

Análisis de coeficiente de potencia C_p , coeficiente TSR prototipo turbina Eólica Savonius TURBEOL M01

Moriano, Elkin

¹Grupo de Investigación INMECNAR, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Pasto, Colombia

Abstracto - se plantea la recopilación de varias discusiones referente al rotor las turbinas tipo Savonius, seguido por el análisis de las ecuaciones que determinan los coeficientes de potencia (C_p) en comparación con la relación de velocidad periférica (*TSR - Tip Speed Ratio*). *TSR* es un valor que relaciona la velocidad del viento con el diámetro del rotor, y posteriormente el remplazo de datos en las ecuaciones, cuyos valores son tomados de la vereda Nueva Esperanza Municipio de (Mocoa Putumayo). Lo cual dará como resultado los dos coeficientes mencionados anteriormente para el prototipo TURBEOL M01.

Abstract - the collection of several discussions regarding the rotor of the Savonius type turbines is proposed, followed by the analysis of the equations that determine the power coefficients (C_p) in comparison with the peripheral speed ratio (*TSR - Tip Speed Ratio*). *TSR* is a value that relates the wind speed with the diameter of the rotor, and later the replacement of data in the equations, whose values are taken from the path Nueva Esperanza Municipality of (Mocoa Putumayo). Which will theoretically result in the two coefficients mentioned above for the prototype TURBEOL M01.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las principales comodidades de la civilización moderna es la disponibilidad de energía eléctrica en zonas residenciales, comerciales e industriales. Sin embargo, gran parte de la energía se obtiene como resultado de la quema de combustibles fósiles. Esta dependencia estrecha con combustibles como el petróleo, gas natural, carbón, entre otros ha generado altos índices de contaminación produciendo efectos perjudiciales para el planeta como por ejemplo el calentamiento global como resultado de la emisión de dióxido de carbono y dióxido de azufre de la quema de combustibles fósiles [1].

La importancia de la reducción de los gases de efecto invernadero, ha conducido a investigaciones acerca de energías renovables y sostenibles [2]. Debido a esto, las actividades de investigación y desarrollo en el campo de las energías renovables, especialmente la eólica y la solar, se han incrementado considerablemente como resultado de la crisis energética mundial y a los elevados niveles de contaminación [3].

El viento es una fuente de energía amigable con el medio ambiente que tiene potencial enorme para

satisfacer las necesidades energéticas de las personas y también para mitigar el cambio climático de los gases de efecto invernadero emitidos por la quema de combustibles fósiles [1]. Las turbinas eólicas se han venido implementando con el objetivo de cambiar la energía proveniente del viento en energía mecánica y así generar electricidad [1].

La energía eólica también se ha venido implementando como una alternativa para abastecer de electricidad a regiones y/o poblaciones en condición de vulnerabilidad [4]. De esta manera, este artículo propone un estudio del aprovechamiento de la energía eólica como una fuente limpia y renovable, con el fin de generar electricidad en la vereda “Nueva Esperanza” Municipio Mocoa (Putumayo), donde habitan familias víctimas del conflicto armado y viven en condiciones de vulnerabilidad con un limitado acceso al servicio de electricidad.

La vereda “Nueva esperanza” ha declarado 5 hectáreas de su territorio como zona de vivienda y productiva las cuales se encuentran alejadas del casco urbano. Una falencia que se presenta en este lugar, es que no cuenta con redes de electrificación y para sus habitantes es indispensable utilizar la energía eléctrica

en actividades cotidianas como alumbrado residencial y proyectos productivos, los cuales se realizan para obtener su sustento diario.

Este desarrollo pretende atacar problemáticas de tipo social, ambiental y tecnológico, mediante la generación de electricidad de energía debido a la carencia de este recurso energético, lo cual afecta negativamente la calidad de vida de los habitantes de este sector.

Debido a que en la zona donde está dirigido este estudio el viento es intermitente y alcanza promedios de velocidades que van desde 2.6m/s a 3.7m/s . Como consecuencia de las velocidades de viento relativamente bajas, se ha decidido implementar una turbina eólica tipo Savonius de eje vertical.

