

## **ANÁLISIS DE MATERIALES COMPUESTOS PARA ÁLABES DE TURBINAS EÓLICAS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DISCRETA Y ELEMENTOS FINITOS INVERSOS (IFEM)**

**Tacca Esteban<sup>AB</sup>(1)**

<sup>A</sup>Laboratorio de flujometría (FLOW), Facultad Regional Santa Fe, UTN

<sup>B</sup>Beca Innovación Tecnológica 2015, Fundación Banco Santa Fe

**Área:** Ingeniería

**Sub-Área:** Materiales

**Grupo:** Y

**Palabras clave:** IFEM, aeroelasticidad, turbinas eólicas

### **INTRODUCCIÓN**

El diseño aerodinámico de los álabes de turbinas eólicas se realiza por lo general mediante software de dinámica de fluidos (CFD). Sin embargo, estos análisis aerodinámicos suponen que la pieza es infinitamente rígida, mientras que en la práctica los álabes son cuerpos esbeltos y flexibles que se deforman cuando están sometidos a las cargas del viento e inerciales. Esta deformación da lugar a pérdidas de eficiencia originadas por el cambio de perfil.

Las técnicas clásicas para estudiar la deformación debido a las cargas del viento (aeroelasticidad) donde se combinan la dinámica de fluido computacional y la mecánica del continuo requieren que los datos del material utilizado sean especificados por el diseñador. Por este motivo el análisis tiene carácter de "prueba y error", y si el resultado demuestra que el modelo no cumple con los requisitos de diseño se deben modificar los datos de material, y repetir el procedimiento.

El objetivo de este trabajo es obtener una herramienta capaz de automatizar y sistematizar la selección de la cantidad de capas de fibras de los álabes de una turbina eólica, la selección de su espesor y la dirección de cada una, para cumplir alguna función objetivo que es prescrita por el ingeniero de diseño. Las funciones objetivos clásicas son mínimo peso, máxima rigidez, mínima flexibilidad, mínimas tensiones entre capas, autofrecuencias y modos de vibración, entre otras.

### **METODOLOGÍA**

Dada una geometría de funcionamiento determinada, se obtiene la cantidad de capas de fibras necesarias mediante optimización discreta, y mediante métodos de elementos finitos inversos (IFEM) se determina la geometría de fabricación de los álabes tal que estos recuperen la geometría aerodinámica óptima cuando están sometidos a las cargas de servicio (cargas aerodinámicas e inerciales).

#### **Geometría de la turbina eólica analizada**

El análisis de algoritmos de optimización fue realizado sobre turbinas eólicas de eje

(1) Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Alejandro E. Albanesi, perteneciente al CIMEC (UNL-CONICET).

horizontal de 3 álabes, y potencias de hasta 40 KW. En la Tabla 1 se encuentran las características de los álabes que se están diseñando. Estos pertenecen a una turbina de media potencia, calculada para la ciudad de Santa Fe, Argentina (latitud  $31^{\circ} 38'S$ , longitud  $60^{\circ} 42'W$ , altitud 25 m.s.n.m.) por simulación computacional en trabajos previos por Albanesi y col. (2014).

Largo de los álabes [m]	6.70
Angulo de paso (pitch)	1 grado
Distribución de la torsión	No lineal
Distribución de la cuerda	No lineal
Perfiles aerodinámicos	OP 6043/6042/6040
Transición entre perfiles aerodinámicos	Lineal

**Tabla 1:** Características de los álabes bajo análisis.

### Método de elementos finitos inverso

El módulo de cálculo para determinar la respuesta mecánica de los álabes de la turbina es una formulación inversa de elementos finitos de cáscaras (IFEM) desarrolladas por Fachinotti y col. (2012) en CIMEC (UNL-CONICET), que permite calcular la geometría de fabricación de los álabes de una turbina, tal que los mismos alcancen la geometría aerodinámica óptima prescrita (de mayor rendimiento) cuando se encuentran sometidos a las cargas de servicio, tanto aerodinámicas como inerciales estacionarias. Se utilizan las rutinas de Fachinotti y col. (2015) para cáscaras de materiales con ortotropía.

