



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE FIBRAS SOBRE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL INDUCIDA POR ADAPTABILIDAD AEROELÁSTICA EN PALAS DE TURBINAS EÓLICAS HÍBRIDAS VIDRIO-CARBONO

**INFLUENCE OF FIBER ORIENTATION ON THE STRUCTURAL
RESPONSE INDUCED BY AEROELASTIC ADAPTABILITY IN
HYBRID GLASS-CARBON WIND TURBINE BLADES**

Jaime Espinoza Hernández

Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

Oscar Fernández Pérez Tejada

Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

León Donizetty Olivares Bazán

Universidad Autónoma de San Luis Potosí – México

José Alejandro Amaro Hernández

Universidad Autónoma de San Luis Potosí - México

Influencia de la orientación de fibras sobre la respuesta estructural inducida por adaptabilidad aeroelástica en palas de turbinas eólicas híbridas vidrio-carbono

Jaime Espinoza Hernández¹

jaime.espinoza@uaslp.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3899-842X>

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
México

Oscar Fernández Pérez Tejada

oscar.pereztejada@uaslp.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6009-8666>

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
México

León Donizetty Olivares Bazán

donizetty.bazan@uaslp.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2070-0229>

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
México

José Alejandro Amaro Hernández

alejandro.amaro@uaslp.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8856-748X>

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
México

RESUMEN

El incremento en el tamaño de las palas de aerogeneradores modernos ha intensificado las cargas aerodinámicas, inerciales y de fatiga, motivando el desarrollo de estrategias de control pasivo de cargas. Entre estas, la adaptabilidad aeroelástica (Aeroelastic Tailoring, AT) aprovecha la anisotropía de los materiales compuestos para inducir acoplamientos flexión-torsión, permitiendo que la pala se torsione ante incrementos de carga y reduzca el ángulo de ataque de manera pasiva. En este estudio se investiga numéricamente la influencia del ángulo de orientación de las fibras y del número de capas en la piel de una pala eólica de 61.5 m correspondiente a la turbina de referencia NREL de 5 MW. Se emplea una metodología basada en diseño de experimentos (DoE) y análisis por elemento finito (MEF) utilizando ANSYS®, considerando configuraciones híbridas de fibra de carbono bajo una condición aerodinámica representativa a 12 m/s. Los resultados muestran una alta sensibilidad de la torsión inducida al ángulo de orientación y al espesor del laminado, identificándose ángulos óptimos cercanos a 25°, 23° y 21° para 1, 2 y 3 capas, respectivamente, con torsiones máximas en punta de hasta 4.18°, asociadas a una reducción potencial de cargas estructurales. No obstante, las configuraciones con fibra de carbono en la piel presentan incrementos significativos en el índice de fallo y en las deformaciones por cortante, superando los criterios de resistencia normativa. Se concluye que la AT es efectiva para la mitigación pasiva de cargas, pero requiere un diseño estructural cuidadosamente balanceado para garantizar la integridad estructural de la pala.

Palabras clave: Adaptabilidad aeroelástica; Acoplamiento flexión-torsión; Materiales Compuestos; Palas de turbinas eólicas; Análisis FEM

¹ Autor principal.

Correspondencia: jaime.espinoza@uaslp.mx

Influence of fiber orientation on the structural response induced by aeroelastic adaptability in hybrid glass–carbon wind turbine blades

ABSTRACT

The increase in the size of modern wind turbine blades has intensified aerodynamic, inertial, and fatigue loads, motivating the development of passive load control strategies. Among these, aeroelastic tailoring (AT) exploits the anisotropy of composite materials to induce bending–torsion coupling, allowing the blade to twist under increasing loads and passively reduce the angle of attack. In this study, the influence of fiber orientation angle and the number of layers in the skin of a 61.5 m wind turbine blade corresponding to the NREL 5 MW reference turbine is numerically investigated. A methodology based on Design of Experiments (DoE) and Finite Element Analysis (FEA) is employed using ANSYS®, considering hybrid carbon fiber configurations under a representative aerodynamic condition at 12 m/s. The results show a high sensitivity of the induced twist to fiber orientation angle and laminate thickness, identifying optimal angles close to 25°, 23°, and 21° for 1, 2, and 3 layers, respectively, with maximum tip twist values of up to 4.18°, associated with a potential reduction in structural loads. However, configurations with carbon fiber in the skin exhibit significant increases in the failure index and shear deformations, exceeding standard strength criteria. It is concluded that aeroelastic tailoring is effective for passive load mitigation but requires a carefully balanced structural design to ensure blade structural integrity.

Keywords: Aeroelastic tailoring; Bending–torsion coupling; Composite materials; Wind turbine blades; FEM analysis

*Artículo recibido 10 diciembre 2025
Aceptado para publicación: 10 enero 2026*



INTRODUCCIÓN

La energía eólica se genera a partir de la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante el rotor, y posteriormente en energía eléctrica. En las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT), el rotor y sus palas son los elementos responsables de la captación de energía del viento (Sorensen, 2011; Manwell et al., 2009). Las palas modernas de turbinas eólicas están fabricadas predominantemente con materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras, debido a su elevada relación resistencia–peso, rigidez específica y buena resistencia a la fatiga.

El crecimiento acelerado del sector eólico ha sido notable durante la última década. De acuerdo con el Global Wind Energy Council (GWEC), en 2019 se instalaron más de 60 GW de nueva capacidad eólica, alcanzando una capacidad acumulada global de aproximadamente 650 GW, con una tasa de crecimiento anual cercana al 10% (Joyce, 2020). Proyecciones de la International Renewable Energy Agency (IRENA) estiman que la capacidad instalada mundial alcanzará aproximadamente 1,787 GW para 2030 y más de 5,000 GW para 2050, lo que representa incrementos sustanciales respecto a los niveles actuales (IRENA, 2019).

La tendencia actual en el diseño de aerogeneradores se orienta hacia el incremento del tamaño de los rotores con el fin de maximizar la captura de energía del viento. Ejemplos representativos incluyen la turbina Haliade-X de 12 MW con palas de 107 m (GE, 2021), la SG 10.0-193 DD de Siemens Gamesa (2021), así como diseños conceptuales de turbinas de 15 MW y 20 MW desarrollados por NREL y Sartori (2018), respectivamente.

El aumento en la longitud de las palas conlleva un incremento significativo en las cargas aerodinámicas e inerciales, lo que somete a las palas a mayores niveles de esfuerzo, deformación y fatiga (Scott, 2017). Para mitigar estas cargas, las turbinas eólicas incorporan sistemas de control activos, siendo el más común el control de paso (pitch), (Scott, 2008; Ponta, 2014).

Como alternativa, los métodos de control pasivo de cargas, y en particular la adaptabilidad aeroelástica (AT), la técnica AT aprovecha la anisotropía de los materiales compuestos para inducir un acoplamiento flexión–torsión, de modo que la pala se torsiona automáticamente ante incrementos de carga, reduciendo el ángulo de ataque y, por ende, las cargas aerodinámicas (Veers, 1998; Espinoza, 2022).

La adaptabilidad aeroelástica puede lograrse mediante dos enfoques: Adaptabilidad geométrica, basada en la curvatura inicial de la pala, y Adaptabilidad estructural, que se obtiene modificando la arquitectura interna del laminado, la distribución del material y la orientación de las fibras (Scott, 2008). En este contexto, el presente trabajo investiga, mediante modelado numérico basado en el Método de Elemento Finito (MEF), la influencia del ángulo de orientación de fibras en la piel de la pala sobre la generación de torsión inducida por flexión, así como la respuesta estructural global de una pala híbrida vidrio-carbono.

Marco teórico y estado del arte

En el diseño de palas de turbinas eólicas con materiales compuestos anisotrópicos, es posible inducir acoplamientos mecánicos controlados entre distintos modos de deformación. El acoplamiento flexión-torsión es inducido principalmente por la fuerza aerodinámica de empuje, que varía con la velocidad del viento, (Karaolis, 1989; Veers, 1998). Las palas de turbinas eólicas están fabricadas principalmente con materiales compuestos laminados, cuya respuesta mecánica depende fuertemente de la orientación de las fibras. Karaolis (1989) fue uno de los primeros autores en demostrar que es posible inducir acoplamientos controlados entre modos de deformación mediante la arquitectura del laminado; Laminados simétricos → acoplamiento flexión-torsión y Laminados antisimétricos → acoplamiento tensión-torsión.

