

Selección del perfil alar simétrico óptimo para un aerogenerador de eje vertical utilizando la dinámica de flujos computacional

Selection of the optimal symmetrical, airfoil for a vertical axis wind turbine using computational fluid dynamics

<https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.22.1344>

Alan Javier González Díaz¹
Leonardo José Geovo Coronado²
Yahir Enrique González Doria³
Universidad de Córdoba, Colombia

RESUMEN

Las turbinas de eje vertical (VAWT) surgieron para la generación de energía a baja potencia. La principal parte de estos dispositivos son los álabes, los cuales definen el rendimiento de la turbina. En este trabajo, utilizando el software comercial ANSYS 14.0, se evaluaron los perfiles NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021 y NACA 0025 para el álabes, seleccionando el perfil que presentó la mayor relación de los coeficientes de arrastre-sustentación y una variación suave del coeficiente de sustentación con respecto al ángulo de ataque. Se seleccionó, el perfil NACA 0025 por mantener una estabilidad dinámica para el número de Reynolds y ángulo de ataque evaluado.

Palabras clave: ÁLABE, CFD, PERFIL, VAWT.

ABSTRACT

Vertical axis turbines (VAWT) were designed to generate energy at low power. The turbine performance is defined by the blade; the main component of these devices. In this paper, using the software ANSYS 14.0, the NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021 and NACA 0025 profiles were evaluated in order to select the profile with the highest drag-lift ratio and the smoothest lift coefficient variation as a function of attack angle. The NACA 0025 profile was selected due to the dynamic stability showed at Reynolds number and angle of attack assessed.

Key Words: BLADE, CFD, AIRFOIL, VAWT.

1. Estudiante de Ingeniería Mecánica, Grupo de investigación Ingeniería, Ciencia y Tecnología (ICT) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba Montería, Colombia.
agonzalezdiaz@correo.unicordoba.edu.co
2. Estudiante de Ingeniería Mecánica, Grupo de investigación Ingeniería, Ciencia y Tecnología (ICT) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba Montería, Colombia.
leogeovo@gmail.com
3. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Industrial Grupo de investigación Ingeniería, Ciencia y Tecnología (ICT) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
yahirgonzalez@correo.unicordoba.edu.co

Fecha de recepción: 10 de octubre de 2016 • Fecha de aceptación: 5 de marzo de 2017

INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla, Año 13, No. 22, pp. 83-91 • ISSN: 1909-2458

1. INTRODUCCIÓN

Según los datos de la unidad de planeación minero-energética, en el departamento de Córdoba aproximadamente el 33 % de las viviendas no se encuentran en el Sistema de Integración Nacional–SIN, siendo que para las zonas costeras el porcentaje de viviendas sin cobertura está alrededor del 40 %, es decir, 7595 familias no tienen acceso al servicio eléctrico [1]. Esta problemática surge principalmente porque la topografía de estas regiones dificulta el acceso de las redes de energía. Una alternativa para mitigar este problema es la implementación de equipos que generen energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, como por ejemplo, la energía eólica que se caracteriza por ser sustentable y amigable con el medioambiente. Los aerogeneradores son dispositivos que transforman la energía del viento en energía mecánica, entre estos dispositivos se encuentran los aerogeneradores de eje vertical conocidos como VAWT (*Vertical Axis Wind Turbines*), los cuales poseen un eje perpendicular a la dirección del viento. Las principales ventajas de estos generadores son: posibilidad de situarlos al nivel del suelo, operación sin mecanismos de orientación, mantenimiento sencillo y capacidad de generar en baja potencia, es decir, potencias menores a 1 KW a partir de velocidades de viento desde 2 m/s hasta 15 m/s [2]. Estas características han permitido el desarrollo de varias investigaciones. Baldomero [3] seleccionó el aerogenerador tipo H que presentó un funcionamiento continuo acorde a las necesidades de aireación, en función de características de autoarranque, velocidad de giro de rotor y el autoposicionamiento respecto a las direcciones del viento. Adicionalmente, usando un túnel de viento se determinó el número de álabes apropiado para las distintas velocidades y ángulos de ataque. En Colombia se diseñó y construyó un prototipo de turbina eólica de eje vertical para la generación de electricidad a baja potencia. Fue reportado que para vientos superiores a los 10 m/s, el prototipo alcanzó potencias cercanas a los 44 W con una eficiencia del 7 % [4].

