

ESTADO DEL ARTE DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL Y VERTICAL

Tobías Salas, Alfredo (1), Rubio Jiménez, Carlos Alberto (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables, Universidad de Guanajuato] | [tobiassalasalfredo@gmail.com]

2 [Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [carlos.rubio@ugto.mx]

Resumen

Estrategias para la disminución de Gases de Efecto Invernadero están siendo ampliamente discutidas. A nivel Mundial, la Energía Eólica está siendo altamente rentable para dar solución a este problema. México cuenta con velocidades de viento favorables en gran parte de su territorio que van en un rango de 5.4-8.5 m/s, lo cual produce un potencial eólico teórico de 40,000 MW. En el presente trabajo resume los diferentes aerogeneradores estudiados en la literatura a fin de determinar aerogenerador apropiado para uso residencial. Basados en su estructura, estos se pueden clasificar debido a su eje de rotación ya sean vertical u horizontal. El Coeficiente de Potencia (C_p) que presenta un sistema eólico es el principal parámetro de diseño y operación de éste. Para un sistema de eje horizontal, el C_p está entre 0.40-0.50, siendo el máximo el valor teórico dado por el Límite de Betz (0.593), Para el aerogenerador Savonius, el C_p varía de 0.05-0.30; para el aerogenerador Darrieus se tiene un C_p de 0.49; y para el rotor-H de 0.41. Aunque los aerogeneradores de eje vertical ofrecen algunas ventajas, su coeficiente de potencia aún está por debajo de los aerogeneradores de eje horizontal y necesitan un sistema de arranque para su operación.

Abstract

Currently there is a concern for global warming. Strategies to reduce Greenhouse Gases have been widely discussed. Worldwide, Eolic Energy have been reliable in order to provide a solution for this problem. Mexico has favorable wind speeds along its territory, ranging from an average of 5.4 to 8.5 m/s, leading a wind potential of 40,000 MW. The present work summarizes the different wind turbines studied in the technical literature in order to determine an adequate wind turbine system for residential use. Based on its structure, these can be classified by their rotation axis either vertical or horizontal. The Power Coefficient (C_p) of a wind system is its main design and performance parameter. For an horizontal axis system, the C_p ranges from 0.40 to 0.50, where the maximum theoretical value is given by the Limit of Betz (0.593); For the Savonius wind system, the C_p ranges from 0.05 to 0.30; for the Darrieus wind system a C_p 0.49 is available; and for the H-rotor, the C_p is 0.41. Although vertical axis wind turbines offer some advantages, their power coefficient is still below horizontal axis wind turbines and requires a starter system for their operation.

Palabras Clave

Energía Eólica; Coeficiente de Potencia; Velocidad del Viento

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una preocupación importante por el calentamiento global generado por la actividad humana; y siendo principalmente el resultado de la combustión de combustibles fósiles a fin de cubrir los requerimientos energéticos actuales, importantes discusiones han invitado al desarrollo y uso de sistemas de generación de energía que operen con recursos renovables a fin de reducir en forma parcial los índices de GEI desprendidos a la atmósfera. Una de los sistemas energéticos más atractivos son aquellos basados en el uso de energía eólica, en los cuales se transforma la energía del viento a energía mecánica para posteriormente convertirla a energía eléctrica.

En el año de 2016, China alcanzó la mayor potencia instalada con este tipo de sistemas (147,502 MW). Estados Unidos se posicionó en el segundo lugar con 81,282 MW, seguido de Alemania (45,639 MW), India (28,874 MW) y España (22,987 MW). Por otra parte, México tiene una potencia instalada de 3,527 MW, siendo el estado de Oaxaca el principal proveedor de este tipo de energía (76.8%) [1,2].

México cuenta con velocidades del viento favorables en varias partes de su territorio, variando desde 5.4 m/s hasta 8.5 m/s. La Figura 1 muestra la distribución de velocidades en el territorio nacional, así México tiene un potencial eólico de 40,000 MW, que se encuentra distribuido en la península de California, en la parte central, en la Costa del Golfo, en la Península de Yucatán y en el Istmo de Tehuantepec [3].

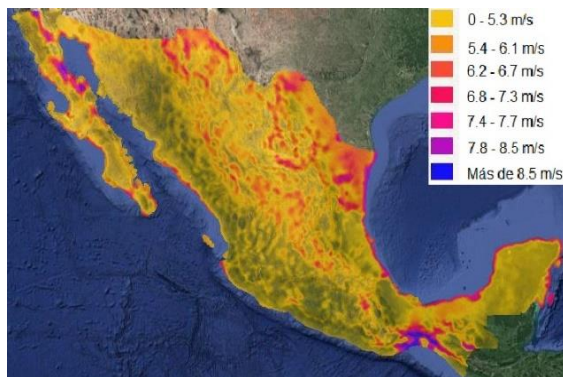


Figura 1: Velocidades del viento en México a 50 m de altura.