Los estudios previos han explorado una amplia variedad de geometrías estructurales, desde vigas planas hasta palas completas. Los resultados muestran que el ángulo óptimo de orientación de fibras depende fuertemente de la geometría, el material de refuerzo y la distribución del laminado (Karaolis, 1989; Walsh, 2011; Fedorov, 2012; Ong, 1999; Kooijman, 1996). Los ángulos de orientación de fibra encontrados que se colocan en la piel van de 9° hasta 35°, el material más utilizado ha sido la fibra de vidrio, seguida de configuraciones híbridas vidrio-carbono y se han reportado torsiones obtenidas en la punta desde 1° hasta 4°. La técnica de AT ha demostrado reducciones significativas en cargas estructurales en turbinas de gran escala. Estudios en turbinas de referencia de 5 MW y 10 MW han reportado reducción de cargas de fatiga flapwise: 8–13%, reducción de cargas extremas: 6–8% y reducción de momentos en la raíz: hasta 16%, (Bagherpour, 2018; Rohaida, 2017; Chen, 2019; Meng, 2018; Hayat, 2015; Ha, 2014), ver Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Revisión del estado del arte sobre la reducción de cargas

Autor	Geometría utilizada	Ángulos de orientación de fibra	Resultados
(Bagheropur, 2018)	10 MW Rotor de 178.3 m.	9°-12.5°-Piel	Torsión 4° en punta Reducción en dirección Flapwise: Fatiga:7-10%, Extremas:6-8%
(Rohaida, 2017)	5 MW Palas de 61.5 m	Distribuciones de twist a lo largo de la pala (4 modelos)	Torsiones en punta: 2.8°, 1°, 1.5° Reducción en uso de Pitch Eliminación de picos a altas frecuencias, Indicativo de reducción de fatiga
(Chen, 2019)	5 MW Palas de 61.5 m	20°-spar-cap	Torsión 4° en punta Reducción de 16% momentos en raíz
(Meng, 2018)	5 MW Palas de 61.5 m	5°-spar-cap 10°-spar-cap 15°-spar-cap	Reducción de cargas en spar-cap del 20-25%. Mejor resultado 15°
(Hayat, 2015)	5 MW Palas de 61.5 m	Laminados desbalanceados con ángulos de fibra de 25°	Torsiones de 0.24°, 1.94° y 2.99° en punta Reducción de cargas de fatiga de 8.7-13.7%
(Ha, 2014)	5 MW Palas de 61.5 m	35° y 25° en laminados BIAX y TRIAX	Reducción en índice de fallo en compuestos de 18% y 38%

Tabla 2. Revisión del estado del arte sobre diferentes geometrías

Autor	Geometría utilizada	Resultados
(Karaolis, 1989)	Viga con sección transversal plana	Máximo acoplamiento flexión torsión a: 12°-carbono, 10°-kevlar, 18°vidrio
(Walsh, 2011)	Viga con sección transversal plana	Máximo acoplamiento flexión torsión a: 20°-carbono, 15°-kevlar, 25°vidrio
(Fedorov, 2012)	Viga con sección abierta en I	Máximo acoplamiento flexión torsión a 15°-vidrio
(Fedorov, 2012)	Viga con sección cerrada en forma de caja	Máximo acoplamiento flexión torsión a 25°-vidrio

(Ong, 1999)	Viga con sección cerrada en forma de D	Analiza las siguientes configuraciones: T800 (60/2515/60), Torayca (60/2524/60), Torayca/vidrio (70g/209ca/208g/208ca/70g) y T800/vidrio (70g/206ca/206ca/206ca/70g)
(Kooijman, 1996)	Perfil aerodinámico NACA 63618	Laminado de carbono (25/-65/25)s Laminado híbrido (25ca/-65gl/25ca)s.
(Fedorov, 2012)	Sección de 8.3 m de pala	Fibras de vidrio colocadas a 25°
(Goeij, 1999)	Pala de 26.3 m	Laminado (25ca/-65gl/25ca/0gl)s en Piel, obtuvo 2.33° en punta Spar-cap-box, obtuvo 2.22° en punta Doble spar-cap-box, obtuvo 2.73° en punta

Los programas de simulación numérica utilizados para análisis estructurales se muestran en la Tabla 3, siendo el más común ANSYS ACP.

Tabla 3. Revisión del estado del arte sobre modelado numérico

Autor	Software	Autor	Software
(Deilmann, 2009)	ADINA	(Murray, 2014)	Altair Hyperworks RADIOSS
(Fedorov, 2009), (Capuzzi, 2014)	MSC NASTRAN	(Hayat, 2015), (Ha, 2014)	ABAQUS
(Manudha, 2015), (Liu, 2011), (Ong, 1999), (Fedorov, 2009)	ANSYS APDL	(Ong, 1999)	3D Beam
(Quang, 2017), (Danao, 2016), (Ozyildiz, 2018), (Wang, 2018)	ANSYS ACP		

METODOLOGÍA

El enfoque metodológico se basa en un diseño de experimentos (DoE) aplicado a un modelo numérico de alta fidelidad, donde se controlan sistemáticamente las variables que influyen en la torsión inducida por cargas aerodinámicas, y, en consecuencia, en la reducción de cargas estructurales.

Cada combinación del DoE es evaluada mediante modelado por elemento finito (MEF) empleando el software ANSYS®.

La metodología se organiza de la siguiente manera:

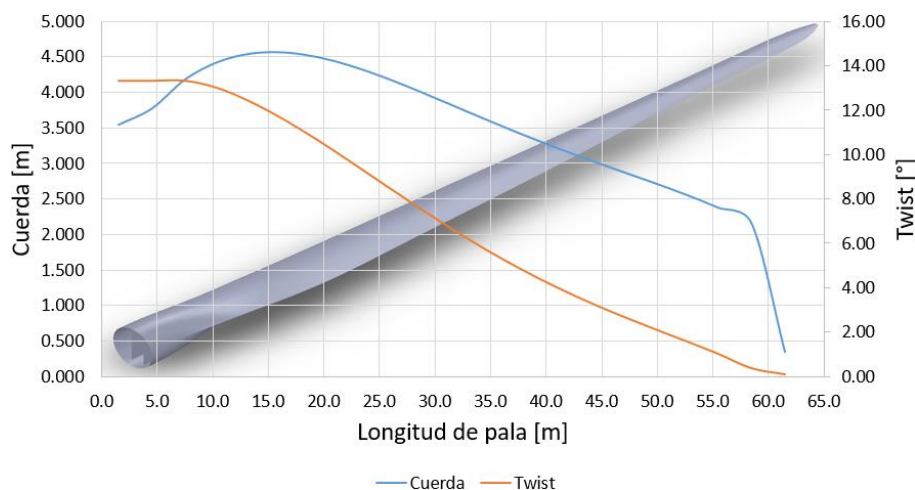
- Definición de la pala convencional de referencia.
- Estudio paramétrico del acoplamiento flexión–torsión aplicado en la piel de la pala.

Pala convencional de referencia

La geometría de referencia corresponde a la pala de la turbina eólica NREL de 5 MW, desarrollada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Jonkman et al., 2009), ampliamente utilizada en estudios de adaptabilidad aeroelástica y control pasivo de cargas (Bagherpour et al., 2018; Rohaida et al., 2017; Chen et al., 2019; Meng et al., 2018).

