

TRAZADO DE CURVAS DE POTENCIA Y RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO, DE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL Y GEOMETRÍA VARIABLE

LAYOUT OF POWER AND PERFORMANCE CURVES BASED ON THE SPEED OF THE WIND, OF A VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH VARIABLE GEOMETRY

Mario F. Bergoglio¹, Carlos G. Medaglia¹, Lucas Rodrigo¹, Javier A. Carletto¹

(1) Universidad Nacional de San Luis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Avda. 25 de Mayo 384, Villa Mercedes, San Luis – Argentina
(e-mail: mfbergoglio@unsl.edu.ar)

Recibido: 13/08/2018 - Evaluado: 31/08/2018 - Aceptado: 24/09/2018

RESUMEN

Se presenta en este trabajo las curvas de potencia y rendimiento de una turbina eólica de eje vertical con geometría variable. Este estudio corresponde a la continuación de estudios previos presentados, y tiene por objeto analizar y conocer la potencia y eficiencia obtenida por el dispositivo cuando se le aplica una carga constante, mientras varía la velocidad del viento. Los ensayos se realizaron en un túnel de viento abierto, y se obtuvieron los puntos de máxima eficiencia para las velocidades de viento analizadas. Dichos datos se compararon con los de otros prototipos recopilados en la literatura, y se concluyó que la eficiencia se encuentra levemente por debajo del promedio. Se destaca entre las conclusiones los puntos de mejora que admite el prototipo a fin de aumentar la eficiencia del mismo.

ABSTRACT

In this work power and performance charts of a Vertical Axis Wind Turbine with variable geometry, is presented. This study corresponds to the continuation of previous studies presented and aims to analyze and know the power and efficiency obtained by the device when a constant load is applied, while the wind speed varies. The tests were conducted in an open wind tunnel, and points of maximum efficiency were obtained for the wind speeds analyzed. These data are compared with those of other prototypes collected in the literature, and it was concluded that performance is slightly below average. In conclusions the improvement points of this device are emphasized to increase efficiency.

Palabras clave: Savonius, túnel de viento, curvas de potencia, rendimiento
Keywords: Savonius, wind tunnel, power charts, efficiency

INTRODUCCIÓN

El aumento en la capacidad de captación de energía a partir de fuentes renovables es objeto de constante investigación. Ya sea para aerogeneradores con aspas de cientos de metros, o bien para pequeños captadores de energía fabricados con materiales piezoeléctricos, uno de los objetivos que se persigue a través de la investigación, es en muchos casos, maximizar el proceso de captación energética (Domínguez, 2008). Estimaciones del Consejo Mundial de Energía Eólica en su reporte del 2016 indican que para el año 2030, hasta el 20% de la electricidad consumida en el mundo podría abastecerse con fuentes eólicas, totalizando 2110 Gigavatios (Sawyer & Rave, 2016).

Para ello, los principales organismos encargados de transformar la energía contenida en el viento en energía mecánica son las turbinas eólicas. Las mismas pueden ser de eje horizontal (HAWT) o de eje vertical (VAWT). Las primeras son las más extendidas y se consideran más eficientes para vientos laminares y de alta velocidad. Sin embargo, tienen una baja eficiencia cuando el viento proviene de direcciones variables. Por otro lado las segundas, poseen la gran ventaja de operar independientemente de la dirección del viento, y si bien, poseen un rendimiento inferior comparadas entre sí, estudios comprueban que poseen una eficiencia superior por unidad de superficie (Caltech, 2011).

Dentro de ellos, las turbinas tipo Savonius tienen la capacidad de comenzar a girar a bajas velocidades, de entre 2 y 3 m/s aproximadamente (Diez, 2006), alcanzando eficiencias en laboratorios de hasta 32% (Akwa *et al.*, 2012). Además, en términos generales poseen la particularidad de ser de construcción sencilla. Autores afirman que existe una tendencia generalizada a afirmar que aún no se ha generado el conocimiento suficiente que permita comprender de manera integral estos dispositivos (Diez, 2006; Damak *et al.*, 2018), por lo tanto, se han realizado estudios tendientes a aumentar el rendimiento enfocados a identificar una morfología óptima, tratando de optimizar parámetros geométricos como el tamaño del rotor, el índice de superposición, el índice de separación entre palas, el número de palas y el cambio de perfil de estas (Damak *et al.*, 2018). De igual manera, se afirma que el estudio de las aspas de estos rotores son un campo de investigación promisorio y sobre el cual debe generarse conocimiento (Zemamou *et al.*, 2017). Con base en ello, se han llevado a cabo investigaciones en las cuales se proponen, por ejemplo, realizar un estudio sobre el número ideal de aletas. Sobre esto se afirma, entre otras cuestiones, que una turbina de viento con 4 aspas, tiene un torque elevado comparado con rotores de 2 o 3 aspas (Wenehenubun *et al.*, 2014). Sin embargo, todos los modelos analizados en la bibliografía son de aspas fijas con diferentes variantes en su diseño lo que produce elevadas presiones sobre las aspas cuando éstas se encuentran opuestas al viento (Wenlong *et al.*, 2017); esto se deriva en una disminución en la eficiencia de los mismos. Por consiguiente se propone llevar a cabo el análisis de un prototipo cuyas palas se abran o cierren según la dirección de las mismas respecto del viento, considerando a la geometría del prototipo como un factor determinante en el coeficiente de potencia (Akwa *et al.*, 2012).

