

## Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT

### Aerodynamic design proposal for turbulence reduction in the rotational steed in low-capacity HAWT wind turbines

MOLINERO, Daniel\*†, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Daniel, Molinero*

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Víctor, López*

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Alberto, Cervantes*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.20.29

Recibido: 20 de Julio, 2020; Aceptado 30 de Diciembre, 2020

#### Resumen

Se presenta una propuesta de diseño aerodinámico para la reducción de turbulencia en la estela de rotación de turbinas eólicas de eje horizontal. La propuesta surge del análisis de diversas alternativas para la modificación de los álabes de una turbina diseñada bajo la teoría BEM (Teoría de Momento-Álabe). Se emplearon diversos programas de cómputo para el diseño, modelado y simulación de las diversas propuestas. Los resultados experimentales de anemometría de hilo caliente en túnel de viento utilizando un modelo fabricado con tecnología de impresión 3D, son comparados con los obtenidos en CFD (Dinámica de Fluidos por Computadora). Como trabajo adicional, se integró un sistema de medición de velocidad de viento para caracterización del túnel de viento empleado. Pruebas adicionales para obtención de líneas de corriente mediante un generador de humos y medición de torque de arranque son también llevadas a cabo. Los resultados experimentales y CFD presentan buena concordancia, con lo cual se logró la validación de la metodología empleada para el análisis. Como resultado del análisis, se demostró que es posible lograr un diseño con baja generación de turbulencia y una potencia de salida aceptable.

**Turbina, Turbulencia, Alabes, Optimización, Simulación**

#### Abstract

A proposal for aerodynamic design in order to reduce turbulence in the wake of rotation horizontal axis wind turbines is presented. The proposal arises from the analysis of various alternatives for the modification of turbine blades designed under the BEM theory (Blade-Element Theory). Various computer programs for design, modelling and simulation of various proposals were employed. The experimental results of hot wire anemometry in wind tunnel using a model made with 3D printing technology are compared with those obtained in CFD (Computer Fluid Dynamics). As additional work, a measuring wind speed system for wind tunnel characterization was integrated. Additional tests for obtaining streamlines using a smoke generator and starting torque measurement are also carried out. Experimental and CFD results show good agreement, thereby validation of the methodology used for the analysis was achieved. As a result of the analysis, it was shown that it is possible to achieve a design with low generation of turbulence and an acceptable output power.

**Turbine, Turbulence, Blades, Optimization, Simulation**

**Citación:** MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. Revista de Simulación Computacional. 2020. 4-12:20-29.

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

† Investigador contribuyendo como primer autor

## Introducción

Dada la tendencia hacia el uso de fuentes de energía renovable la (SENER, 2012) encontró que entre 2006 y 2011 la capacidad de producción global de energía eólica creció a un ritmo de 27% anual. De acuerdo con lo presentado por la consultora PWC para la Asociación Mexicana de Energía Eólica, el potencial eólico nacional se estimó en al menos 50,000 MW considerando factores de planta de 20%. (AMDEE, 2012).

El equipo empleado para la conversión de energía de viento en energía eléctrica es la turbina eólica, que en el caso de turbinas de eje horizontal está compuesta por los álabes, hub y el pedestal. Debido a diversos factores, la eficiencia en turbinas eólicas se aleja del límite teórico de eficiencia máxima. Uno de estos factores es la turbulencia en la corriente de viento generada en la zona inmediata posterior a una turbina; una turbina en funcionamiento en esta estela, o dentro de un parque eólico donde los efectos de varias estelas pueden ser sentidos simultáneamente, producirá menos energía y sufrirá mayor carga estructural que una turbina que funciona en la corriente libre (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

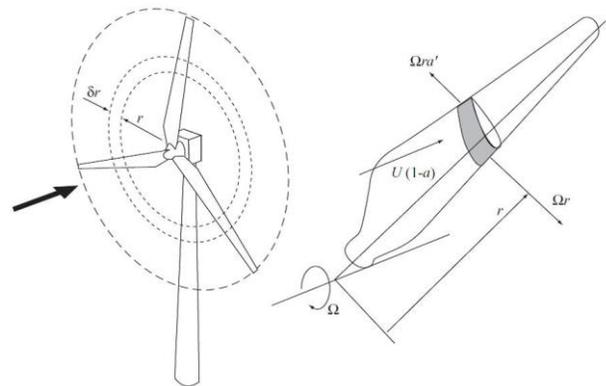
Diversos estudios se han realizado para la optimización de los álabes con el fin de aumentar el aprovechamiento del recurso eólico hasta su límite teórico, entre ellos (Sharifi & Nobari, 2013), (Liu, Wang, & Tang, 2013) y (Singh & Ahmed, 2013), así como evaluar el comportamiento de la estela de rotación, su efecto en el desempeño de la turbina y la turbulencia asociada a la estela de rotación, como lo realizado por (Sicot, Devinant, Loyer, & Hureau, 2008), (Crespo & Hernandez, 1996) y (Bastankhah & Porté-Agel, 2014).