En forma teórica, la potencia generada por un sistema eólico está dado como:

$$P=0.5 C_p \rho A U^3$$

Donde ρ es la densidad del aire, C_p es el Coeficiente de potencia, A es el área de barrido y U es la velocidad del viento.

Ya que la densidad del aire es mucho mas baja comparada con la del agua, el cual es el fluido de trabajo de las plantas hidroeléctricas (alrededor de 800 veces); además de que muestra una dependencia inversa con la altura, el aumento de la potencia generada en este tipo de sistemas es dependiente de la velocidad del viento y el área del mismo; de ahí la razón al gran tamaño de un aerogenerador. Dependiendo de la velocidad de viento de diseño elegida, un aerogenerador de 3 MW puede tener un rotor más de 90 m de diámetro. Por otra parte, el Coeficiente de Potencia describe la fracción de la potencia disponible en el viento que puede ser convertida a trabajo mecánico por el aerogenerador; teniendo un valor máximo teórico de 0.593 (Límite de Betz). El coeficiente de potencia de un rotor varía con la velocidad de la punta (la relación de la velocidad de la punta del rotor y la velocidad del viento; que se representa por λ) y solo hay un máximo para una velocidad de punta [4].

El presente trabajo resume la información disponible sobre los sistemas de generación eólica tanto horizontales como verticales a fin de proponer, de acuerdo a sus características, el mejor sistema eólico a ser usado para uso residencial o industrial dentro de la zona urbana. Las ventajas, desventajas y los límites que puedan tener son los principales parámetros de selección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se hizo una revisión de literatura de los diferentes tipos de aerogeneradores, tanto de eje vertical como de eje horizontal, para posteriormente hacer una comparación de sus diferentes características.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a su eje de rotación, los sistemas de generación de potencia pueden ser de eje vertical y de eje horizontal (HAWT del inglés Horizontal

Axis Wind Turbine). Los aerogeneradores de eje vertical son aquellos que no tienen ningún mecanismo de orientación con respecto al viento además de no tener la capacidad de autoarranque. Como principal característica se tiene que el sistema de transformación de energía mecánica a eléctrica está ubicado en el suelo y su altura a la cual operan es muy baja, permitiendo un acceso fácil a los diferentes sistemas para su mantenimiento. A su vez este tipo de aerogeneradores se pueden clasificar en dos grandes tipos: Darrieus y Savonius. Los tipos Darrieus consta de varios alabes rectos o curvos montados en una estructura vertical. Estos aerogeneradores trabajan a partir de la fuerza de sustentación producidas durante la rotación. Por otra parte, los aerogeneradores Savonius son sistemas basados en el arrastre y consisten en dos o tres alabes. Estos aerogeneradores tienen una sección transversal en forma de “S” cuando se le observa desde la parte superior. A medida que los alabes se mueven a lo largo del viento, experimentan menos arrastre y esta diferencia en el arrastre les permite girar. Los alabes curvos del aerogenerador Darrieus son remplazados por alabes rectos que tienen una sección transversal del perfil aerodinámico vistos desde la parte superior del aerogenerador para dar una configuración de aerogeneradores de eje vertical conocida como Darrieus de alabes rectos. Pueden tener cualquier número de alabes sin embargo, generalmente tienen de dos o tres alabes. Un aerogenerador de este tipo que tiene dos alabes es frecuentemente denominado rotor-H. En la figura 2 se muestran los tres diseños de aerogeneradores de eje vertical.

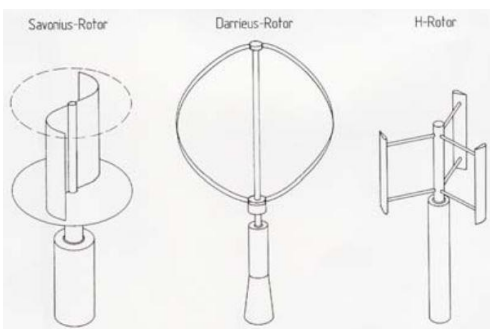


Figura 2: Conceptos de aerogeneradores de eje vertical [5].

