

Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2

Simulation and laboratory testing of a 600W wind turbine assembly according to the standard IEC-61400-2

MARIN-TELLEZ, Paulina†*, LÓPEZ-GARZA, Víctor, PÉREZ-JUÁREZ, Erick y GONZÁLEZ-ÁVALOS, Gilberto

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

ID 1^{er} Autor: *Paulina, Marin-Tellez* / ORC ID: 0000-0003-2966-3409, Researcher ID Thomson: G-2113-2019, CVU CONACYT ID: 928539

ID 1^{er} Coautor: *Víctor, López-Garza* / ORC ID: 0000-0001-9090-9119, Researcher ID Thomson: H-6969-2018, Open ID 107470673007841597382, CVU CONACYT ID: 554311

ID 2^{do} Coautor: *Erick, Pérez-Juárez* / ORC ID: 0000-0003-3069-7198 Researcher ID Thomson: G-4108-2018, Open ID: 111977551830633714492, CVU CONACYT ID: 815741

ID 3^{er} Coautor: *Gilberto, González-Ávalos* / ORC ID: 0000-0002-8041-7847, CVU CONACYT ID: 122994

DOI: 10.35429/JSL.2019.18.6.24.31

Recibido 23 Enero, 2019; Aceptado 30 Marzo, 2019

Resumen

En el presente trabajo, se muestra la simulación numérica realizada mediante software de elemento finito (FEA) y las pruebas mecánicas estáticas empleando técnicas de extensometría para un aspa de turbina de viento de 600W de acuerdo con la norma internacional IEC 61400-2. Se utilizó un perfil NACA 4412 y las cargas aplicadas fueron seleccionadas de acuerdo con las siguientes hipótesis de carga descritas en la norma: operación normal, empuje máximo, inmovilización con carga del viento y exposición máxima. Se desarrolló una metodología tanto para la simulación como para las pruebas de laboratorio, también se analizaron y compararon los datos de las microdeformaciones medidas por extensometría con los obtenidos por la simulación numérica. Concluyendo que, el análisis de elementos finitos es un paso clave previo a la manufactura que nos permite ahorrar recursos y nos otorga parámetros para realizar tanto la manufactura como las pruebas. Las pruebas de laboratorio son necesarias para garantizar un funcionamiento seguro y confiable en operación del álabes durante su vida útil.

Álabes, Medición, Simulación

Abstract

In the present work is shown the numerical simulation performed by means of finite element software (FEA) and the static mechanical tests using extensometric techniques for a wind turbine blade of 600W in accordance with the international standard IEC 61400-2. A NACA 4412 profile was used and the loads applied were selected according to the following load hypotheses described in the standard: normal operation, maximum thrust, immobilization with wind load and maximum exposure. A methodology was developed for both the simulation and for the laboratory tests, the data of the microdeformation measured by extensometry were also analyzed and compared with those obtained by the numerical simulation. Concluding that the analysis of finite elements is a key step prior to manufacturing that allows us to save resources and gives us parameters to perform both manufacturing and testing. Laboratory tests are necessary to ensure safe and reliable functioning of the blade during its useful life.

Blade, Measurement, Simulation

Citación: MARIN-TELLEZ, Paulina, LÓPEZ-GARZA, Víctor, PÉREZ-JUÁREZ, Erick y GONZÁLEZ-ÁVALOS, Gilberto. Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2. Revista de Simulación y Laboratorio. 2019, 6-18: 24-31

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: douxpb@gmail.com)

†Investigador contribuyendo como primer Autor

Introducción

Las turbinas eólicas se encargan de convertir la energía eólica en energía eléctrica y se pueden clasificar de acuerdo con la potencia que generan como: aerogeneradores de baja potencia, aerogeneradores de media potencia y aerogeneradores de alta potencia.

Los aerogeneradores de baja potencia son aquellos que entregan una potencia de hasta 50 kW y se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño.

Actualmente, la energía eólica es una de las tecnologías de energía renovable de más rápido crecimiento; la capacidad de generación de energía eólica instalada en todo el mundo, tanto en tierra como en alta mar, ha aumentado con un factor de casi 50 en las últimas dos décadas de acuerdo con IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables).

Uno de los componentes claves en los aerogeneradores son los álabes, los daños estructurales en ellos pueden generar problemas que disminuyan su rendimiento, aceleren su proceso de degradación, disminuyan su eficiencia en la producción de energía e incluso provocar accidentes catastróficos durante su funcionamiento.

