



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Análisis estructural de una pala de turbina eólica con implementación de la técnica de adaptabilidad aeroelástica en la piel de la pala

Structural analysis of a wind turbine blade with implementation of the aeroelastic tailoring technique in the skin of the blade

Espinoza-Hernández, J.^a, Muñoz-Hernández, G.^b, Manzo-Preciado, J.A.^a, Santander-Bastida, F.J.^c

^aDepartamento de Energía; Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial; Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702. Desarrollo San Pablo, C.P. 76125, Santiago de Querétaro, Qro. México.

^bDirección de Sistemas Mecánicos; Centro de Tecnología Avanzada; Av. Manantiales o. 23-A. Parque industrial Bernardo Quintana. C.P. 76246, El Marqués, Qro. México.

^cDepartamento de Ingeniería en Tecnologías de Manufactura; Universidad Politécnica de Guanajuato; Av. Universidad Sur No. 1001. C.P. 38496, Cortazar, Guanajuato. México.

jaime.espinoza@uaslp.mx; guillermo.munoz@ciateq.mx; jmanzo@cidesi.edu.mx; fsantander@upgto.edu.mx

Innovación tecnológica: Reducción de cargas en palas de turbinas eólicas.

Áreas de aplicación industrial: Energía eólica, Energía del océano, Industria aeronáutica, Automotriz, Materiales compuestos reforzados con fibras.

Recibido: 07 junio 2021

Aceptado: 03 enero 2022

Abstract

The Aeroelastic Tailoring (AT) technique in wind turbine blades, used as a passive control method, has proven to be a technique capable of reducing the loads acting on the turbine components. In the present work, in a 60 m length blade, the fiber orientation angle of that generates the greatest twist at the tip and the structural behavior of the blades with the implementation of the AT technique was investigated. A response surface design of experiments was used and 13 configurations were performed. The blades were analyzed by adding 1, 2 and 3 layers, with fiber orientation angles of 20°, 27.5° and 35°. The structural analysis was carried out using the ANSYS® software with operating loads of 12 m/s obtained by the Blade Element Momentum (BEM) theory. Blades with fiber orientation angles of 20° were found to have a smaller tip offset than those of 35°. The twist at the tip of the blade is dependent on the number of layers and the fiber angle, it is maximum at angles of 26°, 24° and 23° when adding 1, 2 or 3 layers respectively. The Failure Index (FI) of the max strain criteria shows an increase in all the blades with the AT technique compared to the conventional blade. The buckling Load Factor (LF) indicates that the blades with

the AT technique have higher values than the conventional blade and the weight of the blade increases by the number of layers added and not by the fiber's orientation angles.

Key Words: Aeroelastic Tailoring, ANSYS-ACP, Composite materials, Structural behavior, Wind energy.

Resumen

La técnica de Adaptabilidad Aeroelástica (AT) en palas de turbinas eólicas empleada como método de control pasivo, ha demostrado ser una técnica capaz de reducir las cargas que actúan en los componentes de la turbina. En el presente trabajo, se investigó en una pala de 60 m de longitud, cual es el ángulo de orientación de las fibras que mayor torsión genera en la punta y el comportamiento estructural de las palas con la implementación de la técnica de AT. Se empleó un diseño de experimentos de superficie de respuesta y se realizaron 13 configuraciones. Se analizaron las palas al agregar 1, 2 y 3 capas, con ángulos de orientación de fibras de 20°, 27.5° y 35°. El análisis estructural se llevó a cabo utilizando el software ANSYS® con cargas de operación de 12 m/s obtenidas mediante la teoría *Blade Element Momentum* (BEM). Se encontró que las palas con ángulos de orientación de fibra de 20° tienen un desplazamiento de punta menor que las de 35°. La torsión en la punta de la pala es dependiente de la cantidad de capas y el ángulo de la fibra, es máxima a ángulos de 26°, 24° y 23° cuando se agrega 1, 2 o 3 capas respectivamente. El Índice de Falla (IF) del criterio de máxima deformación muestra un incremento en todas las palas con la técnica de AT respecto a la convencional. El Factor de Carga (FC) de pandeo indica que las palas con la técnica de AT tienen valores superiores a la convencional y el peso de la pala incrementa por la cantidad de capas agregadas y no por el ángulo de orientación de las fibras.

Palabras clave: Adaptabilidad aeroelástica, ANSYS-ACP, Comportamiento estructural, Energía eólica, Materiales compuestos.

1. Introducción

El rotor junto con las palas son la parte de la turbina eólica que extrae la energía cinética del viento, la convierte en energía mecánica y luego en electricidad [1]. Global Wind Energy Council [2] al año 2019 reportó una capacidad mundial instalada de energía eólica de 650 GW, un incremento del 19% respecto al año 2018. México contribuye con 6,215 MW. Las proyecciones de la International Renewable Energy Agency [3] para el año 2030 estiman un incremento del 175% en la generación de energía eléctrica mediante la energía eólica.

Para capturar mayor energía del viento los diseñadores y fabricantes incrementan el tamaño de los rotores, creciendo la longitud de las palas e incrementando el área de

barrido y por ende la capacidad de generación eléctrica. General Electric [4] tiene la turbina Haliade-X de 12 MW con palas de 107 m, SIEMENS-Gamesa [5] tiene la turbina SG 10.0193DD de 10 MW, NREL [6] tiene el diseño conceptual de una turbina de 15 MW cuyo rotor es de 240 m y L. Sartori [7] tiene el diseño conceptual de una turbina de 20 MW con un rotor de 252 m. Las investigaciones y desarrollos muestran un incremento potencial de 15 a 20 MW en una o dos décadas. Con el incremento en el tamaño del rotor para aumentar la captura de energía proveniente del viento también aumentan las cargas aerodinámicas e inerciales haciendo que componentes estructurales clave como las palas se encuentren mecánicamente más solicitados [8]. En este sentido, es necesario emplear

métodos de control de cargas activos o pasivos. Un método de control de cargas pasivo es la Adaptabilidad Aeroelástica (AT), útil para reducir las cargas cuando se presentan ráfagas de viento. Consiste en cambiar el ángulo de ataque de la pala a través del ángulo de orientación de las fibras con las que se manufacturan [9].

