



## **Title: Propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbina de viento de baja capacidad de doble raíz con base a la norma IEC 61400-2**

**Authors: SANTIBAÑEZ-MALDONADO, Adrian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SORIANO-PEÑA, Juan Felipe and MARIN-TELLEZ, Paulina**

**Editorial label ECORFAN: 607-8695**

**BCIERMMI Control Number: 2021-01**

**BCIERMMI Classification (2021): 271021-0001**

**Pages: 16**

**RNA: 03-2010-032610115700-14**

**ECORFAN-México, S.C.**

143 – 50 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 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 |
| Spain   | El Salvador | Republic   |
| Ecuador | Taiwan      | of Congo   |
| Peru    | Paraguay    | Nicaragua  |

# Introducción

Una turbina eólica es una turbina accionada por la energía cinética del viento. Se trata de una turbomáquina motora que intercambia cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar un rotor. La energía mecánica del eje del rotor puede ser aprovechada para diversas aplicaciones como moler, en el caso de los molinos de viento; bombear agua, en el caso de las aerobombas; o para la generación de energía eléctrica, en los aerogeneradores.

Las turbinas eólicas se clasifican, según la orientación del eje del rotor, en verticales y horizontales.

Las turbinas eólicas también se pueden clasificar por la potencia que generan: alta, media y baja potencia. La norma IEC 61400-2, clasifica a las turbinas de baja potencia como aquellas que generan hasta 50KW.

# Introducción

Los componentes más importantes de una turbina eólica son los álabes. Si uno solo se daña de manera estructural puede comprometer el rendimiento del aerogenerador o incluso puede provocar fallas catastróficas. Por este mismo motivo, cada álabe antes de ser puesto en funcionamiento debe ser sometido a rigurosas pruebas mecánicas con el fin de garantizar su seguridad estructural durante su vida útil. Aquí entra la Norma IEC 61400-2, la cual es un estándar internacional para la certificación de turbinas de baja potencia y todos los componentes de éstas.

El presente trabajo de investigación muestra la evaluación de un álabe de doble raíz para una turbina de baja potencia de 2400W en base a la norma IEC 61400-2 utilizando las siguientes hipótesis de carga: operación normal, velocidad máxima de rotación y carga extrema de viento. Se muestran los resultados obtenidos mediante simulación por elemento finito y aplicando técnicas de extensometría.

# Metodología

## Norma IEC 61400-2: hipótesis de carga

La norma especifica la metodología de cargas simplificadas, esto con la finalidad de garantizar su calidad y buen funcionamiento.

Las hipótesis de carga que se evaluaron son: operación normal, velocidad máxima del rotor y carga extrema del viento, las cuales se muestran en la tabla 1. Para cada estado de diseño, se expone el tipo apropiado de análisis por “F” y por “U”. F se refiere al análisis de las cargas por fatiga, a emplear en la valoración del esfuerzo por fatiga. U se refiere al análisis de las cargas críticas tales como el análisis del exceso de resistencia máxima del material, el análisis de la deformación extrema y el análisis de la estabilidad.

| Situación de diseño                              | Hipótesis de carga |   | Tipo de análisis |
|--|--------------------|---|------------------|
| Producción de energía                            | A                  | Operación normal  | F                |
|  | B                  | Orientación   | U                |
|  | C                  | Error de orientación                                    | U                |
|  | D                  | Empuje máximo   | U                |
| Producción de energía de más ocurrencia de fallo | E                  | Velocidad de rotación máxima                            | U                |
|  | F                  | Cortocircuito en la conexión de carga                   | U                |
| Parada   | G                  | Desconexión (frenado)                                   | U                |
| Carga extrema de viento                          | H                  | Carga extrema del viento                                | U                |
| Condiciones de inmovilización y de falta         | I                  | Inmovilización con carga del viento y exposición máxima | U                |
| Transporte, montaje, mantenimiento y reparación  | J                  | Deberá estar indicado por el fabricante                 | U                |

Tabla 1.- *Hipótesis de carga de diseño para el método de cálculo de cargas simplificadas.*

# Metodología

## Cálculo de las hipótesis de carga en base a la norma IEC 61400-2

La tabla 2 nos muestra los valores obtenidos para cada hipótesis de carga.