La pala tiene una longitud total de 61.5 m, una cuerda máxima de 4.5 m ubicada a 16.5 m desde la raíz y está conformada por los perfiles aerodinámicos: DU00-W-405, DU00-W-450, DU97-W-350, DU91-W2-250, NACA 64421 y NACA 614618, la distribución de cuerda y twist se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Geometría aerodinámica de la pala de NREL (Jonkman, 2009)



Estructura interna y definición del laminado

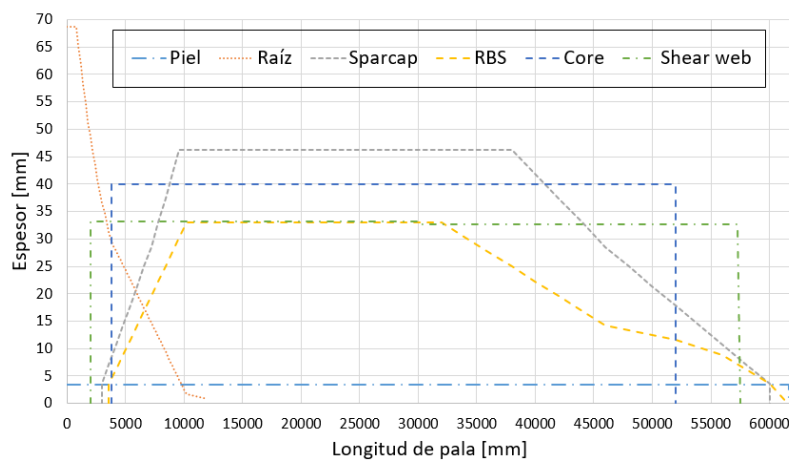
La estructura interna de la pala se define conforme a un diseño convencional validado previamente (Espinoza, 2022), ver Figura 2. Los principales componentes estructurales incluyen:

- Raíz: laminado TRIAX con espesor máximo de 67.86 mm.
- Spar-caps: laminado UD embebido en las conchas, con orientación de fibra 0°, espesor máximo de 46.28 mm.

- Piel interna y externa: laminado TRIAX con orientación 0° , dos capas por cada concha.
- Refuerzos de borde de ataque y salida: laminados TRIAX y UD, respectivamente.
- Núcleo (core): PVC con espesor constante de 40 mm.
- Largueros (webs): estructura sándwich BIAx–PVC.

El peso total de la pala con laminado convencional es de 20.113 toneladas, con el centro de masa localizado en $X = 533.35\text{mm}$, $Y = -192.67\text{mm}$, $Z = 43.605\text{m}$.

Figura 2. Distribución de espesores en la pala con laminado convencional



Materiales utilizados

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos y del núcleo se definen a partir de literatura validada y normas internacionales: Espesor y densidad: Tabla 4, Constantes elásticas: Tabla 5 y Deformaciones permisibles: Tabla 6. Las deformaciones permisibles se reducen mediante un factor parcial de seguridad conforme a la normativa GL (2010).

Tabla 4. Espesor y peso del compuesto

	UD	BIAx	TRIAx	UDC	CORE
Espesor [mm]	0.89	0.65	0.87	0.4	10
Densidad de compuesto [kg/m ³]	1870	1835	1890	1490	100

Tabla 5. Constantes elásticas de los materiales

	GFRP (Espinoza, 2019)			CFRP (ANSYS,2017)	PVC CORE (3A Composites, 2020)
	UD	BIAX	TRIAX	UD	CORE
E1 (MPa)	39330	12400	28425	121000	84
E2 (MPa)	10500	12400	13555	8600	--
ν_{12}	0.26	0.49	0.41	0.27	0.3
G12 (MPa)	4400	10800	8510	4700	40

Tabla 6. Deformaciones permisibles de los materiales compuestos

GFRP	T1_Strain ($\mu\epsilon$)	C1_Strain ($\mu\epsilon$)	T2_Strain ($\mu\epsilon$)	C2_Strain ($\mu\epsilon$)	S_Strain ($\mu\epsilon$)
UD*	18307	13221	4286	10952	10227
BIAX*	11129	12258	11129	12258	16852
TRIAX*	17907	14178	7672	10992	24677
UDC*	16700	10800	3200	19200	12000
UD**	8302.3	5996.1	1943.6	4967.1	4638.2
BIAX**	5047.2	5559.2	5047.2	5559.2	7642.6
TRIAX**	8121.0	6429.8	3479.6	4985.1	11191.3
UDC**	7573.7	4898.0	1451.2	8707.5	5442.2

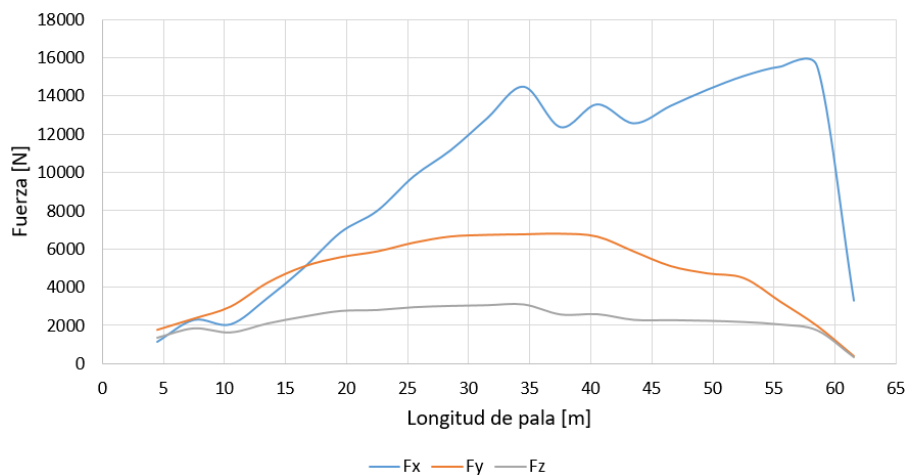
*Valores característicos RK 95

**Valores reducidos por un factor de 2.205

Cargas aerodinámicas aplicadas

Aunque la norma GL (2010) establece hasta 320 casos de carga para una validación estructural completa, esta investigación se enfoca en una condición extrema representativa, con el objetivo de evaluar el comportamiento relativo entre configuraciones de laminado. Las cargas aerodinámicas se obtienen mediante el método clásico Blade Element Momentum (BEM) bajo una velocidad de viento de 12 m/s (Hansen, 2008; Wood, 2011; Manwell et al., 2009). Se calculan las componentes de fuerza F_x , F_y y F_z en 20 estaciones a lo largo de la pala, ver Figura 3.

Figura 3. Distribución de cargas a lo largo de pala a una velocidad de viento de 12 m/s



Modelo por elemento finito (MEF)

El análisis estructural se realiza mediante el Método de Elemento Finito (MEF) usando ANSYS® 17.1, integrando los siguientes módulos: ACP-Pre para definición del laminado compuesto, Static Structural para análisis estático y desplazamientos, ACP-Post para evaluación de deformaciones e índices de fallo y Eigenvalue Buckling para análisis de pandeo lineal.

El modelo emplea elementos Shell181, de cuatro nodos y seis grados de libertad por nodo, capaces de capturar acoplamientos anisotrópicos característicos de materiales compuestos (ANSYS, 2017).

Se utiliza un mallado estructurado con tamaño característico de 100 mm, generando aproximadamente 90,000 elementos con una calidad promedio superior a 0.95, ver Figura 4, las cargas son aplicadas utilizando la opción de Multipoint constraint (MPC) en el centro del sparcap de la concha de presión y succión, ver Figura 5.