El presente trabajo está encaminado a desarrollar un diseño aerodinámico que reduzca la generación de turbulencia en turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad.

También se presenta la metodología llevada a cabo para la validación de un modelo computacional para análisis de la estela de rotación.

## Diseño Aerodinámico de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal – Teoría BEM

En el diseño aerodinámico de álabes de turbinas eólicas de eje horizontal se emplea la teoría BEM (Blade Element Momentum). Sin embargo, de acuerdo a (Sørensen, 2011) modelos numéricos más avanzados basados en las ecuaciones promedio de Navier-Stokes (RANS) se están aplicando ampliamente y comienzan a complementar la teoría BEM, por ejemplo, al analizar la estela de rotación o la interacción entre las turbinas en parques eólicos. El método BEM fue introducido por (Glauert H. , 1953a) (Glauert H. , 1953b) combinando la Teoría de Momento con la Teoría de Elemento Alabe, para determinar las cargas locales a lo largo de la envergadura del álabes.



**Figura 1** Anillo anular descrito por una sección del elemento álabes

Fuente: (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001)

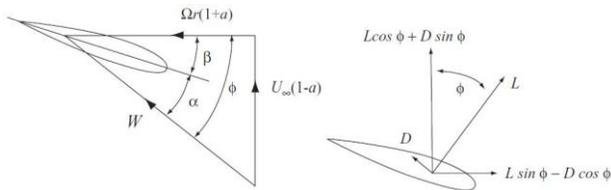
El método supone que todas las secciones a lo largo del rotor son independientes y pueden ser tratadas por separado. Así, las fuerzas de sustentación y arrastre a las que se somete cada elemento son responsables de los cambios de momento axial y angular del aire que pasa a través del anillo que describe el álabes al girar (Figura 1). Por lo tanto, en una sección radial dada, una diferencia en la velocidad del viento se genera desde corriente arriba hasta lo profundo de la estela, creando una caída de presión en la sección del álabes. (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001) y (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

La teoría BEM basa su análisis en un triángulo de velocidades, donde los catetos corresponden a la velocidad del viento  $U_\infty$  y la velocidad tangencial del álabes  $\Omega r$ , mientras que la hipotenusa se conoce como la velocidad relativa  $W$ .

Así se tiene que:

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1-a')^2} \quad (1)$$

Donde  $a$  y  $a'$  son los factores de inducción de flujo axial y radial respectivamente y  $\Omega$  la velocidad de rotación.



**Figura 2** Triangulo de velocidades en una sección del elemento álabo

Fuente: (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001)

En la Figura 2 se puede observar la relación entre los ángulos de ataque  $\alpha$ , de paso  $\beta$  e incidencia  $\phi$  con las velocidades y fuerzas actuantes en una sección transversal del álabo. De este modo se tiene que:

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W}; \quad \cos \phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (2)$$

Finalmente, las ecuaciones de cambio de momento axial y angular para diseño que se utilizan en la teoría BEM son las siguientes:

$$\frac{W^2}{U_{\infty}^2} N \frac{c}{R} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 8\pi(a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2)\mu \quad (3)$$

$$\frac{W^2}{U_{\infty}^2} N \frac{c}{R} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) = 8\pi\lambda\mu^2 a'(1-a) \quad (4)$$

Donde  $N$  es el número de alabes,  $c$  la cuerda del alabe,  $C_l$  el coeficiente de sustentación y  $C_d$  el coeficiente de arrastre. La velocidad específica  $\lambda$  y la relación de radios  $\mu$  están definidas como:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (6)$$

La solución para obtener los factores óptimos de inducción de flujo axial  $a$  y radial  $a'$ , usando coeficientes de sustentación  $C_l$  y arrastre  $C_d$  de perfiles aerodinámicos requiere un proceso iterativo. En tal caso, las siguientes ecuaciones son convenientes ya que, usando valores previos de los factores de inducción de flujo proporcionan nuevos valores para cada iteración. (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin \phi^2} \left[ C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right] \quad (7)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (8)$$

Donde la solidez de cuerda  $\sigma_r$  y los coeficientes de fuerza axial  $C_x$  y tangencial  $C_y$  están definidos como:

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi\mu R} \quad (9)$$

$$C_x = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (10)$$

$$C_y = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (11)$$

De acuerdo con (Wilson & Lissaman, 1974) el coeficiente de arrastre no debería ser incluido en las ecuaciones anteriores. El argumento para la exclusión del arrastre es que, el arrastre sólo es causado por la fricción de pared y no afecta la caída de presión a través del rotor. Por lo tanto, se consideró la siguiente relación:

$$a = \frac{1}{3}; \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (12)$$

Donde  $a=1/3$  es el valor óptimo para alcanzar el máximo coeficiente de potencia ( $C_P = 0.59$ ) conocido como límite de (Betz, 1919) al resolver la diferencial de la expresión siguiente:

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (13)$$

Por lo tanto, el coeficiente de sustentación puede ser elegido como aquel valor que equivale a la máxima relación de sustentación-arrastre ( $C_l/C_d$ ) para el cálculo de la cuerda, ya que esto minimizará pérdidas, de tal manera que el coeficiente de arrastre es tan pequeño que se puede omitir en la Ecuación 4 de cambio de momento angular para dar como resultado:

$$\frac{Nc}{2\pi R} = \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\frac{W}{U_{\infty}} C_l} \quad (14)$$

## Diseño y Modelado

Los perfiles aerodinámicos estándar más empleados pertenecen a diversas familias como: NACA, NREL, RISΦ, DU y FFA. Además, existen también perfiles aerodinámicos desarrollados a partir de los perfiles convencionales antes mencionados.

MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. Revista de Simulación Computacional. 2020

El perfil seleccionado para llevar a cabo el análisis fue el NACA 4412, ya que es un perfil aerodinámico con buena relación sustentación-arrastre incluso a altos ángulos de ataque.

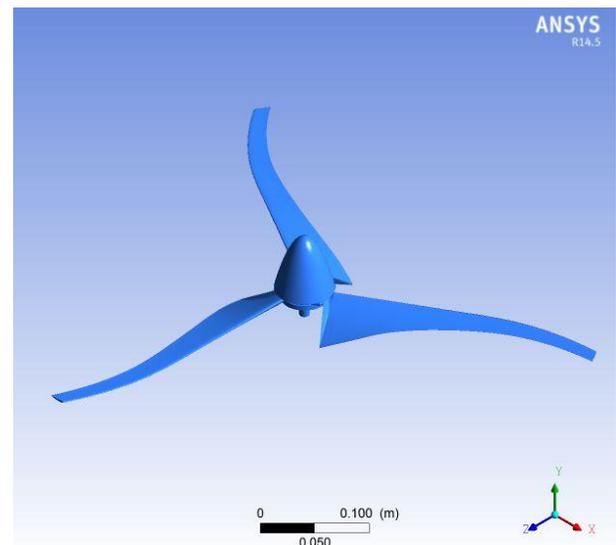
En ocasiones, no es posible obtener los coeficientes de sustentación y arrastre para todos los números de Reynolds y ángulos de ataque a que se somete un perfil, en tales casos se realizan interpolaciones. Por lo tanto, con el fin de hacer más rápido el proceso de diseño se empleó el software Xfoil desarrollado por (Drela, 1989). Xfoil calcula mediante el método de paneles y la función de corriente los coeficientes de sustentación y arrastre en base al perfil aerodinámico, ángulo de ataque y números de Reynolds y Mach. Esto permite seleccionar el ángulo de ataque óptimo a emplear en la punta del álabe, estableciendo un coeficiente de sustentación de diseño y en base a esto realizar el diseño completo.

Para el diseño aerodinámico incluyendo álabes y hub, se creó una rutina en base a la Teoría BEM en MatLab, de la cual se obtiene la geometría del álabe. Los resultados de esta rutina fueron comparados con los obtenidos en el software TIMEO desarrollado por (Álvarez Cervera, Lesso Arroyo, & López Garza, 2005), mostrando buena concordancia.

Una vez concluido el diseño aerodinámico se realiza el modelado 3D en el software Gambit. En el modelado se realiza también el diseño del hub, que para este caso se modelado a partir de la ecuación parabólica presentada por (Wang, Bai, Fletcher, Whiteford, & Cullen, 2008):

$$y = \frac{D}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad (15)$$

Esta geometría de hub puede ser remplazada por geometrías optimizadas, como las presentadas por (Jiménez, Lopez, Solorio, & Molinero, 2015), en futuros análisis.



**Figura 3** Rotor de 25W con alabes curvados (10% de Sweep)

La teoría BEM sólo contempla álabes rectos en un eje normal al perfil aerodinámico, donde se puede variar el ángulo de ataque y de paso en función del ángulo de incidencia de la velocidad relativa de viento. Por lo tanto, en la rutina de diseño en MatLab se incluyeron ecuaciones para generar álabes curvos en distintas direcciones, de manera similar a lo expuesto por (Gertz, Johnson, & Swytink-Binnema, 2014), (Larwood, Dam, & Schow, 2014) y (Chattot, 2009), como se muestra en la Figura 3.