| Hipótesis de carga |                              | Valor                              |
|--------------------|------------------------------|------------------------------------|
| A                  | Operación normal             | $\Delta F_{zB}=12151.12 \text{ N}$ |
|                    |                              | $\Delta M_{xB}=1666.57 \text{ Nm}$ |
|                    |                              | $\Delta M_{yB}=378.67 \text{ Nm}$  |
| E                  | Velocidad de rotación máxima | $F_{zB}=62125 \text{ N}$           |
| H                  | Carga extrema del viento     | $M_{yB}=2970.34 \text{ Nm}$        |

Tabla 2.- *Valores obtenidos para cada hipótesis de carga.*

# Metodología

## Simulación

La imagen 1 nos muestra la metodología a seguir para llevar a cabo la simulación del álabe en software de elemento finito.

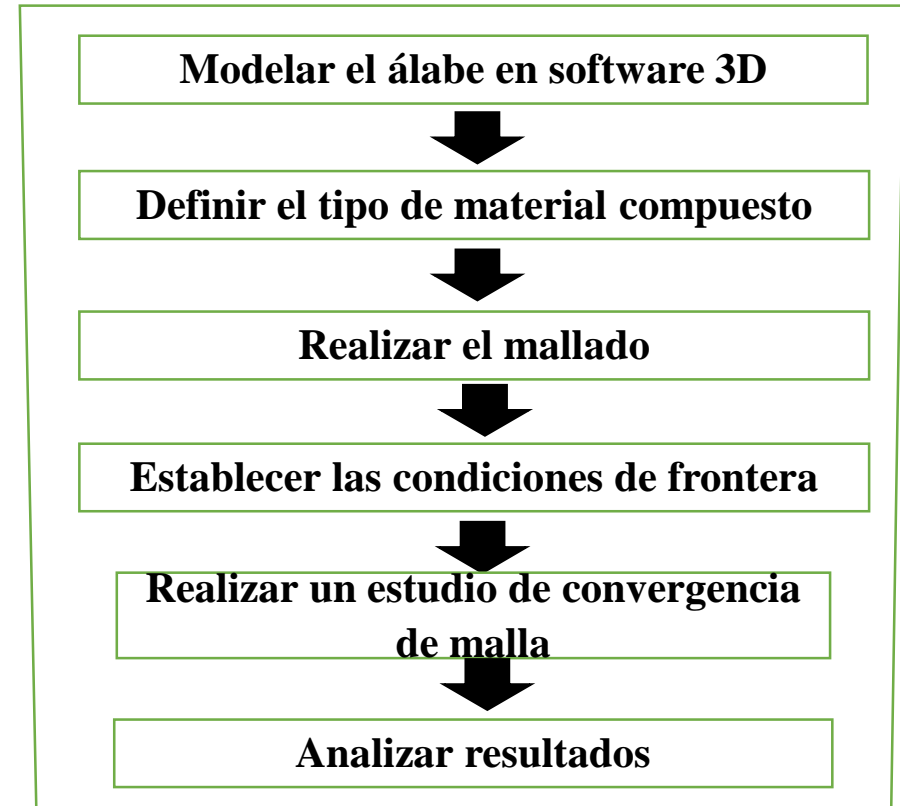


Imagen 1.- Metodología de la simulación.

# Metodología

## Pruebas de laboratorio

La imagen 2 muestra la metodología a seguir para llevar a cabo las pruebas de laboratorio y la imagen 3 nos muestra el banco de pruebas a utilizar.