Figura 4. Mallado en ANSYS del modelo de la pala

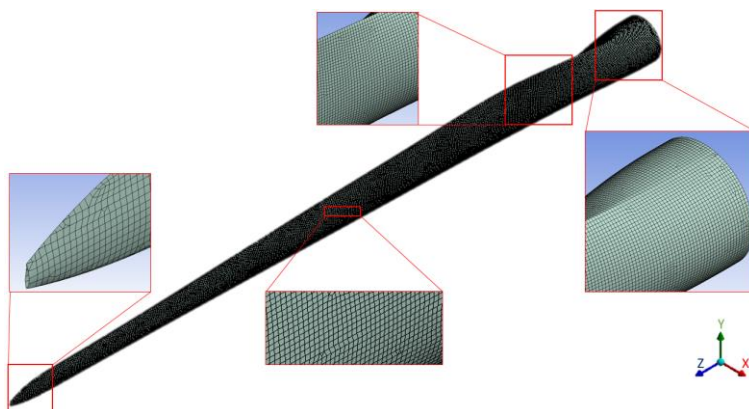
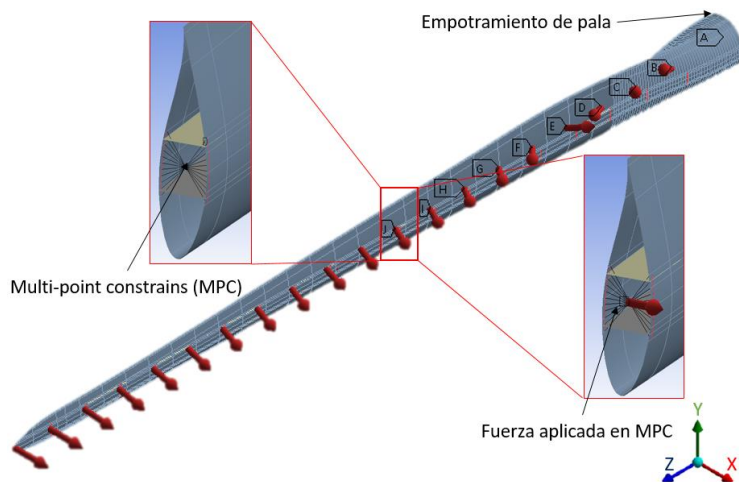


Figura 5. Condiciones de frontera para análisis de cargas estáticas



Respuestas estructurales de interés

La *torsión* se calcula a partir del desplazamiento relativo entre borde de ataque (BA) y borde de salida (BS):

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{BS - BA}{c} \right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La *resistencia estructural* se evalúa mediante la teoría de máxima deformación (Kollar, 2003; Mallick, 2007). El índice de falla (IF) debe ser menor que la unidad:

$$IF = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{perm}} \quad (\text{Ec. 3.3-3.7})$$

Las deformaciones permisibles se reducen con un factor de seguridad total de acuerdo con la norma

GL (2010):

$$\gamma_{Ma} = 2.205 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El *pandeo* se evalúa mediante un análisis de eigenvalores lineal, resolviendo:

$$([K] + \lambda_i[S])\{\psi_i\} = 0 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

El factor de seguridad conforme a GL (2010) debe ser superior a 2.04 y se define como:

$$\lambda = \frac{F_{pandeo}}{F_{aplicada}} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

El *desplazamiento de punta* se utiliza como indicador de seguridad frente a impacto con la torre. Aunque la norma GL (2010) establece una holgura mínima del 30% del radio del rotor, en este estudio se realiza una comparación relativa entre configuraciones.

Diseño de experimentos: orientación de fibra en la piel

Se adopta un diseño central compuesto de superficie de respuesta, con 13 corridas experimentales por material, generado en Minitab® 17 (Montgomery, 2006).

Se seleccionan dos factores principales: Ángulo de orientación de la fibra: 20°–35° y Número de capas: 1–3. El programa arroja 13 corridas experimentales, ver Tabla 7.

Tabla 7. Corridas del Diseño de experimentos para el análisis de la piel

Orden de corrida	TipoPt	Bloques	Ángulo	Cantidad de telas
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

Implementación numérica del AT

La técnica de AT se implementa sustituyendo las capas externas de la piel por laminados UD de fibra de carbono, con la orientación indicada por cada corrida experimental, ver Figura 6 y Figura 7.



Figura 6. Cambios de capas de piel en el modelo convencional

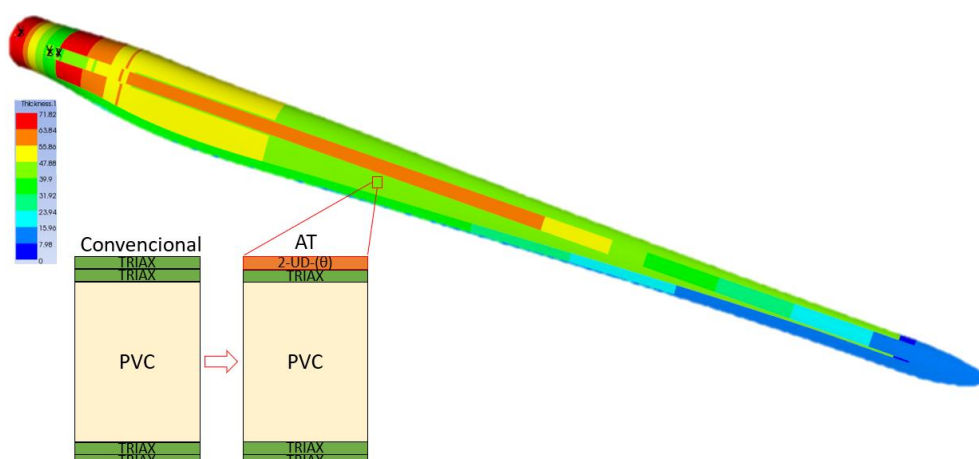
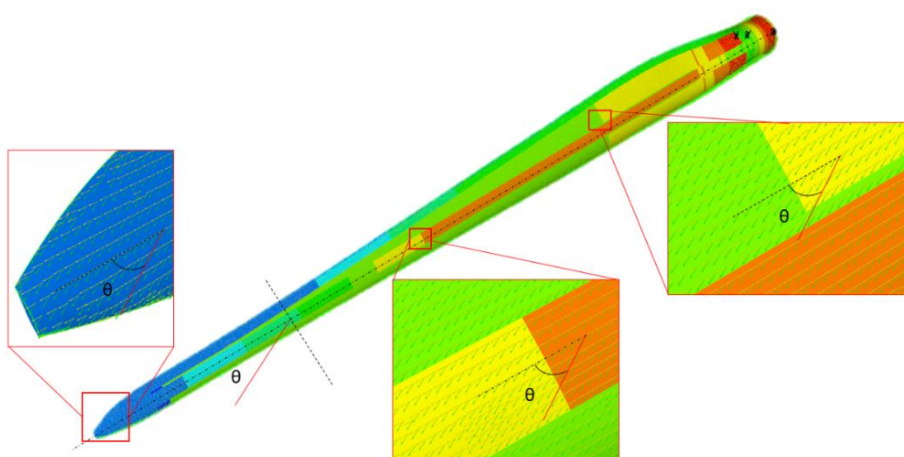


Figura 7. Dirección del ángulo de orientación de las fibras en la piel de la pala



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

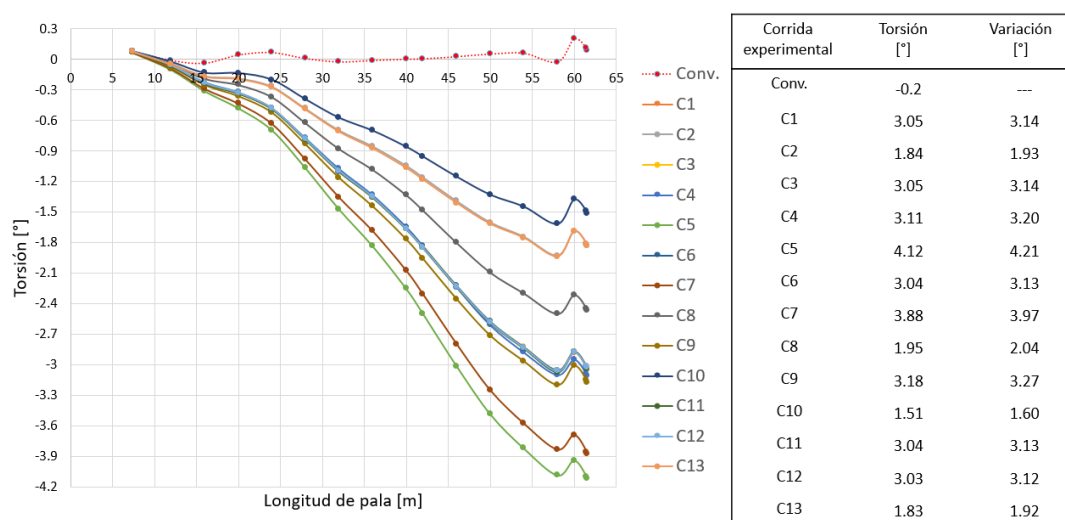
Se evaluó la influencia del ángulo de orientación de las fibras (θ) y del número de capas (C) en la piel de una pala eólica de 61.5 m, considerando configuraciones híbridas y comparando fibra de vidrio (FVP) y fibra de carbono (FCP). Las respuestas analizadas incluyen torsión, desplazamiento de punta, criterio de fallo (IF), pandeo y peso, obtenidas mediante un diseño de experimentos y análisis de superficie de respuesta, los resultados se muestran en la Tabla 8, donde se observa una elevada sensibilidad de las respuestas aeroelásticas al ángulo de orientación de las fibras y al número de capas, particularmente en la torsión inducida.

