

## Simulación de un alabe de aerogenerador para bajas potencias y bajas velocidades

### Simulation of wind turbine blade for low power and low speed.

Conde Pabón B.Y<sup>1</sup>; Florez Serrano E.G<sup>2</sup>; Serrano Rico J.C<sup>3</sup>

<sup>1</sup>. Docente tiempo completo ocasional Universidad de Pamplona. brayan.conde@unipamplona.edu.co

<sup>2</sup> Docente tiempo completo Universidad de Pamplona. eflorez@unipamplona.edu.co

<sup>3</sup> Docente tiempo completo Universidad de Pamplona. jcserrano@unipamplona.edu.co

#### Resumen

En este artículo se presenta la simulación de un aerogenerador de eje horizontal de tres álabes, para baja velocidad y baja potencia, mediante la ayuda de un software comercial de CFD. La geometría de los álabes es determinada acoplando los perfiles aerodinámicos; WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042, para la raíz, la región media y para la punta del alabe, respectivamente. Estos perfiles aerodinámicos son acoplados mediante interpolación geométrica, con la ayuda del software SOLIDWORKS. Por otra parte, utilizando el software de diseño y análisis de perfiles aerodinámicos XFOIL, se caracterizó el rendimiento aerodinámico del alabe. Las simulaciones se desarrollaron para velocidades de viento entre 5 m/s y 10 m/s. A partir de los resultados de estas últimas, se determinaron las características de desempeño del aerogenerador, tales como; la velocidad de rotación, la potencia de salida y el coeficiente de potencia. Finalmente, se analizaron las fluctuaciones de presión sobre la superficie del alabé y la distribución de esfuerzos a lo largo del mismo, con el objetivo de realizar el diseño estructural del aerogenerador.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo serán utilizados, en una segunda fase de la investigación, para la construcción de un modelo que permita validar el comportamiento tanto aerodinámico como mecánico del aerogenerador, lo cual contribuirá en la construcción del prototipo que se implementará en campo.

*Palabras clave:* aerogenerador, energía eólica, CFD.

#### Abstract

In this paper presents the simulation of a three-bladed wind turbine of horizontal axis, for low speed and low power using a commercial CFD software. The blades geometry is determined coupling the aerodynamic profiles; WORTMANN FX 60-126, SG043 and SG042, for the root, the middle region and for the tip of the blade, respectively. Using the SOLIDWORK software, the aerodynamic profiles were coupled through geometric interpolation. Moreover, using the XFOIL software for design and aerodynamic profiles analysis, the aerodynamic performance of the blade was characterized. The simulations were developed for wind speeds between 5 m/s and 10 m/s. With the results of the simulations, the performance characteristics of the wind turbine were determined, such as; the rotation speed, the output power and the power coefficient.

Finally, the pressure field on the blade surface and the strength distribution along the same were analyzed, these with the aim to obtain the structural design of the wind turbine.

The results obtained in the present work will be used, in a second phase of the research, for the construction of a physical model to validate the aerodynamic and mechanical behavior of the wind turbine, which will contribute to the construction of the prototype to be implemented in field.

*Keywords:* wind turbine, wind energy, CFD.

## 1. Introducción

Los problemas ambientales han crecido de manera exponencial en los últimos años, llegando a ser un tema inevitable para cada país o persona en el planeta, donde las economías giran en torno a la explotación energética de los derivados fósiles, agotando las reservas de los mismos e influyendo negativamente en los ecosistemas y cambios climáticos presentes en la actualidad (Emeis, 2018).

Las energías renovables como la solar, la biomasa, térmica, mareomotriz entre otras son alternativas empleadas actualmente. Sin embargo, el recurso para la generación de energía renovable ha tenido algunos inconvenientes debido a la falta de experiencia en la instalación de los equipos durante los últimos años se han realizado investigaciones donde la energía eólica ha ocupado un lugar de preeminencia, por la capacidad instalada y la sostenibilidad económica que ofrece a mediano y largo plazo. Convirtiéndose en una de las tecnologías de mayor crecimiento, gracias al Gpaíses y estando en el foco de numerosas investigaciones alrededor del mundo. Donde se espera que el crecimiento de la capacidad instalada de energía eólica aumente en 3GW para finales del año 2020 (VEGA & RODRÍGUEZ, 2016) (Arenas, Florez, & Serrano, 2018)