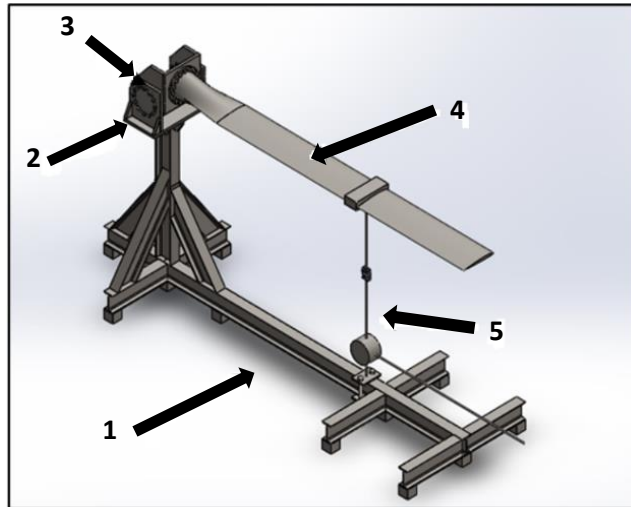


Imagen 3.- Banco de pruebas estáticas y de fatiga.

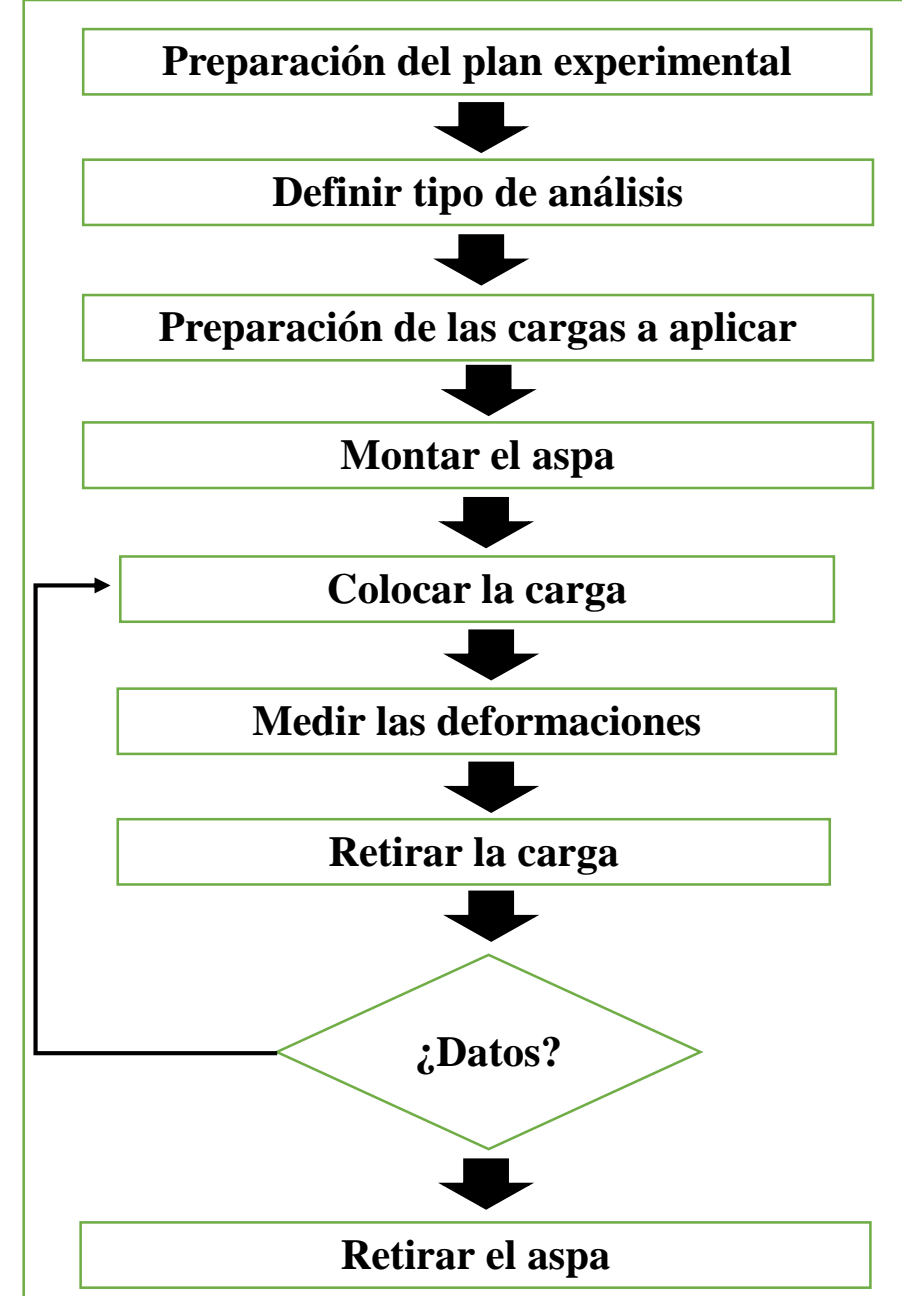


Imagen 2.- Metodología de las pruebas de laboratorio.