Conociendo la importancia de esta temática, es que en este trabajo se plantea como objetivo obtener las curvas de potencia y eficiencia de una turbina eólica de eje vertical de geometría variable (Rodrigo & Risio, 2008); entendiendo a éstas como las curvas características de todo tipo de turbina eólica. Dicho prototipo fue sometido a pruebas preliminares en un túnel de viento para determinar parámetros característicos, tales como TSR (Tip-Speed-Ratio) y potencia como función de la carga aplicada al mismo, y presentados en un trabajo previo de esta revista (Bergoglio *et al.*, 2017). Con base en ello se pretende, continuar con el estudio de la misma, y ampliar el análisis de su desempeño, comparándola además con otros modelos ampliamente estudiados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de abordar la metodología empleada se comenzará con una breve descripción del modelo desarrollado y estudiado, como así también del método de ensayo, el cual se encuentra basado en la norma internacional IEC 61400-12-1 (2005).

Descripción del prototipo

El dispositivo desarrollado fue descrito con mayor detalle en Bergoglio *et al.* (2017). Sin embargo, se considera de relevante realizar una breve descripción que resalte las principales características constructivas, con el fin de lograr una mejor comprensión del presente trabajo.

El dispositivo posee un cuerpo que consta de dos partes, una base y un rotor, unidos entre sí por medio de un eje vertical de 0,65 [m] de altura y 0,02 [m] de diámetro, con capacidad de giro, cuya función, además de unir estas dos partes, es transmitir la energía adquirida del viento.

El rotor es un cuerpo de 0,21 [m] de alto conformado por dos discos horizontales de 0,15 [m] de radio, paralelos entre sí, entre los cuales se ubican 8 palas o aspas curvas que poseen la capacidad de modificar su ángulo de apertura en función de la dirección del viento, conformando un sistema de geometría variable que permite aprovechar el caudal de viento con su máxima apertura cuando este impacta en su parte frontal. A su vez, dichas palas se cierran completamente luego de haber realizado un giro de 180° respecto al eje del molino, cuando el viento impacta en su parte posterior, de manera de adaptar la geometría del rotor y reducir la presión (Wenlong *et al.*, 2017) en las aspas que se encuentran contrarias al viento, evitando así una disminución de la velocidad de giro del mismo. La base del molino, es un cuerpo estático conformado por dos discos de diferente tamaño paralelos entre sí y unidos por tres varillas roscadas, cuyo objetivo es otorgar rigidez estructural a todo el conjunto, mientras el rotor transforma la energía del viento en energía mecánica, y la transfiere a través del eje antes mencionado. Lo descrito anteriormente se puede ver con claridad en Figura 1.

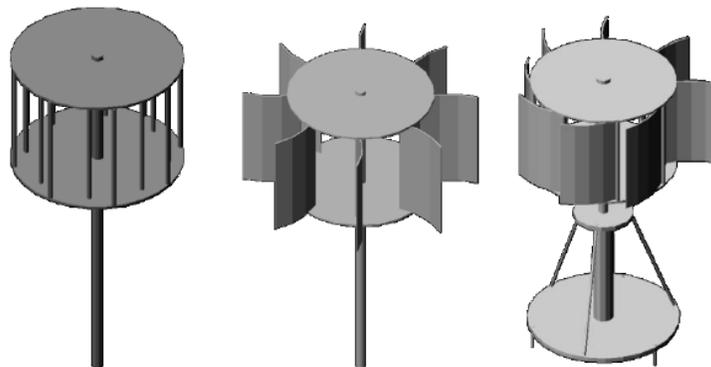


Fig. 1: Renderizado del prototipo de turbina construido.