En total se propusieron 18 rotores, los cuales se dividen en dos grupos: rotores con ángulo de ataque variable (VA) y rotores con ángulo de ataque fijo (FA). Dentro de cada grupo existen cuatro grupos: 1) rotores con “sweep” (positivo en contra del sentido de rotación YSPOS y negativo en sentido opuesto YSNEG), 2) rotores con “dihedral” (positivo en la dirección del viento YDPOS y negativo en contra de la dirección de viento YDNEG), 3) rotores con combinación de “sweep” y “dihedral” (con variantes positivas y negativas) y 4) rotores sin “sweep” y/o “dihedral” (NS-ND).

El sweep se realizó curvando los álabes 10% del valor del radio, la curvatura es con respecto al eje del álabe en el plano que contiene al rotor. La longitud curvada del álabe fue 40% del radio, medido desde la punta hacia la raíz del álabe empleando un exponente de 2. (Larwood, Dam, & Schow, 2014).

$$y = d_{tip} \left( \frac{r-r_{start}}{R*r_{start}} \right)^y \quad (16)$$

El Dihedral se realizó curvando los álabes 10% del valor del radio. En este caso la curvatura se realiza con respecto al eje del álabes en el plano paralelo a la dirección del viento. El porcentaje del álabes curvado es del 100% y el exponente empleado fue de 2. (Chattot, 2009).

$$\left[ \frac{a_{wt}-r}{a_{wt}} \right]^n + y^n = 1 \quad (17)$$

Una opción más para modificación de álabes de turbinas eólicas consiste en linearizar la relación cuerda-radio, lo cual reduce la cuerda en la raíz del álabes. (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009) y (Liu, Wang, & Tang, 2013). Sin embargo, en un estudio previo (Molinero Hernández, Garza López, Jiménez Ramírez, López Zermeño, & Cadenas Calderón, 2015) mostraron que al aplicar esta técnica, tanto la potencia de salida como el torque de arranque de la turbina disminuyen.

### Simulación

Para el proceso de mallado el dominio se dividió en dos marcos de referencia, uno fijo con forma cubica y otro rotatorio de forma cilíndrica dentro del que se incluye el rotor.

Se realizaron simulaciones empleando los modelos de turbulencia k-ε standar para el rotor estático y k-w SST para el rotor en movimiento, ya que estos modelos dan buenas aproximaciones al fenómeno real, como han mostrado (Kasmi & Masson, 2008), (Abdel Salam & Ramalingam, 2014), (Rocha, Rocha, Carneiro, Silva, & Bueno, 2014) y (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2013)



**Figura 4** Rotor de 25 W fabricado en plástico ABS empleando tecnología de impresión 3D

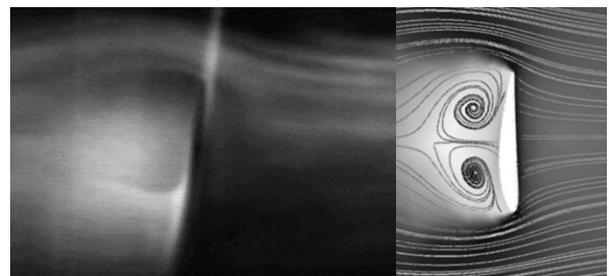
### Fabricación y Pruebas

Con el fin de validar los resultados de CFD y dar certidumbre a los datos que se obtuvieron, se realizaron pruebas en túnel de viento con un rotor de 0.57 m de diámetro fabricado con plástico ABS en una impresora 3D (Figura 4), capaz de generar 25 Watts considerando un coeficiente de potencia ideal de 0.59, una velocidad de viento de 6.5 m/s y una velocidad específica de 5.

Previo a la realización de pruebas con equipo de anemometría de hilo caliente, se realizó la caracterización del túnel de viento. Con este propósito se ensambló un sistema empleando una tarjeta de adquisición de datos National Instruments, un tubo Pitot de punta elipsoidal y cuatro sensores para medir presión diferencial, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.

La conexión entre PC y tarjeta de adquisición de datos se realiza mediante LabView. Los datos obtenidos utilizando este equipo y un anemómetro de paletas fueron comparados. Entre ambos métodos existe una discrepancia de 3%.

Una vez concluida la caracterización del túnel, se midió el torque generado por el rotor usando un torquímetro. Debido a que la sonda del torquímetro no permite la rotación, únicamente se midió el torque de arranque. Como resultado se obtuvo una variación de 3% entre el valor medido y el valor obtenido en CFD. También se realizaron tomas con cámara de alta velocidad para captura de líneas de corriente en la zona cercana a la punta de los álabes utilizando un generador de humo. Debido a las características del mismo únicamente se hicieron tomas del rotor estático, donde se observa buena concordancia entre las imágenes de CFD y de cámara de alta velocidad (Figura 5).