# Metodología

## Simulación del álabo en software de elemento finito

El álabo se modeló empleando software CAD utilizando un perfil NACA 4412 para la raíz principal y para la doble raíz, dividiéndose en 25 secciones. Véase imagen 4.

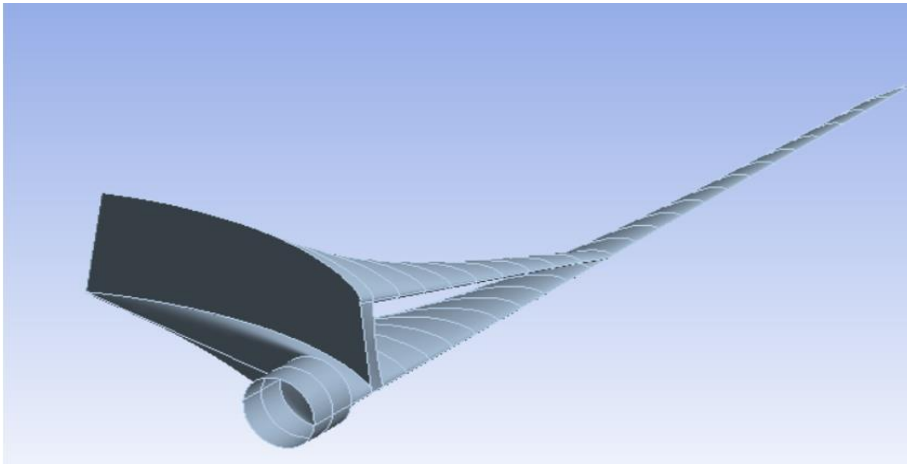


Imagen 4.- Modelado del álabo en software CAD.

El álabo está fabricado con varias capas de material compuesto, fibra de vidrio/Epoxi, dispuestas a  $45^\circ$  y  $90^\circ$  como se muestra en la imagen 5.

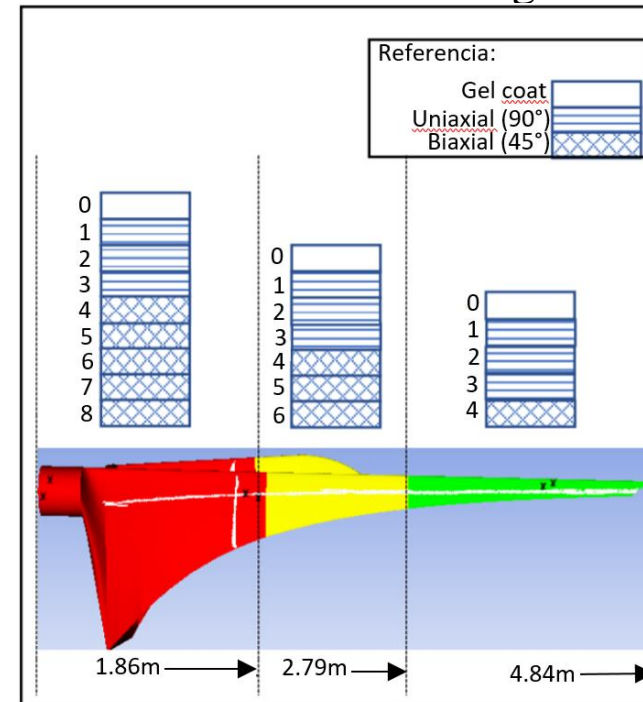


Imagen 5.- Distribución de las láminas de fibra de vidrio/epoxi en álabo de doble raíz.