2. TURBINAS EÓLICAS SAVONIUS

El aerogenerador Savonius (llamado así en honor a su creador Johannes Savonius) funciona aprovechando las diferencias de presiones creadas en sus superficies (llamadas comúnmente paletas) que están en contacto con el aire [5]. En general una turbina Savonius está formada por dos o más placas semicirculares

El movimiento es generado por fuerzas producidas por el viento que actúan sobre las paletas, que son empujadas principalmente por el flujo de aire en su lado cóncavo. Las fuerzas de la corriente de viento, producen un momento resultante a lo largo del eje de rotación del rotor que hace que el sistema gire [6]. La Figura 1 muestra la disposición general de un rotor de estas características.

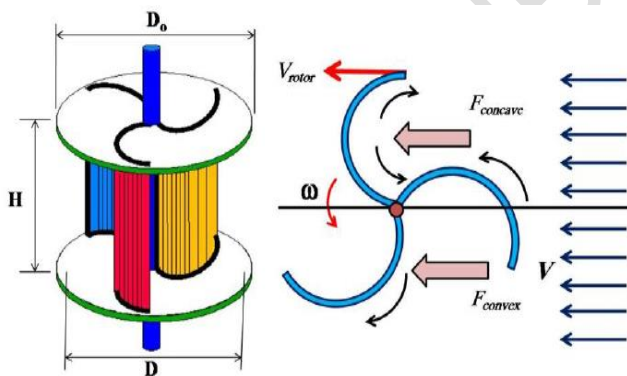


Figura 1 – Esquema general rotor Savonius [7]

En general una turbina eólica Savonius tienen muchas ventajas. Sin embargo, ofrece bajas eficiencias en la generación de electricidad debido a sus bajas velocidades de rotación. Es por esto que los estudios del comportamiento del rotor ante las corrientes de aire y realizar pruebas de diferentes configuraciones, resulta de gran importancia [3]. La razón de la baja eficiencia de las turbinas Savonius en comparación con otro tipo de turbinas puede residir en el hecho de que mientras una de las palas se mueve en dirección

contraria al viento, la otra (s) se mueven en dirección contraria del mismo [8].

Sin embargo, este tipo de turbinas eólicas son ampliamente utilizadas precisamente porque son capaces de operar a bajas velocidades del viento [9]. Para la micro-generación de electricidad, las turbinas de eje vertical pueden ser implementadas debido a su facilidad en la construcción y el mantenimiento de estos dispositivos. De esta manera, las turbinas Savonius son muy utilizadas debido a que su construcción es relativamente sencilla y económica, y su instalación no requiere mayores esfuerzos en comparación con otro tipo de aerogeneradores [2].

Las técnicas de análisis numérico, de optimización y procesamiento por software, juegan un papel importante en el análisis del rotor de las turbinas eólicas [3], con el fin de encontrar y diagnosticar posibles mejoras en el rendimiento del mismo.

Un rotor Savonius tiene entre otras ventajas bajos costos de construcción, aceptación del viento independiente de la dirección, posibilidad de múltiples configuraciones del rotor, desgaste reducido en partes móviles, momento estático y dinámico alto [10].

El desempeño de un aerogenerador Savonius puede ser expresado en términos del coeficiente de potencia (C_p) en comparación con la relación de velocidad periférica (TSR - *Tip Speed Ratio*). TSR es un valor que relaciona la velocidad del viento con el diámetro del rotor, y se expresa de la siguiente manera [1] [11]:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot d}{V} \quad (1)$$

Donde ω es la velocidad angular del rodete en campo de ($7,85 \text{ rad/seg}$) que podría ser expresada en RPM , d es el diámetro de la circunferencia que tiene la pala o la distancia desde el centro de rotación hasta la punta de la pala (0.40 m) y V es la velocidad del viento de ($4,9 \text{ m/s}$).

