

# Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

## Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2

## Numerical simulation and proposal for structural tests of low-capacity double-root wind turbine blades based on the IEC 61400-2 standard

Adrián Santibáñez Maldonado\*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez

**Para citar este artículo:** Santibáñez Maldonado A, López Garza V, Soriano Peña JF, Marín Téllez P, Marín Téllez GJ (2024). Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2. *Ciencia Nicolaita* 90: 117-126.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.743>

### Historial del artículo



Recibido: 17 de agosto de 2023

Aceptado: 10 de noviembre de 2023

Publicado en línea: abril 2024



**Ver material suplementario**



**\*Correspondencia de autor:** [1214743e@umich.mx](mailto:1214743e@umich.mx)



**Términos y condiciones de uso:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



**Envíe su manuscrito a esta revista:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Simulación numérica y propuesta de ensayos estructurales de aspas de turbinas de viento de baja capacidad de doble raíz con base en la norma IEC 61400-2

## Numerical simulation and proposal for structural tests of low-capacity double-root wind turbine blades based on the IEC 61400-2 standard

Adrián Santibáñez Maldonado\*, Víctor López Garza, Juan Felipe Soriano Peña, Paulina Marín Téllez, Gerardo Javier Marín Téllez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica.

### Resumen

En el presente trabajo, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación numérica, así como los resultados de los ensayos estructurales mediante extensometría, para un aspa de turbina de viento de doble raíz de 2400 W en base a la norma IEC 61400-2, bajo las cargas de operación normal. Se desarrolló una metodología para llevar a cabo la experimentación y se muestra la importancia de la simulación numérica como herramienta vital previa a llevar a cabo el plan experimental.

**Palabras clave:** Simulación numérica, álabe de doble raíz, ensayos estructurales, extensometría

### Abstract

In this work, we present the results obtained through numerical simulation as well as structural tests through extensometry for a 2400 W double root wind turbine blade based on the IEC 61400-2 standard, under normal operating loads. A methodology was developed to carry out the experimentation and the importance of numerical simulation as a vital tool prior to carrying out the experimental plan is shown.

**Keywords:** Numerical simulation, double root blade, structural tests, extensometry

\*Autor de correspondencia: [1214743e@umich.mx](mailto:1214743e@umich.mx)  
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

## Introducción

Una turbina eólica es 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. 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.

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 (MX/a/2017/015904) 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

### Hipótesis de carga aplicadas con base en la norma IEC 61400-2

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 exceso de

resistencia máxima del material, de la deformación extrema y de la estabilidad.

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

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

### Hipótesis A: operación normal

La carga de diseño para “operación normal” es una carga de fatiga. La hipótesis de carga asume una carga de fatiga de rango constante para la pala.

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \Omega_{n,design}^2 \quad (1)$$

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{B} + 2m_B g R_{cog} \quad (2)$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} \quad (3)$$

### Hipótesis E: velocidad máxima del rotor

La carga debida a la fuerza centrífuga en la raíz de la pala  $F_{zB}$  se calcula como sigue:

$$F_{zB} = m_B R_{cog} \Omega_{n,máx}^2 \quad (4)$$

### Hipótesis H: carga extrema del viento

En esta hipótesis de carga, el aerogenerador funciona de la manera prevista en el diseño para velocidades de viento extremas. Las cargas deben calcularse tomando la velocidad máxima registrada en los últimos 50 años,  $V_{e50}$ :

$$M_{yB} = \frac{C_D}{4} \rho V_{e50}^2 A_{projB} R \quad (5)$$

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** 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	$M_{yB}=2970.34 \text{ Nm}$