# Resultados

| Hipótesis de carga | Momento en x (momento flapwise) N | Momento en y (momento edgewise) N | Fuerza en z (centrífuga) N |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| A                  | 256                               | 115                               | 12151.12                   |
| E                  | No aplica                         | No aplica                         | 62125                      |
| H                  | No aplica                         | 459.1                             | No aplica                  |

Tabla 3.- Resumen de las condiciones de frontera.

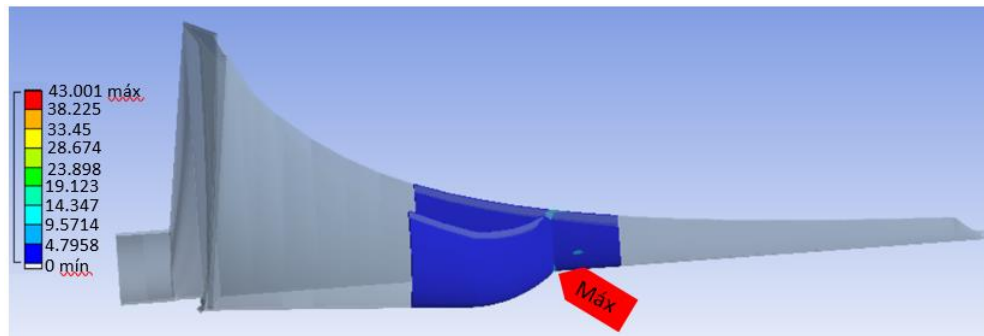


Imagen 6.- Esfuerzo máximo de Von Mises en el extradós de la zona media [Mpa].

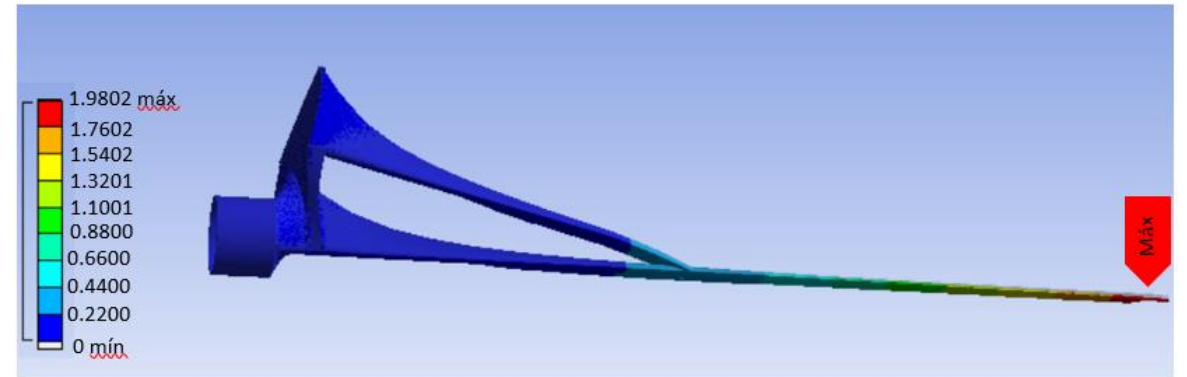


Imagen 7.- Deformación total del álabes [Cm].

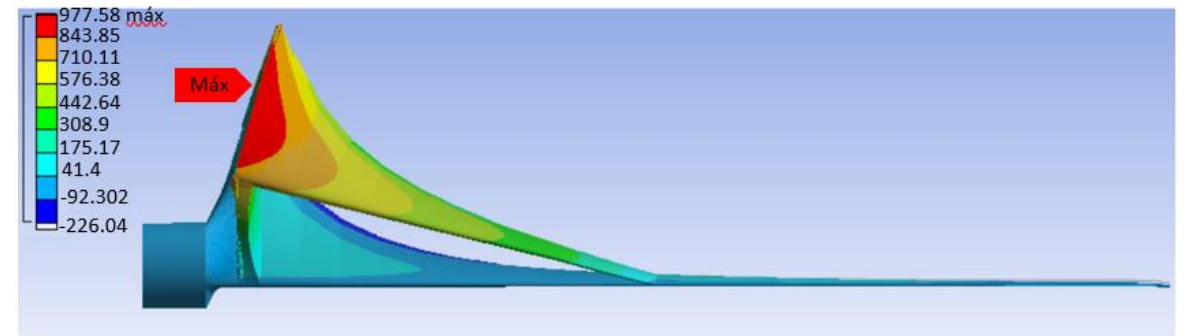


Imagen 8.- Deformación direccional del álabes en el eje z [ $\mu\epsilon$ ].