Los aerogeneradores de eje horizontal son aquellos cuyo eje del rotor está en la posición horizontal. A diferencia de los aerogeneradores de

eje vertical, éste tiene la capacidad de autoarranque, así como un mecanismo de orientación. Estos aerogeneradores son altamente dependientes de la dirección del viento y por lo tanto son operados generalmente a alturas más altas que los aerogeneradores de eje vertical [6].

De los tres tipos de aerogeneradores se revisó el Coeficiente de Potencia, C_p , con el que cuentan a partir de diseños específicos que actualmente se encuentran en operación. Para el tipo Darrieus se consideró el sistema diseñado y Construido por el Sandia National Laboratories, el cual tiene un rotor de 34 metros de diámetro, con un área de barrido de 955 m^2 ; y opera en un rango de 28-38 rpm permitiendo una potencia nominal de 500 kW a 37.5 rpm con una velocidad de viento media de 12.5 m/s [7]. Para el caso de rotor-H, se tiene un aerogenerador de 200 kW con una velocidad de viento de 11.7 m/s , 3 alabes, 33 rpm, con radio de 13 m y los alabes miden 24 m [8]. Finalmente para el aerogenerador de eje horizontal se escogió el aerogenerador manufacturado por la empresa Norwin con una potencia nominal de 200 kW, diámetro de 29.1 m, 3 alabes y 37.6 rpm [9].

Una gran desventaja del aerogenerador Darrieus es su inherente complicación en la fabricación y transporte de los alabes curvos [10]. Los alabes de los aerogeneradores de eje horizontal deben de soportar su propio peso ya que estos están unidos al eje de rotación, mientras que los aerogeneradores de rotor-H están ensamblados a tubos de soporte que generalmente están unidos al centro de los alabes [11]. Las características generales de los cuatro tipos de aerogeneradores se presentan en la Tabla 1, en donde la diferencia más importante es que los aerogeneradores de eje vertical (Darrieus, Savonius y Rotor-H) no necesitan un control de orientación debido a su omnidireccionalidad.

El C_p del aerogenerador Darrieus tuvo un máximo de 0.490 que ocurre a una velocidad de punta de 6.34 y a una velocidad de viento 7.75 m/s , este tipo de aerogeneradores tuvieron mucho interés en la década de los 70's pero los aerogeneradores de eje horizontal obtuvieron una mayor atención debido a su eficiencia, por lo tanto no existe mucha información sobre este tipo de aerogeneradores después de esta época.

Tabla 1: Características de los cuatro tipos de aerogeneradores.

	Darrieus	Rotor-H	Savonius	HAWT
1. Control de orientación	No	No	No	Si
2. Control de direccionamiento perfil del alabe	No	Posible	No	Si
3. Torre	No	Si	No	Si
4. Cables de retención	Si	Opcionales	No	No
5. Posición del generador	En el suelo	En el suelo	En el suelo	En la góndola
6. Autoarranque	No	No	Si	Si
7. Perfil del alabe	Complejo	Simple	Simple	Complejo

En el caso del aerogenerador de rotor-H su C_p se reportó un máximo de 0.41 y para el aerogenerador de eje horizontal su C_p varía entre 0.40 y 0.50 [12]. Para el caso del rotor Savonius se revisaron varias configuraciones de este tipo de aerogenerador en donde el C_p está en un rango de 0.05-0.30 para la mayoría de las configuraciones [13].

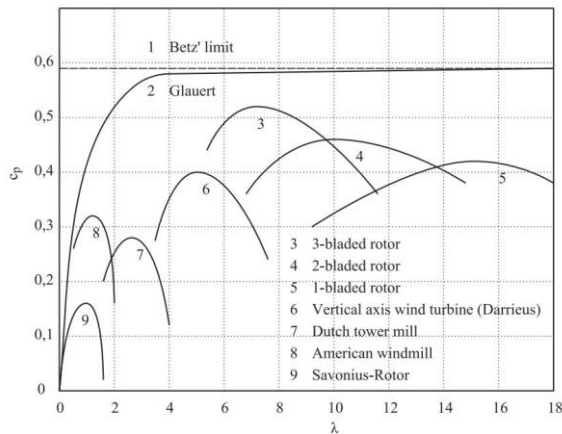


Figura 3: El C_p en función de la velocidad de punta de varios tipos de aerogeneradores [14].

