

## Análisis de cargas aerodinámicas sobre el perfil estático de la hélice de una turbina eólica

CABALLERO, José\*†, RESENDIZ, Celerino y Gómez, Abdiel

*Instituto Tecnológico de Pachuca.*

Recibido Enero 5, 2017; Aceptado Marzo 8, 2017

### Resumen

El uso de la energía del viento para los aerogeneradores modernos, actualmente juega un papel importante para el diseño y eficiencia de estos equipos. Un aerogenerador capta la energía cinética del viento mediante las hélices de la turbina, someténdola a esfuerzos repetidos y deformaciones. A fin de saber, los límites que no puede sobrepasar un aerogenerador de alta potencia durante su funcionamiento y a lo largo de su ciclo de vida, es básico analizar el comportamiento de las cargas aerodinámicas inmersas a lo largo de su superficie. Las causas de todas las fuerzas que actúan sobre una turbina, son atribuibles a los efectos de las fuerzas aerodinámicas, basándonos de esto, surge el interés de analizar, el comportamiento aerodinámico sobre las hélices de una turbina eólica moderna capaz de generar 1.5 MW de potencia. Mediante la simulación por computadora, utilizando herramientas de mecánica de fluidos (CFD). Se determinó las cargas aerodinámicas y parámetros necesarios, con el fin de proponer diseños óptimos de turbinas eólicas, aumentar su eficiencia aerodinámica de la hélice. Se persigue mejorar la producción específica de energía de los aerogeneradores disponibles en el mercado. Obteniendo, las líneas de corriente del fluido y la presión que afecta directamente el rendimiento del álabe.

**Aerogenerador, CFD, Cargas Aerodinámicas**

### Abstract

The use of wind energy for modern wind turbines now plays an important role in the design and efficiency of these equipments. A wind turbine captures the kinetic energy of the wind through the propellers of the turbine, subjecting it to tensions and repeated deformations. In order to know the limits that a high power wind turbine can't overcome during its operation and throughout its life cycle, it is fundamental to analyze the behavior of its aerodynamic loads over its entire surface. The causes of all the forces acting on a turbine are attributable to the effects of the aerodynamic forces, on the basis of this, increase the interest of analyzing the aerodynamic behavior in the propellers of a modern wind turbine of 1.5 MW of power. Using computer simulation, using fluid mechanics (CFD) tools. Aerodynamic loads and parameters were determined to propose optimal designs of wind turbines to increase the aerodynamic efficiency of the propeller. The objective is to improve the specific energy production of wind turbines available in the market. Obtaining, flow lines and fluid pressure that directly affect blade performance.

**Wind turbine, CFD, Aerodynamic loads**

**Citación:** CABALLERO, José, RESENDIZ, Celerino y Gómez, Abdiel. Análisis de cargas aerodinámicas sobre el perfil estático de la hélice de una turbina eólica. Revista de Ingeniería Mecánica 2017, 1-1: 58-64

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: J1cl\_itp2988@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

El abastecimiento de energía, se ha convertido en un elemento vital para el crecimiento de las economías de la mayoría de los países. Los altos costos de importación de hidrocarburos, y los problemas asociados al cambio climático, han impulsado el estudio de fuentes renovables y limpias para producir energía [1], siendo la industria eólica, la que se ha consolidado como la mayor productora de energía renovable a nivel mundial. Las turbinas eólicas son dispositivos aerodinámicos que extraen energía del viento para transformarla en energía mecánica o eléctrica. Para este trabajo, dentro de la gama de aerogeneradores, consideramos para su estudio una turbina eólica de eje horizontal de alta potencia. Las turbinas eólicas de eje horizontal, se clasifican en turbinas alta potencia si producen más de 1 MW [2]. Los elementos principales de toda turbina son los álabes (están ubicados en el rotor, y transforman la energía cinética del viento en energía mecánica al eje de la turbina), un generador de energía eléctrica, y una torre soporte [3]. La potencia que genera la turbina es función de cuatro parámetros: de la densidad del aire  $\rho$ , del área del rotor  $A$ , de la potencia cubica de la velocidad del viento  $V$ , y del factor de operación de la turbina  $C_P$  Ecuación(1)[4].