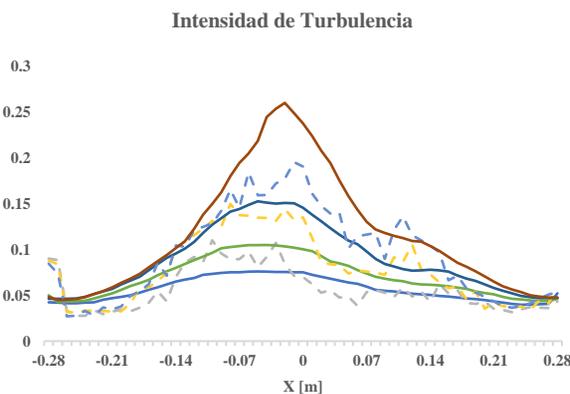


**Figura 5** Líneas de corriente a) Experimento (izquierda) y b) CFD (derecha)

Finalmente, se realizaron las mediciones de velocidad instantánea e intensidad de turbulencia en la estela empleando equipo de anemometría de hilo caliente.

El equipo puede medir la velocidad instantánea con una probeta unidireccional por la cual circula una corriente eléctrica, el enfriamiento debido a una corriente de viento genera variaciones en el voltaje de alimentación, con lo cual se puede conocer la velocidad de viento. (Jørgensen, 2002). Las lecturas fueron tomadas en un plano perpendicular a la dirección del flujo de aire. Solo se realizaron lecturas parte superior de la sección de pruebas, ya que en la parte inferior se encontraba el soporte del rotor y se obtendrían lecturas con un alto nivel de interferencia.

Las lecturas de intensidad de turbulencia con el rotor estático mediante anemometría de hilo caliente y los resultados obtenidos en CFD presentaron buena concordancia como se muestra en la Figura 6. Todas las pruebas se realizaron manteniendo el rotor frente una corriente de viento de 6.5 m/s.



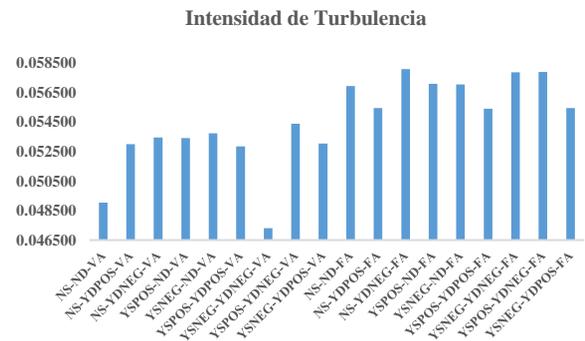
**Figura 6** Intensidad de turbulencia en la región central de los alabes. CFD (línea continua) vs Anemómetro de hilo caliente (línea punteada)

**Análisis de Resultados**

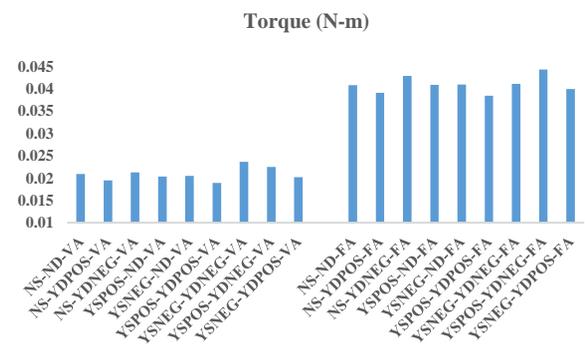
Una vez validado el modelo CFD para el rotor estático se compararon rotores con las mismas características de sweep y dihedral. Se observó que, los rotores con ángulo de ataque fijo generan mayor torque de arranque (73.8% - 103.3%) y mayor potencia de salida (1.6% - 7.1%) que aquellos con ángulo de ataque variable.

Por otro lado, los rotores con ángulo de ataque fijo generan entre 4.49% y 22.31% más intensidad de turbulencia para el rotor estático, y entre 0.26% y 3.03% más para el rotor en movimiento, a excepción del rotor YSPOS-YDNEG-FA, con el cual la intensidad de turbulencia disminuyó 0.39%.

El Gráfico 1 muestra que el máximo valor de intensidad de turbulencia con el rotor estático (0.058057) es producido por el modelo NS-YDNEG-FA, mientras que el valor mínimo (0.047296) es producido por el modelo YSNEG-YDNEG-VA. Así mismo, el mayor torque de arranque (0.04427 N-m) es producido por el rotor YSPOS-YDNEG-FA, y el menor (0.01890 N-m) es producido por el rotor YSPOS-YDPOS-VA según el Gráfico 2.



**Gráfico 1** Intensidad de turbulencia en estela. Resultados de CFD con rotor estático



**Gráfico 2** Torque de arranque. Resultados de CFD con rotor estático

El Gráfico 3 muestra que la mayor intensidad de turbulencia con el rotor en movimiento (0.053896) se genera con el modelo YSPOS-YDPOS-FA, en contraparte la mínima (0.051687) se produce con el modelo NS-ND-VA. Respecto a la potencia generada, en la Grafica 4 se puede observar que el rotor con la mayor potencia de salida (25.18 W) es el YSPOS-YDPOS-FA, lo cual es más de lo esperado según la Teoría BEM.

