



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar  
DOI - REBID - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

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

**Author:** Daniel Molinero, Víctor López, Alberto Cervantes

**Editorial label ECORFAN:** 607-8324  
**BCIERMIMI Control Number:** 2016-01  
**BCIERMIMI Classification(2016):** 191016-0101

**Pages:** 29

**Mail:**

**RNA:** 03-2010-032610115700-14

## ECORFAN-México, S.C.

244 – 2 Itzopan Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 1 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: contacto@ecorfan.org  
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

## Holdings

Bolivia	Honduras	China	Nicaragua
Cameroon	Guatemala	France	Republic of the Congo
El Salvador	Colombia	Ecuador	Dominica
Peru	Spain	Cuba	Haití
Argentina	Paraguay	Costa Rica	Venezuela
Czech Republic			

# Índice

1. Introducción.
2. Diseño Aerodinámico de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal – Teoría BEM
  3. Diseño y Modelado
  4. Simulación.
  5. Fabricación y Pruebas
  6. Análisis de Resultados
  7. Conclusiones

# Introducción

- 2006 – 2011. Capacidad de producción global de energía eólica creció 27% anual. (SENER, 2012). Potencial eólico nacional de 50,000 MW considerando factores de planta de 20%. (AMDEE, 2012).

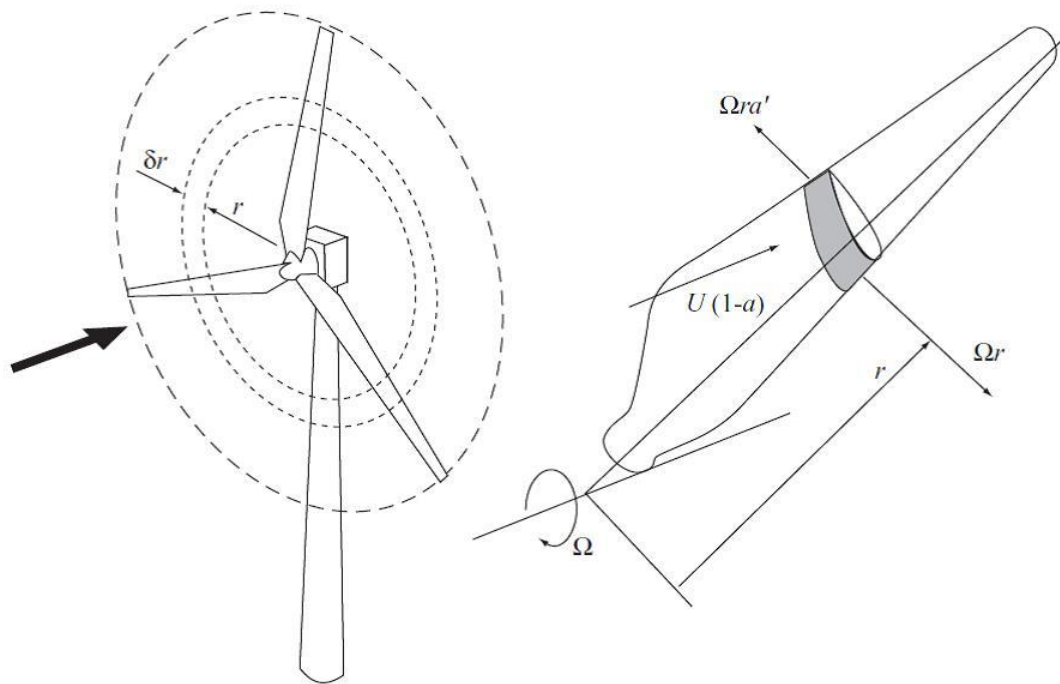


Parque Eólico. Fuente:(AMDEE, 2012).

- Eficiencia. Turbulencia en la corriente de viento generada en la zona posterior de una turbina.
- Diseño aerodinámico que reduzca la generación de turbulencia. Metodología para validación de modelo computacional para análisis de la estela de rotación.

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

- Teoría BEM (Blade Element Momentum) introducida por (Glauert H. , 1953b).



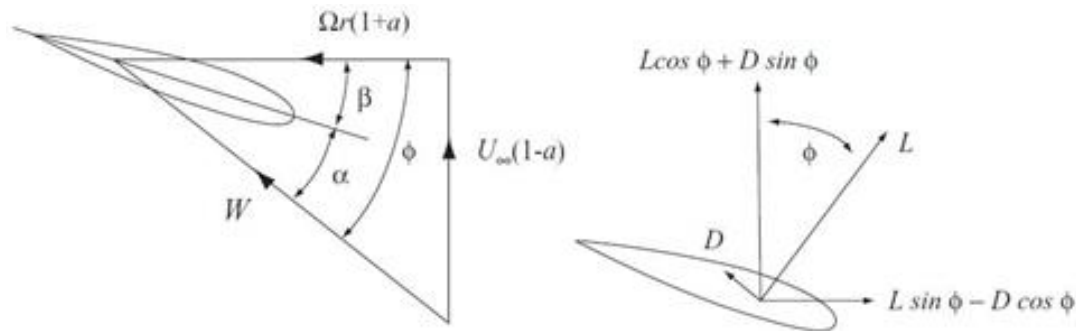
Anillo anular descrito por una sección del elemento álab. Fuente (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

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

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

- Donde  $a$  y  $a'$  son los factores de inducción de flujo axial y radial

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



Triángulo de velocidades en una sección del elemento álabes. Fuente (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

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

- Ecuaciones de cambio de momento axial y angular. Teoría BEM.

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

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

- Donde

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

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

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

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

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

- Donde

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

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

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

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

- El coeficiente de arrastre no debería ser incluido. (Wilson & Lissaman, 1974).