Las investigaciones para la implementación de sistemas de generación eólica van de la mano con el estudio de aerogeneradores, que son máquinas creadas para poder aprovechar el recurso eólico y son clasificados según su eje de rotación en dos tipos de eje horizontal (eje paralelo a la dirección del viento) o de eje vertical (eje perpendicular a la dirección del viento) y están compuesto por elementos, que permiten convertir la energía cinética de las partículas de viento, en energía cinética rotacional y posteriormente en energía eléctrica. El elemento que tiene mayor influencia en el diseño de los aerogeneradores son los álabes o cuchillas, pues estos se encargan de captar la energía mecánica del viento, fundamentados en la aerodinámica buscando el perfil de álabes óptimo, que permita aprovechar la mayor cantidad de energía proporcionada por el viento, evitando la creación de perturbaciones del mismo que puedan acarrear un mal funcionamiento del aerogenerador (Baldomero, 2012).

Esta investigación, se enfocó en estudiar el comportamiento de un aerogenerador de eje horizontal, cuyos álabes están basados en los perfiles aerodinámicos de las familias WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042, para la raíz, la región media y para la punta del álabes, respectivamente. Estos perfiles aerodinámicos fueron acoplados mediante interpolación geométrica, con la ayuda del

36

software SOLIDWORKS basándose en la investigación realizada por (Rojas C. L., 2017;Rojas, Flórez, & Serrano, 2019) donde las familias seleccionadas se caracterizaron por cumplir con el mejor funcionamiento al realizar una comparación entre los distintos perfiles encontrados en diferentes bases de datos. estudiando el comportamiento de todo el conjunto (aerogenerador de baja potencia y baja velocidad) realizando el análisis aerodinámico con ayuda del software ANSYS 2016 y el método de CFD FLUENT (ANSYS, 2018).

## 2. Metodología

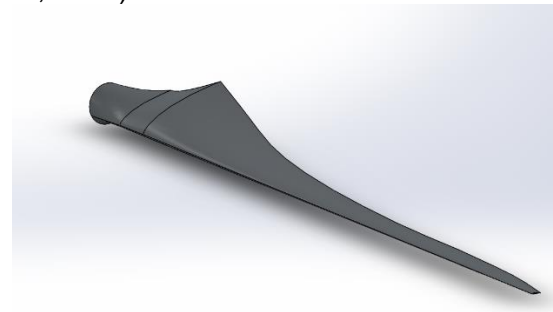
La simulación del aerogenerador se realizó con ANSYS 16.0, el cual es un software para la solución de problemas de ingeniería a través de elementos finitos, para el caso en particular del estudio en esta investigación se implementó a través de FLUENT, dando solución a los problemas que involucran el flujo de fluidos y tiene mayores prestaciones en la aplicación de problemas tridimensionales.

Siguiendo con la lógica de ANSYS para dar solución a los problemas de este tipo, se parte de definir el mecanismo para la solución de las ecuaciones matemáticas y para lo cual ANSYS tiene dos secciones que involucran fluidos y esos dos métodos son el FLUENT y el CFX. Como se mencionó anteriormente se trabajó con FLUENT donde su método de solución es más adecuado cuando el flujo es externo.

Después de seleccionar el método de solución que se implementó (FLUENT), se debían acomodar los parámetros del pre-procesamiento, procesamiento y el post-procesamiento, los cuales sirven para definir geometría (Modeler), realizar el mallado (Mesh), procesar los datos y hallar la

solución del problema para finalmente verificar que la solución del problema haya convergido correctamente.

Para la geometría a ser estudiada se puede realizar de dos formas, la primera es diseñándola por medio del CAD incluido en ANSYS que es el modeler o la segunda es importando la geometría dibujada en otro software CAD y que se haya guardado previamente en formato compatible con ANSYS ya sea él .iges o el parasolid (T\_X) donde este último es el que genera mayor compatibilidad con ANSYS. El método empleado fue el segundo ya que realizar la geometría del aerogenerador es más complejo a través del Modeler que cuenta con formas primitivas como los son cubos, cilindros y esferas entre otros por lo que para realizar las curvas aerodinámicas del aerogenerador es más sencillo con un software CAD externo. En la figura 1 se puede observar el álabo conformado por los diferentes perfiles aerodinámicos y que está diseñado para un ángulo de ataque de  $25.34^\circ$  que es que da las mejores prestaciones según Rojas Pabón (Rojas C. L., 2017).