### Simulación del álab

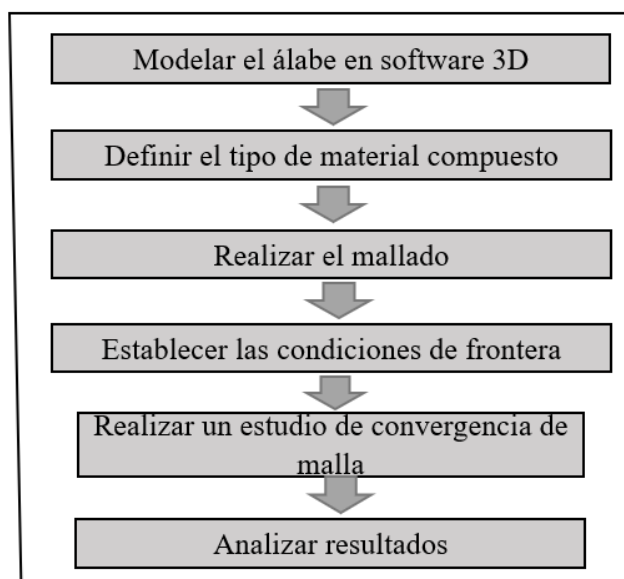
La **Figura 1** muestra la metodología a seguir para llevar a cabo la simulación del álab en software de elemento finito.

El álab se modeló empleando software CAD utilizando un perfil NACA 4412 para la raíz principal y para la doble raíz, dividiéndose en 25 secciones. Véase **Figura 2**.

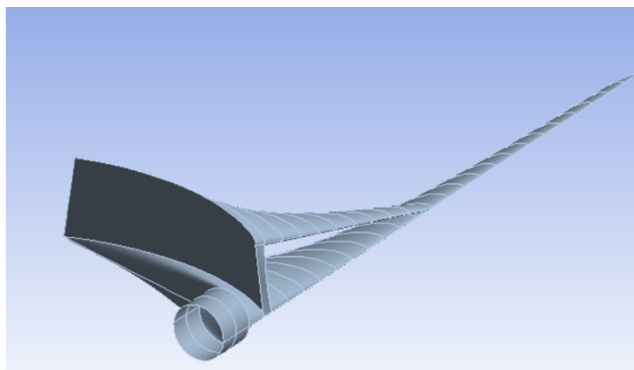
El álab está fabricado con varias capas de material compuesto, fibra de vidrio/Epoxi, dispuestas a  $\pm 45^\circ$  y  $90^\circ$  como se muestra en la **Figura 3**. Los laminados se modelaron empleando el modulo ACP-Pre de ANSYS, el cual permite hacer laminados o sandwich de materiales compuestos de matriz polimérica y fibras en diferentes orientaciones.

El mallado se hizo con la ayuda de un software de elemento finito mediante elementos triangulares (**Figura 4**). En la **Tabla 3** se muestra la calidad del mallado. En la **Figura 5** se muestra el estudio de convergencia de malla.

Las condiciones de frontera consistirán en aplicar las hipótesis de carga agregando una condición de