# Resultados

| Hipótesis de carga |                              | Desplazamiento total (mm) | Esfuerzo máximo de Von Mises (Mpa) | Desplazamiento direccional máximo ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------------|---|
| A                  | Operación normal             | $F_{zB}$ : 24.93          | 35.27                              | 424.52 (eje z)                                      |
|                    |                              | $M_{xB}$ : 43.00          | 86.13                              | 977.58 (eje z)                                      |
|                    |                              | $M_{yB}$ =2.59            | 12.07                              | 4.7282 (eje x)                                      |
| E                  | Velocidad de rotación máxima | $F_{zB}$ : 127.48         | 180.35                             | 2170.5 (eje z)                                      |
| H                  | Carga extrema del viento     | $M_{yB}$ : 20.35          | 94.69                              | 18.876 (eje x)                                      |

Tabla 4.- *Resumen de los resultados obtenidos para los modos de carga simulados.*

# Resultados

## Pruebas de laboratorio

Para la realización de las las mediciones de deformación, se utilizó la técnica de extensometría, la cual, consiste en adherir galgas extensométricas a la superficie del aspa, que son básicamente una resistencia variable. Véase imagen 9.

El lugar donde se colocaron las galgas se eligió en base a los resultados obtenidos en la simulación numérica. Cabe destacar que 2 de los 5 modos de carga no se pueden reproducir en laboratorio debido a la complejidad de las mismas, por lo tanto, se limita a 3 modos de carga, la tabla 5 resume los modos de carga y sus magnitudes, tanto en Newtons como en kilogramos.

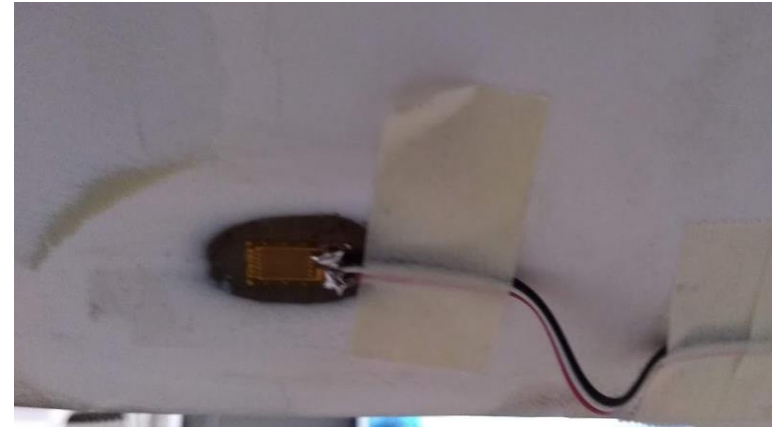


Imagen 9.- Galga instalada en el álabe.

| Hipótesis   | Carga (N) | Carga a aplicar (kg) |
|-------------|-----------|----------------------|
| A: Flapwise | 256       | 26.1                 |
| A: Edgewise | 115       | 11.8                 |
| H: Edgewise | 459.1     | 46.8                 |

Tabla 5.- Resumen de las cargas a aplicar en laboratorio.

# Resultados

## Pruebas de laboratorio

Se llevaron a cabo 30 mediciones para cada modo de carga, sensando de cada galga, su temperatura, humedad y temperatura ambiente. Para evitar la fatiga en el álabe, se decidió realizar las mediciones en dos días. Los resultados obtenidos se muestran a continuación para el modo Flapwise en las tablas 6 y 7.