$$P = \frac{1}{2} \rho C_P A V^3 \quad (1)$$

La potencia generada para una determinada velocidad de viento y diámetro de rotor, es función del factor de operación  $C_P$ . El factor de operación  $C_P$  resulta del producto de tres parámetros: de la eficiencia aerodinámica de los álabes  $\eta_A$ , de la eficiencia de la transmisión mecánica  $\eta_T$ , y de la eficiencia eléctrica del generador  $\eta_E$  [5], y se pone de manifiesto en la Ecuación (2).

$$C_P = \eta_A \eta_T \eta_E \quad (2)$$

Mientras que la eficiencia de la transmisión mecánica  $\eta_T$  y del generador  $\eta_E$  tienen valores elevados, del orden del 80%, la eficiencia aerodinámica de los álabes  $\eta_A$ , suele ser del 30% a 45% para turbinas eólicas de alta potencia [5]. Este reducido valor de  $\eta_A$  es consecuencia, de las simplificaciones geométricas realizadas al fabricar los álabes, y de la falta de estudios aerodinámicos profundos para diseñarlos. El comportamiento de los dispositivos aerodinámicos, depende principalmente de los coeficientes de sustentación, arrastre y de las partes que estén en contacto con el fluido. Según como estén montadas las hélices con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que produzca el par motor con respecto a la superficie de la hélice será predominantemente la fuerza de arrastre o la de sustentación. Desde principios del siglo XX se conoce que  $\eta_A$  tiene un límite teórico máximo de 59.3% (conocido como límite de Betz) [6], aunque la práctica resulta sensiblemente menor debido a diferentes pérdidas: aquellas originadas por la geometría (perfil aerodinámico), por el efecto de punta, por el número finito de álabes (pérdidas de Schmitz), y por el cambio de dirección del viento al atravesar el rotor (pérdidas de Whirlpool) [7]. Aumentando  $\eta_A$  (lo cual implica mejorar la aerodinámica de los álabes) es posible producir más energía, sin tener que recurrir a aumentar el tamaño de la turbina, o a precisar mayores velocidades de viento [8] El objetivo de este trabajo es estudiar y optimizar la aerodinámica de los álabes de turbinas eólicas de alta potencia. Por lo tanto, en este trabajo se obtiene, mediante simulaciones con CFD, las cargas aerodinámicas, las líneas de corriente del fluido y la presión que afecta directamente el rendimiento del alabé. Ya que el flujo alrededor de un perfil alar, operando a un determinado ángulo de ataque en la región, puede ser estudiado mediante la aerodinámica [9].

## Metodología

Para este análisis, se trabaja con una turbina de eje horizontal, similar en tamaño al que usa una turbina de tipo GE 1.5XLE (Figura 1), con un rotor formado por tres álabes, ya que presentan un buen equilibrio entre la velocidad de rotación, el torque de arranque, y la distribución de cargas que actúan sobre el eje de la turbina. El alabe está hecho de un material compuesto ortotrópico (Laminado compuesto con varias capas de polímero de fibra de carbono reforzado).



**Figura 1** Aerogenerador tipo GE 1.5XLE

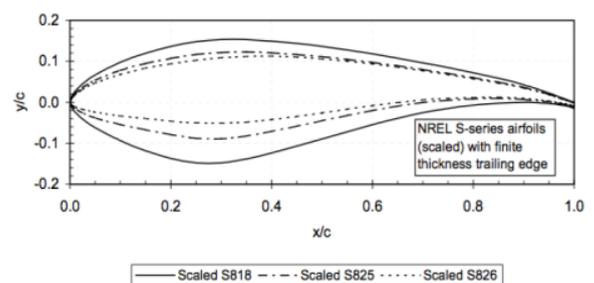
Para el método numérico, utilizamos el método del elemento finito, apoyados de un software comercial Ansys [10]. Se utilizó el modelo mediante la realización de un análisis de estado fijo de una vía FSI (Fluid-Structure Interaction)[11]. Un modelo basado en la interacción de alguna estructura móvil o deformable con un flujo de fluido interno o circundante. Las interacciones fluido-estructura pueden ser estables u oscilatorias. En las interacciones oscilatorias, la deformación inducida en la estructura sólida hace que se mueva de tal manera que la fuente de tensión se reduce y la estructura vuelve a su estado anterior sólo para que el proceso se repita.

El método de Newton-Raphson o una iteración de punto fijo diferente se puede utilizar para resolver problemas de FSI.