**Figura 1.** Metodología para la simulación numérica.

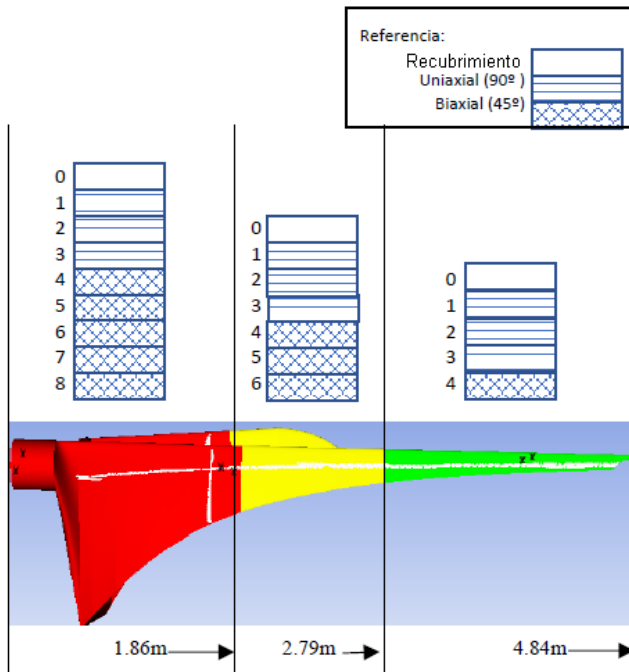


**Figura 2.** Modelo CAD 3D del álab de doble raíz.

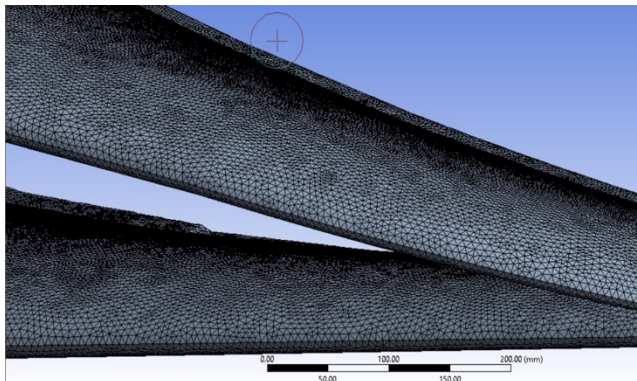
empotramiento en la raíz del aspa (**Figura 6**). Para fines prácticos, las hipótesis de carga que impliquen momentos en el aspa, serán transformadas a fuerzas en el mismo eje, utilizando la distancia a la raíz que en este caso es de 3.25 metros. En la **Tabla 4** se presenta

**Tabla 3.** Métricas de calidad de malla.

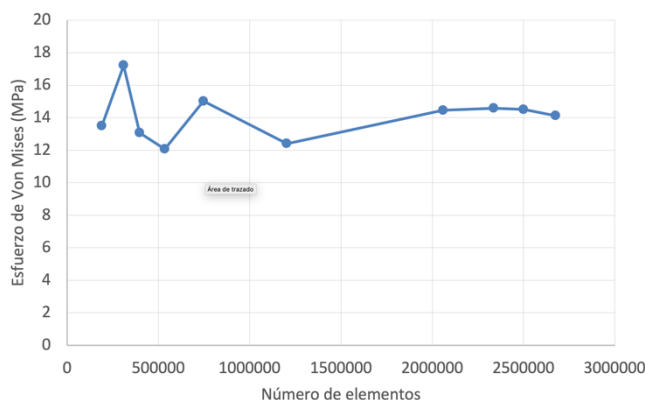
Parámetro	Promedio	Calidad
Tamaño de elemento	2.6 mm	-
Nodos	1338349	-
Elementos	2676144	-
Tipo de elemento	Tri3	-
Calidad del elemento	0.96721	Excelente
Relación de aspecto	1.184	Excelente
Esquinamiento	0.04936	Excelente
Calidad ortogonal	0.96966	Excelente



**Figura 3.** Distribución de las láminas de fibra de vidrio/epoxi en álabes de doble raíz.

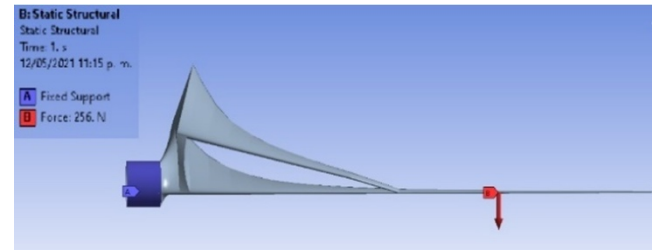


**Figura 4.** Mallado del álabes de doble raíz.



**Figura 5.** Gráfica de convergencia de malla.

un resumen de las condiciones de frontera de las 3 hipótesis de carga.