Para evitar fallas en las palas, estas deben someterse a la verificación de confiabilidad mediante pruebas estáticas y de fatiga, cuya finalidad es verificar que no fallarán dentro de la vida útil planificada. La Norma IEC-61400-2, es un estándar internacional para la evaluación y certificación de las de turbinas de viento de baja potencia y todos sus componentes.

En el presente trabajo, se evalúa un álabe de una turbina de viento de 600W de acuerdo con las siguientes hipótesis de carga descritas en la norma IEC 61-400-2: operación normal, empuje máximo, inmovilización con carga del viento y exposición máxima. Utilizando simulación por elemento finito, así como técnicas de extensometría. Dentro de la simulación de elemento finito se muestra el modelado, la malla, las condiciones de frontera y finalmente los resultados. Para las pruebas de laboratorio se muestran las galgas utilizadas y la estadística obtenida.

Diseño y manufactura de álabes de turbinas de viento

El álabe evaluado en este trabajo, fue diseñado basándose en la Teoría de Elemento de Pala (BEM), la cual calcula la resultante de las fuerzas producidas por la pala en su interacción con el fluido, integrando las fuerzas que se crean en cada sección radial. El diseño del perfil aerodinámico se obtuvo del software TIMEO.

Para la manufactura del álabe se utilizaron técnicas de CAD (Diseño Asistido por Computadora) /CAM (Manufactura Asistida por Computadora), además fue necesario manufacturar una cama falsa que fue utilizada como eje virtual. El mecanizado de los modelos de los álabes fue realizado en madera por fresado y la manufactura final del álabe se realizó en fibra de vidrio.

Esta aspa, está diseñada para una turbina de 600W, para una velocidad específica de 6 y una velocidad en la punta de la pala de 12.5 m/s^2 . Se empleo un perfil NACA 4412, con un radio de 0.95m, una cuerda máxima de 0.215m y se dividió en 10 secciones.

Norma IEC-61400-2 y modos de carga analizados

La Norma IEC-61400-2, divide a los aerogeneradores en clases de AP (Aerogeneradores Pequeños) considerando los valores de la velocidad del viento y la turbulencia independientemente del emplazamiento en específico.

Para efectos de diseño, la vida útil de un AP se puede representar por un conjunto de estados de diseño que cubran las condiciones más significativas que pueda experimentar el aerogenerador.

Las hipótesis de carga de diseño utilizadas para determinar la integridad estructural de un AP se resumen en la tabla 1. Para cada estado de diseño, se expone el tipo apropiado de análisis por "F" (análisis de cargas por fatiga) y por "U" (análisis de cargas críticas).

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

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

Fuente: Norma IEC-61400-2 (2015)

Las hipótesis de carga que se evaluaron fueron: producción de energía, A operación normal y D empuje máximo; carga extrema del viento, H carga extrema del viento; condiciones de inmovilización y de falta, I inmovilización con carga del viento y exposición máxima.

Metodología a desarrollar

De manera general, la metodología utilizada para la simulación y para las pruebas de laboratorio se muestran en la figura 1 y figura 2 respectivamente.