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

- Donde  $a=1/3$  es el valor óptimo para el límite de (Betz, 1919)

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

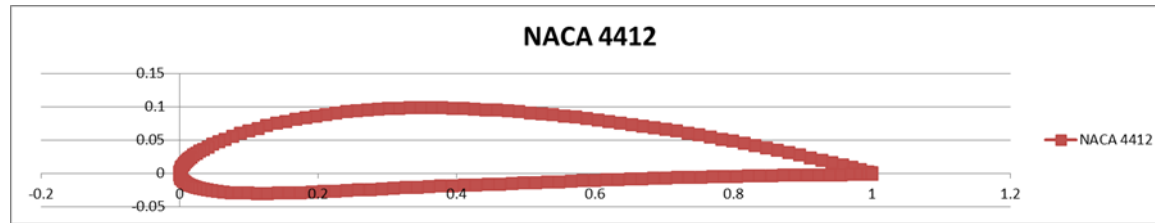
- Máxima relación de sustentación-arrastre ( $C_l/C_d$ ) para el cálculo de la cuerda.

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



# Diseño y Modelado

- Perfiles aerodinámicos: NACA, NREL, RISΦ, DU y FFA.



Coordenadas. Perfil NACA 4412.

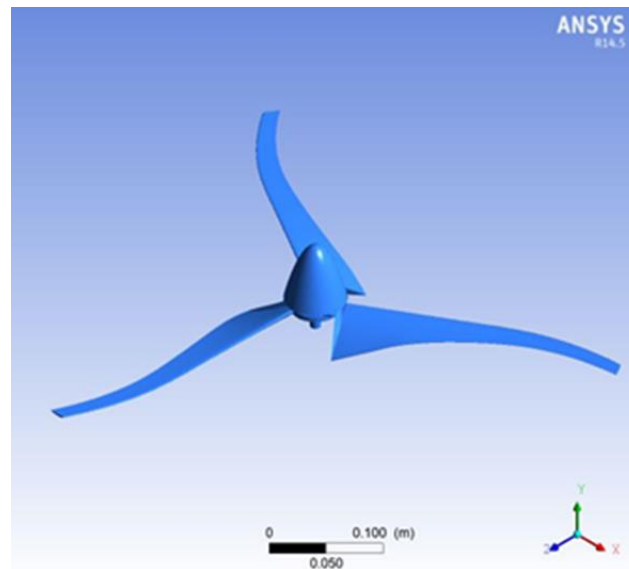
- Software Xfoil. (Drela, 1989). Rutina en MatLab. Comparación con el software TIMEO. (Álvarez Cervera, Lesso Arroyo, & López Garza, 2005).
- Hub a partir de la ecuación presentada por (Wang, Bai, Fletcher, Whiteford, & Cullen, 2008):

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

- Ecuaciones para álabes curvos en distintas direcciones.

# Diseño y Modelado

- 18 rotores . a) Ángulo de ataque variable (VA). b) Ángulo de ataque fijo (FA).
- 1) rotores con “sweep” (positivo YSPOS y negativo YSNEG).
- 2) rotores con “dihedral” (positivo YDPOS y negativo YDNEG).
- 3) rotores con combinación de “sweep” y “dihedral” (YSPOS-YSNEG,..etc.).
- 4) rotores sin “sweep” y/o “dihedral” (NS-ND).



# Diseño y Modelado

- Sweep. (Larwood, Dam, & Schow, 2014).

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

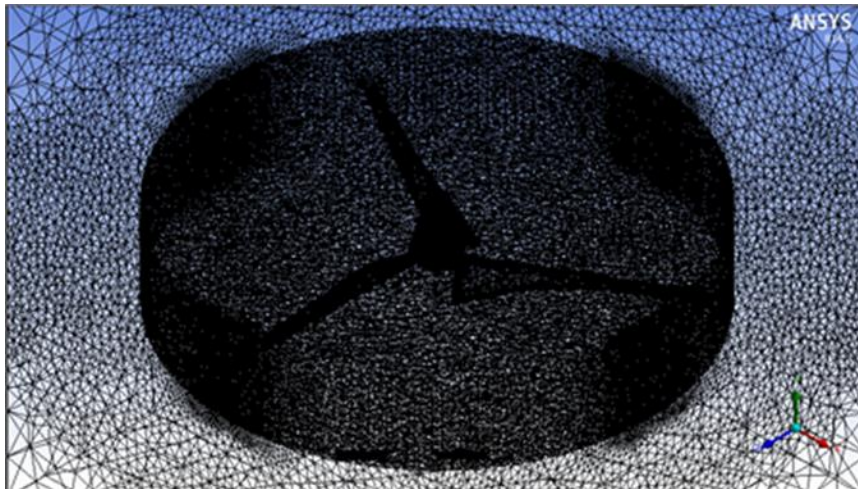
- Dihedral. (Chattot, 2009).

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

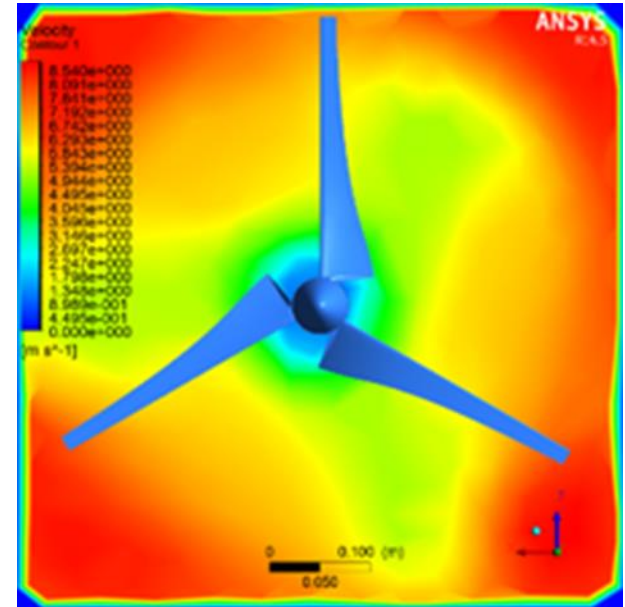
- Linearizar la relación cuerda-radio. (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009) y (Liu, Wang, & Tang, 2013). Potencia y torque de arranque disminuyen. (Molinero Hernández, Garza López, Jiménez Ramírez, López Zermeño, & Cadenas Calderón, 2015).