**Figura 6.** Condiciones de frontera.

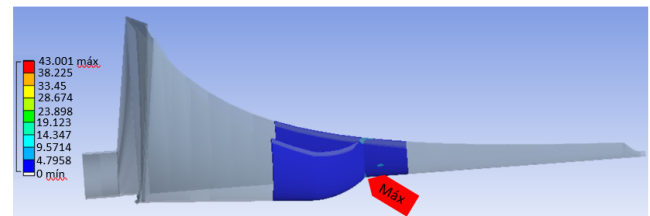
**Tabla 4.** Resumen de las cargas a aplicar.

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

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados en esfuerzo máximo de Von Mises (**Figura 7**) y desplazamiento total (**Figura 8**) y el desplazamiento direccional en el eje Z (**Figura 9**) para la hipótesis de carga A: Flapwise. Según Castillo (2016), es aceptable aplicar la teoría de falla de Von Mises en materiales compuestos siempre y cuando el material se comporte más o menos lineal en la zona elástica en el diagrama esfuerzo-deformación, el material compuesto de fibra de vidrio/Epoxi tiene este tipo de comportamiento lineal.

A continuación, la **Tabla 5** resume los resultados obtenidos de desplazamiento total, esfuerzo máximo de Von Mises y desplazamiento direccional.



**Figura 7.** Esfuerzo máximo de Von Mises, ubicado en la zona media del extradós [MPa].

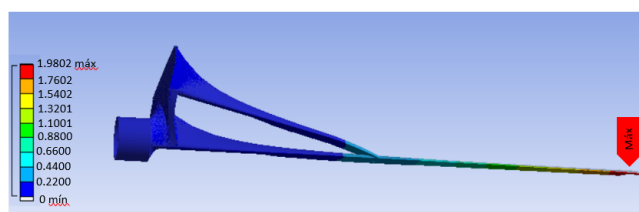


Figura 8. Deformación total del álabe [cm].

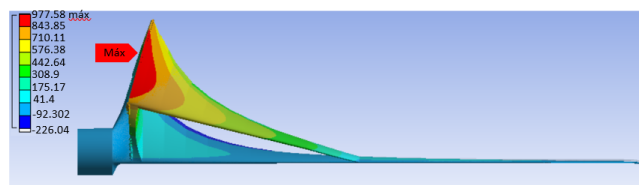
Figura 9. Deformación direccional del álabe en el eje Z [ $\mu\epsilon$ ].

Tabla 5. Resumen de los resultados obtenidos para los modos de carga simulados.

Hipótesis de carga	Desplazamiento total (mm)	Esfuerzo máximo de Von Mises (Mpa)	Desplazamiento direccional máximo ( $\mu\epsilon$ )
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)

## Pruebas de laboratorio

En la **Figura 10**, se muestra a detalle las etapas del plan experimental. La primera es identificar todos los factores o variables no experimentales que puedan afectar el experimento y determinar cómo controlarlas; tales como los factores ambientales, temperatura, ruido, etc.

La **Figura 11** muestra la metodología a seguir para realizar las pruebas de laboratorio.

Para realizar los ensayos estructurales a los álabes se utilizará el banco de pruebas de cargas estáticas y de fatiga (**Figura 12**) diseñado por el Ing. Erick Pérez