Estos métodos resuelven las ecuaciones de flujo no lineal y las ecuaciones estructurales en todo el dominio fluido y sólido. El sistema de ecuaciones lineales dentro de la iteración de Newton-Raphson puede ser resuelto sin conocimiento del Jacobiano con un método iterativo libre de matriz, usando una aproximación de diferencias finitas del producto vector Jacobiano. Los problemas de interacción fluido-estructura y problemas multifísicos en general son a menudo demasiado complejos para resolver analíticamente y por lo tanto tienen que ser analizados por medio de experimentos o simulación numérica.

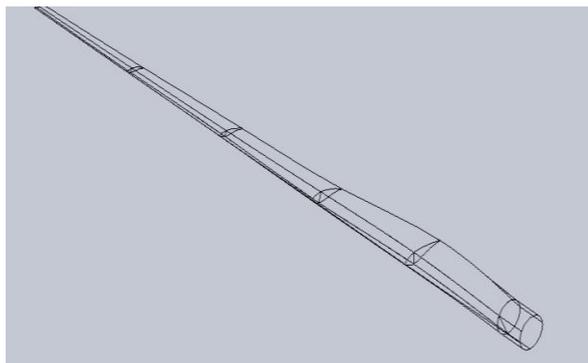
Utilizamos un modelo de turbulencia k-omega SST para cerrar el conjunto de ecuaciones. Una formulación k- $\omega$  en las partes internas de la capa límite hace que el modelo sea directamente utilizable hasta la pared a través de la subcapa viscosa, por lo que el modelo SST k- $\omega$  se puede usar como un modelo sin ninguna función adicional de amortiguación.

El modelo k- $\omega$  de SST produce niveles de turbulencia demasiado grandes en regiones de estancamiento y regiones con aceleración fuerte. Esta tendencia es mucho menos pronunciada que con un modelo k- $\epsilon$  normal. Los tres álabes son iguales, compuesto por tres perfiles diferentes distribuidos a lo largo de su superficie Figura 2.



**Figura 2** Perfiles aerodinámicos

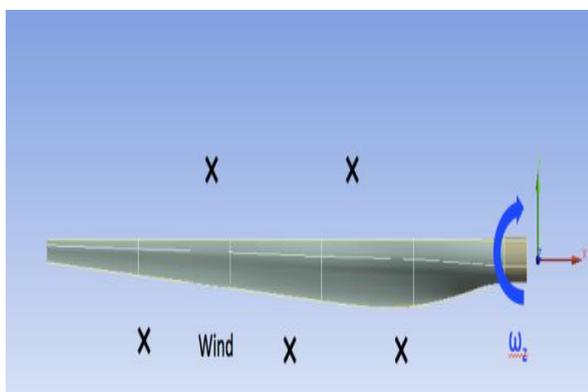
La longitud del alabe es de 43.2 metros de largo y comienza con una forma cilíndrica al inicio posteriormente pasa a la superficie de sustentación. Donde los perfiles se encuentran distribuidos de la siguiente manera de 1 a 15 metros S818, de 15 a 30 metros S825 y la punta de 30 a 43.2 metros S826 y el ángulo de paso en la punta de la pala es de 4 grados Figura 3.



**Figura 3** Perfiles aerodinámicos distribuidos a lo largo de una hélice

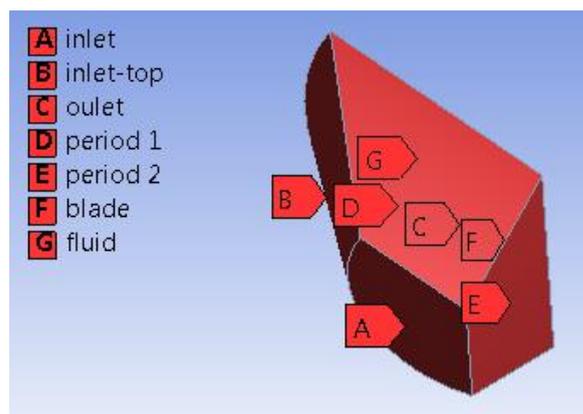
El viento turbulento fluye hacia la dirección z negativa a 11.5 m/s, que es una velocidad típica del viento nominal para una turbina de este tamaño. El flujo de entrada hace que la hélice gire a una velocidad angular de 2,22 rad/s alrededor del eje z en sentido horario Figura 4.