Los rotores con la menor potencia de salida (22.57 W) fueron los modelos YSNEG-YDNEG-VA y NS-YDNEG-VA. Estos resultados están de acuerdo con lo presentado por (Chattot, 2009), donde indica que el sweep y el dihedral positivos incrementan la potencia de salida.

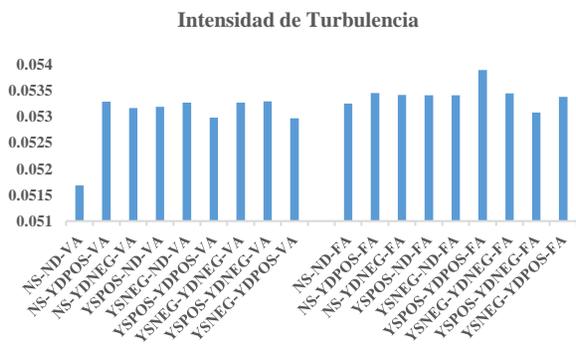


Gráfico 3 Intensidad de turbulencia en estela. Resultados de CFD con rotor en movimiento.

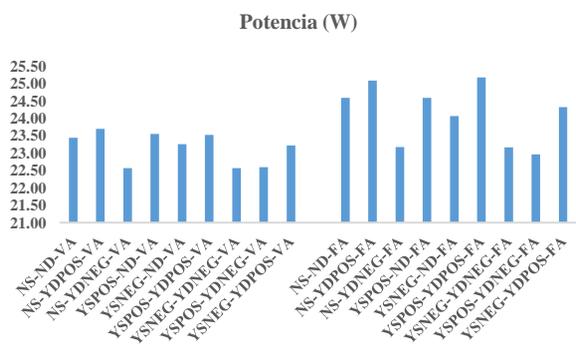


Gráfico 4 Potencia. Resultados de CFD con rotor en movimiento

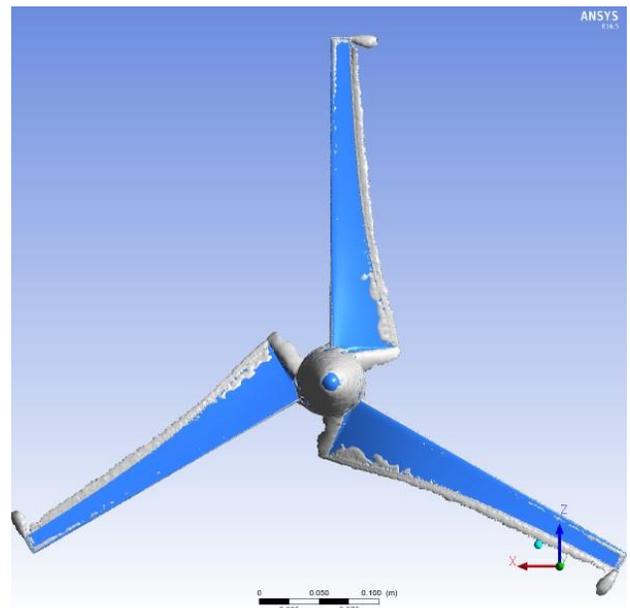


Figura 8 Vorticidad generada por el Rotor NS-ND-VA con la menor intensidad de turbulencia 0.051687. Potencia de salida 23.44 W

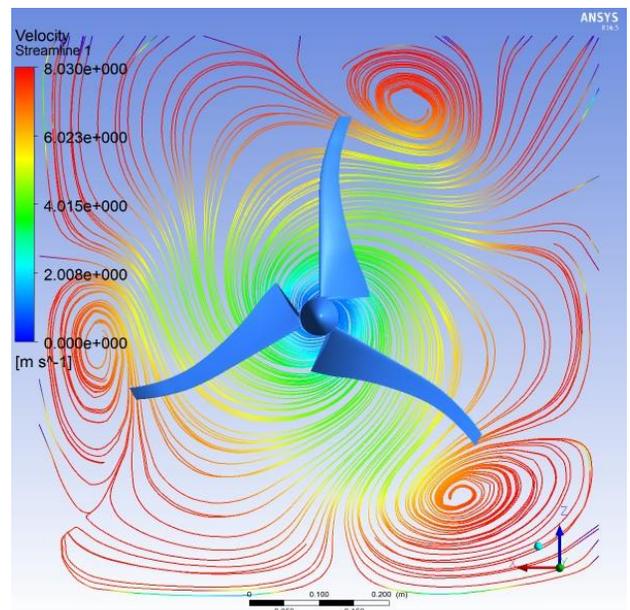


Figura 9 Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor YSPOS-YDPOS-FA con la mayor intensidad de turbulencia 0.053896. Potencia de salida 25.18 W