# Simulación

- Dominio dividido dos marcos de referencia.



Mallado del dominio en ANSYS Workbench.



Contornos Velocidad. Turbina en Movimiento.

- Modelos de turbulencia k- $\epsilon$  standar para el rotor estático y k-w SST para el rotor en movimiento. (Kasmi & Masson, 2008), (Abdel Salam & Ramalingam, 2014), (Rocha, Rocha, Carneiro, Silva, & Bueno, 2014) y (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2013).

# Fabricación y Pruebas

- Rotor de 0.57 m de diámetro fabricado con plástico ABS en impresora 3D. Potencia: 25 Watts, coeficiente de potencia ideal: 0.59, velocidad de viento: 6.5 m/s y velocidad específica: 5.

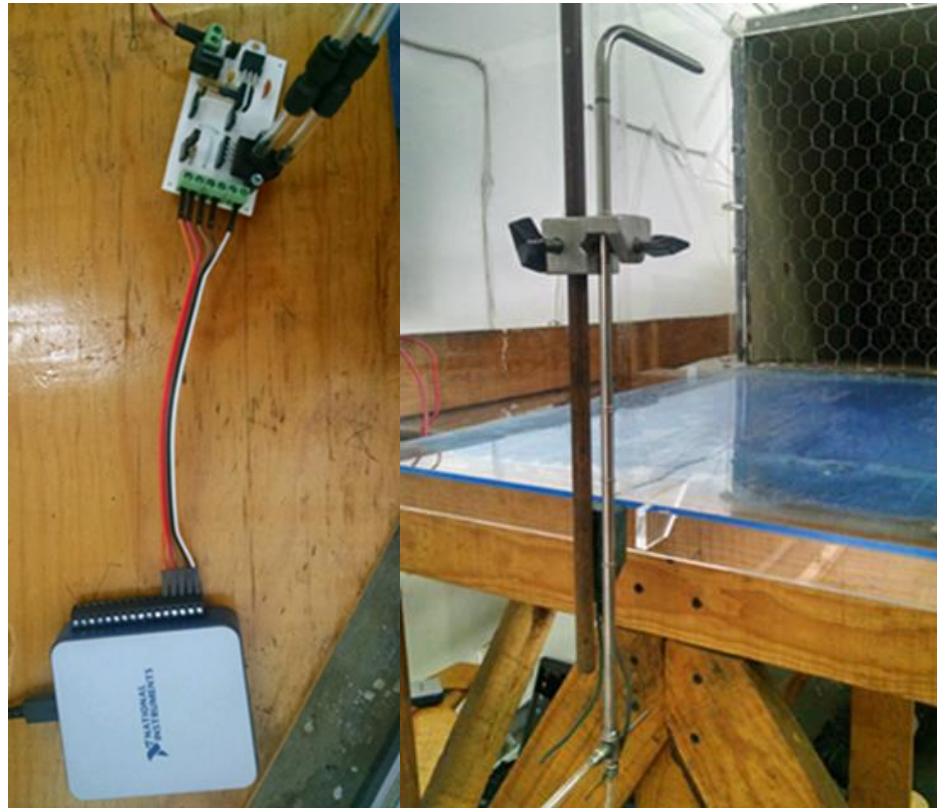


Rotor de 25 W fabricado en plástico ABS empleando tecnología de impresión 3D.



# Fabricación y Pruebas

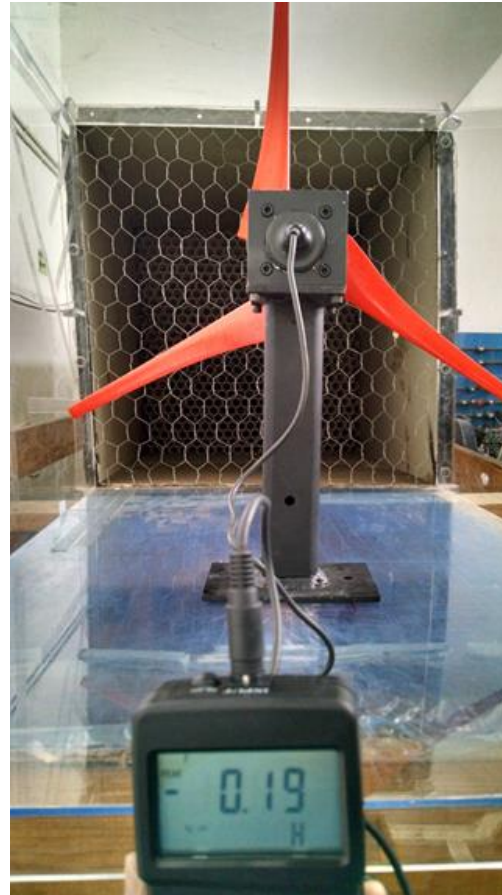
- Caracterización del túnel de viento. Datos obtenidos comparados con anemómetro de paletas. Discrepancia de 3%.



Sistema de medición de viento. a) Tarjeta de adquisición de datos y circuito integrado con sensores