Se usó aire en condiciones normales a (15 grados Celsius). Su densidad es de 1.225 kg/m<sup>3</sup> y su viscosidad es de 1.7894e-05 kg / (m \* s).



**Figura 4** Viento Fluyendo hacia la dirección Z negativa.

Posteriormente, se realiza la optimización geométrica mediante simulación por computadora. Para discretizar el dominio fluido se utilizó una malla no estructurada de elementos tetraédricos. Respecto a las condiciones de contorno, se considera una entrada con velocidad de viento V (variable entre 5 y 10 m/s), densidad  $\rho = 1.2047 \text{ kg/m}^3$ , y viscosidad cinemática  $\nu = 1.45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Se utilizó una ley de pared sin deslizamiento (no-slip) para el suelo y para la columna soporte, una condición tipo opening para el dominio que rodea a la turbina, y los álabes tienen una velocidad angular que es función de la velocidad del viento. En la salida, se considera que el valor de la presión es la atmosférica. Las condiciones de contorno se presentan en la Figura 5.



**Figura 5** Representación de las caras que componen la geometría

### Modelo matemático

Las ecuaciones de gobierno son las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes (ecuaciones diferenciales parciales acopladas, no lineales y de segundo orden) restringidas a un fluido viscoso e incompresible, representan el modelo matemático más apropiado para un flujo viscoso con efectos compresibles despreciables.

Ecuación de conservación de la masa.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad (3)$$

Ecuación de la conservación de Momento de (Navier-Stokes).

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho (2\vec{\omega} \times \vec{v}_r \times \vec{\omega}_r \times \vec{\omega}_r \times \vec{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_r \quad (4)$$

Dónde

$\vec{v}_r$

Es la velocidad relativa

$\vec{\omega}_r$

Es la velocidad angular.

$$2\vec{\omega} \times \vec{v}_r \quad (5)$$

fuerza de Coriolis.

$$(\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (6)$$

Y la aceleración centrípeta

En Fluent, activamos los términos adicionales para un marco de referencia en movimiento y de entrada.

$$\vec{\omega} = -2.22 \hat{k}$$

Utilizamos la forma de continuidad y momento de Reynolds Averaged y usamos el modelo de turbulencia S-K-Omega para cerrar el conjunto de ecuaciones.

### Cálculo analítico

Un cálculo manual que podemos hacer y comparar, con nuestra simulación, es encontrar la velocidad del viento en la punta de la hélice.

$$\vec{v} = \vec{r} \times \vec{\omega} \quad (7)$$

Si la velocidad angular de  $-2,22 \text{ rad / s}$  y la longitud  $43,2 \text{ metros más } 1 \text{ metro}$  para tener en cuenta la distancia desde la raíz hasta el cubo, obtenemos.

$$\vec{v} = -2.22 \text{ rad / s} \times -44.2 = 98.12 \text{ m / s}$$

Además, utilizando la teoría del momento simple unidimensional, podemos estimar el coeficiente de potencia que es la fracción de potencia aprovechada a la potencia total en el viento para el área de barrido de turbina dada.

$$C_p = \frac{P_{rated}}{P_{wind}} = \frac{P_{rated}}{0.5 \rho A V_{rated}^3} \quad (8)$$

$$C_p = \frac{P_{rated}}{(0.50)(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(\frac{\pi(82.5\text{m}^2)}{4})(11.5\text{m/s})^3} = .30$$

### Condiciones de frontera

Modelamos sólo 1/3 del dominio completo, simulando el flujo solo alrededor de una hélice y posteriormente extrapolamos los resultados para un rotor de tres alabes. Usando supuestos de periodicidad Figura 6.

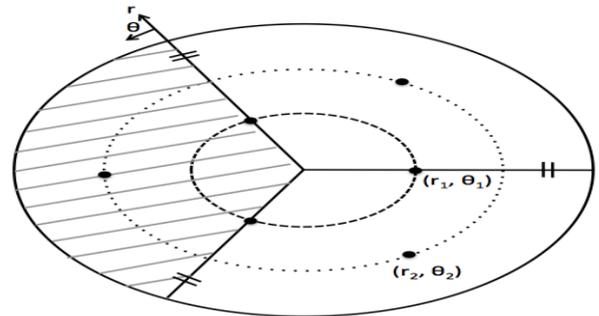
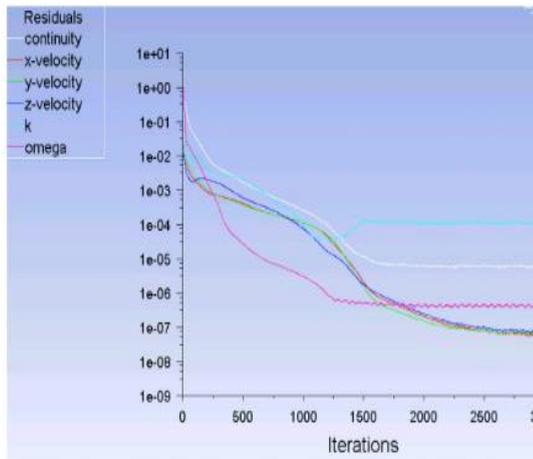