**Figura 1.** Álabo diseñado para el aerogenerador de baja potencia y baja velocidad

Al montar el conjunto del aerogenerador se pudo observar lo mostrado en la figura 2 y se guardó en formato parasolid esto para no generar conflicto al exportar la pieza al modeler. Donde también se montó el túnel de viento con ayuda de las operaciones del modeler los cuales fueron realizadas con la herramienta sketch

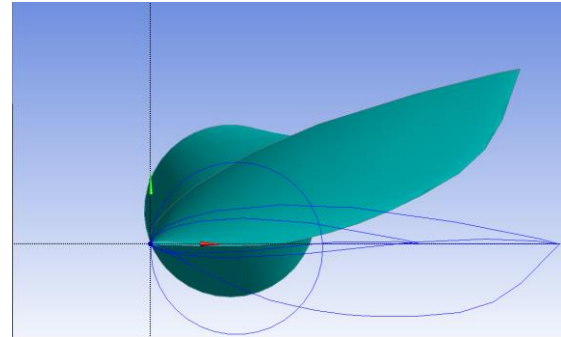


**Figura 2.** Conjunto del aerogenerador formado por los tres álabes

Para evitar gasto computacional innecesario se opta por hacer la simulación de la parte referente a los álabes y al rotor del aerogenerador quedando la geometría que se observa en la figura 3 y a la cual también se le realizó el mallado. Sin embargo, al observar la simetría del aerogenerador se opta por generar el estudio de un tercio de la geometría y cuando se desee visualizar los resultados por simetría se complementará la misma. En la figura 4 se observa la geometría del álabes con su respectivo ángulo de ataque calculado por Rojas Pabón el cual es de  $25.34^\circ$ .

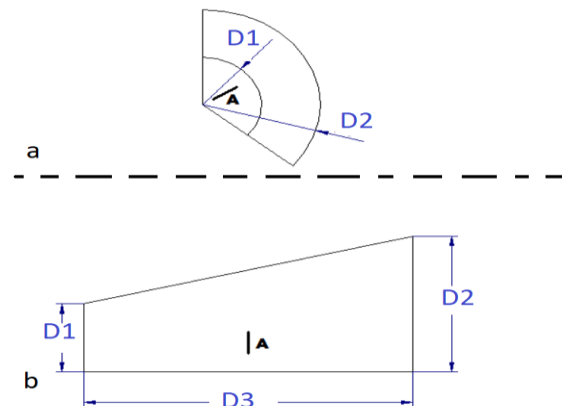


**Figura 3.** Conjunto empleado para la simulación aerodinámica.



**Figura 4.** Ángulo de ataque del álabes  $25.34^\circ$ .

En la figura 5a y 5b se representa el dominio empleado para las simulaciones. Donde el elemento A representa el álabes y las distancias D1, D2 y D3 representan las dimensiones del espacio de estudio tomando como base lo expresado por Sebastien Lachance-Barrett y Edwin Corona D1 que es el radio de la entrada del volumen de control, el cual se toma como el doble del radio del aerogenerador es decir el segmento del cubo y el álabes que para el caso de este estudio fue de 0.85 m (metros). La distancia D2 es la salida del volumen de control y es el doble del radio de la entrada (D1). Finalmente, D3 es la distancia entre la entrada y la salida del volumen de control la cual se tomó aproximadamente como 6 veces el radio del aerogenerador. (Lachance-Barrett & Corona, 2016)



**Figura 5.** Dominio de simulación

El los elementos de malla empleados para esta geometría se generaron por defecto a

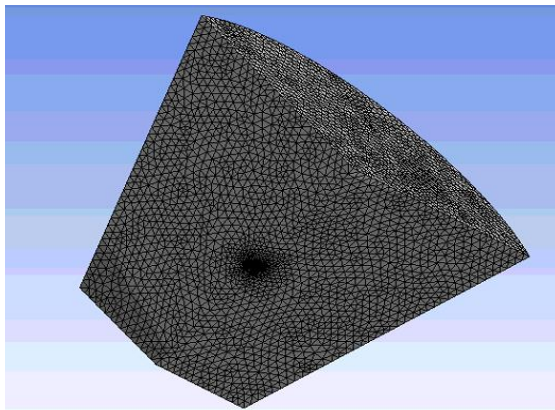
38

través del software creando una malla más fina en la zona cercana al análisis más crítico, el cual está en el fluido cerca al álabe por lo que se tuvo que generar una zona de alta influencia en forma esférica que envuelve el álabe y esto permitió generar una mayor cantidad de elementos para el análisis dentro del volumen de control esto se observa en las figuras 6 donde está el mallado realizado de manera automática, figura 7 la esfera que facilita el análisis en la zona cercana al álabe y figura 8 donde está el mallado generado después de crear la zona de alta influencia.