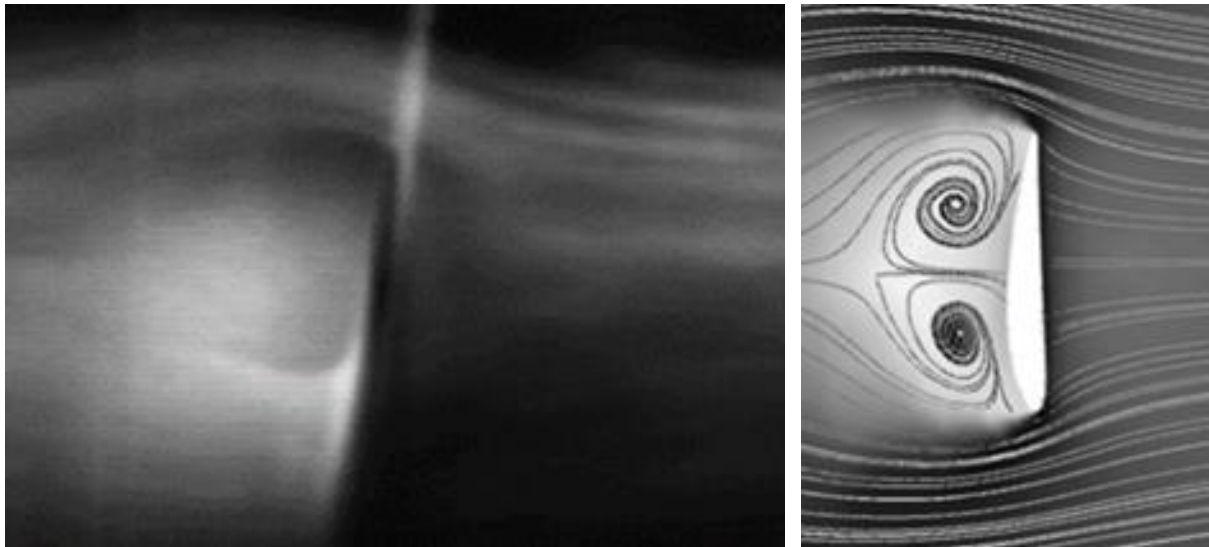
# Fabricación y Pruebas

- Torque generado por el rotor (torque de arranque). Variación de 3% entre el valor medido y el CFD.



# Fabricación y Pruebas

- Tomas con cámara de alta velocidad..



Líneas de corriente: a) Experimento (izquierda) y b) CFD (derecha).



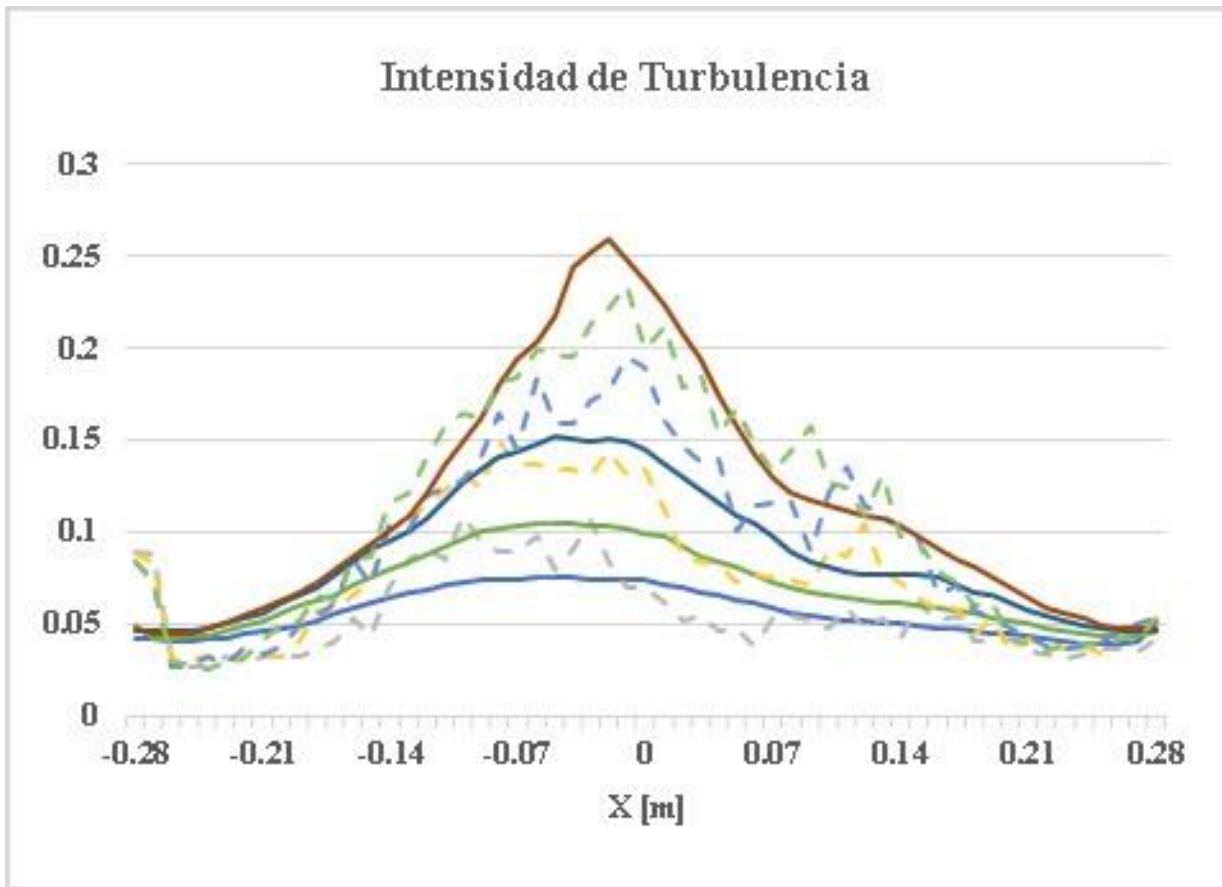
# Fabricación y Pruebas

- Mediciones de velocidad instantánea e intensidad de turbulencia en estela con anemometría de hilo caliente.