Diversos estudios se han llevado a cabo para evaluar el efecto que tienen las palas con la implementación de la técnica AT sobre la reducción de las cargas que actúan en el rotor. Tohid B. [10] analizó una turbina de 10 MW con un diámetro de rotor de 178.3 m, sus palas tenían implementada la técnica de AT con ángulos de orientación de fibras de 9° a 12.5° , con estas orientaciones consiguió torsiones en la punta de la pala de 4° , reducción en las cargas de fatiga en dirección flapwise de 7-10% y reducción en las cargas extremas en dirección flapwise de 6-8%. Sobre una turbina conceptual de 5 MW con palas de 61.5 m de longitud se han realizado diversos trabajos, Rohaida B. [11] modeló 4 palas, una de ellas con laminado convencional tomándola como base y las otras tres con distribuciones de twist emulando la respuesta de palas con ángulo de orientación de fibra con torsiones en la punta de la pala de 2.8° , 1° y 1.5° , las tres palas respecto a la convencional mostraron una reducción en el uso del sistema de control de Pitch eliminando picos a altas frecuencias, esto es un indicativo de la reducción potencial de las cargas de fatiga. Jinge Chen [12] agregó orientaciones de fibra a 20° en el sparcap y generaron 4° de torsión en la punta reduciendo los momentos en la raíz 16% respecto de la convencional. Por otro lado, Hang M. [13] agregó en el sparcap fibras con ángulos de orientación de 5° , 10° y 15° siendo el ángulo de 15° con mayor porcentaje de reducción de cargas en el sparcap, del orden de 20 al 25% respecto a la pala convencional. Khazar Hayat [14] evaluó laminados desbalanceados y encontró que los ángulos de

orientación de fibras de 25° producen el mayor acoplamiento flexión-torsión, en sus modelos encontró ángulos de torsión en la punta de 0.24° , 1.94° y 2.99° alcanzado reducciones en las cargas de fatiga de un 8.7 a 13.7% respecto de la convencional. Finalmente, Sung Kyu [15] investigó la resistencia mecánica de laminados reforzados con fibras biaxiales (BIAX) y triaxiales (TRIAX) de la pala al agregar fibras con ángulos de orientación de 35° y 25° , encontró una reducción en el índice de fallo de los materiales compuestos de 18% y 38% respectivamente comparada con la pala convencional.

Dados estos antecedentes y adicional a los cambios de ángulos de orientación de fibra estudiados en trabajos previos, esta investigación agrega una variación de la cantidad de capas con ángulos de orientación de fibra que se agregan a la pala y un estudio del comportamiento estructural de las palas con la implementación de la técnica de AT bajo criterios de falla como el de máxima deformación, pandeo y desplazamiento de punta. Para la realización de este trabajo se utilizó el Método de Elementos Finitos (MEF) y diseño de experimentos.

2. Materiales y equipos

La estructura de la pala está formada por materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio unidireccionales (UD), biaxiales (BIAX) y triaxiales (TRIAX), la pala también cuenta con núcleos formados por espuma de cloruro de poli vinilo (PVC). Las propiedades de los materiales necesarias para realizar los cálculos estructurales fueron las siguientes: Espesor de capa y densidad del material compuesto, módulos de elasticidad en la dirección principal E1 y transversal E2 del compuesto, coeficiente de Poisson ν_{12} y Módulo cortante G12, valores de deformación permisible de los materiales a tensión (T1, T2), compresión (C1, C2) y

cortante (S), como se muestra en la Tabla 1. Para el criterio de la máxima deformación se toman los valores reducidos por un factor de 2.205 acorde a la normativa GL2010 [16].

El MEF fue implementado en el software ANSYS® 17.1, se utilizaron los siguientes módulos: ANSYS Composite Prepost (ACP-Pre) [17] utilizado para la generación del modelo de compuestos de la pala; Static Structural [18] utilizado para la aplicación de las condiciones de frontera incluyendo cargas

estáticas y empotramiento, obtención de resultados de desplazamientos y transferencia de datos al módulo ACP-Post; ACP-Post [19] utilizado para obtener los índices de fallo y las deformaciones en cada capa; Eigenvalue Buckling [20] utilizado para obtener los factores de carga crítica de pandeo y ubicación de las zonas críticas.

La creación del diseño de experimentos y el análisis estadístico de los datos se realizó en el programa Minitab ®17 [21].

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

	GFRP [22]			PVC CORE [23]
	UD	BIAX	TRIAx	AIREX C70.90
Espesor, [mm]	0.89	0.65	0.87	10
Densidad de compuesto, [kg/m ³]	1870	1835	1890	100
E1, (MPa)	39330	12400	28425	84
E2, (MPa)	10500	12400	13555	---
ν_{12}	0.26	0.49	0.41	0.3
G12, (MPa)	4400	10800	8510	40
T1 Strain, ($\mu\epsilon$)	8302.3	5047.2	8121	---
C1 Strain, ($\mu\epsilon$)	5996.1	5559.2	6429.8	---
T2 Strain, ($\mu\epsilon$)	1943.6	5047.2	3479.6	---
C2 Strain, ($\mu\epsilon$)	4967.1	5559.2	4985.1	---
S Strain, ($\mu\epsilon$)	4638.2	7642.6	11191.3	---

3. Metodología de investigación

Para el presente estudio se tomó la geometría aerodinámica de la pala de la turbina de referencia de NREL 5-MW [24] desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), la cual ha sido utilizada en diferentes estudios relacionados al tema [11-14].

La definición del laminado convencional se indica a continuación:

- Las conchas; Piel (interna y externa), formada de un laminado TRIAX, cubre la superficie interna y externa de la pala, son dos capas en piel interna y dos capas en piel externa.
- Raíz, formada de un laminado TRIAX, tiene un espesor máximo de 67.86 mm de 0 a 800 mm, tiene una

caída de capas progresiva hasta una longitud de 12,000 mm.

- Sparcaps, formado de un laminado UD, va embebido en las conchas y está posicionado de 2,990 mm a 60,010 mm, tiene un ancho de 1,000 mm y un espesor máximo de 46.28 mm.
- Refuerzo de borde de salida, formado de un laminado UD, posicionado de 3,600 mm a 60,000 mm, tiene un ancho constante de 500 mm y un espesor máximo de 32.93 mm.
- Refuerzo de borde de entrada (Pegado de conchas), formado de un laminado TRIAX, posicionado en toda la longitud de la pala, tiene un espesor constante de 1.74 mm.

- Núcleo, formado de material PVC, va desde 3,790 mm hasta 52,020 mm, tiene un espesor constante de 40 mm.
- Los Shear webs principal y secundario (PSW y SSW respectivamente); Formados por una estructura sándwich con laminado

BIAX y core de PVC, están centrados al eje de pitch y tienen una distancia entre ellos de 800 mm, van desde 1,990 mm hasta 57,250 mm.

En la Figura 1 se presenta la distribución de espesores por componentes.

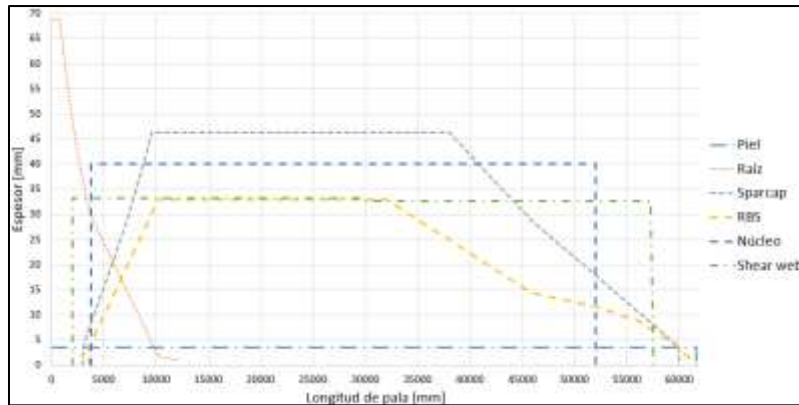


Figura 1. Distribución de espesores en la pala con laminado convencional.