### Materiales de los álabes

Los materiales compuestos con los que se manufacturan los álabes de la turbina son múltiples capas de fibras, que pueden ser de vidrio y/o carbono tipo:

- Uniaxiales, cuyo eje principal está alineado con el eje longitudinal de los álabes.
- Biaxiales cuyas fibras están tejidas en ángulos de  $0^{\circ}$  y  $90^{\circ}$  y se suele alinear el  $0^{\circ}$  con el eje longitudinal de los álabes.
- Double-bias que están tejidas en ángulos de  $+45^{\circ}$  y  $-45^{\circ}$  que se suelen orientar a  $+45^{\circ}$  respecto del eje longitudinal de los álabes.
- Una última capa de recubrimiento protector tal como el gelcoat, que es un material con isotropía (igual propiedad en cualquier dirección).

Los álabes se componen de un laminado que resulta de la combinación de fibras y la matriz de adhesivos. Goluby col. (1996) define que las propiedades mecánicas de se calculan con la "regla de las mezclas" a través de las ecuaciones de Halpin-Tsai. En la Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas del laminado para una relación de volumen de 60% (60% de fibra y 40 % de resina). Las propiedades mecánicas de cada tipo de fibra, resina y pintura han sido obtenidas del manual de materiales compuestos de Golfman (2012).

### Algoritmos de optimización discretos

Diversos autores (Paluch y col., 2008; Almeida y col., 2009) muestran cómo utilizar optimizadores genéticos en elementos compuestos. Estos optimizadores están basados en la evolución biológica de los seres vivos, es posible mejorar dos o más diseños "padres" para dar diseños "descendientes", y es posible mutar, recombinar, y mezclar

aleatoriamente sus propiedades. Es decir, se combinan diseños y se busca el óptimo simultáneamente. Las variables de diseño son un número entero, y para los álabes de turbina pueden ser por ejemplo el número de capas de material, el espesor o el ángulo de las fibras por cada capa. Se utilizaron los paquetes de optimización genética disponible en los paquetes GNU Octave y Matlab.

Propiedad Mecánica	Uniaxial	Biaxial	Double-Bias
Modulo elástico $E_1$ [Pa]	44 <sup>9</sup>	44 <sup>9</sup>	31 <sup>9</sup>
Modulo elástico $E_2$ [Pa]	12.6 <sup>9</sup>	44 <sup>9</sup>	24.7 <sup>9</sup>
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	1117	1104	914
Modulo al corte [Pa]	16.5 <sup>9</sup>	35 <sup>9</sup>	15 <sup>9</sup>
Tensión ultima [Pa]	1.75 <sup>8</sup>	1.75 <sup>8</sup>	1.26 <sup>8</sup>
Coef. De Poisson	0.36	0.36	0.36
Espesor [mm]	0.50	0.50	0.35

**Tabla 2:** Propiedades mecánicas del laminado para la proporción fibra/resina utilizada

### Requisitos y variables de diseño

Para disminuir las variables de diseño, se divide el álabe en 10 secciones equidistantes en sentido longitudinal, se le da un espesor definido a las capas, y se imponen los siguientes requisitos:

- Las capas deben respetar bloques de materiales cuya secuencia es: la primera capa debe ser double-bias, la segunda y tercera capa deben ser bidireccionales, la cuarta y quinta capa deben ser de fibras unidireccionales. En la sexta capa, la secuencia vuelve a comenzar con double-bias, y así continua sucesivamente.
- El ángulo de las fibras debe mantenerse entre secciones.
- La diferencia de la cantidad de capas de laminado entre secciones no puede ser superior a 4 capas, porque generaría una concentración elevada de tensiones.
- La última capa debe ser de gelcoat (pintura protectora).
- La población de diseños padres es de 30 (puede combinar 30 modelos distintos).
- La cantidad de descendientes que sobrevive por iteración es 1 (el mejor sobrevive).
- La cantidad de generaciones descendientes es 30.
- La función objetivo es la media geométrica entre la masa y la deformación ( $0.5 \cdot (\text{Masa} + \text{Deformación})$ ), es decir, se minimizan las dos variable simultáneamente.
- En ningún punto las tensiones de Von Mises pueden estar por encima de la tensión admisible del laminado.