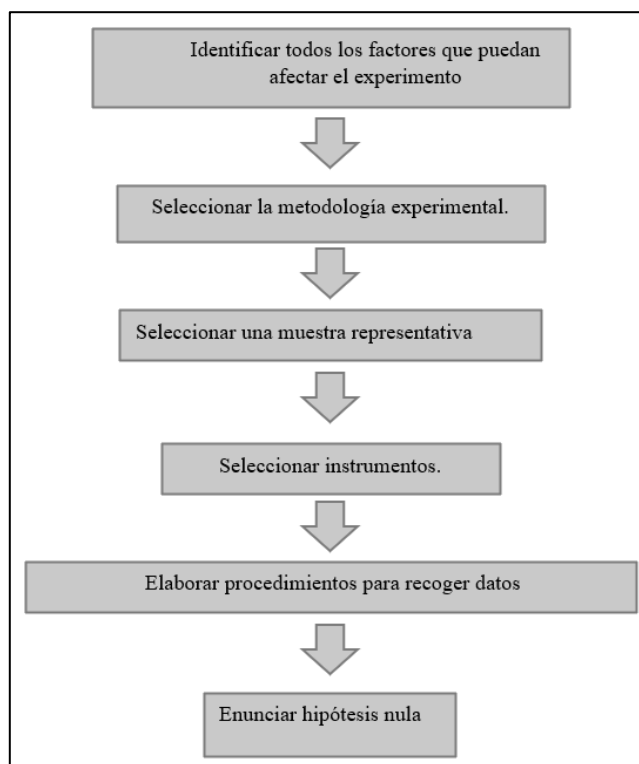


Figura 10. Metodología del plan experimental.

Juárez, el cual está conformado por las siguientes partes:

1. Base
2. Cabezal-soporte
3. Cabezal-sujetador
4. Álabe
5. Sistema de fuerza

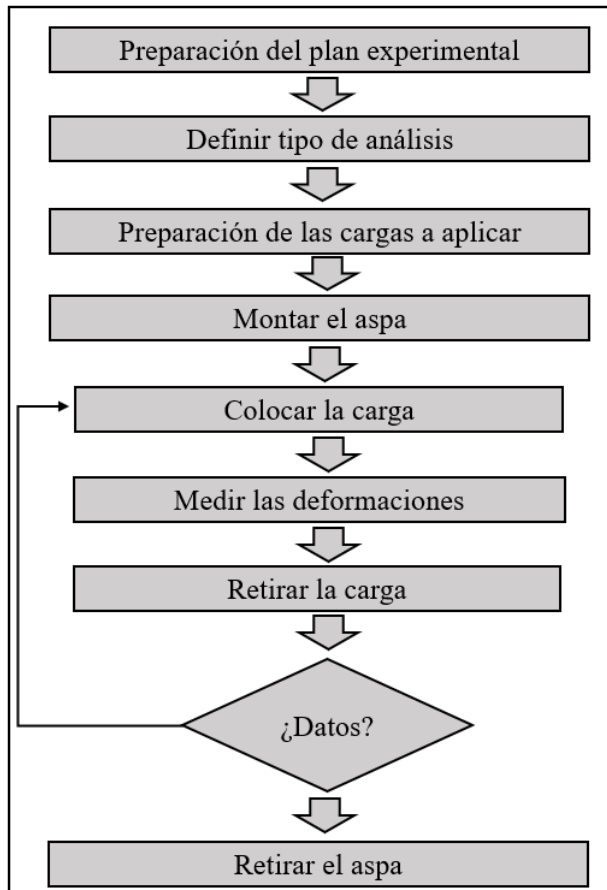
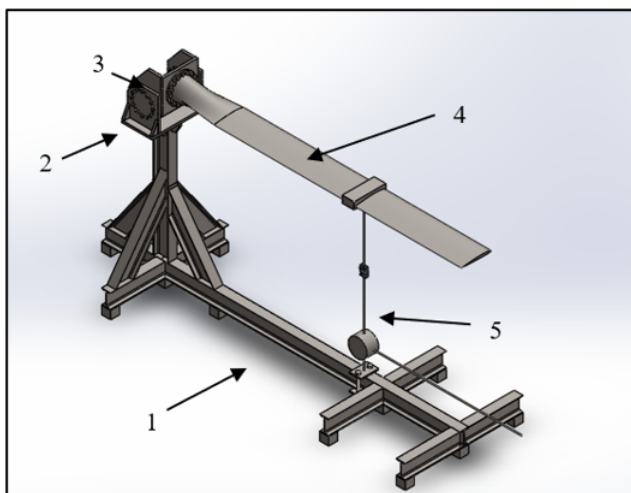
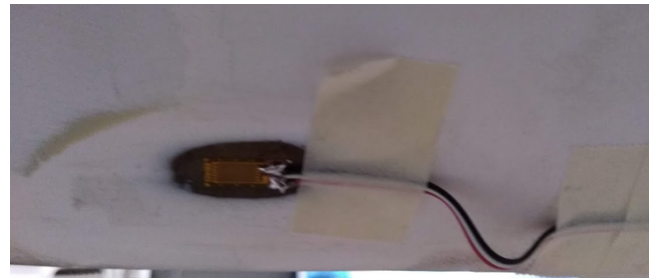
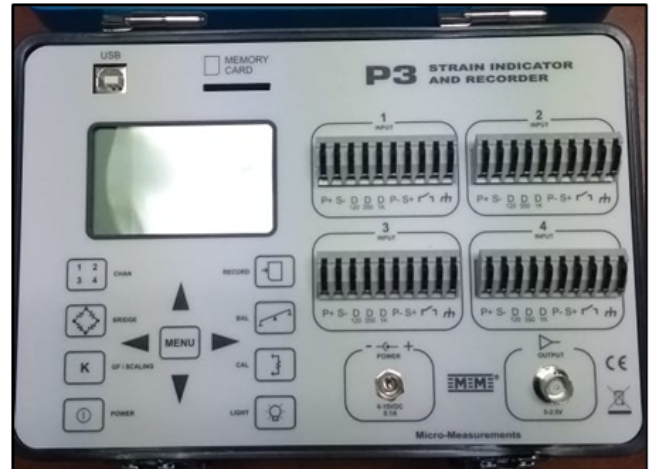
Para la realización de las mediciones de deformación, se utilizó la técnica de extensometría, la cual, consiste en adherir galgas extensométricas a la superficie del aspa, que son básicamente una resistencia variable (**Figura 13**). Se utilizaron galgas modelo CEA-06-240UZ-120 y un indicador de tensión y registrador modelo P3 para recabar los datos (**Figura 14**).