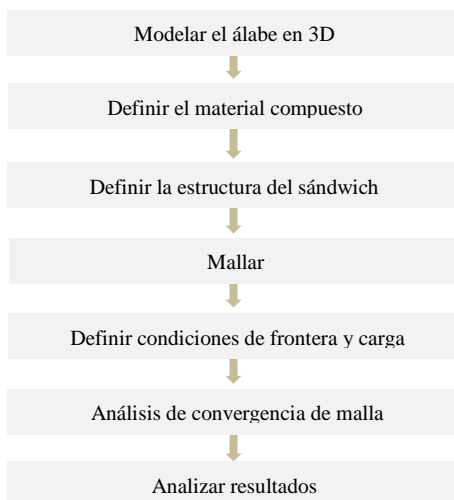


Figura 1 Diagrama de la metodología de simulación

Fuente: Elaboración Propia

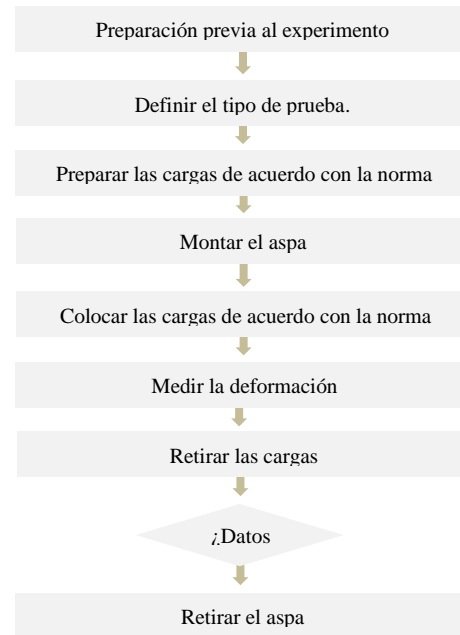


Figura 2 Diagrama de la metodología de pruebas de laboratorio

Fuente: Elaboración Propia

Cálculo de las cargas que se aplican al álabe

Se calcularon las cargas aplicadas al álabe de acuerdo con la norma IEC-61400-2 [1].

Hipótesis de carga A: operación normal

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \omega_{n,design}^2 \tag{1}$$

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

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{B} \tag{3}$$

Hipótesis de carga D: empuje máximo

$$F_{x-shaft} = C_T 0.5 \rho (2.5 * V_{ave})^2 \pi R^2 \tag{4}$$

Hipótesis de carga H: carga extrema del viento

$$M_{yB} = C_d \frac{1}{4} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} R \tag{5}$$

$$F_{x-shaft} = B C_d \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj,B} \tag{6}$$

Hipótesis de carga I: Inmovilización con carga del viento, exposición máxima

$$F = C_f \frac{1}{2} \rho V_{e50}^2 A_{proj} \tag{7}$$

Los valores calculados se muestran en la tabla 2.

Hipótesis de carga		Valor calculado
A	Operación normal	$\Delta F_{ZB}=35.743 \text{ N}$
		$\Delta M_{xB}=18.416 \text{ Nm}$
		$\Delta M_{yB}=76.394 \text{ Nm}$
D	Empuje máximo	$F_{x\text{-shaft}}=41.157 \text{ N}$
H	Carga extrema del viento	$M_{yB}=8.415 \text{ Nm}$
		$F_{x\text{-shaft}}=258.952 \text{ N}$
I	Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	$F=86.317 \text{ N}$

Tabla 2 Valores calculados para cada hipótesis de carga
Fuente: Elaboración Propia

Modelado del álabe y simulación en FEM

Se modeló el aspa como superficie por medio de secciones, como se muestra en la figura 3.

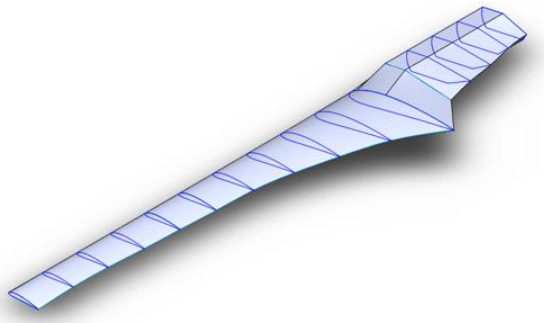


Figura 3. Modelado del aspa en Solidworks
Fuente: Elaboración Propia

Mediante el software de elemento finito, se realizó el mallado del álabe usando el método de triángulos, con mapeo de malla en todas las caras, un tamaño de elemento de 6 mm y aplicando un refinamiento en las secciones mostradas en la figura 4 y 5.