Imagen 10.- Galgas instaladas en el álabe para las pruebas a Flapwise.

| Hipótesis de carga A: Flapwise            |       |       |         |         |
|---|-------|-------|---------|---------|
| Medidas de tendencia central y dispersión | Galga |       |         |         |
|   | A     | B     | C       | D       |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                   | 54.76 | 20.76 | -177.47 | -191.11 |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                    | 54    | 20    | -183    | -194    |
| Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )     | 2.75  | 2.04  | 5.14    | 4.44    |
| Coefficiente de variación                 | 5.02  | 9.85  | 2.90    | 2.32    |

Tabla 6.- Resultados para el día 1, se realizaron 17 mediciones.

| Hipótesis de carga A: Flapwise            |       |       |         |         |
|---|-------|-------|---------|---------|
| Medidas de tendencia central y dispersión | Galga |       |         |         |
|   | A     | B     | C       | D       |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                   | 57.07 | 22.38 | -185.46 | -197.15 |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                    | 57    | 24    | -186    | -198    |
| Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )     | 0.64  | 1.15  | 1.45    | 2.93    |
| Coefficiente de variación                 | 1.12  | 6.71  | 0.78    | 1.49    |

Tabla 7.- Resultados para el día 2, se realizaron 13 mediciones.

# Resultados

## Pruebas de laboratorio

Las galgas para los modos Edgewise se muestran en la imagen 11. Los resultados obtenidos para el modo Edgewise de la hipótesis A se muestran a continuación en las tablas 8 y 9.

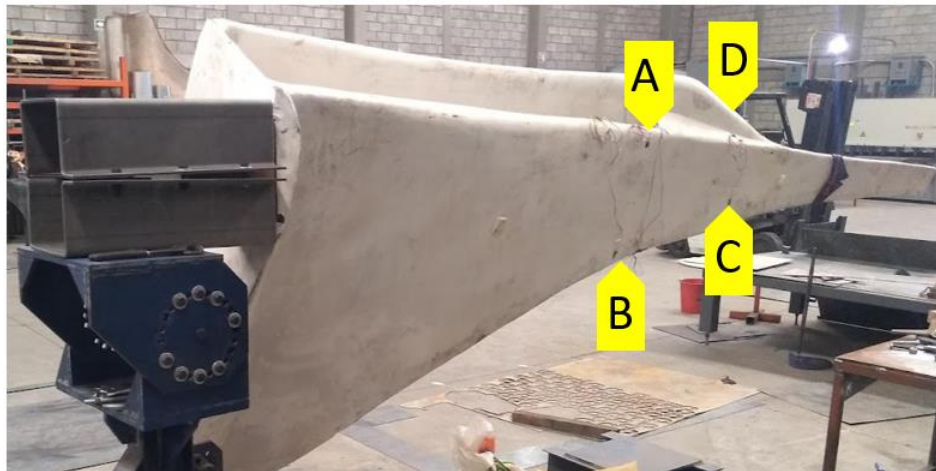


Imagen 11.- Galgas instaladas en el álabe para las pruebas a Edgewise.

| Hipótesis de carga A: Edgewise            |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Medidas de tendencia central y dispersión | Galga |       |       |       |
|   | A     | B     | C     | D     |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                   | -2.73 | 20.93 | 12.13 | 2.86  |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                    | -3    | 21    | 12    | 3     |
| Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )     | 0.59  | 0.45  | 0.51  | 0.74  |
| Coefficiente de variación                 | 21.71 | 2.18  | 4.25  | 25.92 |

Tabla 8.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

| Hipótesis de carga A: Edgewise            |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Medidas de tendencia central y dispersión | Galga |       |       |       |
|   | A     | B     | C     | D     |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                   | -2.93 | 21.06 | 12.13 | 2.8   |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                    | -3    | 21    | 12    | 3     |
| Desviación estándar ( $\mu\epsilon$ )     | 0.59  | 0.45  | 0.35  | 0.67  |
| Coefficiente de variación                 | 20.23 | 2.17  | 2.89  | 24.14 |

Tabla 9.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

# Resultados

## Pruebas de laboratorio

Los resultados obtenidos para el modo Edgewise de la hipótesis H se muestran a continuación en las tablas 10 y 11.

## Resultados

Para el modo de carga de Hipótesis A: Flapwise, las galgas A y B, registraron mediciones de tensión, como era de esperarse de acuerdo a la simulación numérica, las galgas C y D registraron mediciones de compresión, de acuerdo a la simulación numérica, la galga C debería registrar mediciones de tensión, cosa que no sucedió, la galga D si se está comportando de acuerdo a lo esperado (a compresión), ambas galgas mostraron los valores más altos debido a la cercanía al punto de aplicación de la carga.