Según los datos de la unidad de planeación minero-energética [1], las zonas costeras del departamento de Córdoba presentan velocidades que oscilan entre 2 y 6 m/s, lo que permite la implementación de aerogeneradores tipo H para generación en baja potencia que ofrezcan sustentabilidad, un buen rendimiento y que sean amigables con el medioambiente, ofreciendo una alternativa de suministro eléctrico para hogares que podrían tecnificar sus actividades económicas y generar desarrollo en la región. El objetivo de este proyecto es la selección de un perfil simétrico idóneo para un aerogenerador VAWT tipo H de baja potencia, acorde a la velocidad del viento en las zonas costaneras de ese departamento. La selección del perfil se realizó con base en los coeficientes de sustentación y arrastre evaluados con el software ANSYS 14.0.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Preselección de los perfiles alares

Los perfiles simétricos son los recomendados para aerogeneradores verticales de baja potencia [5], además son de bajo costo debido a su fácil construcción. Los NACA 00XX poseen datos experimen-

tales como el número de Reynolds (Re), coeficiente de sustentación y de arrastre que se encuentran en la literatura, indispensables para el diseño analítico. Los perfiles preseleccionados para el análisis fueron NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021, NACA 0025, debido a las condiciones establecidas de disponibilidad de trabajo con los aerogeneradores de eje vertical y de economía. Las coordenadas de los perfiles se tomaron de la base de datos UIUC Applied Aerodynamics Group [6].

2.2. Generación de la geometría y creación del volumen de control

La selección del perfil simétrico se realizó usando el software GAMBIT 2.4.6 que ofrece gran versatilidad para crear tantas restricciones como sean necesarias para las condiciones requeridas de capa límite y de contorno de volumen de control. Para representar la geometría de los perfiles, se importó un archivo *.dat que contiene las coordenadas de todos los puntos que conforman las zonas de alta y de baja presión del perfil. Después de obtener los perfiles, se delimitó el volumen de control para una malla tipo C, dado que permite mejor control en el tamaño de los elementos de la malla alrededor del perfil. Se crearon siete puntos relacionados con la cuerda del perfil y el volumen de control, según Ravikumar & Kumar [7].

2.3. Generación de la malla y condiciones de contorno

Durante la construcción de las mallas, se utilizó el parámetro inflación y^+ para el tratamiento de pared, el cual es definido en la ecuación 1 [8]:

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_\tau \rho} \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad del aire (Kg/m^3),

μ : Viscosidad dinámica (Kg/m s)

y : Espesor de la capa (m)

U_τ : Velocidad en la capa (m/s)

La velocidad de la capa U_τ se calculó a partir de la ecuación 2:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2)$$

Donde:

τ_w : Esfuerzo cortante en la capa N/m^2

Se realizó un análisis de la subcapa viscosa para determinar las fuerzas de arrastre y de sustentación y sus valores fueron adicionados al software de mallado. Adicionalmente, se escogió una inflación de

y^+1 , porque para bajos números de Reynolds se recomienda inflaciones de $y^+ \cong 1$ para subcapa viscosa [9]. El número de nodos creados y el número de elementos se determinaron mediante el comando “información de malla” que proporciona Gambit. Se realizaron cuatro mallas para los cuatro tipos de perfiles NACA 0015, NACA 0018, NACA 0021, NACA 0025 mostrados en la Figura 1. Las condiciones de frontera utilizadas en el modelo fueron: perfil tipo pared (*Wall*), dos velocidades de entradas una para la semicircunferencia y otra para los lados horizontales (*Velocity-inlet*) y tipo de presión de salida para las líneas verticales traseras (*Pressure-Outlet*). La calidad de los elementos de mado en cada malla se verificó usando los parámetros oblicuidad (*skewness*) y calidad ortogonal.