Figura 6 Representación de periodicidad

### Resultados

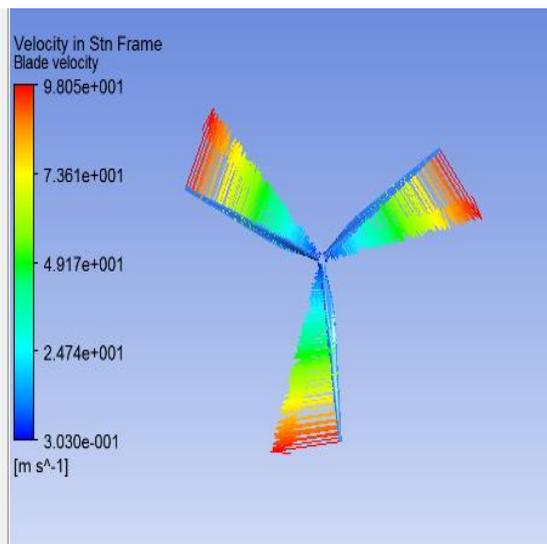
Una vez realizada la simulación, y a ver extrapolado el número de hélices. Para validar nuestros resultados, es necesario verificar el número de interacciones (es decir, si la solución convergió).

La (Figura7) muestra cómo se comporta la solución después de 3000 iteraciones. Como puede ver, los residuos no cambian mucho entre 1500 y 3000 iteraciones.



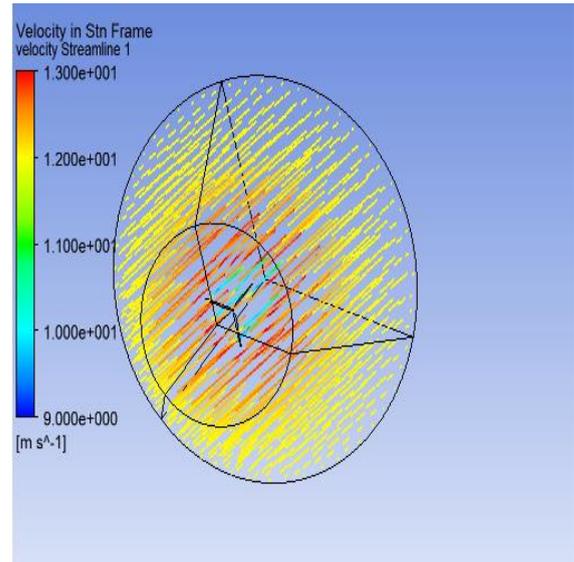
**Figura 7** Convergencia de la simulación

De los resultados la velocidad en la punta del alabe es de 98,05 m/s en CFD-Post (Figura8), si comparamos este resultado con el de la solución analítica de 98,12 m/s. Esto es básicamente idéntico.

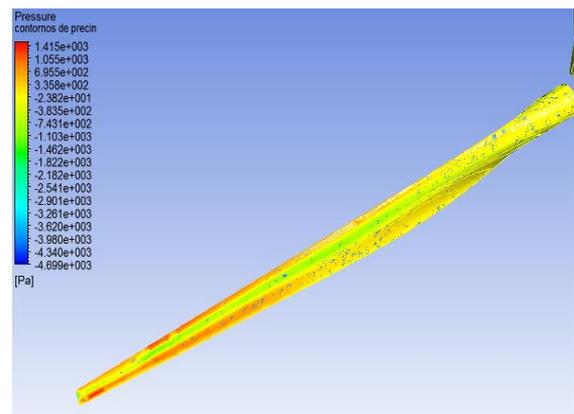


**Figura 8** Velocidad en la punta de hélices de la turbina

Ahora podemos visualizar, los resultados del comportamiento de los vectores de velocidad del flujo alrededor de la turbina Figura 9.