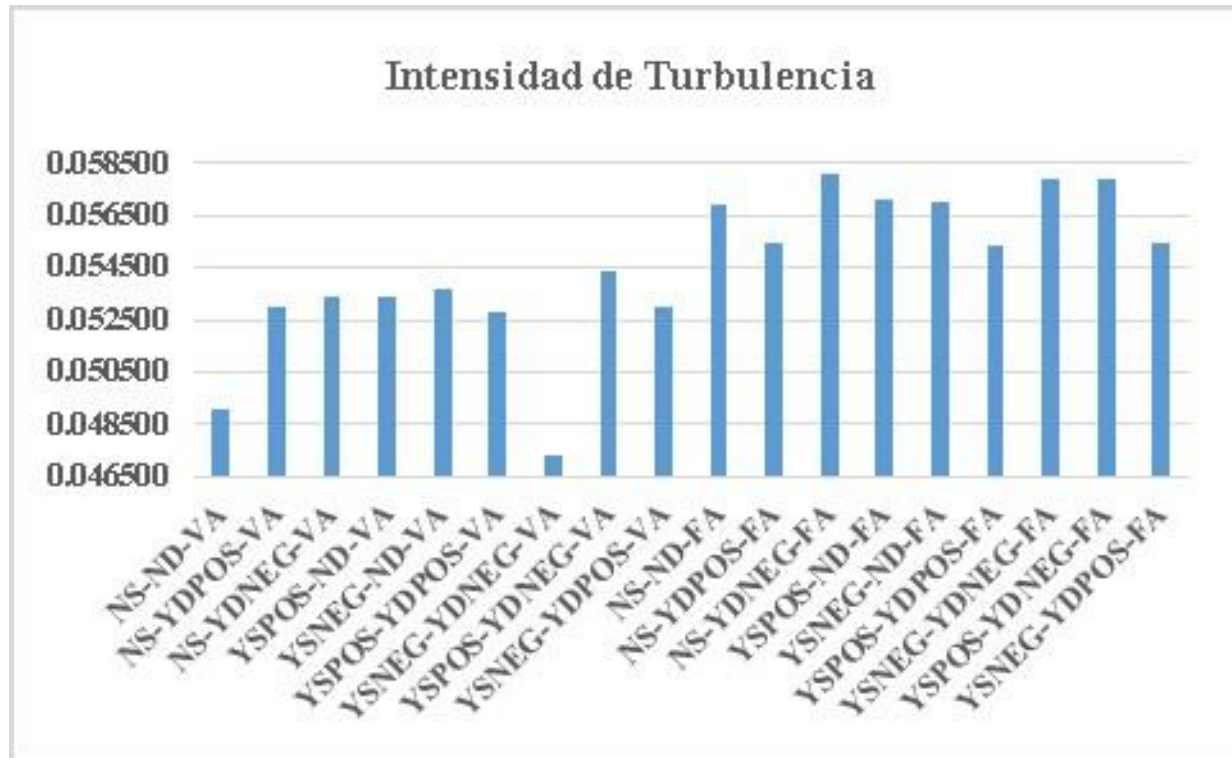
Anemómetro de hilo caliente incluyendo sistema de posicionamiento (derecha) y equipo de calibración de

# Fabricación y Pruebas



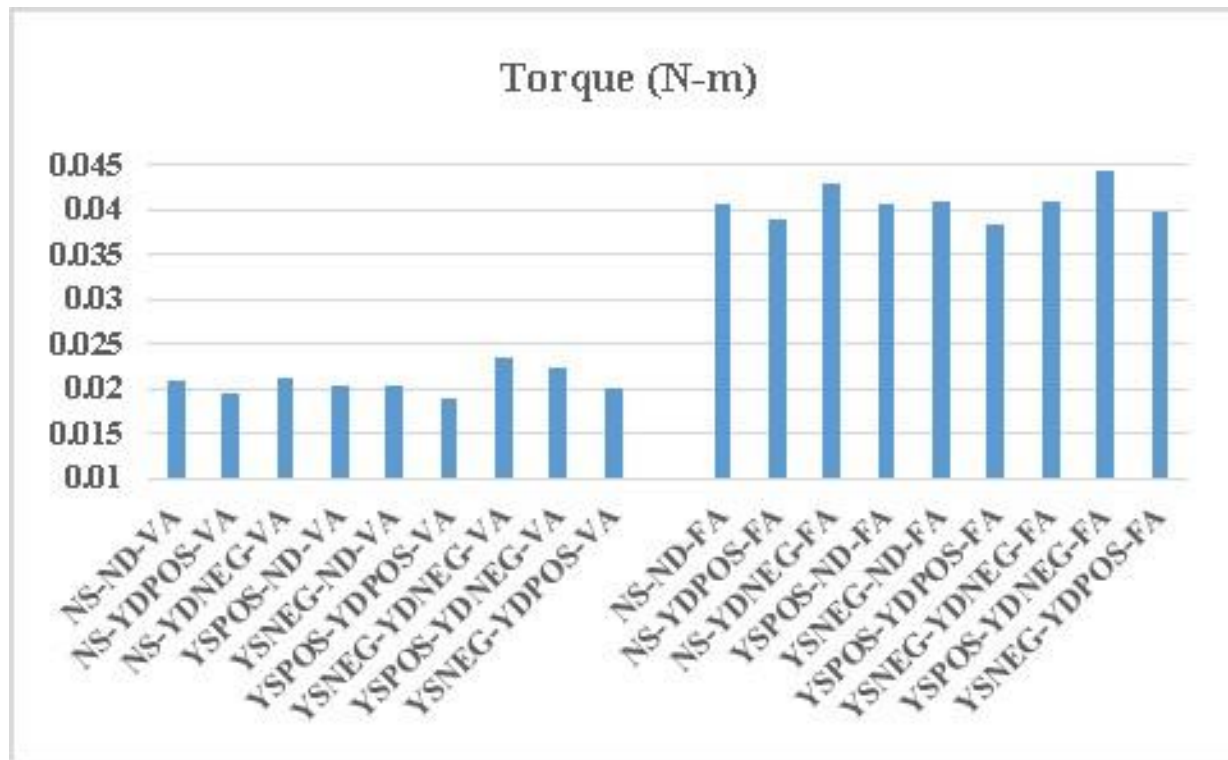
Intensidad de turbulencia en la sección central de los tubos CFD (línea continua) con Anemómetros de hilo caliente (línea interrumpida)