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 6** resume los modos de carga y sus magnitudes, tanto en Newtons como en kilogramos.



**Tabla 6.** Resumen de las cargas a aplicar en laboratorio.

Hipótesis	Carga (N)	Carga a aplicar (kg)
<b>A: Flapwise</b>	256	26.1
<b>A:Edgewise</b>	115	11.8
<b>H: Edgewise</b>	459.1	46.8

**Figura 11.** Metodología para las pruebas de laboratorio.**Figura 12.** Banco de pruebas estáticas y de fatiga.**Figura 13.** Galga instalada en el álabe.**Figura 14.** Indicador de tensión y registrador modelo P3.

## Resultados

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.

**Figura 15.** Galgas instaladas en el álabe para las pruebas a Flapwise.

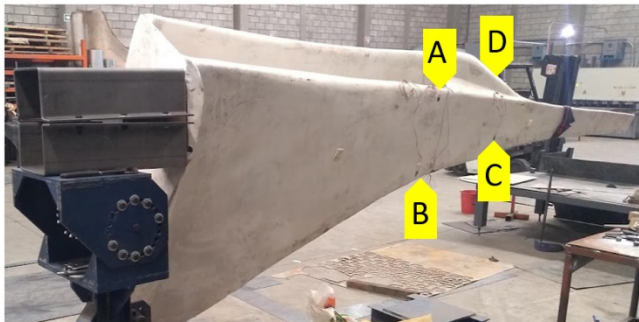
Las Tablas 7 y 8 muestran las medidas de dispersión y de tendencia central de los resultados obtenidos para las mediciones a Flapwise (**Figura 15**).