**Figura 9** Representación de la velocidad del flujo alrededor de la turbina

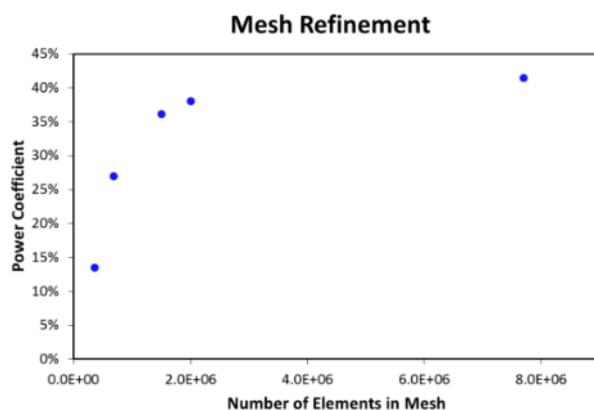


**Figura 10** Representación de la distribución de los contornos de presión

Aquí se muestran los resultados de la presión obtenidos y distribuidos sobre su superficie alar, si notamos bien la (Figura10). La máxima presión se encuentra sobre el borde de y en la punta de la hélice.

De vuelta a la solución analítica, habíamos calculado que el coeficiente de potencia es alrededor de 0.3. Como se ve en la gráfica 1, los resultados numéricos coinciden bien con este valor. El coeficiente de potencia se convierte en un 38% (Grafico 1) en comparación con el 30% de cálculos manuales.

Estos coinciden bastante bien. Si el coeficiente de potencia debe situarse bajo el límite de Betz de 59,2% para un rotor no revestido. Nuestros resultados numéricos caen correctamente por debajo de este límite.



**Grafico 1** Grafico de convergencia

## Conclusiones

El análisis se presentaron los estudios aerodinámicos preliminares que se están realizando sobre los álabes de turbinas eólicas, para mejorar la potencia específica generada, por de las cargas aerodinámicas. Las simulaciones computacionales se realizan mediante el software comercial de CFD, haciendo uso del método FSI y un modelo de turbulencia SST. Las obtenciones de los resultados son útiles y necesarios. Claro está que la hélice al estar sometida a grandes presiones, altera las propiedades físicas del equipo, disminuyendo su rendimiento al someterla a esfuerzos y deformaciones repetidos. Como consecuencia de esto el ángulo de ataque que incide sobre la fuerza resultante altera los valores entre la fuerza de arrastre y de sustentación generando ineficiencia en el equipo además de que los elementos al estar sometidos a esfuerzos repetidos pueden crear fisuras o que se rompan.

## Referencias

Ye, Z. (2017, Julio 02). La predicción de las cargas aerodinámicas del rotor de MEXICO: efectos de la cinta ZigZag y modelado de transición laminar-turbulenta en CFD. *Revista de Ingeniería Eólica y Aerodinámica Industrial*, 168, pp, 152-163.

Martin, D. (2014, Diciembre 11). El impacto de las capas estables de la frontera atmosférica sobre las campanas de las turbinas eólicas en los parques eólicos marinos. *Elsevier*, 144, 146

Thanh, T., (2015, Julio). El movimiento de lanzamiento de la plataforma de la turbina de viento marina flotante: Un análisis aerodinámico preliminar inestable. *Ingeniería Eólica y Aerodinámica Industrial*, 142, p.65

Jacobsen, M. (2007). *Palas del Rotor*. 2010, Asociación danesa de la industria eólica Sitio web: <http://www.windpower.org/es/tour/design/opt im.htm>.

GAMESA, R. (2014). *Energías eólicas*. Julio 27, 2017, de Siemens Gamesa Sitio web: <http://www.gamesa.es/>

Carol, L. (2015). *hélice de una turbina*. Agosto 03, 2016, de Ventas Wind Systems Sitio web: <http://www.ciemat.es/>

Fontal, S. (2013, Abril). *Diseño de una hélice de paso variable para el navigator X-2*. Pdf, 1, 10.

*Revista Clean Energy*. Año 4. Nro. 14. Enero 2013. ISSN 2250-401X.

*Revista Clean Energy*. Año 4. Nro. 14. Enero 2013. ISSN 2250-401X.