Las cargas usadas para el análisis estructural son obtenidas bajo una condición de operación normal y velocidad de viento de 12 m/s mediante la teoría BEM (*Blade element*

momentum) [25-27]. Se obtienen las fuerzas en cada dirección (F_x , F_y y F_z) en 20 estaciones de la pala. La Figura 2 muestra la magnitud de las cargas a lo largo de la pala.

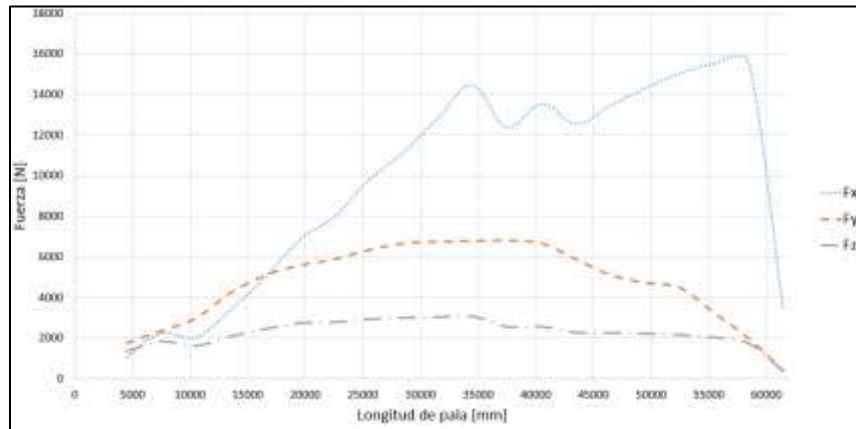


Figura 2. Distribución de cargas a lo largo de pala a una velocidad de viento de 12 m/s.

Se utiliza el MEF con el software ANSYS para realizar el análisis estructural y la investigación del fenómeno de adaptabilidad aeroelástica, como se menciona en [28-30]. Se crean dos modelos del MEF con la versión de ANSYS 17.1.

Modelo 1: El modelo de Elemento Finito (EF) utilizado para la investigación está compuesto por superficies caracterizadas en la geometría externa de la pala y los shear webs. Ambos componentes están representados con elementos 2D con propiedades de rigidez a la flexión, cortante en el plano y

tensión/compresión. El mallado se realiza utilizando el elemento Shell 181 [31], es un elemento de 4 nodos con 6 grados de libertad en cada nodo que le permiten el desplazamiento y rotación en los tres ejes. Considera los efectos de los acoplamientos que existen en materiales compuestos como el acoplamiento flexión-torsión, tensión-torsión entre otros [32]. Se utiliza el método de malla estructurada con elementos cuadriláteros 2D y un controlador de tamaño de 100 mm en todas las superficies de la pala. En total se generan 91,885 nodos en 89,953 elementos, con estas condiciones se obtiene una calidad de malla promedio de 0.9514 en donde un valor de 1 indica un cuadrado perfecto [33]. Las condiciones de frontera se definieron a través de cargas aplicadas mediante la opción de multi-point-constraints (MPC). El nodo maestro se localiza en el eje neutro de cada sección de la pala y los nodos esclavos se localizan en la zona correspondiente al sparcap del lado de presión y de succión. El modelo de EF se fijó en la raíz.

El análisis estructural estático se realiza para conocer el desplazamiento de punta, los desplazamientos por zonas para calcular el valor de la torsión y la distribución del criterio de máxima deformación. El desplazamiento de punta es un indicativo de la separación entre la punta de la pala y la torre. En esta investigación se hace una comparativa del desplazamiento de la pala con laminado convencional contra los modelos de las palas con implementación de la técnica de AT. La respuesta natural de la pala es flexionarse en dirección de la carga aplicada, las fibras colocadas a un ángulo de orientación diferente de 0° generan el acoplamiento flexión-torsión, [34-37]. La torsión en las diferentes posiciones de la pala se obtiene por trigonometría midiendo el desplazamiento en borde de entrada (BE), borde de salida (BS) y la cuerda de la sección. La teoría de falla de la máxima deformación es utilizada para

analizar si existe falla en alguna de las fibras que forman el laminado de la pala [38-40]. Las direcciones a revisar del tensor de deformaciones para los materiales UD, BIAx y TRIAX son la componente de deformación alineada con la dirección principal del material (0°), la dirección transversal (90°) y la deformación cortante (45°). Los resultados distinguen entre los modos de fallo a tensión, compresión y cortante. Para garantizar que los materiales se encuentren trabajando en la zona segura, el índice de fallo (IF) debe ser menor a 1.

Modelo 2. El Modelo 2 toma como base el Modelo 1. El análisis de pandeo acopla los resultados de esfuerzos generados en la pala por las cargas de operación al módulo de Eigenvalue Buckling y utiliza la técnica de análisis de eigenvalor de Lanczos o lineal de pandeo [20]. El Análisis de Pandeo se realiza para extraer las magnitudes de la carga crítica y su ubicación sobre la pala. Se obtiene el modo de pandeo con el factor de carga más bajo. De acuerdo con GL2010 [16] se busca obtener factores de pandeo superiores a 2.04.

3.1. Diseño de experimentos

En el Diseño de Experimentos se estudiaron factores cuantitativos con diferentes niveles y rangos, como se presenta en la Tabla 2. Las respuestas de interés son: desplazamiento de punta, torsión en la pala, criterio de la máxima deformación, pandeo y peso. Se utilizó un diseño de experimentos de superficie de respuesta central compuesto [21], [41]. En el programa Minitab @17 [21] se generaron 13 corridas experimentales de las cuales 4 fueron de puntos centrales para una estimación del error experimental, la Tabla 3 muestra las 13 configuraciones a realizar. Para los análisis de los puntos centrales correspondientes a las corridas 3, 6, 11 y 12 se cambió el tamaño de la malla a 80, 90, 110 y 120 mm respectivamente. La Tabla 4 muestra las

características obtenidas con las nuevas condiciones de mallado.

El cambio de la pala con laminado convencional a una pala con la técnica de adaptabilidad aeroelástica se logró al cambiar una de las capas de TRIAX de la piel por una o varias capas de material UD con el ángulo de orientación de fibra que se indican en las corridas experimentales de la Tabla 3. La capa de TRIAX que se sustituye es la que se

encuentra en la superficie externa de la pala, tanto de la concha de presión como la de succión. El ángulo de 0° va paralelo al eje de pitch de la pala e incrementa en sentido positivo en dirección del borde de ataque como se muestra en la Figura 3.

Tabla 2. Factores, niveles y rangos.