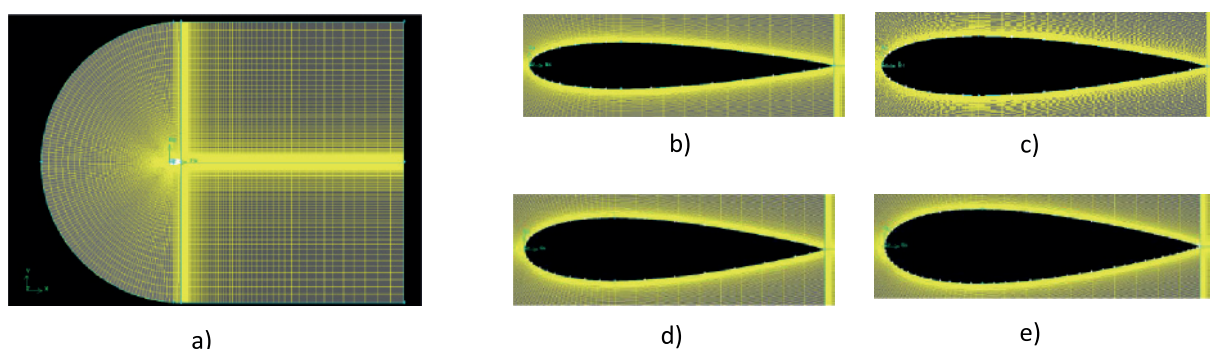


Figura 1. a) Mallado de la geometría del perfil. b) Perfil NACA 0015. c) Perfil NACA 0018
d) Perfil NACA 0021 y e) Perfil NACA 0025

Fuente: Elaborado por los autores

2.4. Definición del solver y configuraciones de los parámetros de solución

En esta etapa de modelado se utilizó como modelo de simulación el método $K - \omega$ SST (2eqn), dado que es robusto para bajos números Reynolds, está formulado para la capa viscosa y se caracteriza principalmente por realizar una transición gradual desde el modelo estándar $K - \omega$ cerca de la pared con la posibilidad de predecir el comportamiento a número de Reynolds altos $K - \epsilon$ en la zona externa a la capa límite [9, 10]. Este modelo es ampliamente utilizado en investigaciones del sector aeroespacial y de turbomaquinaria. Adicionalmente se utilizaron los siguientes datos de entrada: número de Reynolds subsónico de $1,6 \times 10^5$, temperatura de corriente libre de 300 K, densidad del aire $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, viscosidad $\mu = 1,7604 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ y flujo incompresible. Las simulaciones se realizaron para los ángulos de ataque comprendidos entre 0° y 30° . Se escogió el perfil que presentó una variación estable del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque y mayor relación arrastre/sustentación. La validación de las simulaciones se realizó comparando los resultados con los datos disponibles en la base de datos SANDIA [11]. Al perfil seleccionado se le realizó un análisis de contorno de presiones y velocidades para un $\alpha = 15^\circ$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados de la calidad de los elementos de mallado evaluada a partir de los pa-

rámetros oblicuidad (*skewness*) y calidad ortogonal. Se puede observar que la ortogonalidad promedio en cada una de las mallas estuvo alrededor de 1. Adicionalmente, la oblicuidad promedio fue 0,02 para las mallas de los perfiles NACA 0015, NACA 0018 y NACA 0021 y 0,105 para la malla del perfil NACA 0025. Se considera que la malla es de mejor calidad cuando los valores de ortogonalidad son cercanos a 1 y los valores de oblicuidad se encuentran entre 0 y 0,25 [12].

Tabla 1. Resultados de la calidad de los elementos de mallado evaluada a partir de los parámetros oblicuidad (*skewness*) y calidad ortogonal

Mallado-Perfil	Malla perfil NACA 0015	Malla perfil NACA 0018	Malla perfil NACA 0021	Malla perfil NACA 0025
Nodos	66892	66892	66892	66892
Elementos	66000	66000	66000	66000
Skewness Máxima	0,12	0,14	0,16	0,19
Skewness Mínima	0,01	0,01	0,01	0,02
Skewness promedio	0,02	0,02	0,02	0,105
Ortogonal Máxima	1	1	1	1
Ortogonal Mínima	0,939	0,943	0,923	0,893
Ortogonal Promedio	0,98	0,991	0,988	0,9465
Inflación y^+ Máxima	0,925	0,975	0,825	1,0
Inflación y^+ Mínima	0,2	0,125	0,025	0,2
y^+ Promedio	0,5	0,5	0,5	0,45

Fuente: Elaborado por los autores

Validación de las simulaciones

La Figura 2 muestra el coeficiente de sustentación en función de α obtenidos a partir de la simulación del perfil NACA 0025 junto con los valores tomados de SANDIA. Los resultados de esta simulación fueron utilizados para validar el mallado.

