

Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal

MENDOZA-CERÓN, Nuria *† & RODRÍGUEZ-CASTILLO, Mario E

Instituto Tecnológico de Pachuca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Carr. México-Pachuca Km. 87.5 Col. Venta Prieta, CP 42080, Pachuca, Hgo. México.

Recibido 08 Enero, 2017; Aceptado 12 Marzo, 2017

Resumen

Con el propósito de mejorar el auto arranque de las turbinas eólicas, este trabajo se centro en diseñar una turbina de viento de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés) tipo Darrieus helicoidal. El álabe es el componente más importante de un aerogenerador ya que controla el rendimiento de una turbina y el diseño de otros componentes. El diseño del rotor consiste en tres palas con una inclinación de 47°. Para el diseño de concepto de la pala con un perfil simétrico se utiliza la teoría de BEM para el modelo analítico y software comercial ANSYS para el modelado numérico que se presenta en esta investigación. Los parámetros de diseño como solidez de la hoja, la relación de aspecto, el coeficiente de presión entre otros se determinan con el objetivo de obtener una potencia de salida de 3 kW y el diseño de la pala se analizó en condiciones de viento relativamente alto donde se determinan los valores máximos de las fuerzas aerodinámicas y centrífugas. El diseño se optimizó para alcanzar la resistencia estructural, es decir, la reducción de esfuerzos y tensiones.

Darrieus helicoidal, rotor eólico, VAWT, energía eólica

Abstract

In order to improve the self-starting of wind turbines, this work focused on designing a vertical axis wind turbine (VAWT) type Darrieus helicoidal. The blade is the most important component of a wind turbine that controls the performance of a turbine and the design of other components. The rotor design consists of three blades with an inclination of 47 °. For the concept design of the blade with a symmetrical profile, the BEM theory is used for the analytical model and ANSYS commercial software for the numerical modeling presented in this research. Design parameters such as sheet strength, aspect ratio, pressure coefficient, among others were determined in order to obtain an output power of 3 kW and the blade design was analyzed in relatively high wind conditions where the maximum values of the aerodynamic and centrifugal forces are determined. The design was optimized to achieve structural strength, i.e., reduction of stresses.

Helical Darrieus, wind rotor, VAWT, wind energy

Citación: MENDOZA-CERÓN, Nuria & RODRÍGUEZ-CASTILLO, Mario E. Diseño de un rotor eólico tipo Darrieus helicoidal. Revista de Ingeniería Mecánica. 2017. 1-2: 34-41.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: nuriamendezac@hotmail)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Hoy en día se ha buscado el desarrollo de tecnologías que sean agradables con el medio ambiente debido a los problemas presentados por la creciente contaminación y sus derivados. Los recursos energéticos comunmente empleados son el petróleo, gas y carbón sin embargo son recursos limitados con una producción costosa asimismo ayudan al incremento de la contaminación del planeta. Por ello se han buscado alternativas de producción de energía provenientes de los recursos naturales de los cuales se puedan recurrir de manera permanente sin ocasionar un impacto al ambiente.

Esto es gracias a la ausencia de producción de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Las energías renovables comparadas con la energía conveccional tienen un papel decisivo en el combate contra el cambio climático.

Entre las energías renovables se encuentran la energía eólica, geotérmica, hidroeléctrica, solar, mareomotriz entre otras aunque la principal fuente es el sol. La energía eólica ha tenido gran desarrollo debido a su bajo costo de producción.

El uso del viento como fuente de energía, ha tenido lugar desde la antigüedad, pero no fue hasta el siglo XX que incremento su utilidad. La generación de electricidad a partir de la energía eólica está aumentando rápidamente en todo el mundo sobretodo en europa, y continuará con la misma tendencia en un futuro cercano.

Por otro lado la continua búsqueda de soluciones por parte de las potencias mundiales en conjunto con otros países han decidido hacer frente a la problemática del cambio climático optando por el uso de energías renovables como

una solución benéfica.

Dentro de la gama de aerogeneradores de eje vertical, el rotor Darrieus ha sido uno con más desarrollo tecnológico. Este fue inventado por el ingeniero francés: George Jeans Mary Darrieus en 1931 en Estados Unidos. Su patente incluye dos tipos de rotores: el de palas curvas (Figura 1-A) y palas rectas (Figura 1-B) como se observa en la figura. Por sus características y condiciones de trabajo lo convierten en un rotor óptimo para la generación de energía a pequeña escala, a un bajo costo de instalación y mantenimiento relativamente fácil.