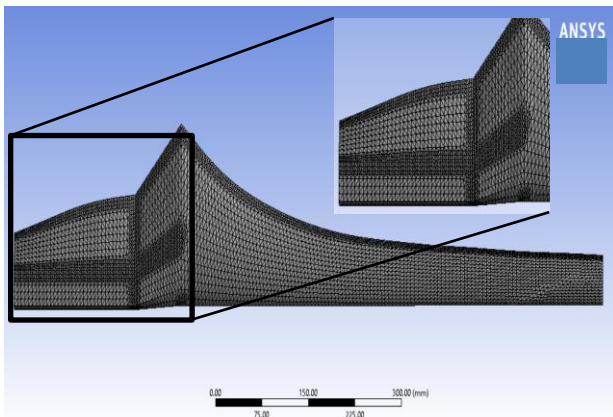


Figura 4 Mallado del extradós del álabe
Fuente: Elaboración Propia

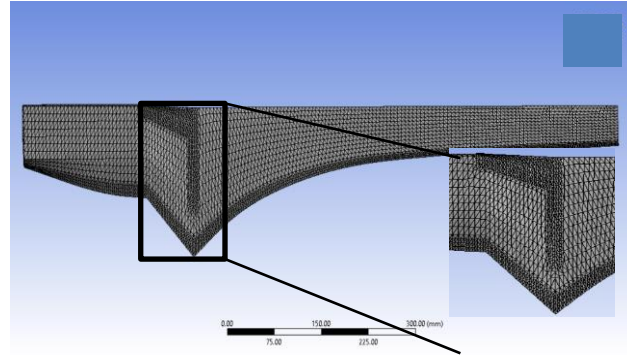


Figura 5 Mallado del intradós del álabe
Fuente: Elaboración Propia

En el módulo para materiales compuestos del software FEM, se modeló la estructura compuesta del álabe utilizando fibra de vidrio con un Módulo de Young de 38GPa, dando un espesor de 1mm por capa y orientándolas en la dirección de la envergadura. Se definieron 3 capas para la región roja y 2 capas para la región azul, tal como se muestra en la figura 6.

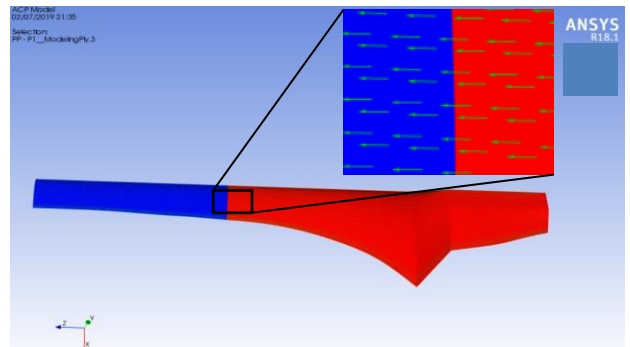


Figura 6 Orientación de las capas del álabe
Fuente: Elaboración Propia

Se aplicaron las condiciones de frontera en el álabe, tomando en cuenta la fuerza de gravedad, un soporte fijo y la acción de la fuerza calculada de acuerdo con las hipótesis de carga.

Se muestra el comportamiento del álabe obtenido de la simulación para el desplazamiento total, el esfuerzo de Von Mises y el desplazamiento a lo largo de la envergadura del álabe, en las figuras 8, 9 y 10 respectivamente.

Se muestran los valores obtenidos en la simulación para cada carga aplicada al álabe en la tabla 3.

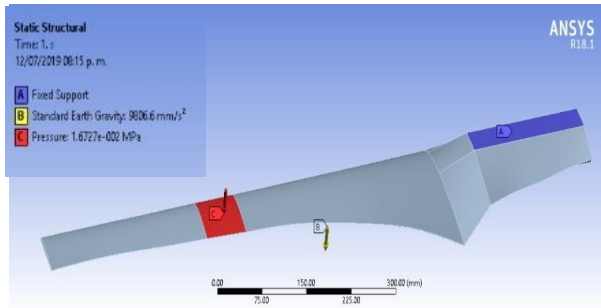


Figura 7 Condiciones de frontera del álabe
Fuente: Elaboración Propia

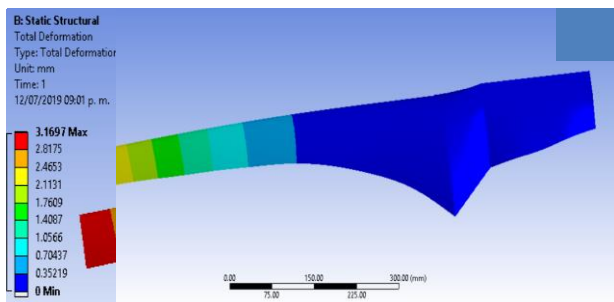


figura 8 Análisis de desplazamientos totales en el software FEM. Valor máx. 3.1697 mm, valor min. 0 mm
Fuente: Elaboración Propia

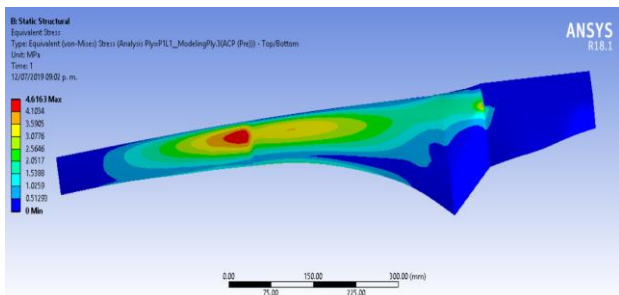


Figura 9. Análisis de esfuerzos de Von Mises en el software FEM. Valor máx. 4.6163 MPa, valor min. 0 MPa
Fuente: Elaboración propia.