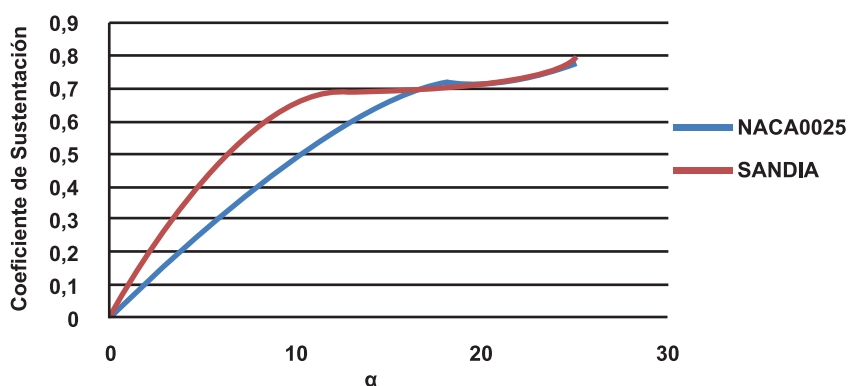


Figura 2. Coeficiente de sustentación en función de α para $Re = 160000$

Fuente: Elaborado por los autores

Como se aprecia en la Figura 2, la diferencia del máximo coeficiente de sustentación entre el modelado y los datos tomados de SANDIA fue de 5,35 %. G. Reis [8] realizó una simulación similar y reportó un

error del 13,3 %, por tanto, se concluyó que el porcentaje de error es confiable y las condiciones de calidad de mallado y métodos de modelado fueron adecuadas para el proceso de simulación.

Selección del perfil

La Figura 3 muestra los resultados del coeficiente de sustentación en función de α para los cuatro perfiles evaluados. Se puede observar que el coeficiente de sustentación para todos los perfiles en ángulos inferiores a 15° tiene un comportamiento similar con valores próximos entre sí. Para ángulos mayores a 15° , el perfil NACA 0015 presentó un coeficiente de sustentación de 0,79 pero es el perfil con mayor pérdida dinámica después de 17° . El NACA 0018 tuvo el mayor valor de coeficiente de sustentación de 0,83, sin embargo, presentó una pérdida dinámica al pasar los 23° . El perfil NACA 0021 presentó el coeficiente de sustentación de 0,78 y una pérdida dinámica aproximadamente a los 20° . El perfil NACA 0025 presentó un coeficiente de sustentación de 0,71, valor más bajo entre los perfiles evaluados, sin embargo, no sufrió pérdida dinámica garantizando un funcionamiento continuo porque las fuerzas de sustentación no fluctúan, lo que genera mayor estabilidad del álabo dada la reducción de vibraciones por pérdidas de sustentación. Aunque el valor del coeficiente de sustentación del perfil NACA 0025 es el más bajo entre todos, es un valor muy próximo a los presentados por los otros perfiles.

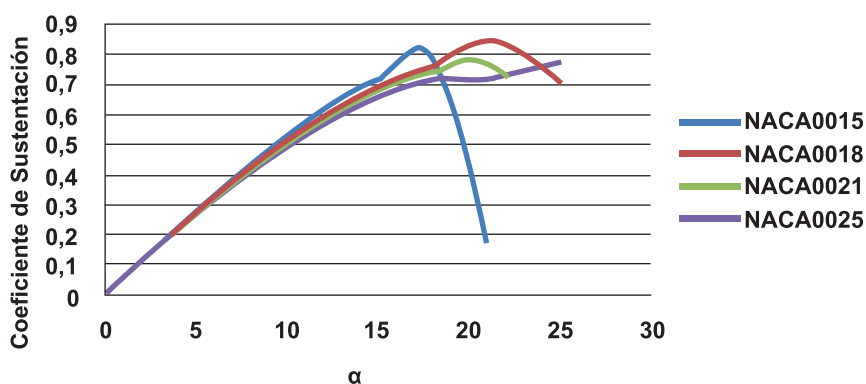


Figura 3. Coeficiente de sustentación en función de α para los cuatro perfiles evaluados para $Re = 160000$