# Análisis de Resultados



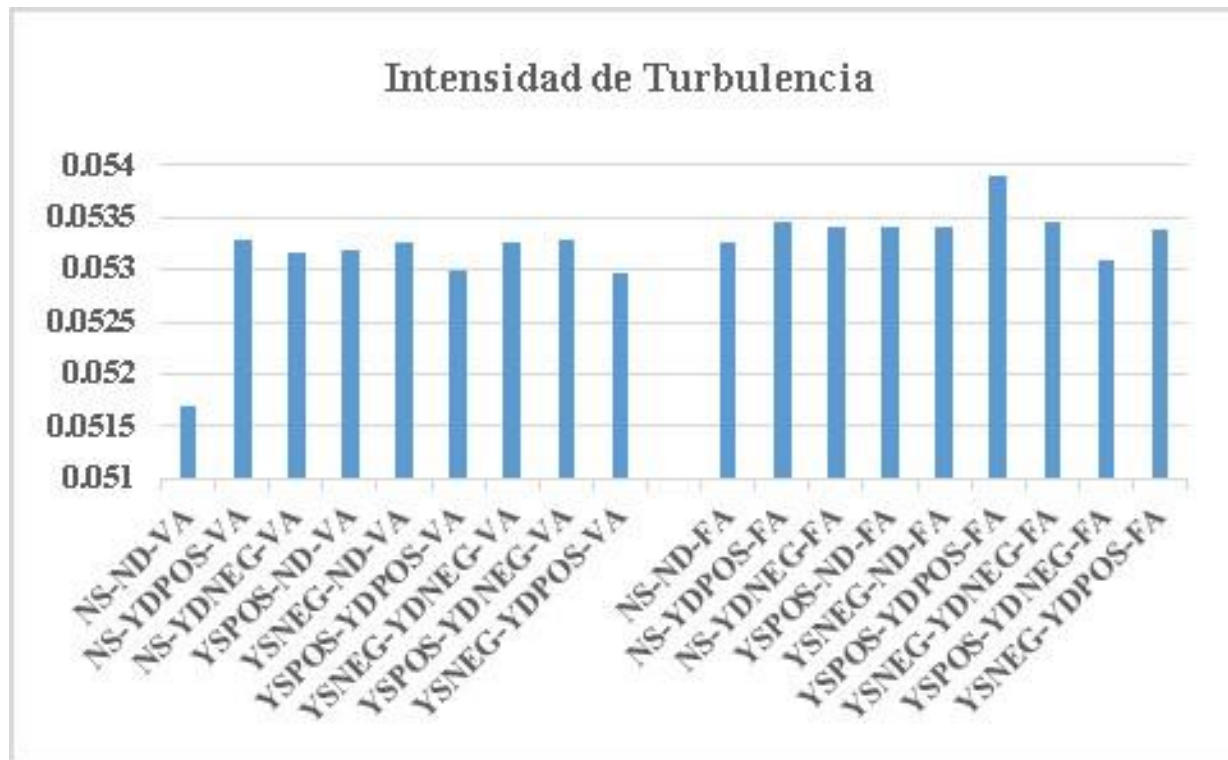
Intensidad de turbulencia en estela. Resultados de CFD con rotor estático.

# Análisis de Resultados



Torque de arranque. Resultados de CFD con rotor estático.