Factores	Niveles	Rangos	
Ángulo de orientación de la fibra	2	20°	35°
Número de capas	2	1	3

Tabla 3. Corridas del Diseño de experimentos para cada material de refuerzo.

Orden de corrida	TipoPt	Bloques	Ángulo de orientación de fibra	Número de capas
C1	0	1	27.5	2
C2	-1	1	27.5	1
C3	0	1	27.5	2
C4	1	1	35	3
C5	1	1	20	3
C6	0	1	27.5	2
C7	-1	1	27.5	3
C8	-1	1	35	2
C9	-1	1	20	2
C10	1	1	35	1
C11	0	1	27.5	2
C12	0	1	27.5	2
C13	1	1	20	1

Tabla 4. Variación del mallado para corridas de puntos centrales.

Corrida	Tamaño de malla [mm]	No. de nodos	No. de elementos	Calidad de malla
C3	80	123,569	121,862	0.9485
C6	90	106,930	105,254	0.9454
C11	110	83,782	81,779	0.9594
C12	120	77,773	75,888	0.9554

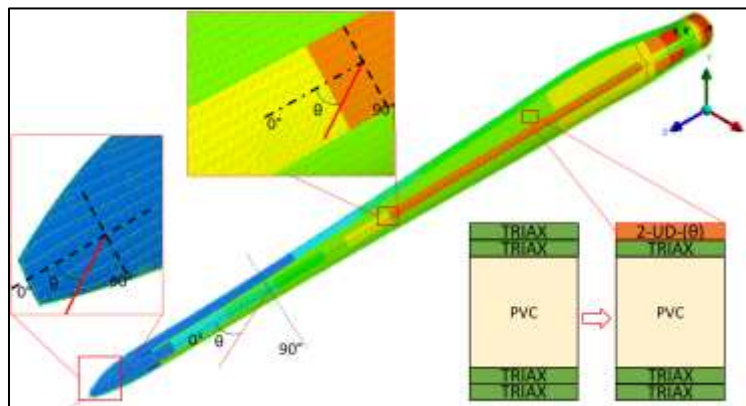


Figura 3. Cambios de capas de piel en el modelo convencional.

4. Discusión de Resultados

4.1. Desplazamiento de punta

La Figura 4 muestra de manera gráfica los desplazamientos de punta de las diferentes corridas experimentales, en la parte derecha se muestra la magnitud del desplazamiento y la variación porcentual respecto a la pala convencional. En color rojo con una magnitud de 6,592 mm se muestra el desplazamiento (D) de la pala convencional. El desplazamiento máximo tiene una magnitud de 6,931.57 mm, un incremento del 4.97% y es obtenido en la C10 con una capa a un ángulo de 35°. El desplazamiento mínimo tiene una magnitud de 6,536.78, una reducción de 0.82% y es obtenido en la C5 con 3 capas a un ángulo de 20°.

Con un coeficiente de correlación R^2 de 99.95% de confianza la Ec. (4.1) de regresión describe la relación entre el desplazamiento y los términos en el modelo, en la Figura 5 se observa que las palas con incorporación de la técnica de AT con ángulos de orientación de fibra de 20° presentan un desplazamiento menor que los de 35°, esto es debido a que la rigidez a la flexión de las fibras es máxima cuando tienen un ángulo de orientación de 0° y disminuye gradualmente cuando se orientan a 90°, es el mismo comportamiento al agregar 1, 2 o 3 capas, siendo la configuración con mayor número de capas la que menor desplazamiento presenta.

$$D = 6953.1 + 4.94 * \theta - 273.13 * C - 0.0732 * \theta^2 + 6.27 * C^2 + 4.626 * \theta * C \quad \text{(Ec. 4. 1)}$$



Figura 4. Desplazamiento de punta.

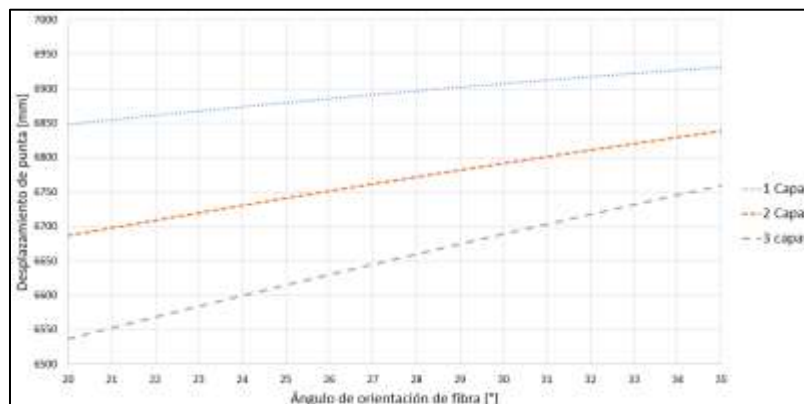


Figura 5. Distribución de desplazamiento utilizando la ecuación de regresión.

4.2. Torsión

La Figura 6 muestra la distribución de la Torsión (T) a lo largo de la pala para las diferentes corridas experimentales, en la parte derecha se muestra la magnitud de la T y la variación en grados respecto a la pala convencional. En línea punteada color rojo se indica la distribución de T de la pala convencional, la magnitud no es lineal, va cambiando a lo largo y es dependiente de la forma geométrica y el laminado local, la máxima T se genera a una posición de 60 m y tiene una magnitud de 0.2°. En todas las corridas experimentales se observa un cambio del ángulo de T entre 58 y 60 m, este cambio es debido a la forma geométrica de la pala. En todas las corridas experimentales, la máxima torsión está cercana a la punta, la torsión a lo largo de la pala tiene una disminución gradual hacia la raíz. La T máxima tiene una magnitud de 2.58° y se presenta en la C7 con 3 capas a un ángulo de fibra de 27.5°. La T mínima tiene una magnitud de 0.96° y se presenta en la C10 con 1 capa a un ángulo de fibra de 35°.

La Figura 7 muestra en superficie de respuesta la Torsión ante la variación del

ángulo de orientación de fibras y el número de capas. Se observa que la torsión incrementa con el número de capas. La mayor torsión se genera a un ángulo de orientación de fibra de 23° y 3 capas, la tendencia en el rango de estudio es que, a mayor número de capas, el ángulo de orientación de fibra que genera la mayor torsión baja de 26° a 23° para 1 y 3 capas respectivamente.