## RESULTADOS

La optimización de la cantidad de capas en cada sección del álabe para los requisitos y la función objetivo determinados se representa gráficamente en la Figura 1.

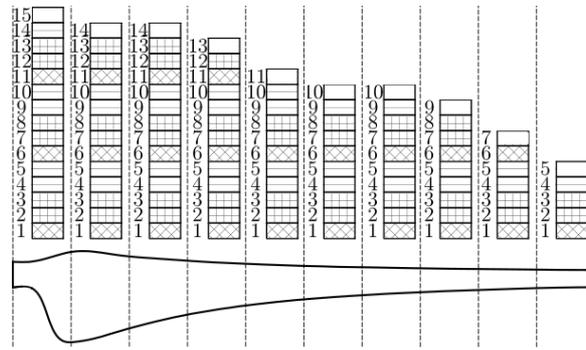
La Figura 2 presenta las tensiones que aparecen por defectos de la deformación elástica, considerado aquí el criterio de Von Mises. Si bien en este caso las tensiones están por debajo de los valores límites, se puede incorporar como función objetivo que las tensiones en la pieza no superen las tensiones elásticas admisibles.

## CONCLUSIONES

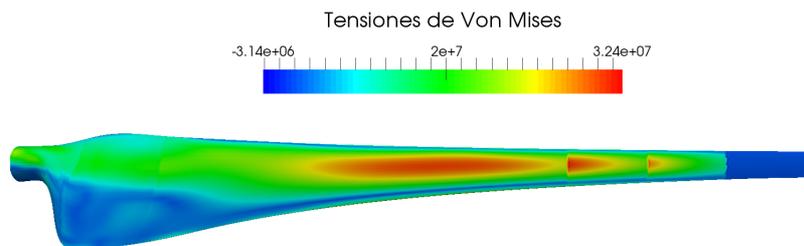
Se ha logrado automatizar la selección de cantidad de capas para manufacturar álabes de turbinas eólicas de eje horizontal, mediante el uso de algoritmos de optimización discreta a través de simulación computacional.

Las soluciones obtenidas con algoritmos genéticos son casi siempre válidas. Estos algoritmos tienen la ventaja que no requieren el cálculo de sensibilidades y por lo tanto no requieren modificar el código de respuesta mecánica de IFEM. La principal desventaja del método es el elevado tiempo computacional.

Se presenta la alternativa de implementar algoritmos de optimización continuos, que tienen alta velocidad de cálculo pero requieren una modificación del código de IFEM para calcular las sensibilidades respecto a las variables de diseño.



**Figura 1:** Solución de la optimización genética. Determinación automática de la cantidad de capas de fibra.



**Figura 2:** Solución de la optimización genética. Tensiones de Von Mises en un álabo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Fundación Banco Santa Fe, con el programa “Beca Innovación Tecnológica 2015”.

## BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

**Albanesi A., Careno S., Storti B., Peralta I.,**2014.Análisis y mejora de la eficiencia aerodinámica de turbinas eólicas de eje horizontal mediante simulación computacional por CFD. I Congreso Argentino de Energías Sustentables. Bahía Blanca. Buenos Aires.

**Fachinotti V., AlbanesiA.,** 2012. Método de elementos finitos inverso para cáscaras sometidas a grandes desplazamientos en régimen elástico. Cong. de Mét. Num. y Aplic. MECOM 2012, Salta, Argentina.

**Fachinotti V., Albanesi A., Martinez Valle J.M.,** 2015. Inverse finite element of shells using the degenerated-solid approach. Computers and Structures. 157 89–98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.05.013>.

**Golfman Y.,** 2012. Hybrid Anisotropic Materials for Wind Power Turbine Blades.CRC Press.

**Golub G. H., Van Loan C. F.,** 1996. Matrix Computations. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 3rd edition.

**Paluch B., Gređiac M., Faye A.,** 2008. Combining a finite element programme and a genetic algorithm to optimize composite structures with variable thickness. Composite Structures 83 284–294.

**Almeida F.S., Awruch A.M.,** 2009. Design optimization of composite laminated structures using geneticalgorithms and finite element analysis.Composite Structures 88 443–454