Fuente: Elaborado por los autores

La Figura 4 muestra el comportamiento del coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre. Se puede observar que para valores menores a 0,05 de coeficiente de arrastre, la pendiente de todas las gráficas tiene la misma inclinación, por lo cual la máxima relación de arrastre y sustentación es aproximadamente igual para todos los perfiles, evidenciando la necesidad de analizar con mayor detalle el comportamiento para cada perfil. La curva del NACA 0015 presentó una caída pronunciada a un coeficiente de arrastre próximo a 0,1, debido a que para ángulos de ataque pequeños el perfil pierde sustentación quedando sometido a fuerzas de arrastre, como resultado de la pérdida dinámica. El NACA 0018 mostró un valor casi constante de coeficiente de sustentación de $\sim 0,82$ para

valores de coeficiente de arrastre entre 0,21 y 0,28, a partir de este punto disminuye lo que deja al perfil sometido a fuerzas de arrastre producto de la entrada en pérdida. A pesar de que el perfil NACA 0021 no presentó una caída pronunciada en el coeficiente de sustentación como la del perfil NACA 0015 para un coeficiente de arrastre de $\sim 0,01$, sí mostró una disminución considerable, evidenciando que queda sometido a fuerzas de arrastre más pronto que el perfil NACA 0018. El coeficiente de sustentación perfil NACA 0025 aumentó continuamente implicando que el perfil se encuentra principalmente sometido a fuerzas de sustentación en vez de fuerzas de arrastre, siendo un comportamiento favorable dado que, al mantener bajas y equilibradas las cargas de arrastre, no se generan fluctuaciones que ocasionen vibraciones sobre el álabe que afectan la resistencia estructural manteniendo un rendimiento continuo. Por mantener una pérdida dinámica estable, trabajar con cargas de sustentación en altos ángulos de ataque manteniendo un bajo coeficiente de arrastre y una buena relación coeficiente de sustentación/coeficiente arrastre, se seleccionó el perfil NACA 0025.

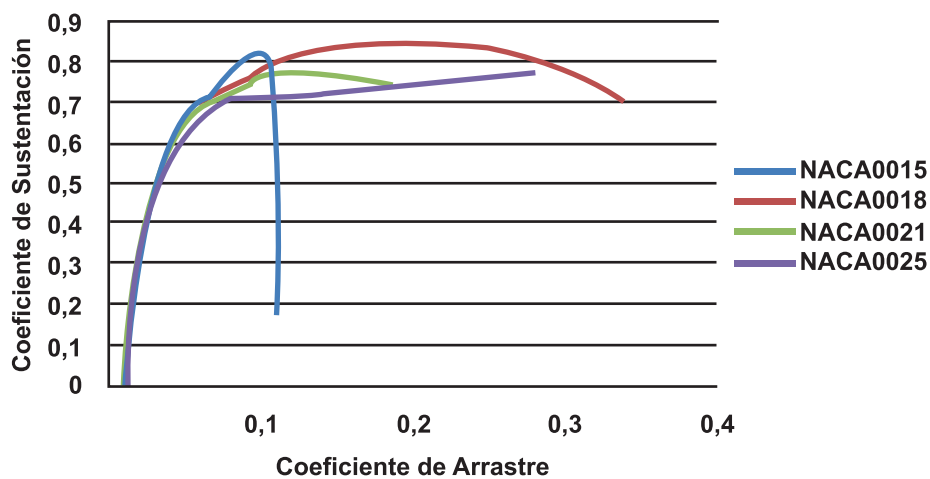
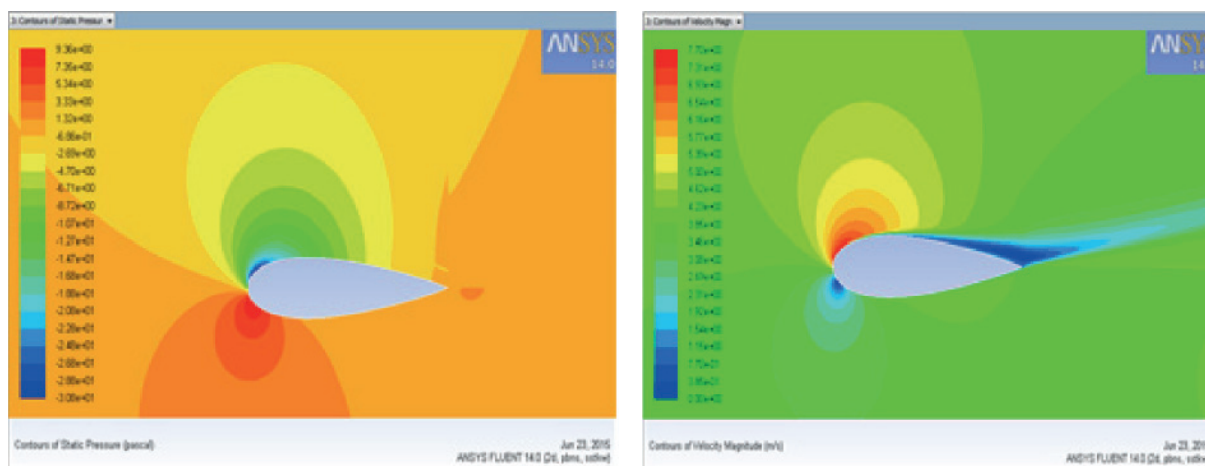