El coeficiente de torque es posible calcularlo de acuerdo a la siguiente expresión [1]:

Donde T es el torque entregado por el rotor ($N \cdot m$), A_s es el área proyectada del rotor (en este caso es un rectángulo de base 0.80m y altura 1.6m , es decir 1.29 m^2), ρ es la densidad del aire (se ha estimado que para la zona en cuestión es 1.15Kg/m^3).

Para determinar el coeficiente de potencia, se utiliza la siguiente expresión [1]:

$$C_p = \frac{\omega T}{\frac{1}{2} \rho A_s V^3} \quad (2)$$

Una de las ventajas de las turbinas eólicas de eje vertical con respecto a las turbinas de eje horizontal (de tipo Savonius), es que su velocidad de arranque es mucho menor que la turbina de eje horizontal. Otra ventaja de las turbinas eólicas Savonius es su facilidad de construcción y de bajo costo. De esta manera, estas turbinas eólicas funcionan a baja velocidad y el lugar de montaje no necesita estar a grandes altitudes para operar [4].

3. ANTECEDENTES

Uno de los componentes más importantes de las turbinas eólicas es el rotor. El cual ha sido objeto de estudio con el objetivo de mejorar la eficiencia y rendimiento de las turbinas. Por ejemplo, Nakajima *et al.* [12] presenta una configuración de un rotor Savonius de doble etapa para hacer un re-uso de la diferencia de presiones producida por el viento para así aumentar la eficiencia.

Tal es el caso de Driss *et al.* [8] en el cual se analizaron de forma numérica computacional diferentes configuraciones de las palas, mostrando que la geometría de las mismas forman un papel clave en el aprovechamiento de las corrientes de viento.

Las turbinas eólicas Savonius se pueden construir en diferentes configuraciones. Lee *et al.* [13] propone un estudio de un rotor Savonius helicoidal mediante el uso de dinámica computacional con el fin de encontrar el ángulo de hélice para la cual se obtiene un C_p mayor, lo que significaría una mejor eficiencia del rodete.

Por su parte Wenehenubun, Saputra y Sutanto [1] analizan el efecto en el rendimiento de las turbinas eólicas Savonius con el incremento del número de palas. Los autores realizaron pruebas experimentales con rotores de la misma relación de aspecto incrementado el número de palas (para 2, 3 y 4 palas). El resultado de su estudio, mostró que el rotor con 3 palas tiene un mejor desempeño y por lo tanto presentaba una mejor eficiencia en comparación con los otros rotores estudiados.

Otras investigaciones, por ejemplo Ferrari *et al.* [2] realizan un análisis CFD del comportamiento dinámico de una turbina Savonius de eje vertical. Lo que evalúan en este artículo, es la influencia de la relación de aspecto del rodete en el coeficiente de potencia.

Teniendo como objetivo analizar el comportamiento de diferentes configuraciones de aerogeneradores Savonius, se han Goh *et al.* [14] analiza de forma experimental y numérica un rotor Savonius de eje horizontal. El montaje experimental que proponen los autores es instalar un rotor eólico Savonius en un vehículo el cual con su movimiento genera una corriente de viento que produce una rotación en el rotor. El sistema está instrumentado de tal manera que se pueden obtener mediciones de velocidad del viento, dirección del mismo entre otros. Esto con el fin de calcular el C_p para la configuración dada y posteriormente ser comparada contra un análisis de elementos finitos usando un análisis computacional de fluidos (CFD).

Ali [7] realiza comparaciones y pruebas experimentales para estudiar el rendimiento y hacer una comparación entre turbinas eólicas Savonius de dos y tres palas. Para tal fin utilizó un túnel de viento para recolectar datos de forma experimental. En general encontró que para las condiciones de su experimento, un rodete de 2 palas presentó mejor eficiencia que un rodete de 3 palas. Sin embargo, toda configuración Savonius tiene un comportamiento diferente y hay que tener especial cuidado con la comparación entre un resultado y otro.