**Tabla 7.** 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 (με)	54.76	20.76	-177.47	-191.11
Moda (με)	54	20	-183	-194
Desviación estándar (με)	2.75	2.04	5.14	4.44
Coefficiente de variación	5.02	9.85	2.90	2.32

**Tabla 8.** Resultados para el día 2, se realizaron 13 mediciones.

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



**Figura 16.** Galgas instaladas en álabes para pruebas a Edgewise.

**Tabla 9.** 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 (με)	-2.73	20.93	12.13	2.86
Moda (με)	-3	21	12	3
Desviación estándar (με)	0.59	0.45	0.51	0.74
Coefficiente de variación	21.71	2.18	4.25	25.92

Las galgas para los modos Edgewise se muestran en la **Figura 16**. Los resultados obtenidos para el modo Edgewise de la hipótesis A se muestran a continuación en las **Tablas 9 y 10**.

**Tabla 10.** Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

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

Por último, se muestran los resultados para la hipótesis H, también a Edgewise en las **Tablas 11 y 12**:

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.

**Tabla 11.** Resultados para el día 1, se realizaron 15 mediciones.

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

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.



**Tabla 12.** Resultados para el día 2, se realizaron 15 mediciones.

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

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 reproducibilidad 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.

## Conclusiones

Fue posible realizar la simulación numérica y ensayos estructurales a un álabe de doble raíz para una turbina de baja potencia empleando las hipótesis de carga que describe la norma IEC 61400-2. De acuerdo a los valores obtenidos tanto de esfuerzo mediante la simulación como de microdeformaciones obtenidas mediante extensometría, se puede concluir que el álabe es apto para trabajar en condiciones sin que se vea comprometida su integridad estructural.

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.

Cabe destacar que, para este tipo de álabes de doble raíz a la hora de hacer los ensayos en modo Flapwise, hay que tener mucha precaución en la zona de unión de la doble raíz, ya que es la que presentó los mayores valores de microdeformaciones ( $-407.92 \mu\epsilon$ ), además, presentó el esfuerzo máximo de Von Mises ( $86.135 \text{ MPa}$ ). Caso contrario en las hipótesis a Edgewise, donde prácticamente todo el esfuerzo lo presentó la raíz principal y los valores de

microdeformaciones fueron de casi cero en la doble raíz tanto para la hipótesis A como la H.

Los resultados mayores de deformación medidos en laboratorio mediante extensometría, se dieron en la Hipótesis A: Flapwise como era de esperarse. Una consideración de suma importancia es que el módulo de Young empleado en la simulación para la fibra de vidrio/epoxi difiere del módulo de Young real del aspa analizada, esto causa discrepancia entre los valores obtenidos con los distintos métodos. Habría que hacer una caracterización de la resina empleada para la fabricación del álabe, pero por cuestiones de tiempo no fue posible.

Los valores obtenidos en el 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

- Barnes RH, Morozov EV, Shankar K (2015). Improved Methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades. *Composite Structures* 119: 677-684.
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E (2001). WIND ENERGY HANDBOOK, by John Wiley & Sons, Ltd.
- Castillo Sebastián E (2016). Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos, tesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL (2009). Wind Energy Explained Theory, Design and Application, Second Edition. John Wiley & Sons Ltd.
- Marin Tellez P (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.
- Monje C (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica, Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana.
- Norma Europea EN 61400-2:2015 (2015). que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 61400-2.
- López Garza V 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* 5-17: 22-30.

- López Garza V (2020). Diseño y manufactura de álabes de turbinas de viento de eje horizontal de baja capacidad para bajas velocidades de viento, CIATEQ.
- Pérez Juárez E (2019). Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad. UMSNH.
- Pitteloud Jean-Daniel, Gsänger S (2017). World Wind Energy Association. Small Wind World Report small wind report. WWEA, Bonn, Germany.
- SENSITEC S.A. de C.V. (2016). Extensometría Eléctrica.
- Wood D (2011). Small Wind turbines, Analysis, Design, and Application. SpringerVerlag London Limited.