Con un R² de 99.89% de confianza la (Ec. 4. 2) de regresión describe la relación entre la Torsión y los términos en el modelo. En la Figura 8 se observa que el ángulo de orientación de la fibra que mayor torsión genera en la punta de la pala es dependiente de cantidad de capas que se coloquen, si se coloca una capa el ángulo de orientación es 26°, si se colocan dos capas el ángulo de orientación es 24° y si se colocan tres capas el ángulo de orientación es 23°, estos resultados son diferentes de [12-14]. Los valores de torsión en la punta de 1.16°, 2.002° y 2.61° para 1, 2 y 3 capas respectivamente indican una potencial reducción de cargas de acuerdo a [11] y [14].

$$\theta = -2.006 + 0.151 * \theta + 1.4377 * C - 0.002719 * \theta^2 - 0.1226 * C^2 - 0.00905 * \theta * C \quad \text{(Ec. 4. 2)}$$

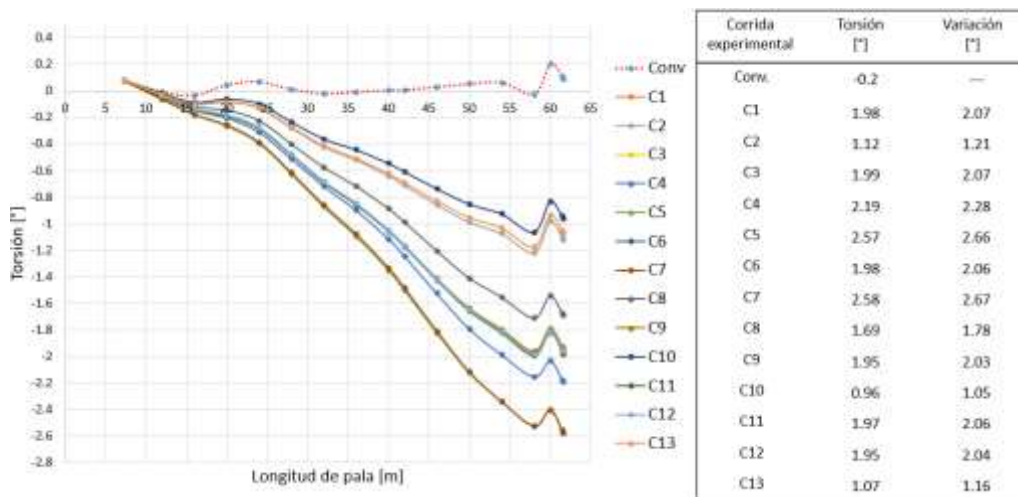


Figura 6. Distribución de torsión a lo largo de la pala.

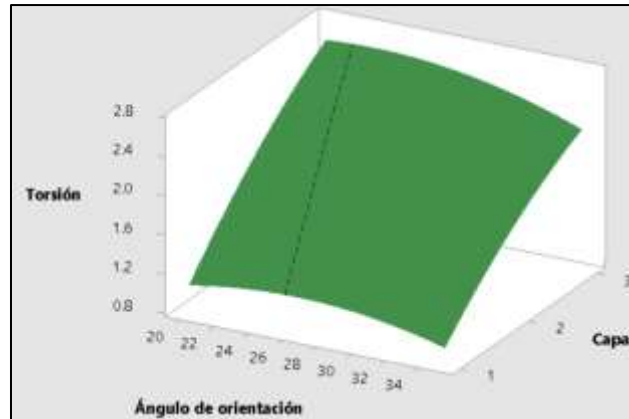


Figura 7. Distribución de torsión utilizando la superficie de respuesta.

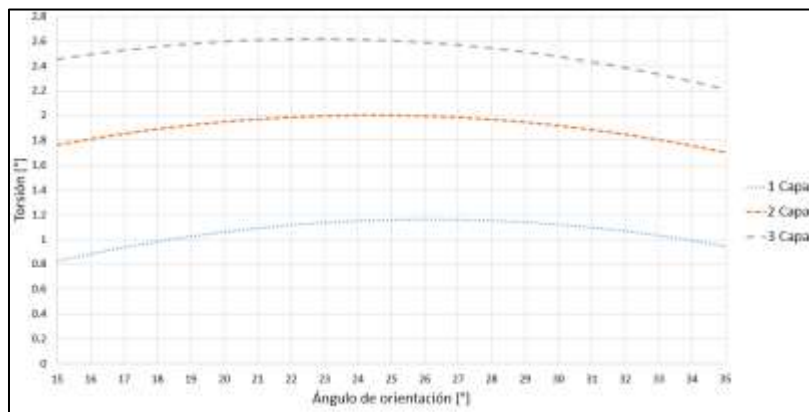


Figura 8. Distribución de torsión utilizando la ecuación de regresión.

4.3. Criterio de la máxima deformación

La Figura 9 muestra la distribución del índice de Fallo (IF) a lo largo de la pala para las diferentes corridas experimentales, en la parte derecha se muestra la magnitud del IF, la variación porcentual respecto a la pala convencional y la posición en donde se presenta el máximo. En línea punteada color rojo se muestra la distribución del IF de la pala convencional, la máxima magnitud en la piel de la pala es de 0.67 y se presenta en dos posiciones, a 9 m y 59 m. El máximo IF tiene una magnitud de 1.19, un incremento del 164% y se presenta en la C10 con 1 capa a un ángulo de fibra de 35°. El mínimo IF tiene una magnitud de 0.85, un incremento del 75% y se presenta en la C5 con 3 capas a un ángulo de 20°. El comportamiento de resistencia estructural de la pala mediante el criterio de la máxima deformación arroja incrementos en

toda la pala respecto a la convencional. El modo de fallo predominante en todas las corridas experimentales con ángulos de orientación de fibra es fallo a deformación de tensión en la dirección transversal de la fibra (e_{2t}) y en deformación en cortante (e_{12}). La capa crítica es la externa, se presenta a 12 m sobre la terminación del sparcap en dirección al borde de ataque y a 16 m sobre el borde de ataque, ver Figura 10.

Con un R^2 de 96.72% de confianza la (Ec. 4. 3) de regresión describe la relación entre el IF y los términos en el modelo a una posición de 12 m, en la Figura 11 se observa que las palas con la implementación de la técnica de AT resisten estructuralmente cuando se agrega una capa con ángulos hasta 28°, dos capas con ángulos hasta 30.5° y tres capas con ángulos hasta 32.5°, los resultados indican que de las

palas con implementación de AT resisten más a bajos ángulos de orientación de fibra como indica [15].

$$IF = 0.284 + 0.0191 * \theta + 0.1034 * C + 0.000338 * \theta^2 + 0.0189 * C^2 - 0.00766 * \theta * C \quad (\text{Ec. 4.3})$$

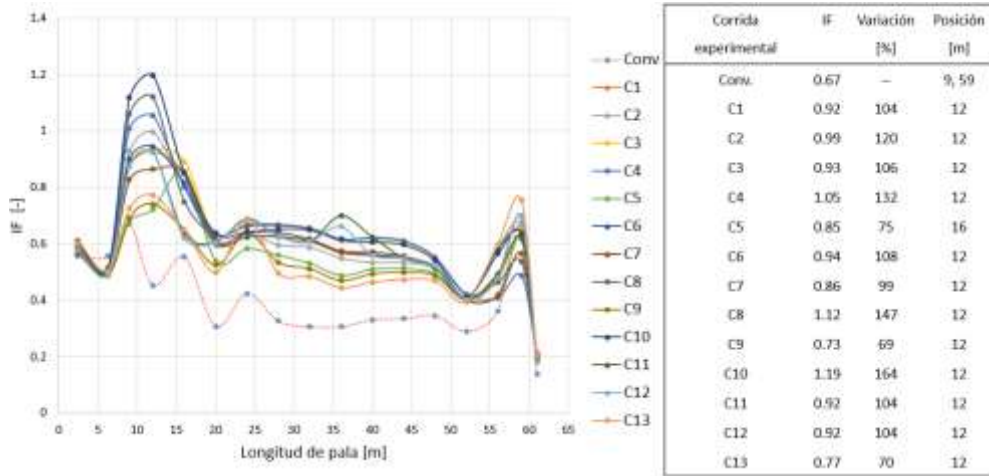


Figura 9. Distribución de IF a lo largo de la piel.