Figura 4. Coeficiente de sustentación en función de coeficiente de arrastre para $Re = 160000$

Fuente: Elaborado por los autores

La Figura 5 muestra los contornos de presión y de velocidades sobre el perfil NACA 0025 para $\alpha = 15^\circ$. Se puede observar en la Figura 5 a que para un incremento en la inclinación del perfil de 15° se produjo una diferencia de presiones entre la zona de extrados e intrados generando la carga por presión denominada sustentación y como consecuencia la elevación del perfil. Adicionalmente, con el aumento de sustentación se tiene un aumento de carga de arrastre, debido a que con la inclinación del perfil se incrementa su área de contacto en la pared. El contorno de velocidades mostrado en la Figura 5 b es consecuente con la presión generada, porque para que haya sustentación se requiere de las zonas de baja y alta presión. La zona de baja presión es producto de la alta velocidad de flujo que se muestra en la zona de extrados, mientras que la zona de alta presión requiere bajas velocidades. En el borde de salida la reducción de velocidad es producida por los efectos de desprendimiento de la capa límite.



a) b)
**Figura 5. Análisis de contorno del perfil NACA 0025 para $\alpha = 15^\circ$,
 a) contorno de presión. b) contorno de velocidad**

Fuente: Elaborado por los autores

4. CONCLUSIÓN

Se seleccionó para el aerogenerador tipo H el perfil NACA 0025 por presentar una variación estable del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque y una buena relación arrastre/sustentación entre los perfiles evaluados. La estabilidad dinámica y el funcionamiento de este perfil para el Re utilizado en las simulaciones, permite que trabaje con velocidades de viento entre 2 y 6 m/s, siendo un perfil idóneo para necesidades de generación de baja potencia para aerogeneradores tipo H.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IDEAM, *Atlas de viento y energía eólica en Colombia*, Bogotá: IDEAM, 2008.
- [2] M. Castro, A. Colmenar, O. Perpiñán y C. Sánchez, *Energía eólica*, Madrid: Promotora General de Estudios, 2011.
- [3] M. P. Baldomero, "Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces", *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Nov- Dic, n. 4, pp.617-623, 2012.
- [4] O. Orduz y J. Suárez, *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [5] D. Escánez, *Diseño y fabricación de los álabes de un micro-aerogenerador de baja potencia*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [6] Aerospace Department. (2015). UIUC Applied Aerodynamics Group. [Online]. Available en: http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#N

- [7] T. Ravikumar & B. Kumar, "Effect of Blade Thickness of Vertical Axis Wind Turbine on Power Generation", *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 3, n° 10, pp. 932-916, 2014.
- [8] G. Reis, *Análise numérica e experimental de perfis aerodinâmicos para aprimoramento do projeto de turbinas H-Darrieus*, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- [9] ANSYS, *Turbulence Modeling: Introduction to NASYS FLUENT*, ANSYS Inc, 2010.
- [10] E. Douvi, A. Tsavalos & D. Margaris, "Evaluation of the turbulence models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 0012 airfoil," *Journal of Mechanical Engineering Research*, vol. 4, no. 3, pp. 100-111, 2012.
- [11] R. E. Sheldahl & P. C. Klimas, *Aerodynamic Characteristic of Seven Symmetrical Airfoil Sections Throught 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*, Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1981.
- [12] J. López, *Estudio de perfil aerodinámico NACA 6609*, Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2012.