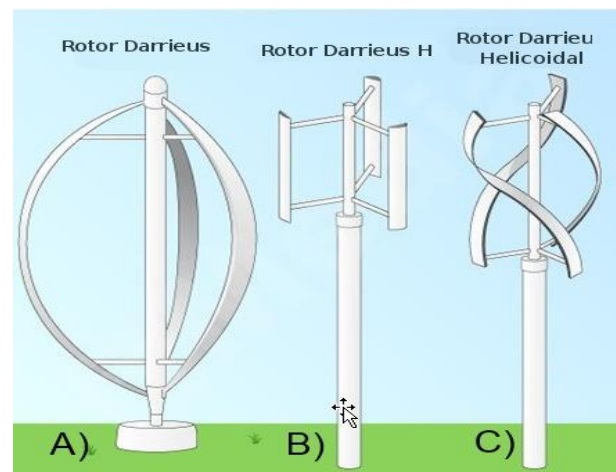


Figura 1 Generadores de eje vertical tipo Darrieus

Los rotores Darrieus de palas helicoidales (Figura 1-C) son una variante del de palas rectas pero con la ventaja de captar mejor el viento a comparación del de palas rectas debido a la curvatura que presenta álabes.

El objetivo principal de este trabajo fue, diseñar un generador eólico de eje vertical tipo Darrieus de palas helicoidales con una capacidad aproximada a los 3KW, el cual se situará dentro de las instalaciones del Tecnológico de Pachuca.

Nomenclatura

A	Área de barrido.
b	Ancho máximo del perfil.
c	Cuerda.
C_D	Coefficiente de arrastre.
C_L	Coefficiente de sustentación.
C_P	Coefficiente de potencia.
D	Diámetro del rotor.
F_D	Fuerza de arrastre.
F_L	Fuerza de sustentación.
F_n	Fuerza normal.
F_t	Fuerza tangencial.
H	Altura del rotor.
P_{turbina}	Potencia de la turbina.
P_{viento}	Potencial del viento.
V	Velocidad del viento.
$Y_{\text{Máx}}$	Deflexión máxima.
α	Ángulo de ataque.
ρ	Densidad del aire.
ω	Velocidad angular.

Metodología

Para la realización del proyecto y cumplir con los objetivos establecidos, se definieron las actividades necesarias para el diseño del rotor. La metodología establecida para la obtención del diseño del rotor se muestra en la Figura 2 y se describe a continuación.

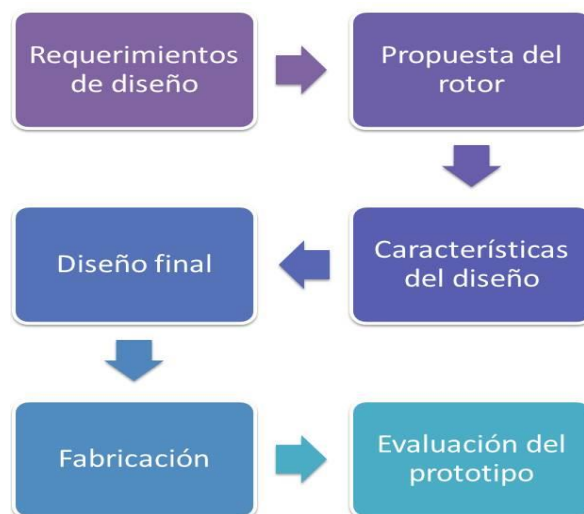


Figura 2 Metodología del diseño de rotor

Para iniciar con el diseño se deben plantear la topología del rotor además de definir la zona y condiciones de trabajo. En primer lugar este equipo será instalado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo en el Instituto Tecnológico de Pachuca. La ciudad está situada aproximadamente a 2400 m.s.n.m. lo que proporciona una densidad del fluido de trabajo de 0.967 kg/m^3 . Además de esta se deben tener presentes otras características que muestren los parámetros climáticos en la ciudad de Pachuca a los que estará sometido el prototipo durante su funcionamiento que se presentan en la Tabla 1. Estas medidas son de agosto a noviembre del 2014.