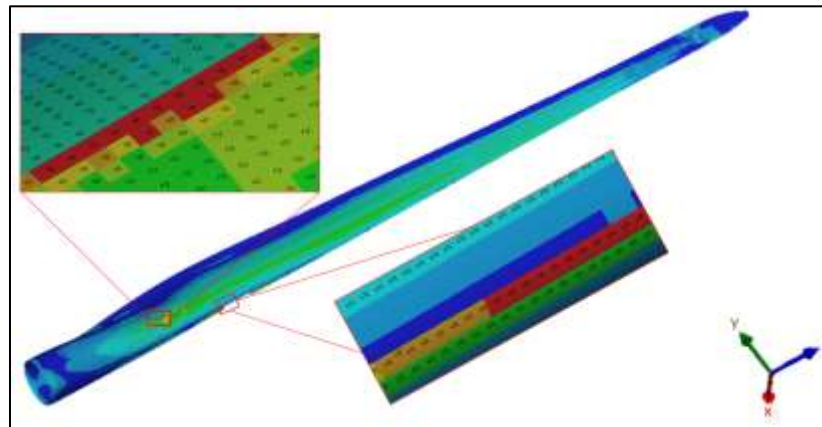


Figura 10. Zonas de valores máximos.

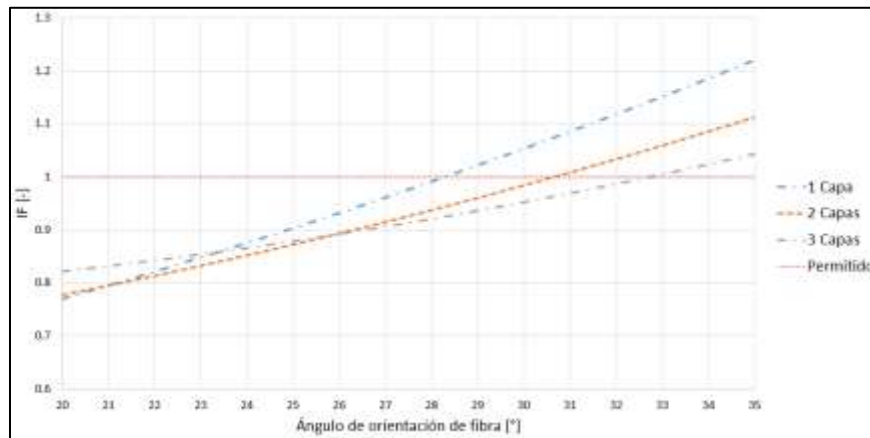


Figura 11. Distribución de IF utilizando la ecuación de regresión.

4.4. Pandeo

La Figura 12 muestra el factor de carga de pandeo (FC) de las palas obtenido de las diferentes corridas experimentales, en la parte derecha se muestra la magnitud del FC, la variación porcentual respecto a la pala convencional y la posición en donde se presenta el mínimo FC. En color rojo se indica el FC de la pala convencional, una magnitud de 2.05 presente en el BS a 13 m de la raíz. El máximo FC se presenta en el PSW a 5 m, tiene una magnitud de 2.58, un incremento del 25.7% y es obtenido en la C4 con 3 capas a un ángulo de 35°. El mínimo FC se presenta en el BS a 14 m, tiene una

magnitud de 2.08, un incremento del 1.36% y es obtenido en la C13 con 1 capa a un ángulo de 20°.

Con un R^2 de 97.13% de confianza la (Ec. 4.4) de regresión describe la relación entre el FC y los términos en el modelo, en la Figura 13 se observa que la utilización de fibras con ángulos de orientación mejora el FC de Pandeo de la pala respecto a la convencional. El FC es mayor a ángulos de orientación de fibra más grandes y a mayor número de capas. Con una capa el FC incrementa 11.08%, con dos capas el FC incrementa 23.5% y con tres capas el FC incrementa 25.8%.

$$FC = 1.031 + 0.0458 * \theta + 0.402 * C - 0.000556 * \theta^2 - 0.0582 * C^2 - 0.00005\theta * C \quad \text{(Ec. 4.4)}$$

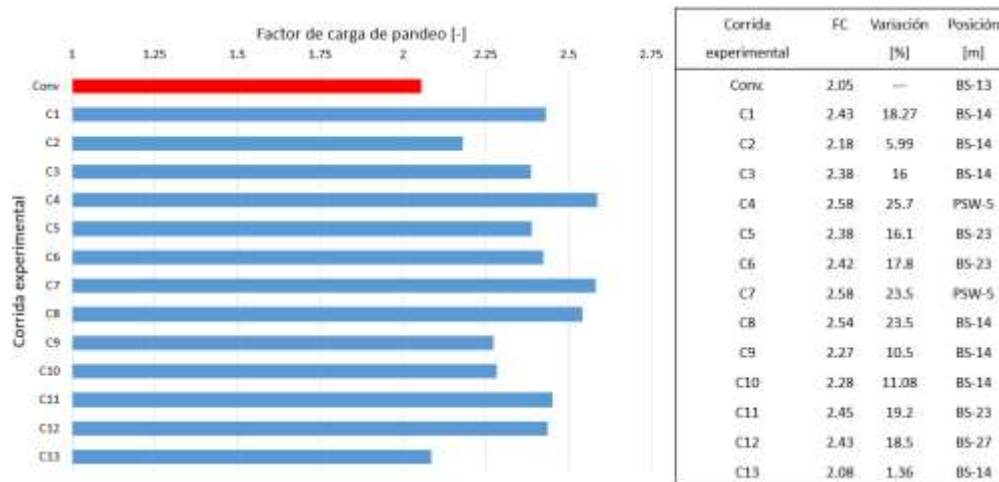


Figura 12. Factor de carga de pandeo.