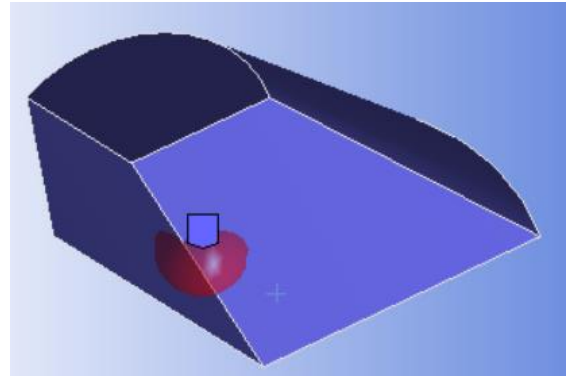
En la tabla 1 se muestran los datos más relevantes entre las dos maneras de hacer mallado, básicamente varía en el número de nodos y elementos a los que se les realizará el estudio.

**Tabla 1** Diferencia entre los dos métodos de mallado

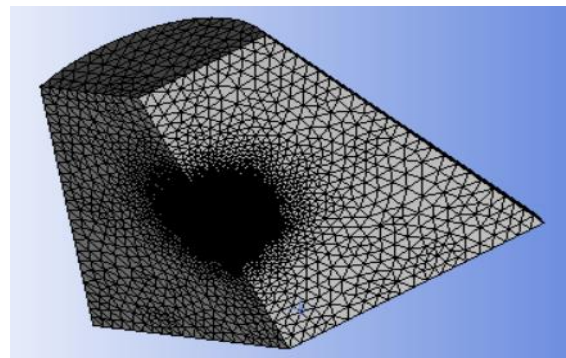
	Por defecto	Con zona de influencia
<b>No. de nodos</b>	62060	252955
<b>Elementos</b>	353781	1465301



**Figura 6.** Mallado generado por defecto.



**Figura 7.** Generando zona de influencia alrededor del álabe.



**Figura 8.** Malla con la zona de influencia.

En la tabla 2, se pueden observar los parámetros más importantes a tener en cuenta para dar solución a este problema con las condiciones de frontera y métodos que faciliten la solución del mismo. Partiendo de algunos parámetros del equipo de cómputo, seleccionando un nivel de precisión doble la cual disminuye el margen de error en la solución y la cantidad de núcleos empleados para resolver el problema. Y se seleccionó el modelo viscoso K omega SST ya que como lo menciona Pabón Rojas (Rojas C. L., 2017) en base a lo expresado por (Maia, Santos Lopes, Silveira, Andrade, & Filho) y Carrizales Rodríguez quienes definen este método como lo suficientemente robusto para realizar un análisis tridimensional al tener en cuenta cizallamiento y tensiones por el intercambio de cantidad de movimiento en el volumen de control y cuya formulación para

39

el método de solución se expresa a través de las ecuaciones 1 y 2 que son similares al método estándar y la evaluación de los diferentes coeficientes se expresan en las ecuaciones de la 3 a la 10 las cuales son explicadas en diversos tutoriales web del software Ansys todo esto con el objetivo de comprender mejor la parte interna en la solución de diversos problemas (ENEAGRID, 2009).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad 1$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad 2$$

En la ecuación 3 se representan los coeficientes de difusividad efectiva que dependen del número de Prandtl para  $k$  y  $\omega$ . Además, de incorporar la viscosidad turbulenta que es calculada en la ecuación 4, en la cual la  $S$  representa la tasa de deformación y es expresada en la ecuación 5.

$$T_{(k,\omega)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{(k,\omega)}} \quad 3$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right)} \quad 4$$

$$\sigma_{(k,\omega)} = \left( \frac{F_1}{\sigma_{(k,\omega)1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{(k,\omega)2}} \right)^{-1} \quad 5$$

Los coeficientes tales como  $F_1, F_2, \Phi_1$  y  $\Phi_2$  que están expresados en las ecuaciones de la 6 a la 9.