Tabla 8. Corridas del Diseño de experimentos para el análisis de la piel con fibra de carbono

Corrida	Ángulo de fibras [°]	Cantidad de capas [C]	Torsión [°]	Desplazamiento de punta [mm]	Max Stress [IF]	Pandeo [-]	Peso [t]
1	27.5	2	3.05	6713.36	2.37	2.05	19.92
2	27.5	1	1.84	6854.32	2.36	2.03	19.66
3	27.5	2	3.05	6709.44	1.66	2.12	19.93
4	35	3	3.11	6753.72	1.96	2.59	20.18
5	20	3	4.12	6400.00	2.23	1.92	20.18
6	27.5	2	3.04	6710.44	1.54	2.17	19.92
7	27.5	3	3.88	6594.27	2.18	2.26	20.18
8	35	2	1.95	6829.66	1.77	2.27	19.92
9	20	2	3.18	6575.06	2.39	1.91	19.92
10	35	1	1.51	6919.16	2.18	2.21	19.66
11	27.5	2	3.04	6714.63	1.51	2.18	19.92
12	27.5	2	3.03	6715.21	1.51	2.18	19.92
13	20	1	1.83	6780.55	2.36	1.87	19.66

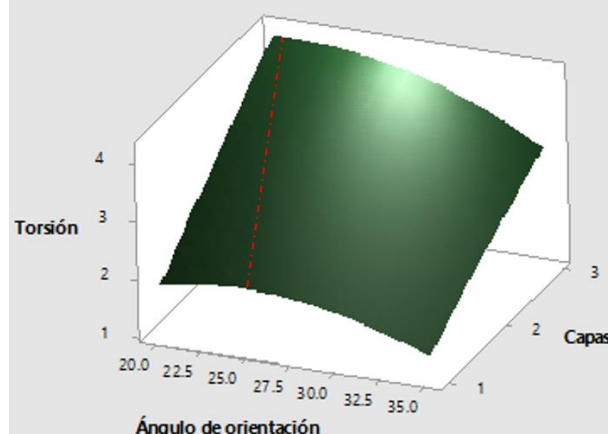
La Figura 8 muestra la distribución de torsión a lo largo de la pala para las diferentes corridas con FCP. En comparación con la pala convencional (línea roja punteada), todas las configuraciones con fibras orientadas inducen un incremento significativo de la torsión, concentrado principalmente en la región cercana a la punta (58–61 m), lo cual es consistente con la geometría y el laminado local de la pala. La Torsión máxima: 4.12° (C5, $\theta = 20^\circ$, 3 capas) y la Torsión mínima: 1.51° (C10, $\theta = 35^\circ$, 1 capa).

Figura 8. Distribución de torsión a lo largo de la pala en la FCP



La superficie de respuesta mostrada en la Figura 9 indica que la torsión: Incrementa con el número de capas y presenta un máximo para ángulos de orientación cercanos a 20–25°, desplazándose hacia ángulos menores conforme aumenta el número de capas.

Figura 9. Distribución de torsión utilizando la superficie de respuesta en la FCP



El modelo de regresión con $R^2 = 96.49\%$ queda definido por la Ec. (5.2):

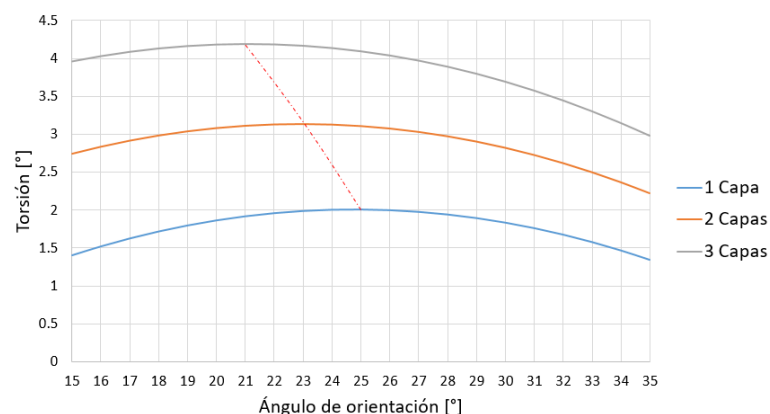
$$T = -3.61 + 0.3316\theta + 1.849C - 0.00623\theta^2 - 0.0572C^2 - 0.02302\theta C \quad (5.2)$$

La Figura 10 muestra que el ángulo óptimo para maximizar torsión depende del número de capas: 1 capa $\rightarrow \theta \approx 25^\circ$, 2 capas $\rightarrow \theta \approx 23^\circ$ y 3 capas $\rightarrow \theta \approx 21^\circ$.

Estos valores difieren de los reportados por Goeij (1999), Bagherpour (2018) y Ha (2014), lo que evidencia la influencia del laminado híbrido y la geometría real de la pala.

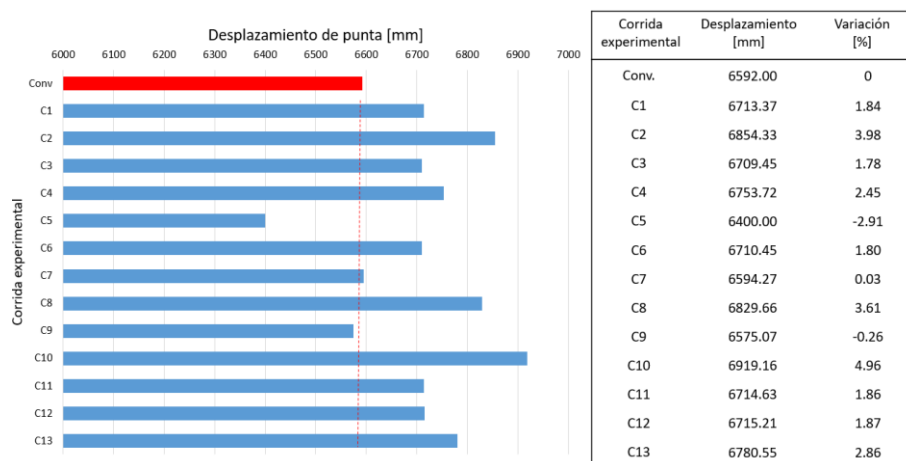
Las torsiones obtenidas (2.00° – 4.18°) sugieren una reducción potencial de cargas extremas ($\approx 6.8\%$), reducción de fatiga (7–13.7%) y hasta 16% en los momentos en la raíz, de acuerdo con Bagherpour (2018), Rohaida (2017), Hayat (2015) y Chen (2019).

Figura 10. Distribución de torsión utilizando la ecuación de regresión en la FCP



La Figura 11 presenta el desplazamiento de punta para todas las corridas con FCP, comparadas con la pala convencional (6,592 mm). Máximo desplazamiento: 6,919 mm (+4.96%), C10 ($\theta = 35^{\circ}$, 1 capa) y Mínimo desplazamiento: 6,400 mm (–2.91%), C5 ($\theta = 20^{\circ}$, 3 capas).