Mahmoud *et al.* [15] estudió experimentalmente diferentes geometrías de turbinas eólicas Savonius para determinar los parámetros de operación más efectivos. Se encontró que, el rotor de dos palas es más eficiente que otros rodetes de tres y cuatro. Esta conclusión se obtuvo realizando pruebas experimentales con rodetes de diferentes configuraciones en un túnel de viento.

Dobrev y Massouh [16] realizan un estudio para analizar por mecánica computacional de fluidos el comportamiento de un rotor Savonius de eje vertical. El análisis de flujo es utilizado para calificar el desempeño del rodete en el proceso de generación de electricidad. Adicionalmente realizaron pruebas experimentales utilizando un túnel de viento para validar la información.

Ricci *et al.* [6] estudian el comportamiento de una turbina eólica Savonius y realizan experimentos en un túnel de viento para determinar la eficiencia de un rotor con cierta geometría y así analizar la eficiencia en la generación de electricidad.

Ubando *et al.* [5] realiza un estudio utilizando dinámica de fluidos computacional de un rotor Savonius de dos palas. Analizando la dinámica del comportamiento del rotor, se observó que factores como la altura del rodete, el diámetro y el

espaciamiento entre las paletas son claves en la eficiencia.

Maldonado *et al.* [4] realizó un estudio de una turbina Savonius para determinar su comportamiento ante las corrientes de viento. Los resultados de las simulaciones mostraron que la geometría y la distancia de separación de las cuchillas aumentan el C_p aproximadamente un 20%. La distancia de separación entre las palas fue utilizada para re-direccionar el viento y ser dirigido a la superficie de la pala siguiente para inducir su rotación.

Frikha *et al.* [17] presentan un estudio de una simulación numérica computacional para evaluar el efecto de turbinas eólicas con múltiples etapas. Además, los resultados fueron comparados con resultados experimentales que demostraron que no había una alta dependencia entre el número de etapas de un rotor Savonius y el aumento en la velocidad de rotación.

Sharma [18] propone el uso de paletas adicionales adaptadas a un rotor de un aerogenerador Savonius convencional. La idea era aprovechar al máximo la energía cinética que se pierde en la zona cóncava de las paletas con el fin de aumentar el coeficiente de desempeño (COP – *Coefficient of Performance*) del aerogenerador.

Otros estudios como el realizado por Roy y Saha [9], realizan estudios del comportamiento de las corrientes de viento y el aprovechamiento sobre los aerogeneradores Savonius de forma experimental. En [9] proponen y estudian el comportamiento de un rotor de dos paletas con una geometría definida por los autores para ser comparada de forma experimental con dos geometrías de aerogeneradores Savonius comúnmente utilizadas.

Debido a la importancia y el papel que juega el rotor de las turbinas eólicas, los análisis numérico-computacionales tienen un gran impacto en el diseño de estos dispositivos. El modelado debe ser cuidadosamente realizado en un análisis CFD de un rotor Savonius según Mohamed y Thévenin [19]. Esto debido a que tienen una dependencia estrecha con el tiempo y el viento presenta un complejo comportamiento alrededor del rotor.

4. CONSIDERACIONES DEL MODELO

La vereda de “Nueva Esperanza” está ubicada al norte km 6 vía Pitalito en el Municipio de Mocoa (Putumayo).
Tiempo (temporal)



En general se han realizado varios estudios tanto experimentales, teóricos y numéricos que concluyen que cada configuración tiene un comportamiento distinto por esta razón es importante realizar unas curvas específicas de potencia y eficiencia para cada configuración de rotor [10].

5. RESULTADOS

Después de haber remplazado los valores obtenidos durante el estudio en la vereda Nueva Esperanza se procederá a remplazar en las ecuaciones correspondientes ya mencionadas anteriormente donde se obtuvieron los siguientes resultados:

(TSR - *Tip Speed Ratio*)

$$\lambda = 0,6$$

Coficiente de potencia

$$C_p = 0,33$$

6. CONCLUSIONES

Con base al resultado $\lambda = 0,6$ se puede inferir que este resultado es un punto positivo para el prototipo TURBEOL M01 el cual muestra una cercanía al valor de 0,8 correspondiente al de un aerogenerador Savonius tradicional.