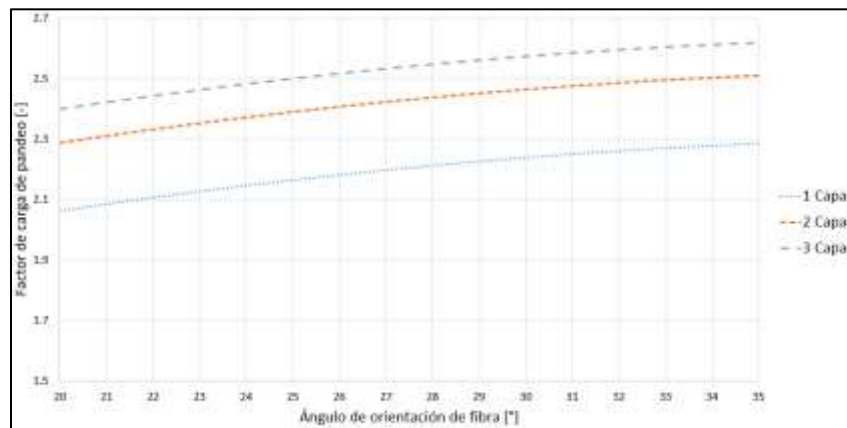


Figura 13. Distribución de Pandeo utilizando la ecuación de regresión.

4.5. Peso

La Figura 14 muestra el Peso (W) de las palas obtenido de las diferentes corridas experimentales, en la parte derecha se muestra la magnitud de W y la variación porcentual respecto a la pala convencional. En color rojo se indica el W de la pala convencional, una magnitud de 20.113 Ton. El máximo W es de 21.58 Ton, un incremento del 7.34% y es obtenido en la C4, C5 y C7 con 3 capas y ángulos de 35°, 20° y 27.5° respectivamente. El mínimo W es de 20.13 Ton, un incremento del 0.08% y es obtenido en la C2, C10 y C13 con 1 capa y ángulos de 27.5°, 35° y 20° respectivamente.

Con un R² de 97.74% de confianza la (Ec. 4.5) de regresión describe la relación entre el Peso (W) y los términos en el modelo, en la Figura 15 se observa que las palas con la implementación de la técnica de AT tienen un incremento respecto a la pala convencional, con una capa incrementa 0.08%, con dos capas incrementa 3.71% y con tres capas 7.34%, el cambio en el peso es independiente del ángulo de orientación de las fibras, ocurre al cambiar de un material TRIAX a uno UD con diferentes espesores y densidades.

$$W = 19.884 - 0.03 * \theta + 0.607 * C + 0.00054 * \theta^2 + 0.00306 * C^2 - 0.0\theta * C \quad \text{(Ec. 4.5)}$$

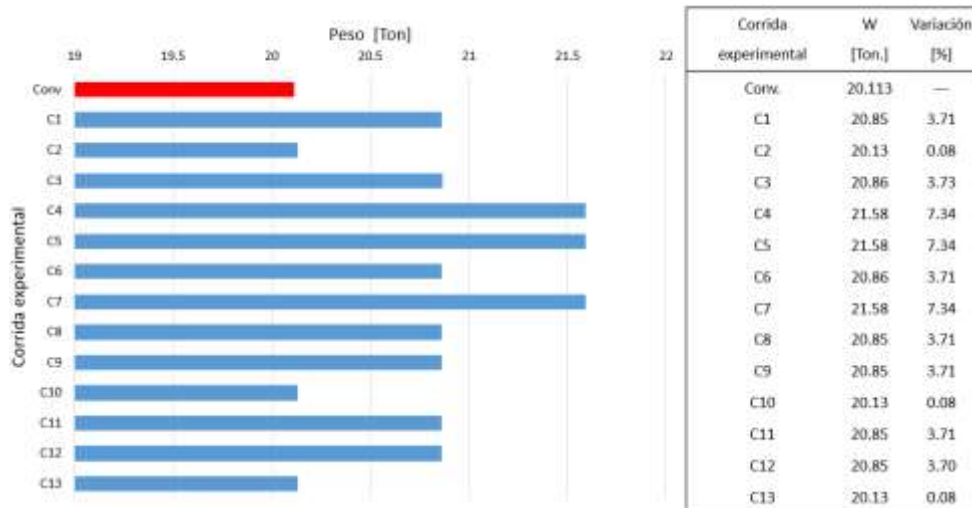


Figura 14. Peso de las palas.

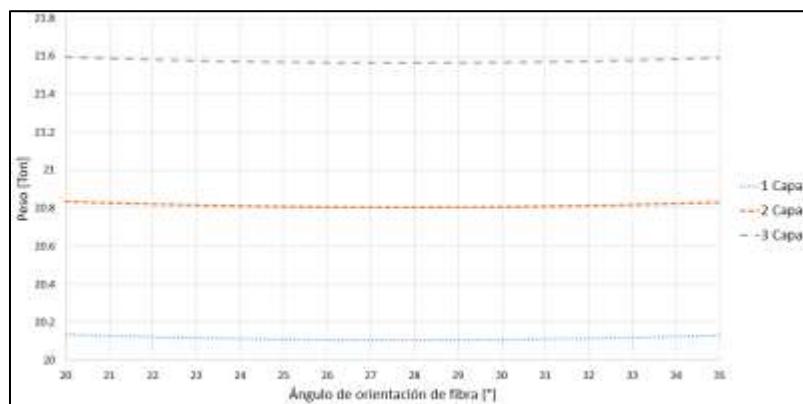


Figura 15. Distribución de Peso utilizando la ecuación de regresión.

5. Conclusiones

Las palas con la implementación de la técnica de AT que consiguen una torsión en la punta de 1° o superior han demostrado una reducción en las cargas de los componentes de la turbina. Este trabajo investigó cual es el ángulo de orientación de las fibras que mayor torsión producen en la pala y su efecto sobre el comportamiento estructural, concluyendo lo siguiente:

El desplazamiento de las palas con la implementación de la técnica de AT es menor cuando se tienen fibras orientadas a 20° que cuando están orientadas a 35° y disminuye con el incremento de capas.

El ángulo de orientación de fibra que mayor torsión genera en la punta de la pala es dependiente de la cantidad de capas que se agregue, cuando se agrega 1, 2 y 3 capas el ángulo de orientación de fibra es 26° , 24° y 23° y genera una torsión máxima de 1.16° , 2.002° y 2.61° respectivamente, de acuerdo a [11] y [14] estos ángulos de torsión son indicativos de una reducción de cargas en la turbina.

El IF del criterio de máxima deformación a lo largo de la pala bajo una condición de carga de viento a 12 m/s muestran que las palas con la implementación de la técnica de AT son menos resistentes estructuralmente que las palas convencionales, la pala está en el límite hasta ángulos de orientación de fibra de 28° , 30.5° y 32.5° para 1, 2 y 3 capas respectivamente.

El FC de Pandeo de las palas con la implementación de la técnica de AT es superior a la pala convencional, los valores máximos se obtienen a ángulos de orientación de fibra de 35° , para 1, 2 y 3 capas el incremento del FC es de 11.08%, 23.5% y 25.8% respectivamente.

El peso de las palas con la implementación de la técnica de AT respecto a la convencional no es dependiente del ángulo de orientación de fibra, está relacionado con los espesores y densidades de las capas que se sustituyen en la pala.