Figura 11. Desplazamiento de punta en la FCP

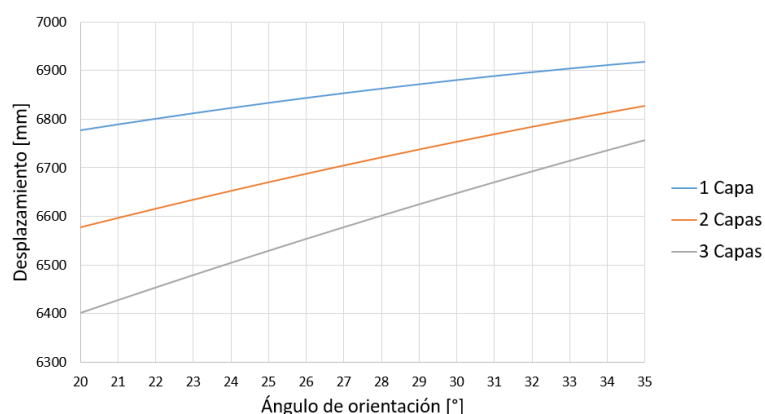


El modelo de regresión se describe mediante la Ec. (5.4):

$$D = 6822.4 + 12.61\theta - 376.9C - 0.1882\theta^2 + 11.35C^2 + 7.17\theta C \quad (5.4)$$

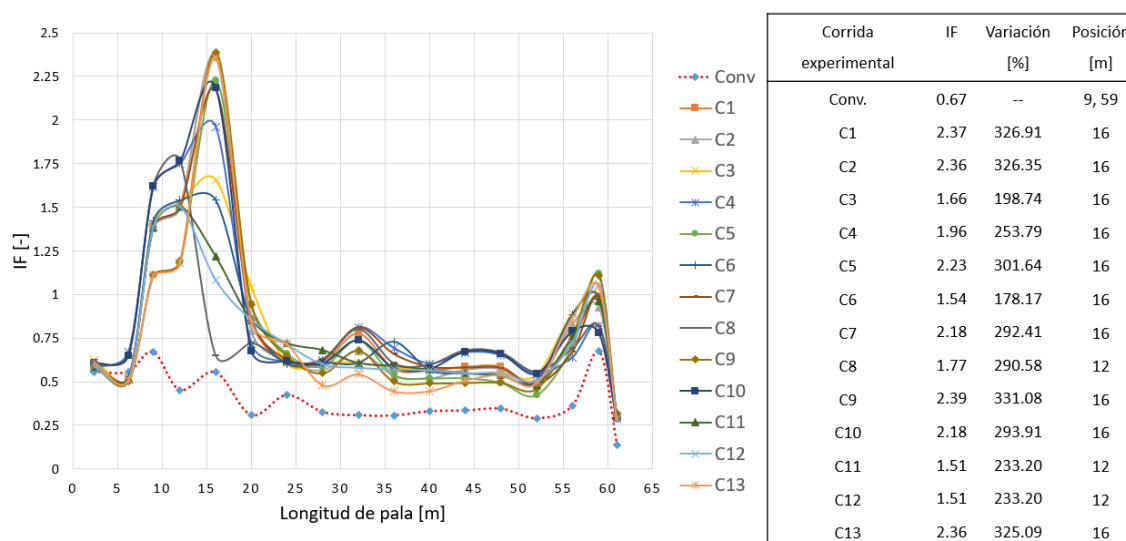
La Figura 12 muestra que ángulos menores ($\approx 20^{\circ}$) y mayor número de capas incrementan la rigidez a flexión, reduciendo el desplazamiento, en concordancia con la teoría clásica de laminados compuestos.

Figura 12. Distribución del Desplazamiento utilizando la ecuación de regresión en la FCP



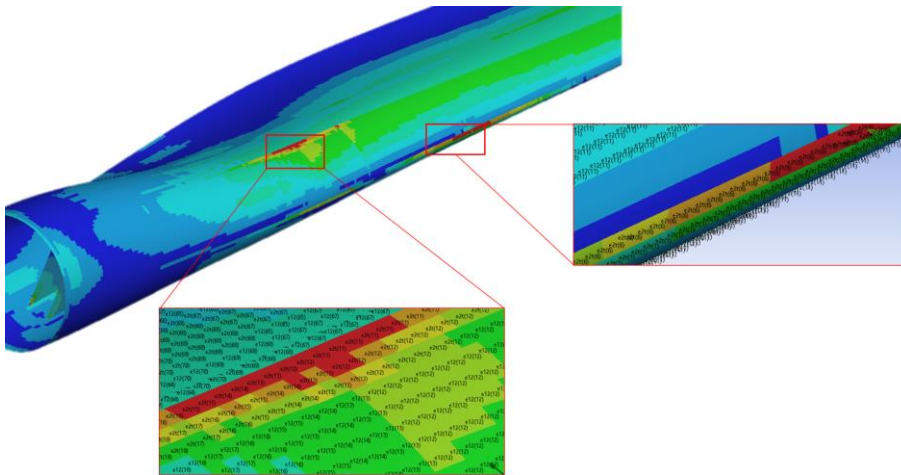
El índice de fallo (IF), evaluado mediante el criterio de máxima deformación, se presenta en la Figura 13. En comparación con la pala convencional (IF ≈ 0.67), todas las configuraciones con FCP muestran incrementos severos del IF: IF máximo: 2.39 (+331%), C9 ($\theta = 20^\circ$, 2 capas) y IF mínimo: 1.51 (+233%), C11–C12 ($\theta = 27.5^\circ$, 2 capas).

Figura 13. Distribución de IF a lo largo de la piel en la FCP



El modo de fallo predominante corresponde a: Deformación transversal a la fibra (ϵ_t) y Deformación por cortante (ϵ_{12}), Las zonas críticas se localizan cerca del spar-cap y borde de ataque (Figura 14).

Figura 14. Zonas de valores máximos

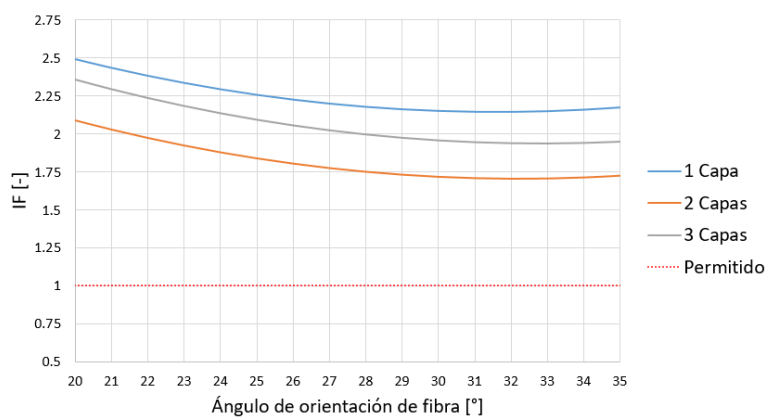


El modelo de regresión es descrito por (Ec. 5.6):

$$IF = 5.74 - 0.160\theta - 1.351C + 0.00258\theta^2 + 0.336C^2 - 0.0031\theta C \quad (5.6)$$