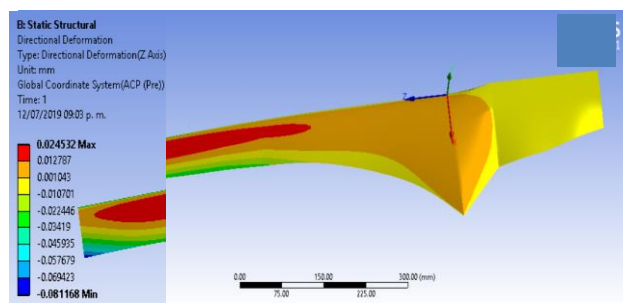


Figura 10 Análisis de desplazamientos direccionales en el eje z en el software FEM. Valor máx. 0.024532 mm, valor min. 0 mm
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de los desplazamientos totales son bajos y como es de esperar la punta del álabe es la que presenta los mayores desplazamientos en todos los casos. Aproximadamente, hasta la mitad de la longitud total del álabe es que comienza a haber un desplazamiento.

Siendo el valor mayor en el caso operación normal con carga en M_{yB} .

Hipótesis de carga	Carga	Valor máximo		
		Desplazamiento total (mm)	Esfuerzo de Von Mises (MPa)	Desplazamiento direccional (mm)
A Operación normal	ΔF_{zB}	0.20991	0.10759	0.20637 (eje y)
	ΔM_{xB}	1.0746	2.0216	0.014513 (eje z)
	ΔM_{yB}	28.795	41.937	0.22286 (eje z)
H Carga extrema del viento	M_{yB}	3.1697	4.6163	0.024532 (eje z)
I Inmovilización con carga del viento y exposición máxima	F	8.5582	19.936	0.05429 (eje z)

Tabla 3. Resultados para las cargas en el álabe
Fuente: Elaboración Propia.

El valor máximo para esfuerzos de Von Mises, se presenta para la operación normal, sin embrago es un valor muy bajo que no representa riesgo de falla del álabe. Los mayores esfuerzos se presentan en el extradós próximos al área de aplicación de la carga y en la zona entre el soporte y la raíz de la pala, esto último debido al cambio en la sección transversal.

Los valores mayores de desplazamiento direccional se presentan en las zonas cercanas a la aplicación de la carga y en todos los casos presentan valores muy pequeños, menores a 1 mm. Siendo el valor mayor en el caso operación normal con carga en M_{yB}

Pruebas de laboratorio

La técnica de la extensometría consiste, básicamente, en adherir una resistencia eléctrica deformable al elemento estructural de interés de manera que la galga esté sujeta a la misma deformación que experimente el elemento estructural [Fuente].

El principio de funcionamiento de las galgas extensométricas se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material del que está hecho y el diseño adoptado. De esta forma, el cambio en la resistencia eléctrica indicará un cambio en la deformación, que a su vez se relaciona con las fuerzas que actúan sobre el elemento instrumentado.

Se utilizaron galgas modelo EA-06-120LZ-120/E un indicador de tensión y registrador modelo P3 para recabar los datos.



Figura 11. Pegado de una galga extensométrica en el álabe
Fuente: *Elaboración Propia*

Se colocaron 3 galgas al álabe, como se muestra en la figura 12 y 13; la galga A, se colocó en el extradós a 2/3 de la longitud total del álabe; la galga B, se colocó en el extradós en la raíz del álabe y la galga C, se colocó en el intradós en la raíz del álabe.