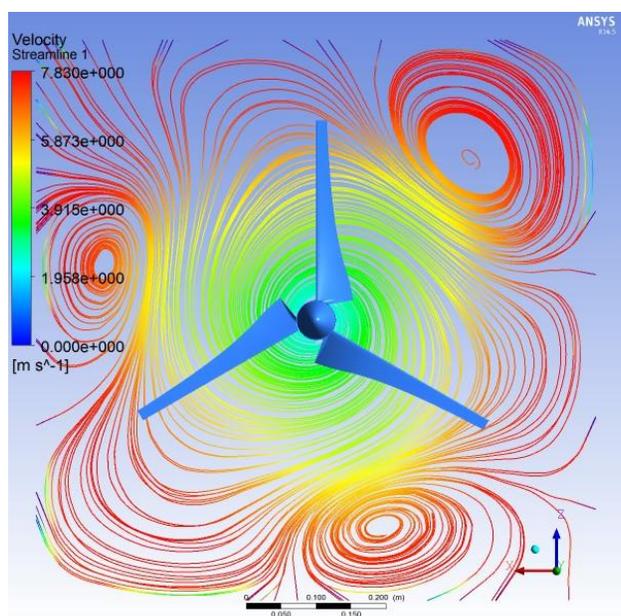
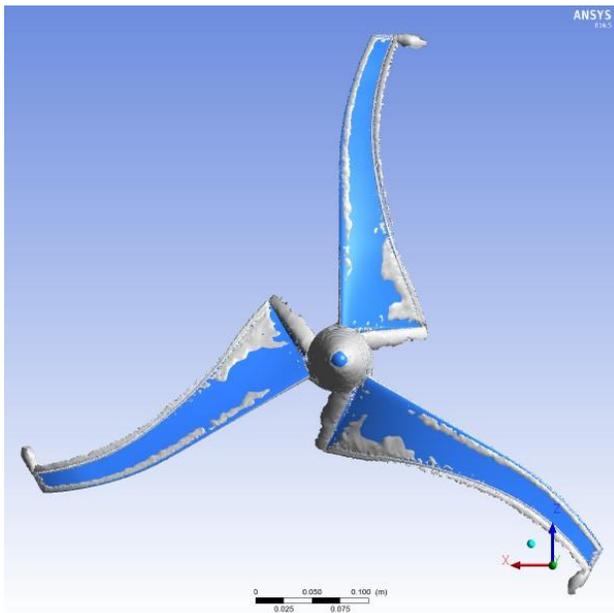


Figura 7 Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor NS-ND-VA con la menor intensidad de turbulencia 0.051687. Potencia de salida 23.44 W



**Figura 10** Vorticidad generada por el Rotor YSPOS-YDPOS-FA con la mayor intensidad de turbulencia 0.053896. Potencia de salida 25.18 W

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestra mediante líneas de corrientes y zonas de vorticidad el comportamiento de los rotores que generan la menor y mayor intensidad de turbulencia al generar potencia de salida.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (CIC) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

### Conclusiones

Se empleó equipo de anemometría de hilo caliente para obtener datos de velocidad de instantánea e intensidad de turbulencia en la estela detrás del rotor de una turbina de viento de eje horizontal de baja capacidad, los datos experimentales para el rotor estático presentan buena concordancia con los datos de CFD, lo cual sumado con los resultados de medición de torque da certidumbre en el procedimiento ejecutado para el diseño, modelado, simulación, fabricación y experimentación.

En futuros trabajos es recomendable llevar a cabo un análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos en cada uno de los puntos de medición, lo cual dará información acerca de la simetría estadística y la amplitud de distribución (factor de planicidad) del flujo. En el caso del rotor en movimiento, se deben realizar pruebas aun adicionales con probetas de hilo caliente de dos y tres direcciones con el propósito de incrementar la certidumbre en los datos obtenidos en CFD, esto último en conjunto con un análisis estadístico proporcionara información más detallada del flujo relacionada con los esfuerzos cortantes de Reynolds (momentos cruzados) y cantidades de transporte lateral (momentos cruzados de orden superior).

La propuesta de diseño que cumple con la menor generación de turbulencia, tanto en modo estático como en movimiento, fue el modelo NS-ND-VA. Aunque no fue la propuesta con la mayor potencia de salida, la cual fue el modelo YSPOS-YDPOS-FA, su potencia de salida es mayor a otras propuestas que presentan incluso mayor intensidad de turbulencia en la estela. Con estos resultados se puede comprobar que es posible mediante la modificación de la geometría de los álabes reducir la turbulencia en la estela de rotación, logrando un incremento en la eficiencia del aerogenerador y reducción de la estela de rotación afectada por la turbulencia.

Ya que en todos los modelos los álabes fueron curvados únicamente el 10% de la longitud del radio, es recomendable realizar análisis con distintos porcentajes de curvatura y el impacto que esto tendría en la estructura del alabe debido a la variación en las cargas resultantes debido a la interacción con el fluido.