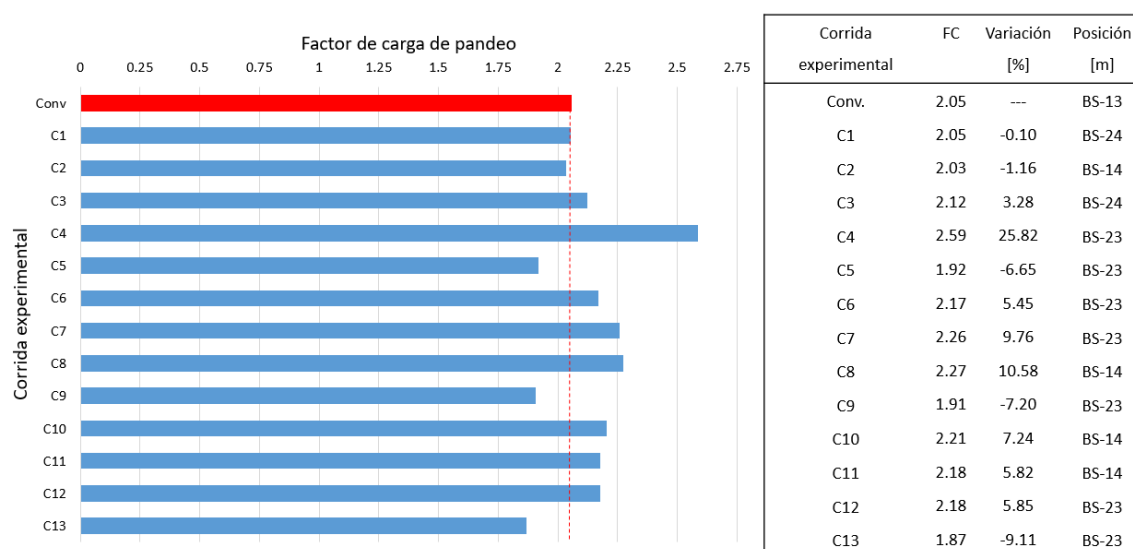
La Figura 15 confirma que las configuraciones con FCP no cumplen los criterios estructurales, a pesar de sus beneficios aeroelásticos.

Figura 15. Distribución de IF utilizando la ecuación de regresión en la FCP



El factor de carga de pandeo (FC), mostrado en la Figura 16, presenta su valor mínimo predominantemente en el borde de salida: FC máximo: 2.59 (+25.8%), C4 ($\theta = 35^\circ$, 3 capas) y FC mínimo: 1.87 (-9.11%), C13 ($\theta = 20^\circ$, 1 capa).

Figura 16. Factor de carga de pandeo en la FCP

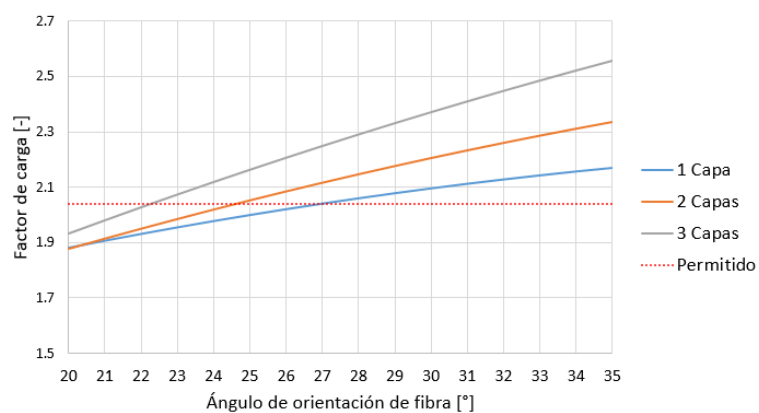


El modelo de regresión mediante la Ec. (5.8) describe el comportamiento:

$$FC = 1.464 + 0.0327\theta - 0.309C - 0.000444\theta^2 + 0.0287C^2 + 0.01105\theta C \quad (5.8)$$

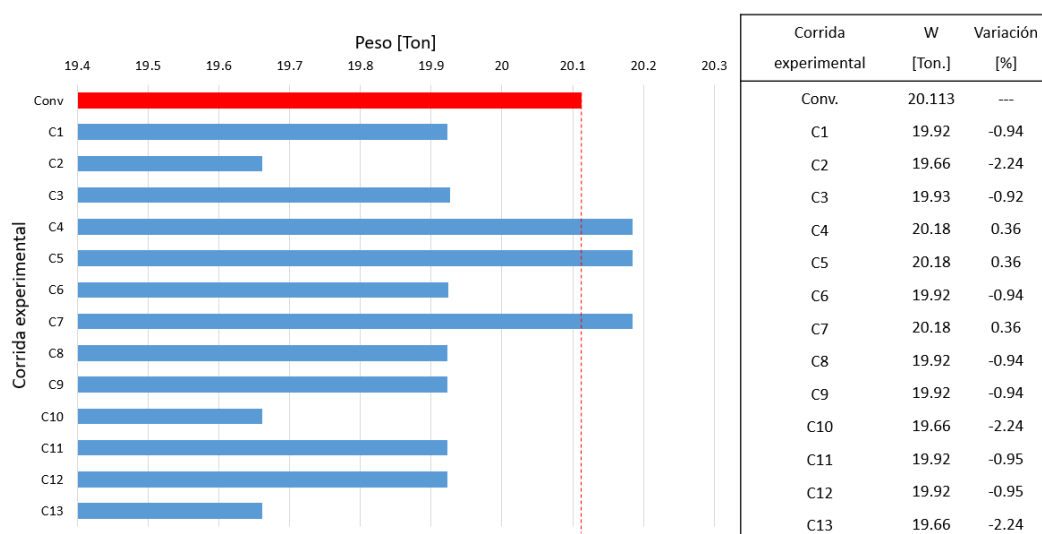
La Figura 17 evidencia que ángulos bajos (20–27°) reducen el FC, comprometiendo la estabilidad local.

Figura 17. Distribución de Pandeo utilizando la ecuación de regresión en la FCP



El peso de la pala (Figura 18) presenta variaciones marginales: Máximo: +0.36% (3 capas) y Mínimo: -2.24% (1 capa).

Figura 18. Peso de las palas en la FCP



El modelo ($R^2 = 100\%$) se describe con la Ec. (5.10):

$$W = 19.3944 + 0.26282C \quad (5.10)$$

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó exitosamente una metodología de diseño de experimentos (DoE) para evaluar y generar conocimiento nuevo sobre el control pasivo de cargas mediante la técnica de adaptabilidad aeroelástica (AT) en palas eólicas de gran escala. Mediante el uso del método de elemento finito (MEF) se implementó la técnica de AT en una pala de 61.5 m de longitud, induciendo acoplamiento flexión–torsión a través de la incorporación de materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio y fibra de carbono, con ángulos de orientación de fibra entre 20° y 35° en la piel.

La metodología permitió identificar los ángulos de orientación de fibra que maximizan la respuesta torsional, así como evaluar las respuestas estructurales asociadas bajo una condición de velocidad de viento de 12 m/s.

A continuación, se presentan las conclusiones específicas obtenidas en este estudio.

- El ángulo de orientación de fibra que genera la mayor torsión en la punta de la pala depende directamente del número de capas incorporadas, evidenciando el fuerte acoplamiento entre el espesor del laminado y la anisotropía del material, se identificaron ángulos óptimos de 25°, 23° y 21° para 1, 2 y 3 capas, respectivamente, generando torsiones de 2.0°, 3.13° y 4.18°. De acuerdo con la literatura, estos niveles de torsión son indicativos de una reducción de cargas de

fatiga, disminución de cargas extremas y reducción de momentos en la raíz, (Bagherpour, 2018; Rohaida, 2017; Hayat, 2015; Chen, 2019).