Mes	Promedio
Temp. Máx. absoluta (°C)	29.75
Temp. máxima media (°C)	21.36
Temperatura media (°C)	13.98
Temp. mínima media (°C)	6.60
Temp. Min. Absoluta (°C)	-3.00
Precipitación total (mm)	34.33
Días de precipitación (≥ 0.1)	3.50
Días de lluvia (≥ 0.1)	6.69
Horas de sol	224.52
Humedad relativa (%)	62.42

Tabla 1 Parámetros climáticos promedio en Pachuca, Hidalgo

Propuesta del rotor

Dentro de la exploración de alternativa adecuada para el diseño y fabricación del prototipo, se consideraron tres premisas, las cuales se mencionan a continuación:

- Fabricación accesible dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Diseño ecológico.
- Proceso de mantenimiento y ensamblaje sencillo.

Terminada la valoración de estos aspectos en conjunto a los requerimientos iniciales facilitaron realizar la siguiente propuesta del rotor. La opción seleccionada a desarrollar es un VAWT tipo Darrieus helicoidal por las siguientes razones:

- Varios autores han presentado estudios en el cual presenta un buen funcionamiento a comparación otros tipos de VAWT.
- Un diseño helicoidal garantiza que siempre haya una sección de la hoja en cada ángulo de ataque posible.
- El uso de palas helicoidales permite deshacerse del par pulsante que daña la vida útil del rotor.

En la siguiente imagen (Figura 3) se presenta el diseño preliminar el rotor y sus dimensiones en mm. Donde H es la altura del rotor y R es la longitud del centro del eje hasta la cuerda de la pala.

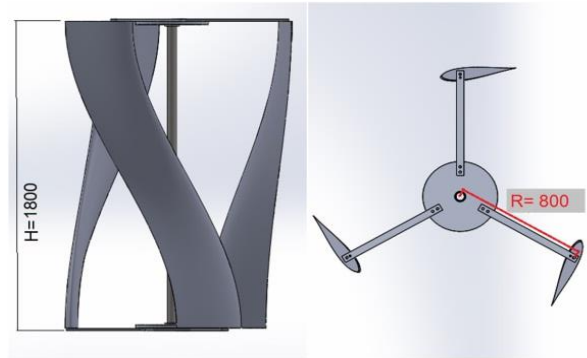


Figura 3 Propuesta del rotor

Características del diseño

Para que el diseño tenga sustento y satisficiera los requerimientos establecidos fue necesario elaborar una serie de análisis, apoyados con la realización de cálculos matemáticos, divididos en dos partes: la estructural y la aerodinámica. Una vez definidos, a continuación se describirá los análisis realizados.

Análisis estructural

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron ecuaciones de resistencia de materiales para encontrar los esfuerzos y deformaciones que actúan sobre el prototipo también se elaboraron cálculos analíticos de los componentes del rotor, considerándolos como vigas.

La ecuación (1) para el caso de una columna soportada en ambos extremos.

$$Y_{M\acute{a}x} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (1)$$

En cuanto a los otros elementos del rotor se obtuvieron deformaciones menores a los 10 mm, valores relativamente bajos atribuido a la robutez de cada parte y a la estructura interior de la paleta que le permite tener mejor soporte de carga.

Análisis aerodinámico

Una parte importante del diseño es el comportamiento que tendrá el rotor cuando este en funcionamiento y si este es adecuado a través del aire por ello se emplea un análisis aerodinámico. La forma del perfil aerodinámico tiene un gran papel ya que puede influir en la resistencia al movimiento que ejerce el aire sobre él, provocando fuerzas aerodinámicas llamadas fuerza de arrastre y sustentación que predominan en el comportamiento estructural del rotor.

Un método para tener una idea de como se comportara el rotor ante esta situación es necesario realizar practicas de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en ingles). Para la realización de estos requiere consultarse trabajos enfocados al análisis de los VAWT además de conocer algunos parámetros como:

- Tipo de turbina: Darrieus helicoidal.
- Potencia esperada: 3000 W.
- Número de Paletas: 3.

Asimismo como las características geométricas, tales como:

- H: 1.8 m.
- D: 1.6 m.
- c: 0.4 m.
- A: 2.88 m²

Estos parámetros junto con algunos más, fueron útiles para tener datos suficientes para obtener los valores como la potencia del aire, a partir de la ec. (2), así como calcular la potencia del viento.