Descripción de los ensayos

Para la realización de los ensayos, se contó con un freno por corrientes parásitas marca BIM (Figura 2.c), formado por 14 pares de polos magnéticos concéntricos, solidarios a un eje que se traslada longitudinalmente, y cuyo par antagónico es a través de una barra de torsión y una cupla máxima de 2 [Nm], además de un anemómetro marca LUTRON modelo AM-4206M, un tacómetro marca PROVA, modelo RM-1501. Estos instrumentos permitieron leer en simultáneo la cupla resistente aplicada, la velocidad del viento y la velocidad de rotación. Los ensayos se realizaron en el túnel de viento de la facultad (Figura 2a y 2b), bajo las siguientes condiciones ambientales:

- Temperatura: 23°C
- Presión atmosférica: 957 hPa,
- Humedad relativa: 34%
- Densidad del aire: 1,12 kg/m³.

En este sentido, no es necesario realizar normalizaciones de datos, ya que los ensayos se realizaron en períodos cortos de tiempo, por lo tanto, no es factible el cálculo de temperatura y densidad de aire promedio cada 10 minutos, como hace referencia la norma IEC 61400-12-1 (2005) en el apartado 8.1.

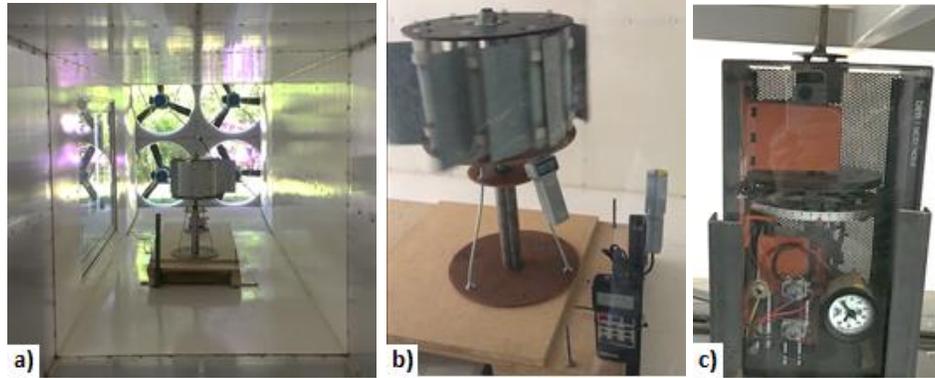


Fig. 2: a) Prototipo montado en el túnel de viento. b) Captura del prototipo en funcionamiento. c) Freno por corrientes parásitas acoplado al aerogenerador.

Procedimiento de ensayo

Los ensayos se realizaron a través de la variación de la velocidad del viento del túnel, al tiempo que se aumentaba la cupla resistente por medio del freno magnético, y se obtenían datos de cupla, velocidad angular del rotor, y velocidad de viento de forma simultánea.

En esta oportunidad, con la información proporcionada por los ensayos fue posible realizar el trazado de curvas de potencia en el eje en función de la velocidad viento, lo que resulta un complemento al trazado de curvas de potencia en función del torque realizados en el trabajo anterior (Bergoglio *et al.*, 2017).

La potencia captada por la turbina es llamada potencia del viento, y fue determinada a través de la siguiente ecuación, a partir del área interna del curvado cóncavo de un aspa cuando la misma se encuentra directamente perpendicular al flujo de aire, considerando una densidad del aire ($\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$).

$$P_v = \frac{1}{2} * A * \rho * u^3 \quad (1)$$

A su vez, el valor de área de cada aspa es:

$$A = l * a = 0,2 [m] * 0,1 [m] = 0,02 [m^2] \quad (2)$$

Por su parte, la potencia de salida que otorga el molino en el extremo del eje, se determinó a través de la siguiente ecuación, tomando como dato los resultados de cupla y velocidad angular obtenidos a través de los ensayos en el túnel de viento previamente descritos.

$$P_n = Q_a * \omega \quad (3)$$

Los valores de potencia mecánica en el eje del dispositivo, obtenidos para los distintos puntos de ensayo, se presentan en la Tabla 1. Cabe destacar que esta potencia será considerada como la potencia de salida del dispositivo, y como tal, utilizada para medir la eficiencia del mismo, ya que este no cuenta con ningún sistema de generación eléctrica acoplado sobre el que se puedan realizar ensayos y de esa manera considerar también las pérdidas eléctricas que sufriría todo el conjunto.