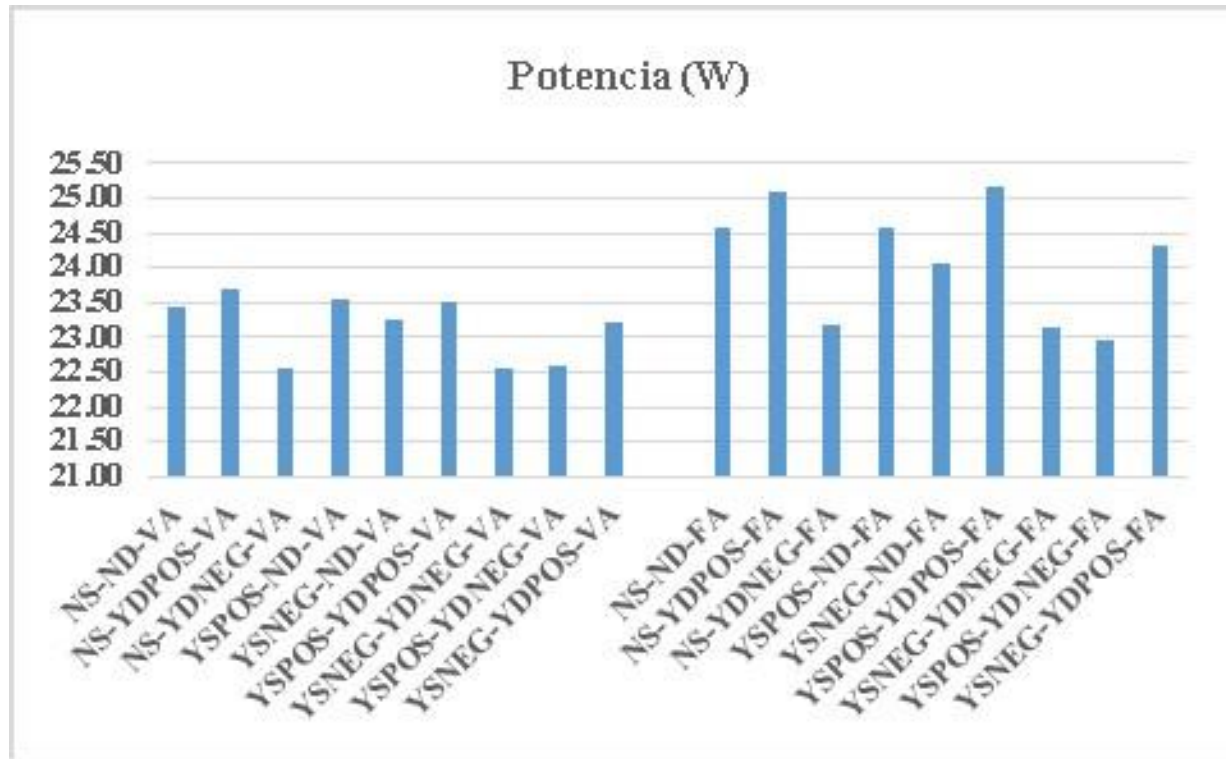
# Análisis de Resultados



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

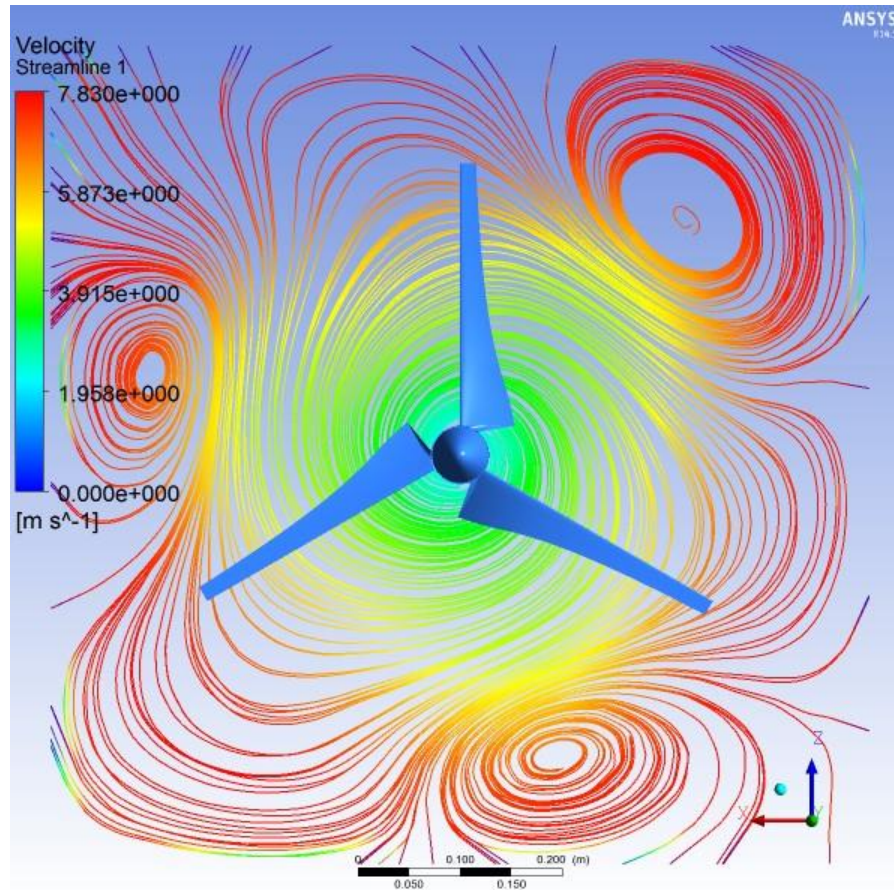


# Análisis de Resultados



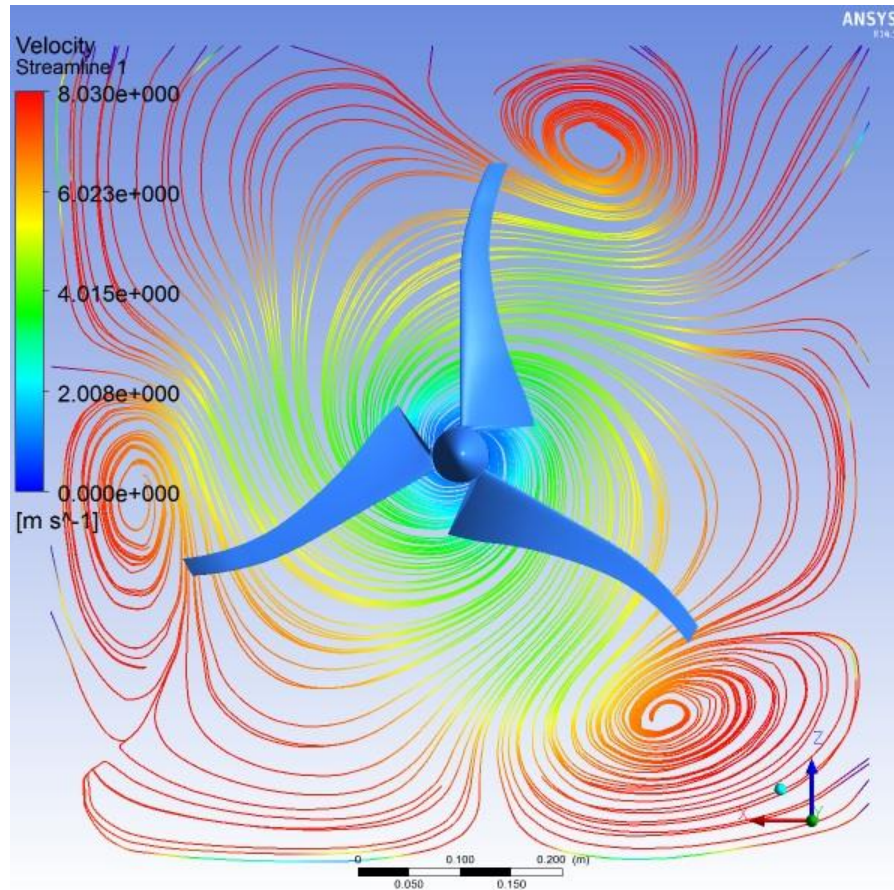
Potencia. Resultados de CFD con rotor en movimiento.

# Análisis de Resultados



Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor NS-ND-VA con la menor intensidad de turbulencia