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2)$$

Esta es la potencia máxima que se puede extraer del viento, pero de acuerdo con algunos otros parámetros como el coeficiente Lanchester-Betz para el cual, el máximo valor conocido es $C_p = \frac{16}{27}$. Con lo cual fue posible determinar la potencia general del rotor de acuerdo con la ec. (3)

$$P_{\text{turbina}} = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \quad (3)$$

En donde: $V=12$ m/s y $\rho=0.967$ kg/m³, con lo que se calculó que $P=2839.322$ W. Una herramienta útil para estos casos es el programa XFOIL, un programa iterativo para el diseño y análisis de perfiles aerodinámicos subsónicos aislados, creado por Mark Drela del MIT.

Esta compuesto por una serie de prácticas formadas por distintos repertorios de los cuales se pueden elegir de acuerdo a las necesidades o requerimientos del diseñador. Con este software se determinaron los coeficientes de arrastre y sustentación mostrados en la Tabla 2.

α	C_L	C_D	$F_L(N)$	$F_D(N)$	$F_t(N)$	$F_n(N)$
-15.6	-0.904	0.088	-1.336	0.128	33.224	-53.632
-15.2	-0.92	0.08	-1.36	0.112	4.256	-64.232
-12	-1.008	0.024	-1.488	0.04	47	51.96
-8	-0.88	0.008	-1.304	0.016	-32.792	51.88
-7.2	-0.784	0.008	-1.16	0.016	23.032	49.456
-1.6	-0.184	0.008	-0.264	0.008	11.592	4.864
-0.8	-0.088	0.008	-0.136	0.008	5.072	-3.728
0	0	0.008	0	0.008	-0.392	0
0.8	0.088	0.008	0.136	0.008	5.072	3.728
1.6	0.184	0.008	0.264	0.008	11.592	-4.864
7.2	0.784	0.008	1.16	0.016	23.032	-49.464
8	0.88	0.008	1.304	0.016	-32.792	-51.88
12	1.008	0.024	1.488	0.04	47.048	-52.024
15.2	0.92	0.08	1.368	0.112	4.28	64.344
15.4	0.912	0.08	1.352	0.12	19.584	60.888

Tabla 2 Datos obtenidos

Como complemento de los datos obtenidos se utilizaron las ecs. (4)– (7), con el fin de realizar los cálculos necesarios se pudo sacar las fuerzas presentes sobre el alabe además de comprobar la resistencia de los demás componentes.

En las cuales, realizando los análisis con la suma de todas las cargas incidentes, se obtuvieron factores de seguridad con valores mínimos de 2.

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho \omega^2 (bc) \quad (4)$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho \omega^2 (bc) \quad (5)$$

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho c H \omega^2 \quad (6)$$

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho c H \omega^2 \quad (7)$$

También se obtuvieron los gráficos de comportamiento de estos coeficientes y fuerzas. También se realizaron análisis CFD en 2D para observar el comportamiento del rotor a través con el aire como se muestra en las Figura 4 y 5, que permite visualizar el comportamiento de la velocidad y la presión ejercidas por el flujo de aire que intenta pasar a través del rotor.