Por la interpretación del resultado mostrado anteriormente También se puede concluir que este valor expresa que la turbina gira 0,6 veces mayor que la velocidad del viento nominal.

Con base a los valores obtenidos del C_p 0,33 se puede concluir que se clasifica en una máquina de alta eficiencia ya que los máximos para este tipo de máquinas se encuentran en 0,35 implementado algunas técnicas.

Bibliografía

- [1] F. Wenehenubun, A. Saputra y H. Sutanto, «An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades,» *Energy Procedia*, vol. 68, p. 297 – 304, 2015.
- [2] G. Ferrari, D. Federici, P. Schito, F. Inzoli y R. Mereu, «CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis,» *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 722-734, 2017.

- [3] S. Roy y U. K. Saha, «Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 73-83, 2013.
- [4] R. Maldonado, E. Huerta, J. Corona, O. Ceh, A. León, M. Gómez y E. Mendoza, «Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico,» *Energy Procedia*, vol. 57, p. 691 – 697, 2014.
- [5] A. Ubando, A. Maralit, K. Nyanasengeran, M. Timothy, M. Marcelino y R. Moran, «Computational Fluid Dynamics Analysis and Optimization of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine for De La Salle University Campus,» *DLSU Research Congress 2015 De La Salle University*, vol. 3, pp. 1-10, 2015.
- [6] R. Ricci, R. Romagnoli, S. Montelpare y D. Vitali, «Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems,» *Applied Energy*, vol. 161, p. 143–152, 2016.
- [7] M. H. Ali, «Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed,» *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 3, nº 5, pp. 2978-2986, 2013.
- [8] Z. Driss, O. Mlayeh, S. Driss, D. Driss, M. Maaloul y M. S. Abid, «Study of the bucket design effect on the turbulent flow around unconventional Savonius wind rotors,» *Energy*, vol. 89, pp. 708-729, 2015.
- [9] S. Roy y U. K. Saha, «Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine,» *Applied Energy*, vol. 137, p. 117–125, 2015.
- [10] J. Akwa, H. Vielmo y A. Petry, «A review on the performance of Savonius wind turbines,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, p. 3054– 3064, 2012.
- [11] R. Jha, *Wind Turbine Technology*, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [12] M. Nakajima, S. Iio y T. Ikeda, «Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hydraulic Turbine,» *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 3, nº 3, pp. 410-419, 2008.
- [13] J.-H. Lee, Y.-T. Lee y H.-C. Lim, «Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine,» *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 231-244, 2016.
- [14] S. C. Goh, S. R. Boopathy, C. Krishnaswami y J. U. Schlüter, «Tow testing of Savonius wind turbine above a bluff body complemented by CFD simulation,» *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 332-345, 2016.
- [15] N. Mahmoud, A. El-Haroun, E. Wahba y M. Nasef, «An experimental study on improvement of Savonius rotor performance,» *Alexandria Engineering Journal*, vol. 51, p. 19–25, 2012.
- [16] I. Dobrev y F. Massouh, «CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine,» *Energy Procedia*, vol. 6, p. 711–720, 2011.
- [17] S. Frikha, Z. Driss, E. Ayadi, Z. Masmoudi y M. S. Abid, «Numerical and experimental characterization of multi-stage Savonius rotors,» *Energy*, vol. 114, pp. 382-404, 2016.
- [18] S. Sharma y R. K. Sharma, «Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation,» *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 43-55, 2016.
- [19] M. Mohamed y D. Thévenin, «Performance optimization of a Savonius turbine considering different shapes for frontal guiding plates,» *Proceedings of the 10th international congress of fluid dynamics (ICFD 10)*, pp. 1-12, 2010.