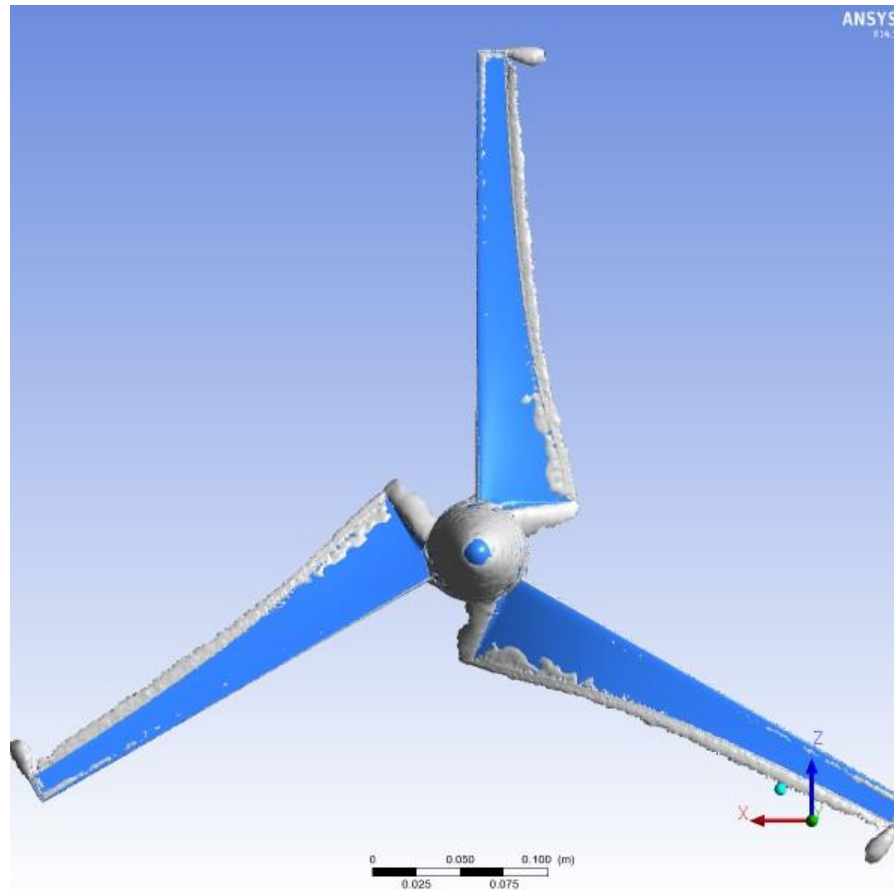
# Análisis de Resultados



Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor YSPOS-YDPOS-FA con la mayor intensidad de turbulencia

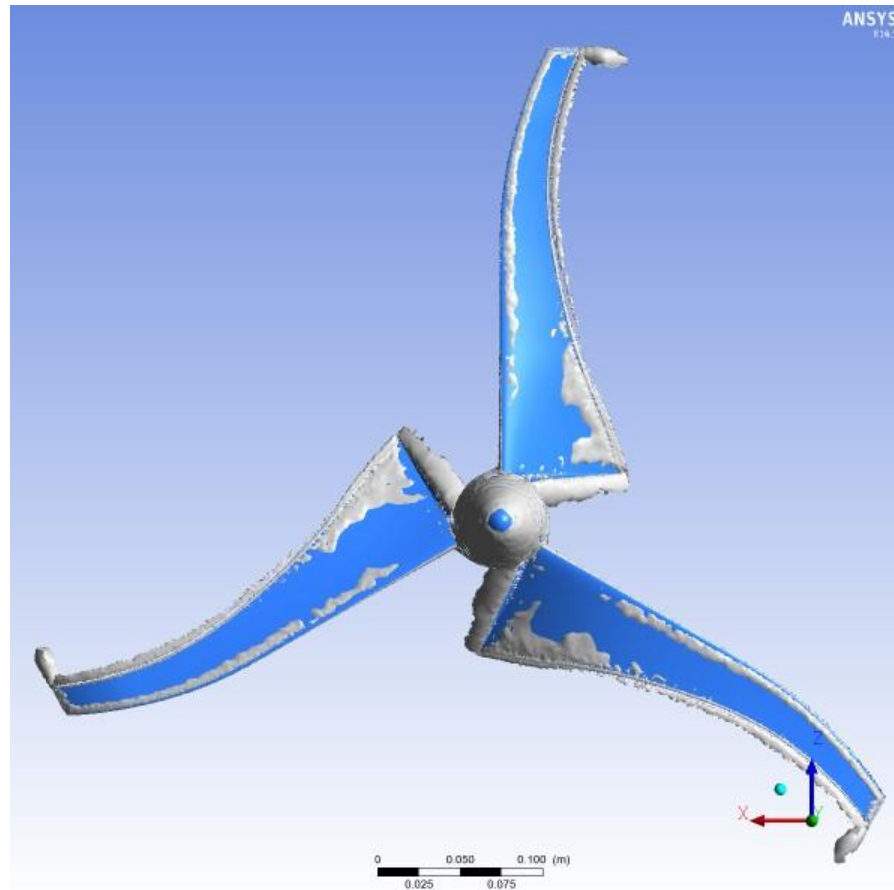


# Análisis de Resultados



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

# Análisis de Resultados



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

# Conclusiones

- Los datos experimentales para el rotor estático presentan buena concordancia con los datos de CFD, lo cual da certidumbre en el procedimiento ejecutado.
- Es recomendable llevar a cabo un análisis estadístico de los datos experimentales, lo cual dará información acerca de la simetría estadística y la amplitud de distribución del flujo.
- En el caso del rotor en movimiento, se deben realizar pruebas adicionales con probetas de dos y tres direcciones, esto en conjunto con un análisis estadístico proporcionara información más detallada relacionada con esfuerzos cortantes de Reynolds y cantidades de transporte lateral.
- La propuesta de diseño que cumple con la menor generación de turbulencia, 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.

# Conclusiones

- 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.
- Es recomendable realizar análisis con distintos porcentajes de curvatura y el impacto que esto tendría en la estructura del alabe.
- La metodología seguida puede ser empleada en el diseño de nuevos perfiles aerodinámicos y el estudio de diferentes geometrías de puntas para los álabes.

# 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 Álabo 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 Energía Eólica.
- 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.
- Drela, M. (1989). XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. *Low Reynolds Aerodynamics. Lec. Notes in Eng.*(54).
- Glauert, H. (1953b). *Windmills and fans. Aerodynamic theory* (ed. W.F. Durand). Berlin, Germany: Julius Springer.
- 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).
- Kasmi, A. E., & Masson, C. (2008). An extended k- $\epsilon$  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.

# Referencias

- 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- $\omega$ -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.
- 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.



**ECORFAN®**

**© ECORFAN-Mexico, S.C.**

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMIMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/](http://www.ecorfan.org/) booklets)