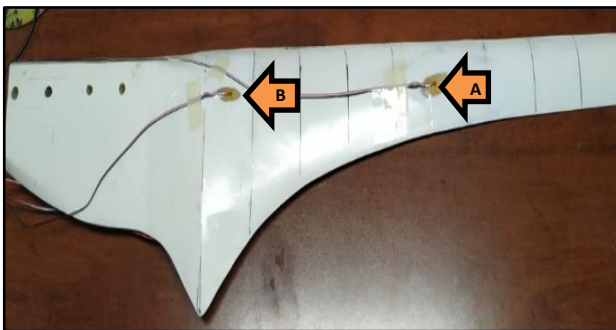


Figura 12 Ubicación de las galgas en el extradós del álabe
Fuente: *Elaboración Propia*

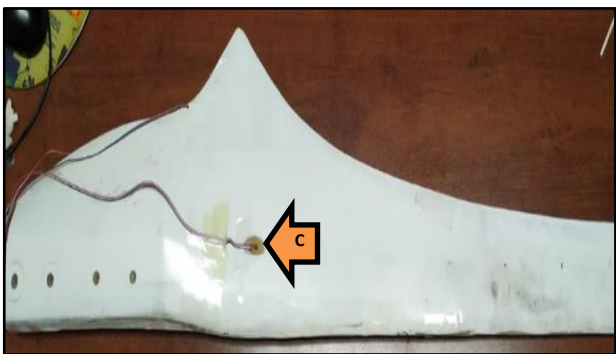


Figura 13 Ubicación de las galgas en el intradós del álabe
Fuente: *Elaboración Propia*

Los resultados obtenidos de un total de 40 mediciones se muestran en las siguientes tablas.

Hipótesis de carga A Operación normal Carga MxB		
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga	
	A	C
Media (με)	72	-111
Mediana (με)	72	-110
Moda (με)	65	-110
Desviación estándar (με)	4.33	1.35
Coefficiente de variación	6.04	1.22
Rango (με)	14	4

Tabla 4 Resultados para la hipótesis de carga A con carga M_{xB}

Fuente: *Elaboración Propia*

Hipótesis de carga A Operación normal Carga MyB			
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga		
	A	B	C
Media (με)	2361	2524.1	-533.5
Mediana (με)	2450	2543	-534.5
Moda (με)	2450	2560	-
Desviación estándar (με)	164.08	51.60	39.82
Coefficiente de variación	6.95	2.04	7.46
Rango (με)	457	141	140

Tabla 5. Resultados para la hipótesis de carga A con carga M_{yB}

Fuente: *Elaboración Propia*

Hipótesis de carga H Carga extrema del viento Carga MyB			
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga		
	A	B	C
Media (με)	210	254	-12
Mediana (με)	216	254	-12
Moda (με)	220	254	-12
Desviación estándar (με)	14.91	3.16	1.77
Coefficiente de variación	7.10	1.24	14.37
Rango (με)	46	12	7

Tabla 6. Resultados para la hipótesis de carga H Carga extrema del viento con carga M_{yB}

Fuente: *Elaboración Propia*

Hipótesis de carga I Inmovilización con carga del viento y exposición máxima Carga F			
Medidas de tendencia central y dispersión	Galga		
	A	B	C
Media (με)	1373	1670.9	-192
Mediana (με)	1372	1671.5	-194
Moda (με)	-	1673	-197
Desviación estándar (με)	44.21	11.39	8.53
Coefficiente de variación	3.22	0.68	4.45
Rango (με)	150	37	29

Tabla 7 Resultados para I Inmovilización con carga del viento y exposición máxima con carga F

Fuente: *Elaboración Propia*

Resultados

Las galgas A y B registraron medidas a tensión mientras que la galga C registro medidas a compresión (como se esperaba). Los mayores valores de deformaciones se presentaron para el caso de operación normal con carga en M_{yB} mientras que los valores menores para el mismo caso, pero con carga en M_{xB}.

La galga A, presenta mayor sensibilidad en las mediciones, esto debido a la cercanía que tiene al área de aplicación de la carga. Mientras que la galga C, presenta una menor sensibilidad.

El coeficiente de variabilidad es bajo en general indicando una homogeneidad en las muestras, mientras que la desviación estándar nos indica que cuando se miden valores de deformación mayores se presenta una mayor dispersión de los datos que al medir valores de deformación pequeños.

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica por las facilidades otorgadas para desarrollar el presente trabajo. Así como a CONACYT por las becas otorgadas a los estudiantes de maestría.