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad 6$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad 7$$

$\Phi_1$

$$= \min \left[ \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega + y^2} \right] \quad 8$$

$$\Phi_2 = \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500 \mu}{\rho y^2 \omega} \right) \quad 9$$

Finalmente en la ecuación 10 se puede observar el cálculo de la variable  $D_\omega$  requerida en la ecuación 8.

$$D_\omega = \max \left[ 2 \rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad 10$$

Cabe resaltar que el número de iteraciones se determinó como 1500 siguiendo datos presentados por (Lachance-Barrett & Corona, 2016) sin embargo para el caso particular de esta simulación y como se puede observar en la figura 9 converge después de las 300 es por esta razón que se trabajó con número de iteraciones entre las 350 y 400 en algunos casos esto para generar el menor gasto computacional.

**Tabla 2** Condiciones de operación.

Parámetro	Selección
Precisión	Doble
Núcleos de procesamiento	Tres en paralelo
Modelo Viscoso	K omega SST
Fluido	aire estándar
Velocidad rotacional	-56 rad/s
Velocidad eje x entrada y alrededores	0 m/s
Velocidad eje estrada y alrededores y	0 m/s
Velocidad eje z entrada y alrededores	-6 m/s
% de Turbulencia	5%

Razón de turbulencia-viscosidad	10
Presión	1 atm (atmosfera)

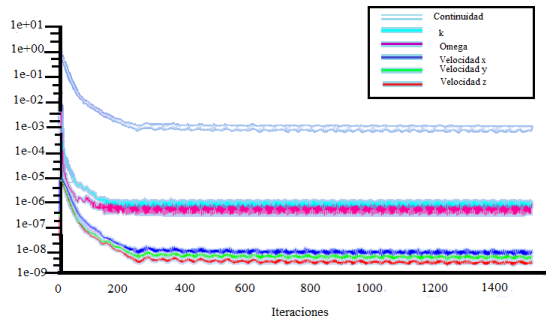


Figura 9. Número de iteraciones empleadas para convergencia de la solución.

### 3. Resultados

En las figuras 10 y 11 se observan los vectores velocidad y presiones sobre el álabe respectivamente.

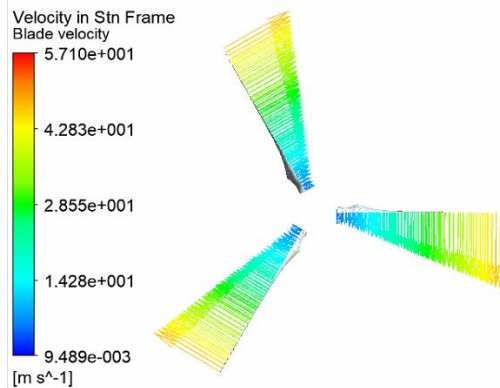


Figura 10. Vectores velocidad sobre el álabe.

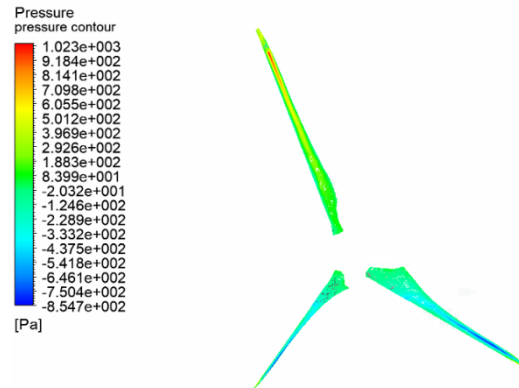


Figura 11. Número de iteraciones empleadas para convergencia de la solución.

Se calculó el torque generado por el aerogenerador con ayuda de Ansys el cual arrojó un valor de 1.4989 N\*m con ayuda de ecuaciones presentadas por HBM y basado en libros de mecánica de fluidos en la medición de la potencia en un aerogenerador presentada en la ecuación 11 (Schicker, 2012) (Çengel & Cimbala, 2006).

$$P = T * \omega \tag{11}$$

Donde P es la potencia generada en Watts T es el torque dado en newton por metro y  $\omega$  es la velocidad angular en radianes por segundo del aerogenerador al reemplazar los datos queda:

$$P = 1.4998(N * m) * 56 \left(\frac{rad}{s}\right)$$

$$P = 83.93 W$$

Al revisar los datos obtenidos por Pabón Rojas al cual la potencia generada le dio 96.82W se calcula el porcentaje de discrepancia entre los dos valores obtenidos(DV) con la ecuación 12.

$$DV = \frac{(valor\ calculado - Valor\ referencia)}{Valor\ referencia} \tag{12}$$

Reemplazando los datos y multiplicándolos por 100 para obtenerlos en porcentaje se tiene:

41

$$DV = \frac{(83.93 - 96.82)}{96.82} * 100$$

$$DV = -13.31\%$$

Se puede observar que la potencia generada da 13.31% menor que la calculada por Pabón Rojas (Rojas C. L., 2017).