Esto concuerda con la figura 3 en donde se muestran los coeficientes de potencia de los cuatro aerogeneradores y aerogeneradores clásicos como lo son los molinos de Estados Unidos y Holandés (American windmill y Dutch towermill), cabe destacar que todos los aerogeneradores tienen un C_p máximo y existen dos tipos de aerogeneradores aquellos con un C_p máximo con una velocidad de punta (λ) entre 6-10

y aquellos con un C_p máximo en un valor menor a 4. También las curvas tienden a $C_p=0$ cuando $\lambda=0$, esto fue discutido por Glauert [15]

Un parámetro que afecta a la potencia de salida en los aerogeneradores de eje horizontal es el ángulo de ajuste del paso de los alabes. Para el caso del aerogenerador Darrieus es imposible el uso del ajuste del ángulo de ataque [16]. Para este tipo de aerogenerador y para el rotor-H se utiliza un método pasivo de parada en donde el perfil de los alabes es diseñado aerodinámicamente para asegurar que la potencia capturada disminuya gradualmente a mayores velocidades del viento debido a la reducción del C_p a velocidades bajas de punta. Este tipo de control pasivo de parada elimina la necesidad de partes móviles junto con su mecanismo de control complejo [17].

El ruido de los aerogeneradores es a menudo percibido como uno de los impactos ambientales más significativos. El ruido de los aerogeneradores puede dividirse en mecánico y aerodinámico. El ruido mecánico se genera principalmente a partir de la maquinaria giratoria en la góndola, en particular la transmisión y el generador. El ruido aerodinámico tiene varias causas como: ruido de baja frecuencia, ruido de turbulencia de flujo y ruido propio de la superficie aerodinámica. El ruido de los aerogeneradores de eje vertical es menor que el del aerogenerador de eje horizontal con el mismo rendimiento aerodinámico ya que el C_p máximo puede obtenerse a menores velocidades de punta comparado con los aerogeneradores de eje horizontal [18].

CONCLUSIONES

Aunque los aerogeneradores de eje vertical ofrecen algunas ventajas como tener un perfil de alabe simple, ser omnidireccional y tener el generador en el suelo para un fácil acceso, su coeficiente de potencia aun esta debajo de los aerogeneradores de eje horizontal, más aun se necesita tener un sistema de arranque para su funcionamiento. Debido a las bajas velocidades del viento en la mayor parte de México, el uso residencial de aerogeneradores solo es conveniente en ciertas localidades y el aerogenerador de eje horizontal es el más conveniente debido a su Cp.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Guanajuato – Dirección de Investigación y Posgrado por el apoyo brindado para esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] IRENA (2017), Renewable Energy Statistics 2017, The International Renewable Energy Agency
- [2] AMDEE. (s.f) Capacidad Instalada. Recuperado el 4 de julio de 2017 de <http://www.amdee.org>
- [3] Cancino-Solórzano, Y., Gutiérrez-Trashorras, A. J., & Xiberta-Bernat, J. (2011). Current state of wind energy in Mexico, achievements and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3552-3557.
- [4] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons.
- [5] Hau, E. (2013). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer Science & Business Media.
- [6] Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indrāja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371.
- [7] Ashwill, T. D. (1992). Measured data for the Sandia 34-meter vertical axis wind turbine. Sandia National Laboratories
- [8] Eriksson, S., Kjellin, J., & Bernhoff, H. (2013). Tip speed ratio control of a 200 kW VAWT with synchronous generator and variable DC voltage. *Energy Science & Engineering*, 1(3), 135-143
- [9] Norwin. (s.f). Recuperado el 23 de julio de <http://www.norwin.dk/norwintd200kw.html>
- [10] Shankar, P. N. (1979, March). Development of vertical axis wind turbines. In *Proc. Indian Acad. Sci (Vol. 100, p. 2)*.
- [11] Eriksson, S., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2008). Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5), 1419-1434.
- [12] Muljadi, E., Pierce, K., & Migliore, P. (1998, June). Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines. In *American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998 (Vol. 3, pp. 1710-1714)*. IEEE
- [13] Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(5), 3054-3064.
- [14] Tong, W. (2010). *Wind power generation and wind turbine design*. WIT press.
- [15] Glauert, H. (1983). *The elements of aerofoil and airscrew theory*. Cambridge University Press.
- [16] Vandenberghe, D., & Dick, E. (1987). A free vortex simulation method for the straight bladed vertical axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 26(3), 307-324.
- [17] Venkatesh, G. C., & Kulkarni, S. V. (2006). Energy yield of passive stall regulated fixed speed wind turbine with optimal rotor speed. *Electric power systems research*, 76(12), 1019-1026.
- [18] Wagner, S., Bareis, R. and Guidati, G. (1996) *Wind Turbine Noise*. Springer-Verlag, Berlin