A futuro la metodología seguida en este trabajo puede ser también empleada el diseño de nuevos perfiles aerodinámicos y el estudio de diferentes geometrías de puntas para los álabes, entre ellos los “winglets”.

### Referencias

Abdel Salam, A. M., & Ramalingam, V. (2014). Wake prediction of horizontal-axis wind turbine using full-rotor modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(124), 7-19.

Álvarez Cervera, R., Lesso Arroyo, R., & López Garza, V. (2005). Análisis de Perfiles Aerodinámicos de un Álabes de Turbina de Viento a Través de la Interfase TIMEO-ANSYS. *VI Congreso Internacional de Innovación Basada en Diseño e Ingeniería*, 461, págs. 2–4. San Miguel de Allende, México.

AMDEE. (2012). *Iniciativa para el desarrollo del potencial eólico en México*. Mexico, D.F.: Asociación Mexicana de Energia Eolica.

Bastankhah, M., & Porté-Agel, F. (2014). A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, 1-8.

Betz, A. (1919). *Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust*. Berlin, Germany: Gottinger Nachr.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook* (1 ed.). West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. doi:ISBN 0 471 48997 2

Chattot, J.-J. (2009). Effects of blade tip modifications on wind turbine performance using vortex model. *Computers & Fluids*(38), 1405–1410.

Crespo, A., & Hernandez, J. (1996). Turbulence Characteristics in wind-turbines wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*( 61), 71-85.

Drela, M. (1989). XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. *Low Reynolds Aerodynamics. Lec. Notes in Eng.*(54).

Gertz, D., Johnson, D. A., & Swytink-Binnema, N. (2014). Comparative Measurements of the Effect of a Winglet on a Wind Turbine. En *Research Topics in Wind Energy 2. Wind Energy – Impact of Turbulence* (págs. 121-126). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Glauert, H. (1953a). *Airplane propellers. Aerodynamic theory* (ed. W. F. Durand ). Berlin, Germany: Julius Springer.

Glauert, H. (1953b). *Windmills and fans. Aerodynamic theory* (ed. W. F. Durand). Berlin, Germany: Julius Springer.

Jiménez, A., Lopez, V., Solorio, G., & Molinero, D. (2015). Diseño y Optimización del Perfil Aerodinámico del Hub para una Turbina de Viento de Baja Capacidad. *1er. Congreso Internacional de Energías Renovables*. Huatulco, Oaxaca. México.

Jørgensen, F. E. (2002). How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide. Skovlunde, Denmark: Dantec Dynamics A/S.

Kasmi, A. E., & Masson, C. (2008). An extended k-ε model for turbulent flow through horizontal axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*( 96), 103–122.

Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2013). Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model. *Renewable Energy*(52), 31-39.

Larwood, S., Dam, C. v., & Schow, D. (2014). Design studies of swept wind turbine blades. *Renewable Energy*(71), 563-571.

Liu, X., Wang, L., & Tang, X. (2013). Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades. *Renewable Energy*(57), 111-119.

Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2009). *Wind Energy Explained : Theory, Design, and Application* (2 ed.). West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Molinero Hernández, D., Garza López, V., Jiménez Ramírez, A., López Zermeño, J., & Cadenas Calderón, E. (2015). Evaluación de Técnicas de Optimización Geométrica de Álabes de Turbinas Eólicas de Alta Capacidad Aplicadas a Turbinas Eólicas de Baja Capacidad. *Academia Journals Celaya 2015*. Celaya, Guanajuato, México.

Rocha, P. C., Rocha, H. B., Carneiro, F. M., Silva, M. V., & Bueno, A. V. (2014). K-ω-SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy* 65 (2014) 412e418(65), 412-418.

SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. Mexico, D.F.: Secretaría de Energía. Obtenido de [www.energia.gob.mx](http://www.energia.gob.mx)

MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. *Revista de Simulación Computacional*. 2020

Sharifi, A., & Nobari, M. (2013). Prediction of optimum section pitch angle distribution along wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 67, 342–350.

Sicot, C., Devinant, P., Loyer, S., & Hureau, J. (2008). Rotational and turbulence effects on a wind turbine blade. Investigation of the stall mechanisms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (96 ), 1320– 1331.

Singh, R. K., & Ahmed, M. R. (2013). Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*(50), 812-819.

Sørensen, J. N. (2011). Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion. *Annual Review of Fluid Mechanics*(43), 427-448.

Wang, F., Bai, L., Fletcher, J., Whiteford, J., & Cullen, D. (2008). Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output. *Renewable Energy*(33), 1637-1651.

Wilson, R. E., & Lissaman, P. B. (1974). Applied aerodynamics of wind-power machines'. NTIS: PB-238-595, . Oregon State University, USA.