- Se observó que el desplazamiento de punta es menor cuando las fibras se orientan a 20° en comparación con 35° , debido a que la rigidez a la flexión de los materiales compuestos es mayor a ángulos cercanos a 0° , disminuyendo progresivamente conforme aumenta el ángulo de orientación. El desplazamiento de punta disminuye al incrementar el número de capas, reflejando el aumento de rigidez global de la pala.
- Las palas con implementación de la técnica de AT presentan una menor resistencia estructural que la pala convencional, debido al incremento simultáneo de torsión y desplazamiento, lo cual provoca un aumento significativo en las deformaciones por cortante (ϵ_{12}). En particular, las configuraciones con FCP no cumplen los criterios de resistencia estructural, presentándose el fallo de la piel de fibra de carbono en la región adyacente al *spar-cap* a 12 m de la raíz, así como en el borde de ataque a 16 m. El índice de fallo máximo alcanza un valor de 2.39 (+331%) a un ángulo de orientación de 20° , mientras que el mínimo IF es de 1.51 (+233%) a 27.5° .
- Todas las configuraciones evaluadas con FVP muestran incrementos en el factor de carga de pandeo (FC) respecto a la pala convencional, evidenciando una mejora en la estabilidad local de la estructura. Los ángulos de orientación superiores a 27.5° , 25° y 22.5° para 1, 2 y 3 capas, respectivamente, presentan incrementos en el FC, alcanzándose los valores máximos a 35° .
- El peso de las palas con la implementación de la técnica de AT no depende del ángulo de orientación de las fibras, sino que está determinado principalmente por los espesores y densidades de los laminados sustituidos (Espinoza, 2022). En el caso de la FCP, se obtiene una reducción del peso del 2.24% al emplear una capa, una reducción del 0.92% con dos capas y un incremento del 0.36% al utilizar tres capas, lo cual indica que las posibles ventajas en peso no compensan las deficiencias estructurales observadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A composites Core Materials AIREX® C70 [Data Sheet 04.2020]. Recuperado el día 29 de mayo de 2021. <https://www.3accorematerials.com/uploads/documents/TDS-AIREX-C70-E-04.2020.pdf>
- Ansys® ACP (Post), Release 17.1.
- Ansys® ACP (Pre), Release 17.1.
- Ansys® ACP (Pre), Release 17.1.
- Ansys® Eigenvalue Buckling, Release 17.1.
- Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, ANSYS Composite PrepPost User's Guide/Theory Documentation/Classical Laminate Theory/Analysis, ANSYS, Inc.
- Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, Mechanical APDL/Element library/Shell 181, ANSYS, Inc.
- Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, Meshing User's Guide, ANSYS, Inc.
- Ansys® Static Structural, Release 17.1, Help System, Workbench/Material data/ ANSYS,
- Ansys® Static Structural, Release 17.1.
- Bagherpour, T., Li, X.M., Manolas, D. I., Riziotis, V. A. (2018). Modeling of Material Bend-Twist Coupling on Wind Turbine blades. Composite Structures.
- Capuzzi, M., Pirrera A., Weaver P. M. (2014). A novel adaptive blade concept for large-scale wind turbines. Part II: Structural design and power performance. Energy.
- Chen, J., Shen, X., Zhu, X., Du, Z. (2019). Study on composite bend-twist coupled wind turbine blade for passive load mitigation. Composite Structures.
- Danao, L. A., Abuan, B., Howell, R. (2016). Design analysis of a horizontal axis tidal turbine. Asian Wave and Tidal Conference 2016.
- Deilmann, C. (2009). Passive aeroelastic tailoring of wind turbine blades-A numerical analysis. Massachusetts Institute of Technology.
- Espinoza, H. J., Muñoz, H. G., Manzo, P. A., Santander, B. F. (2022). Análisis estructural de una pala de turbina eólica con implementación de la técnica de adaptabilidad aeroelástica en la piel de la pala. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.



- Fedorov, V. (2012). Bend-Twist Coupling Effects in Wind Turbine Blades. Departamento de Energía Eólica, Universidad Técnica de Dinamarca.
- GE Renewable Energy. (2021). 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>
- Germanisher Lloyd, G. L. (2010). Guideline for the Certification of Wind Turbines. Hamburg, Germanisher Lloyd.
- Goeij, W. C., Van, T. M. J. L. , Beukers A. (1999). Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor-blade. Elsevier.
- Ha, S. K., Hayat, K., Xu, L. (2014). Effect of shallow-angled skin on the structural performance of the large-scale wind turbine blade. Renewable Energy.
- Hansen, M. O. L. 2008. Aerodynamics of Wind Turbines. UK. Earthscan.
- Hayat, K., Ha, S. K. (2015). Load mitigation of wind turbine blade by aeroelastic tailoring via unbalanced laminates composites. Composite Structures.
- 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.
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., Scott, G. (2009), Definition of a 5-MW Reference wind Turbine for Offshore System Development. <https://doi.org/10.2172/947422>
- Joyce, L., Feng, Z. 2020. Global Wind Report 2019. Belgium. Global Wind Energy Council.
- Karaolis N. M. (1989). The design of fiber reinforced composite blades for passive and active wind turbine rotor aerodynamic control. University of Reading.
- Kooijman, H. J. T. (1996). Bending-torsion coupling of a wind turbine rotor blade. Netherlands Energy Research Foundation, report number 7.4012.
- Liu, W. and Gong, J. (2011). Adaptive Bend-Torsional Coupling Wind Turbine Blade Design Imitating the Topology Structure of Natural Plant Leaves. Wind Turbines.
- Manudha, T. H., Aaron, K.L, Lee, B., Gangadhara, P. (2015). Design of shape-adaptive wind turbine blades using Differential Stiffness Bend-Twist coupling. Ocean Engineering.



- Manwell J. F. , McGowan J. G. and Rogers A. L. (2009). Wind Energy Explained, theory, design and application. Wiley.
- Meng, H., Lien, F., Glinka, G., Geiger, P. (2018). Study on fatigue life of bend-twist coupling wind turbine blade based on anisotropic beam model and stress-based fatigue analysis method. Composite Structures.
- Minitab® 17.1.0.
- Montgomery, D. C. 2006. Diseño y análisis de experimentos. México. LIMUSA WILEY.
- Murray, R. E., Doman, D. A., Pegg, M. J. (2014). Finite element modeling and effects of material uncertainties in a composite laminate with bend-twist coupling. Composite Structures.
- NREL Transforming ENERGY. (2021). New Reference Turbine Gives Offshore Wind and Upward Draft. Recuperado el 20 de mayo de 2021. <https://www.nrel.gov/news/program/2020/reference-turbine-gives-offshore-wind-updraft.html>.
- NREL/SR-500-38752. (2006). Advanced Wind Turbine Program Next Generation Turbine Development Project. GE Wind Energy, LLC, California.
- Ong, C. H., Tsai, S. W. (1999). Design, Manufacture and Testing of a Bend-Twist D-spar”. SAND 99-1324.
- Ozyildiz M., Muyan C., Coker D. (2018). Strength Analysis of a Composite Turbine Blade Using Puck Failure Criteria. The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2018). doi :10.1088/1742-6596/1037/4/042027
- Ponta, L., Otero, D., Rajan. (2014). The Adaptive-blade concept in wind power applications. ELSEVIER. DOI:10.1016/j.esd.2014.04.004
- Quang, D. N., Hoon, C. P., Taesam, K. and Jin, H. K. (2017). Structural design and analysis of composite blade for horizontal-axis tidal turbine. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/secm-2017-0093>
- Rohaida, B. Hussain, H. Y., William, E. L., Qing, X. (2017). Modelling and Analysis of Aeroelastic Tailoring Blade wind Turbine Systems. Science Direct.
- Sartori, L., Bellini, F., Crocem, A., Bottasso, C.L. (2018). Preliminary design and optimization of a 20MW reference wind turbine. Journal of Physics: The Science of Making Torque from Wind (TORQUE 2018). doi :10.1088/1742-6596/1037/4/042003.



- Scott, J. J., Van, D. and Dale, E. B. (2008). Active Load Control Techniques for Wind Turbines. Sandia Report 2008. DOI:10.2172/943932
- Scott, S., Capuzzi, M., Langston, D., Bossanyi, E., McCann, G., Weaver, P. M., Pirrera, A. (2017). Effects of aeroelastic tailoring on performance characteristics of wind turbine systems. Renewable Energy, Volume 114, Part B. Pages 887-903. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.048>
- SIEMENS Gamesa.(2021) 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>
- Sorensen J. D. and Sorensen J. N. (2011). Aerodynamic design of wind turbine rotors. Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation. Woodhead Publishing Series in Energy, Pages 161-207. <https://doi.org/10.1533/9780857090638.2.161>
- Veers, P., Bir, G. and Lobitz, D. (1998). Aeroelastic tailoring in wind turbine blade applications. Windpower 1998, American Wind Energy Association Meeting and Exhibition.
- Walsh, J. M., Walrath, D. E. (2011). Experimental bend-twist coupling properties of three unidirectional fiber-reinforced composite materials. AIAA 2011-261.
- Wood, D. 2011. Small Wind Turbines; Analysis, Design, and Application. London. Springer.