6. Referencias

- [1] Sorensen J. D. and Sorensen J. N. Aerodynamic design of wind turbine rotors. *Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation* Woodhead Publishing Series in Energy, 2011, Pages 161-207. <https://doi.org/10.1533/9780857090638.2.161>.
- [2] Joyce Lee, Feng Zhao. 2020. *Global Wind Report 2019*. Belgium. Global Wind Energy Council.
- [3] IRENA. 2019. *Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)*. Abu Dhabi. International Renewable Energy Agency.
- [4] GE Renewable Energy. Haliade-X offshore wind turbine. Recuperado el 29 de mayo de 2021. <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>.
- [5] SIEMENS Gamesa. Generation V: power for generations. Recuperado el 29 de mayo de 2021. <https://www.siemensgamesa.com/es-es/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/offshore/brochures/siemens-gamesa-offshore-wind-turbine-sg-10-0-193-dd-en-double.pdf>.
- [6] NREL Transforming ENERGY. New Reference Turbine Gives Offshore Wind and Upward Draft. Recuperado el 20 de mayo de 2021. <https://www.nrel.gov/news/program/202>

- 0/reference-turbine-gives-offshore-wind-updraft.html.
- [7] L. Sartori, F Bellini, A. Crocem, C.L. Bottasso. "Preliminary design and optimization of a 20MW reference wind turbine". *Journal of Physics: The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2018)*. 2018. doi :10.1088/1742-6596/1037/4/042003.
- [8] Samuel Scott, Marco Capuzzi, David Langston, Ervin Bossanyi, Graeme McCann, Paul M. Weaver, Alberto Pirrera. Effects of aeroelastic tailoring on performance characteristics of wind turbine systems. *Renewable Energy*, Volume 114, Part B, 2017. Pages 887-903. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.048>.
- [9] Paul Veers, Gunjit Bir and Donald Lobitz. "Aeroelastic tailoring in wind turbine blade applications". *Windpower 1998*, American Wind Energy Association Meeting and Exhibition.
- [10] Tohid. Bagherpour, X.M. Li, Dimitris I. Manolas, V. A. Riziotis. "Modeling of Material Bend-Twist Coupling on Wind Turbine blades". *Composite Structures*. Volume 193. 2018. Pages 237-246. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.071>.
- [11] Rohaida B. Hussain, Hong Yue, William E. Leithead, Qing Xiao. "Modelling and Analysis of Aeroelastic Tailoring Blade wind Turbine Systems". *IFAC-PapersOnLine*. Volume 50, 2017. Pages 9926-9931. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1637>.
- [12] Jinge Chen, Xin Shen, Xiaocheng Zhu, Zhaohui Du. "Study on composite bend-twist coupled wind turbine blade for passive load mitigation". *Composite Structures*. Volume 213. 2019. Pages 173-189. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.086>.
- [13] Hang Meng, Fue-Sang Lien, Gregory Glinka, Paul Geiger. "Study on fatigue life of bend-twist coupling wind turbine blade based on anisotropic beam model and stress-based fatigue analysis method". *Composite Structures*. Volume 208. 2019. Pages 678-701. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.032>.
- [14] Khazar Hayat, Sung Kyu Ha. "Load mitigation of wind turbine blade by aeroelastic tailoring via unbalanced laminates composites". *Composite Structures*. Volume 128. 2015. Pages 122-133. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.042>.
- [15] Sung Kyu Ha, Khizar Hayat, Lei Xu. "Effect of shallow-angled skin on the structural performance of the large-scale wind turbine blade". *Renewable Energy*. Volume 71. 2014. Pages 100-112. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.023>.
- [16] Germanisher Lloyd. 2010. *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Hamburg, Germanisher Lloyd.
- [17] Ansys® ACP (Pre), Release 17.1.
- [18] Ansys® Static Structural, Release 17.1.
- [19] Ansys® ACP (Post), Release 17.1.
- [20] Ansys® Eigenvalue Buckling, Release 17.1.
- [21] Minitab® 17.1.0.
- [22] J. Espinoza, A. González, A. Marco, E. Sáenz. *Design Basis for the Certification of the Blade for the MEM*. Instituto Nacional de Energías Eléctricas Limpías. 2019. Contenido en <https://detelm.ineel.mx/iniciarsesion/consulta/ecm-cener-79-design-basis>.
- [23] 3A composites Core Materials AIREX® C70 [Data Sheet 04.2020]. Recuperado el día 29 de mayo de 2021. <https://www.3accorematerials.com/uploa>

- ds/documents/TDS-AIREX-C70-E-04.2020.pdf.
- [24] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott. *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*. United States. 2009. <https://doi.org/10.2172/947422>.
- [25] David Wood. 2011. *Small Wind Turbines; Analysis, Design, and Application*. London. Springer.
- [26] Martin O. L. Hansen. 2008. *Aerodynamics of Wind Turbines*. UK. Earthscan.
- [27] Erich Hau. 2006. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Germany. Springer.
- [28] Carlos Rubio González, Víctor Romero Muñoz. 2011. *Método del Elemento Finito, Fundamentos y aplicaciones con ANSYS*. México. LIMUSA.
- [29] Daryl L. Logan. 2007. *A first Course in the Finite Element Method*. Canada. Thomson.
- [30] G. Lakshmi Narasaiah. 2008. *Finite Element Analysis*. India. BS Publications.
- [31] Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, Mechanical APDL/Element library/Shell 181, ANSYS, Inc.
- [32] Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, ANSYS Composite PrepPost User's Guide/Theory Documentation/Classical Laminated Theory/Analysis, ANSYS, Inc.
- [33] Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, Meshing User's Guide, ANSYS, Inc.
- [34] N. M. Karaolis, G. Jeronimidis and P. J. Mussgrove. "Composite Wind Turbine Blades: Coupling Effects and Rotor Aerodynamic Performance". European Wind Energy Conf. 1989. Pages 244-248.
- [35] Vladimir Fedorov. 2012. *Bend-Twist Coupling Effects in Wind Turbine Blades*. Denmark. Department of Wind Energy Technical University of Denmark.
- [36] Cheng-Huat Ong and Stephen W. Tsai. 1999. *Design, Manufacture and Testing of a Bend-Twist D-spar*. California. Sandia National Laboratories.
- [37] W. C. de Goeij, M. J. L. van Tooren, A. Beukers. "Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor-blade". *Applied Energy*. Volume 63. 1999. Pages 197-207. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(99\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00016-1).
- [38] László P. Kollár, George S. Springer. 2003. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511547140>
- [39] P. K. Mallick. 2007. *Fiber-reinforced composites, Materials, Manufacturing and Design*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005981>.
- [40] Federico Paris Carballo, Jose Cañas Delgado, Juan Carlos Marin Vallejo. 2006. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Sevilla. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros Industriales.
- [41] Douglas C. Montgomery. 2006. *Diseño y análisis de experimentos*. México. LIMUSA WILEY.