Conclusiones

El análisis estructural del diseño de los álabes mediante elemento finito es necesario para brindarnos información sobre su comportamiento cuando se somete a cargas antes de ponerlo en funcionamiento. Por lo que es un paso clave previo a la manufactura ya que nos indica si es necesario hacer un rediseño o modificar algún factor; lo cual nos permite ahorrar valiosos recursos y nos otorga parámetros para realizar tanto la manufactura como las pruebas.

Únicamente aplicando las pruebas de laboratorio se puede garantizar un funcionamiento seguro y confiable del álabes en operación durante su vida útil.

Referencias

AMDEE (Asociación Mexicana de Energía Eólica) (2018), "El viento en números", <https://www.amdee.org/el-viento-en-numeros>, 20 de febrero del 2019.

Anup KC, Jonathan Whale y Tania Urmeo (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review, 131, 268-283.

Clemence Rubiella, Cyrus A.Hessabi y Arash SoleimanFallah (2018). State of the art in fatigue modelling of composite wind turbine blades. Elsevier, 117, 230-245.

D.J.Willis, C.Niezrecki, D.Kuchma, E.Hines y S.R.Arwide (2018). Wind energy research: State-of-the-art and future research directions. Elsevier, 125, 133-154.

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

Erich Hau (2006), Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Second Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.

Erick Pérez Juárez (2019). Construcción de una máquina de ensayo a fatiga para álabes de aerogeneradores de baja capacidad (tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Erick Yuvaniel Gómez Urieta (2012). Diseño y manufactura del Hub y álabes de una turbina de viento (tesis de maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Ferrero, José María. Guijarro, E. (1994). Instrumentación Electrónica. Sensores. España, servicio de publicaciones UPV, 1994.

Germanischer Lloyd, Hamburg, Germany: "the new guideline for the certification of wind turbines", Edition 2010

H. J. Sutherland (1999), On the Fatigue Analysis of Wind Turbines. United States, 1999.

Hak GuLee y JungwanLee (2018). Measurement theory of test bending moments for resonance-type fatigue testing of a full-scale wind turbine blade. Elsevier, 200, 306-312.

Hong-Kwan Kim, Jang-Ho Lee, Se-Myong Jang y Ki-Weon Kang (2013). Structural Analysis and Testing of 1.5kW Class Wind Turbine Blade. Journal of Fluid Machinery, 13, 37-44.

IEC 61400-2 "Wind Turbines - Part2: Design requirements of small wind turbines", Edition 2015.

IRENA (2017), REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

J.H.Wu y F.M.Lai (2014) Fatigue Life Analysis of Small Composite Sandwich Wind Turbine Blades, 14, 2014-2020.

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

L.Menegozzo, A.Dal Monte, E.Benini y A.Benato (2018). Fatigue small wind turbines: A numerical study for aerodynamic performance assessment under gust conditions, 121, 123-132.
Monje, C. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica, Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana.

REN21, (2018), Renewables 2018 Global Status Report, (Paris: REN21 Secretariat) ISBN 978-3-9818911-3-3

Sina Yasin Erturk (2014). Tower design load verification of 3.5 kW wind turbine (tesis de maestría). University of Wyoming.

Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Boss Anyi (2001). Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd.

Yuan-KangWua, Huei-JengLinb y Jhih-HaoLinb (2019). Certification and testing technology for small vertical axis wind turbine in Taiwan. Elsevier,31, 34-42.

Z. Pan and J. Wu (2017), A Novel Multi-Point Excitation Fatigue Testing Method for Wind Turbine Rotor Blades, vol. 10. 2017.

Anexos

$A_{proj,B}$ = Área del álabe proyectada

B = número de palas

C_d = coeficiente de resistencia

C_f = coeficiente de empuje

C_T = coeficiente de empuje

$F_{x-shaft}$ = carga mecánica en la dirección del eje axial

F_{ZB} = fuerza sobre la pala en la raíz en la dirección de la envergadura

g = aceleración de la gravedad

m_B = masa de la pala

M_{xB} = momento flector en la raíz de la pala en la dirección x

M_{yB} = momento flector en la raíz de la pala en la dirección y

Q_{design} = par del eje de diseño

R = radio del rotor

R_{cog} = distancia radial entre el centro de gravedad de la pala y el centro del rotor, 0.503 m

V_{ave} = velocidad del viento media anual a la altura del buje

V_{e50} = valor extremo de la velocidad en 50 años

ρ = densidad del aire

λ_{design} = relación de velocidad en la punta de la pala

$\omega_{n,design}$ = velocidad de rotación del rotor