### Conclusiones

Ansys permite realizar el análisis de la potencia generada de forma más directa ya que permite calcular de forma directa el torque generado por el alabe.

Los valores obtenidos en las simulaciones dependen en gran medida del número de nodos y tamaño de los elementos. Así como, el número de iteraciones por lo que estos datos variaran en función de los perfiles aerodinámicos empleados en la construcción del álabes.

Se debe construir un modelo que permita verificar los datos obtenidos a través de las simulaciones para el perfil aerodinámico construido con los perfiles aerodinámicos de las familias WORTMANN FX 60-126, SG043 y SG042 y de esta manera verificar dichos datos.

### Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Pamplona, por su apoyo financiero al proyecto titulado “*Diseño, simulación y construcción de un prototipo de alabé para un generador eólico de bajas velocidades de viento utilizando materiales bio-compuestos con fibras naturales*”. En el marco de la convocatoria interna 2017 y desarrollado por el grupo GIMUP.

### Referencias bibliográficas.

- ANSYS. (15 de Agosto de 2018). ANSYS. (ESSS) Recuperado el 25 de Agosto de 2018
- Arenas, E. A., Florez, E. G., & Serrano, J. C. (2018). Diseño y simulación de un concentrador de flujo para aumentar la potencia eólica disponible en un aerogenerador de baja potencia. *Bistua*, 49-58.
- Baldomero, M. P. (2012). Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(1), 617-623.
- Begambre, M. y Pardo, E. (2015). Abundancia y distribución de las palomas caseras (*Columba livia*) *Bistua*. *Revista Facultad Ciencias Básicas*, 13(2), 57-62.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. ciudad de mexico: mc graw hill.
- Emeis, S. (2018). *Wind Energy Meteorology Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. cham switzerland: Springer Nature.
- ENEAGRID. (23 de 01 de 2009). *ENEAGRID GRESCO*. (ENEA - Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie) Recuperado el 12 de 08 de 2018, de <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node67.htm>
- González, F. A., & Cely, M. M. (2013). Study wind and solar potential of cucuta, norte de. *Revista Colombiana de Tecnología y avanzada*, 2(22), 27-33.





Huang, H., Sun, T., Zhang, G., Sun, L., & Zong, Z. (2018). Modeling and computation of turbulent slot jet impingement heat transfer using RANS method with special emphasis on the developed SST turbulence model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126(1), 589-602.

Lachance-Barrett, S., & Corona, E. (11 de Julio de 2016). *Cornell University*. (Confluence) Recuperado el 7 de Agosto de 2018, de <https://confluence.cornell.edu/pages/.action?pageId=262012971>

Rojas, C. L. (2017). Diseño del álabe de un aerogenerador horizontal de baja potencia. Ppamplona: Facultad de Ingenierías y Arquitectura Universidad de Pamplona.

Rojas, C. L., Flórez, E., & Serrano, J. C. (2019). Diseño del álabe de un aerogenerador horizontal de baja potencia. *Bistua*, 219-229.

Schicker, R. (2012). *International Product Manager*. HBM Test and Measurement, 1(1), 1-5.

Vega, J.S., & Rodríguez, D. F. (2016). diseño y construcción de un prototipo de aerogenerador eólico de eje vertical soportado por cojinetes magnéticos. Bogota: Facultad de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas:  
Conde Pabón  
B.Y Docente tiempo completo ocasional  
Universidad de Pamplona.  
Email:brayan.conde@unipamplona.edu.co

Recibido: Octubre 25 de 2018

Aceptado: Enero 22 de 2019

\*Para citar este artículo: Conde Pabón B.Y; Florez Serrano E.G; Serrano Rico J.C.Simulation of wind turbine blade for low power and low speed.. *Revista Bistua*.2019.17(3):34-42