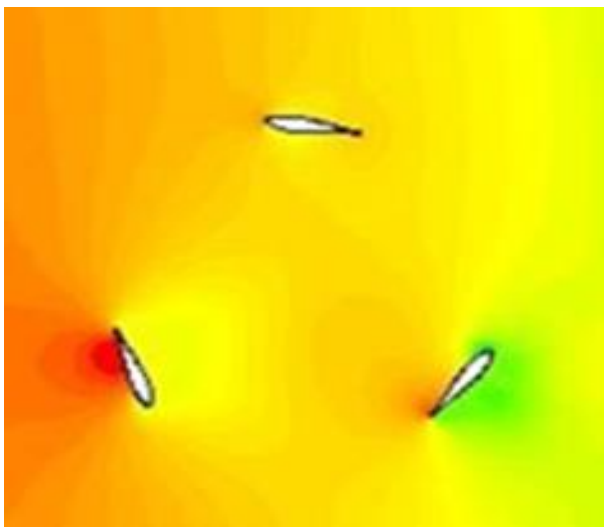


Figura 4 Contornos de presión

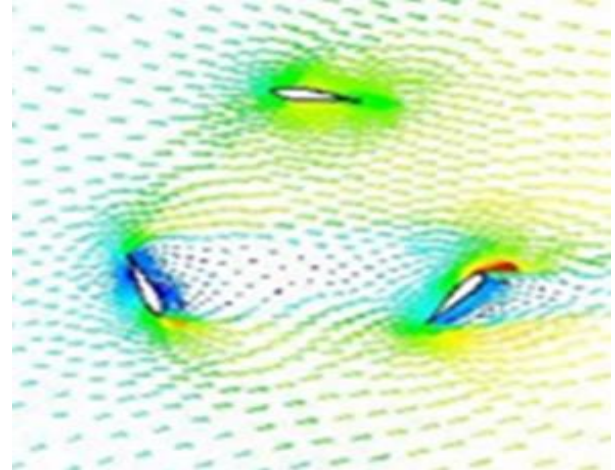


Figura 5 Vectores de velocidad

Manufactura

Para el proceso de manufactura y ensamble de las partes del rotor se examinaron las diferentes posibilidades de materiales que podrían ser útiles para la construcción del prototipo. Se tomó la decisión que el material adecuado para los diferentes componentes es el aluminio por su baja densidad y resistencia a la corrosión.

Los cálculos realizados para este material en particular, mostraron un buen comportamiento demostrando que es un material viable para lograr el objetivo. La construcción del prototipo inició con el eje y después las paletas, mostrada en la Figura 6.



Figura 6 Pala del rotor helicoidal

El ensamblaje final del rotor puede observarse en la Figura 7, en la cual se muestra el conjunto de componentes unidos y sus accesorios necesarios para la realización de las pruebas de funcionamiento.

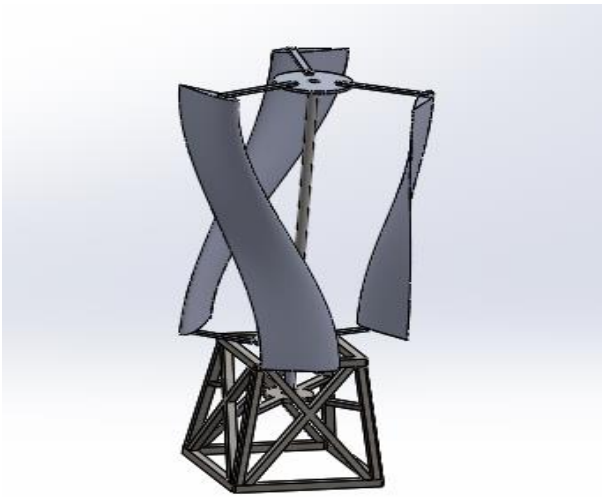


Figura 7 Ensamble final del rotor

Agradecimientos

Quiero dar mi agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante el desarrollo del proyecto. Asimismo, a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Pachuca, por la ayuda entregada en la elaboración del proyecto.

Conclusión

Con lo anteriormente desarrollado se han diseñado las partes del rotor partiendo de la mecánica de fluidos así como la mecánica de materiales, gracias al software se puede hacer una predicción de los resultados asimismo se tiene que comparar con los resultados obtenidos por medio de experimentación.

Para la evaluación del prototipo es necesario concluir la etapa de fabricación la cual aun se continúa en proceso y se espera concluirla en próximas fechas para poder realizar las pruebas dentro de las instalaciones del Tecnológico de Pachuca.

Referencias

Bos René (2012) *Self-starting of a small urban Darrieus rotor* (Master of Science Thesis), Delft University of Technology.

G. J. M. Darrieus. (1931) *Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current*.

Gorlov, A. M. (1998). *Development of the helical reaction hydraulic turbine*. Technical Report DE-FG01-96EE 15669, US Department of Energy.

J. C. Martínez Jardón, M. E. Rodríguez Castillo, C. Reséndiz Rosas, A. Gómez Mercado (2016) *Diseño de un generador eólico de eje vertical, tipo Darrieus de paletas rectas*. Memorias del XXII congreso de SOMIM, Cd. Mérida, Yucatán. México.

Marsh, P., Ranmuthugala, D., Penesis, I., & Thomas, G. (2015). *Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines*. *Renewable Energy*, pp. 926–935.

Olivier, J.G.J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M. Peters, J.H.A.W.(2014), *Trends in global CO2 emissions - 2014 report*, JRC report 93171 / PBL report 1490; ISBN 978-94-91506-87-1, Emissions Database for Global Atmospheric Research.

R. G. Budynas y J. K. Nisbett. (2008) *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* 8va Ed., México, D. F.: McGraw-Hill.