Para los modos de análisis Edgewise, las galgas A, B y C tuvieron el mismo comportamiento, tanto para la hipótesis A como la H, la galga D fue la única que se comportó de manera distinta, a tensión en la hipótesis A y a compresión en la H.

El coeficiente de variación es bajo en general (salvo en un par de ocasiones) lo que nos indica que las pruebas se llevaron a cabo de manera homogénea y que hay repetibilidad en el experimento. Los valores de desviación estándar más altos se dieron para la Hipótesis A: Flapwise, donde se dieron los valores de deformación más altos, esto nos indica que, a mayores valores de deformación, mayor será la dispersión de los datos y viceversa.

| Hipótesis de carga H                                  |        |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|
| Medidas de<br>tendencia<br>central<br>y<br>dispersión | Galga  |       |       |       |
|   | A      | B     | C     | D     |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                               | -20.06 | 76.66 | 38.93 | -2.8  |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                                | -20    | 74    | 39    | -2    |
| Desviación<br>estándar ( $\mu\epsilon$ )              | 0.79   | 1.17  | 0.88  | 0.77  |
| Coefficiente<br>de variación                          | 3.98   | 1.59  | 2.26  | 27.66 |

Tabla 10.- Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

| Hipótesis de carga H                                  |        |       |       |       |
|---|--------|-------|-------|-------|
| Medidas de<br>tendencia<br>central<br>y<br>dispersión | Galga  |       |       |       |
|   | A      | B     | C     | D     |
| Media ( $\mu\epsilon$ )                               | -19.33 | 72.73 | 38.86 | -2.53 |
| Moda ( $\mu\epsilon$ )                                | -19    | 74    | 39    | -2    |
| Desviación<br>estándar ( $\mu\epsilon$ )              | 1.34   | 1.53  | 0.74  | 1.18  |
| Coefficiente<br>de variación                          | 6.95   | 2.10  | 1.91  | 46.86 |

Tabla 11.- Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

# Conclusiones

Como se pudo observar en el presente trabajo, la simulación numérica es un paso fundamental previo a la hora de diseñar álabes de turbinas ya que los resultados que nos arroja son claves para poder realizar los ensayos estructurales en laboratorio.

Los resultados mayores de deformación medidos en laboratorio mediante extensometría, se dieron en la Hipótesis A: Flapwise como era de esperarse.

Los valores obtenidos en laboratorio nos indican que el álabe trabajará de forma segura en funcionamiento, ya que los valores obtenidos están lejos de los valores de fallo. Por lo tanto podemos concluir que la norma IEC 61400-2 se puede aplicar perfectamente a este tipo de álabes de doble raíz siguiendo la metodología planteada para su análisis estructural.

# Referencias

David Wood (2011). Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. SpringerVerlag London Limited.

Erick Pérez Juárez (2019). Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad. UMSNH.

Esmeralda Castillo Sebastián (2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos, tesis, Universidad Politécnica de Valencia.

J. F. Manwell, J. G. MCGowan, A. L. Rogers (2009). Wind Energy Explained Theory, Design and Application, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd.

Jean-Daniel Pitteloud and Stefan Gsänger (2017). World Wind Energy Association. Small Wind World Report small wind report. WWEA, Bonn, Germany.

Monje, C. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica, Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana.



# Referencias

Norma Europea EN 61400-2:2015 (2015). que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 61400-2.

Paulina Marin Tellez (2020). Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600 W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2, UMSNH.

R.H. Barnes, E.V. Morozov, K. Shankar (2015). Improved Methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades, Composite Structures 119, pg. 677-684.

SENSITEC S.A. de C.V. (2016). Extensometría Eléctrica.

Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2001). WIND ENERGY HANDBOOK, by John Wiley & Sons, Ltd.

Victor López Garza et. al. (2018). 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.

Víctor López Garza (2020). Diseño y manufactura de álabes de turbinas de viento de eje horizontal de baja capacidad para bajas velocidades de viento, CIATEQ.



**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](http://www.ecorfan.org/booklets))