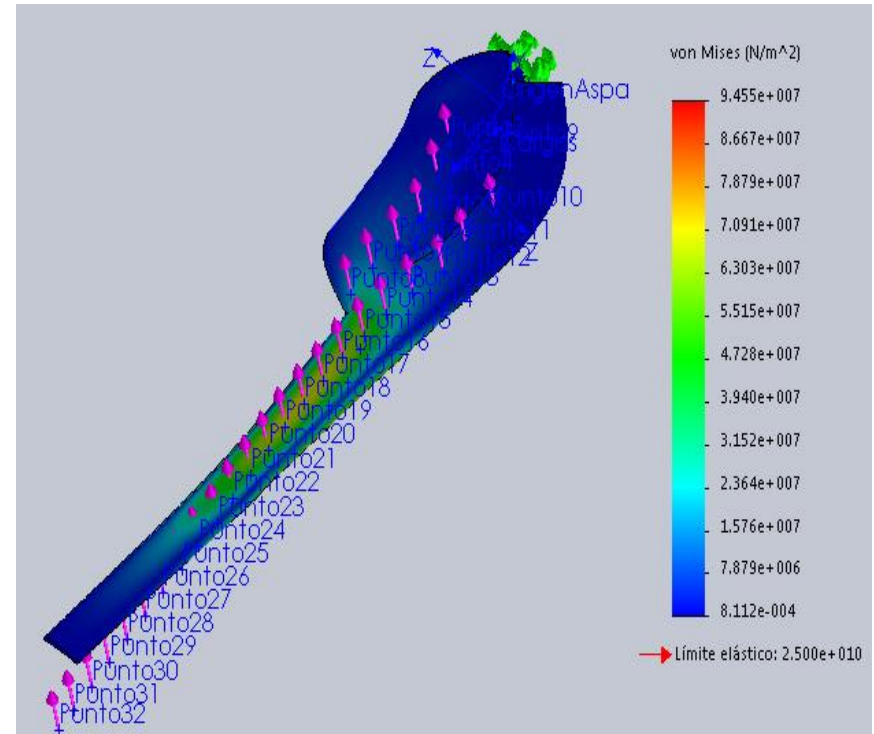
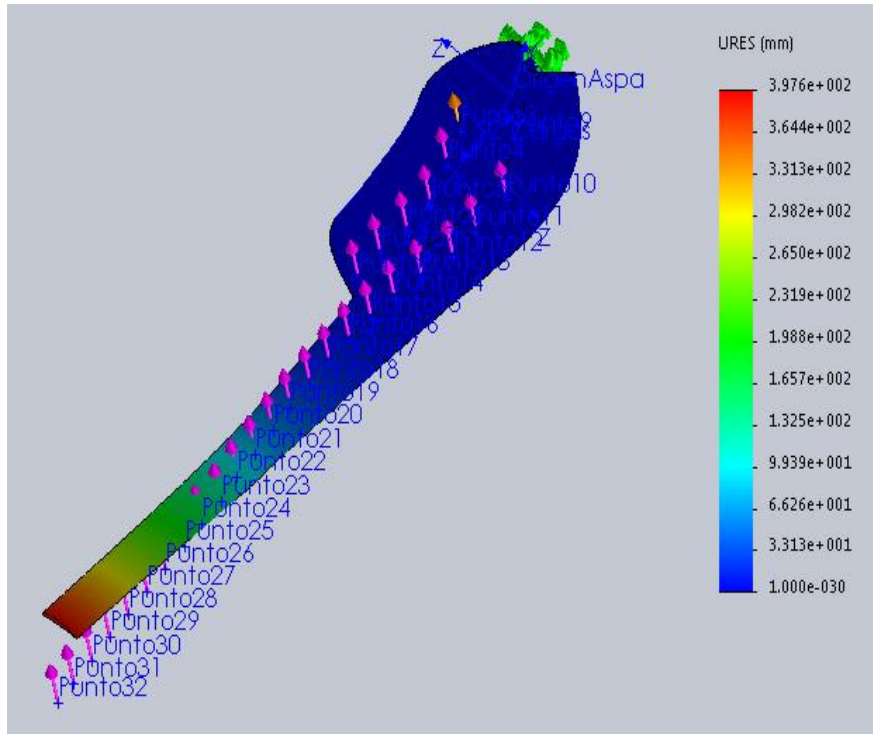


Prueba de Deflexión en carga extrema del álabe de doble raíz en el Elemento Finito, deformaciones (mm)



Prueba de Deflexión en carga extrema del álabe de doble raíz en el Elemento Finito, von Mises (Nm²).

Resultados



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

Prueba de Deflexión al fallo del ábale de doble raíz en el Elemento Finito, von Mises (Nm²).

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 álabe 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 álabes de doble raíz, se incrementan de manera importante en operación normal**, lo que provoca que el factor de seguridad disminuya en relación al álabe simple. De manera similar, **la velocidad de viento de daño, para el caso del álabe de doble raíz, se ve disminuida en comparación con la del álabe simple**. Lo anterior se atribuye al incremento del área del álabe 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 mas importantes**.
-

Conclusiones

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

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 Association.
- [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.

Referencias

- [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
- [15] David Wood, *Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application*. Springer-Verlag London Limited 2011.

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.





ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)