Además, se determinaron los valores de rendimiento para los distintos puntos ensayados y se elaboraron las curvas correspondientes en función de la velocidad del viento, como la relación de los valores de potencia en el eje (potencia de salida) y potencia del viento (potencia de entrada) como se muestra a continuación:

$$\eta = \frac{P_n}{P_v} \quad (4)$$

Considerando los resultados obtenidos y posteriormente tabulados (Tablas 1 y 2), se procedió a realizar los gráficos de potencia y rendimiento en función de la velocidad del viento (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicando los procedimientos previamente detallados, se obtuvieron los siguientes resultados para la Potencia de Salida (Eje del dispositivo), mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1: Potencia en relación a la Velocidad del viento.

Torque [N*m]	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,2	0,25	0,3	
Viento [m/s]	P_1 [W]	P_2 [W]	P_3 [W]	P_4 [W]	P_5 [W]	P_6 [W]	P_7 [W]	P_8 [W]	P_9 [W]	P_v [W]
5,20		0,60								1,72
6,40	0,13	0,21	0,29	0,36						3,21
8,50	0,24	0,45	0,49	0,56	0,62					7,52
10,50	0,31	0,60	0,89	1,16	1,43	1,68				14,18
12,60	0,36	0,72	1,06	1,34	1,64	1,95	1,99			24,50
13,40	0,42	0,84	1,23	1,62	1,99	2,36	3,06	2,62		29,47
15,10	0,48	0,94		1,83		2,58	3,35	4,06		42,18
18,40	0,56	1,10		2,13		2,98	3,85	4,71	5,59	76,31

Del trabajo realizado, se observó cuál es el punto de potencia máxima que genera el dispositivo, para las velocidades de viento evaluadas. El mismo es de 5,59 [W] y se encuentra dentro del rango de valores previsible para una velocidad de viento 18,4 [m/s] y torque máximo de 0,3 [N*m]. Con base en ello se determinaron los valores de rendimiento para las velocidades de viento y cuplas analizadas, las mismas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Rendimiento en relación a la velocidad del viento.

Torque [N*m]	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,15	0,2	0,25	0,3
Viento [m/s]	η_1 [%]	η_2 [%]	η_3 [%]	η_4 [%]	η_5 [%]	η_6 [%]	η_7 [%]	η_8 [%]	η_9 [%]
5,20		34,96							
6,40	4,08	6,69	9,05	11,25					
8,50	3,17	5,99	6,47	7,38	8,24				
10,50	2,20	4,21	6,26	8,20	10,08	11,85			
12,60	1,49	2,93	4,33	5,47	6,68	7,95	8,12		
13,40	1,42	2,84	4,18	5,51	6,75	7,99	10,37	8,88	
15,10	1,13	2,23		4,35		6,11	7,95	9,62	
18,40	0,73	1,44		2,79		3,91	5,05	6,18	7,33

Analizando la tabla precedente, es decir evaluar cuando se aprovecha la energía del viento de forma más eficiente, se observa que este punto se obtiene a una velocidad de 10,5 [m/s] y 0,15 [N*m] de cupla en donde el rendimiento alcanza un valor porcentual de 11,85%. Este es un número no despreciable, si se considera que los aerogeneradores Savonius poseen rendimientos promedios cercanos al 23% según los prototipos analizados (Akwa *et al.*, 2012). Algunos modelos, poseen valores de rendimiento del 14%, cuya característica principal es el de poseer perfil de aspas semicircular. Sin embargo, la diferencia se hace mayor al considerar aspas retorcidas, en cuyo caso se han obtenido valores de 0,32. En otros casos, se desarrollaron variantes como el HBR (Helical Bach rotor), caracterizado por combinar un rotor helicoidal con uno tipo Bach, y cuyo rendimiento fue del 20% aproximadamente (Damak *et al.*, 2018). Cabe aclarar que en nuestro caso no se considera la primera prueba, con vientos de 5,2 [m/s], por arrojar valores iniciales de velocidad angular y torque demasiado bajos, y difícilmente aprovechables. Por otro lado, desde un punto de vista cualitativo, se observa una vibración excesiva del prototipo a elevadas revoluciones. Es decir, que existe una pérdida importante de energía causada por este fenómeno.

La tabulación de los resultados permitió gráfica las magnitudes de potencia y rendimiento, obteniendo los siguientes resultados (Figura 3a y 3b)

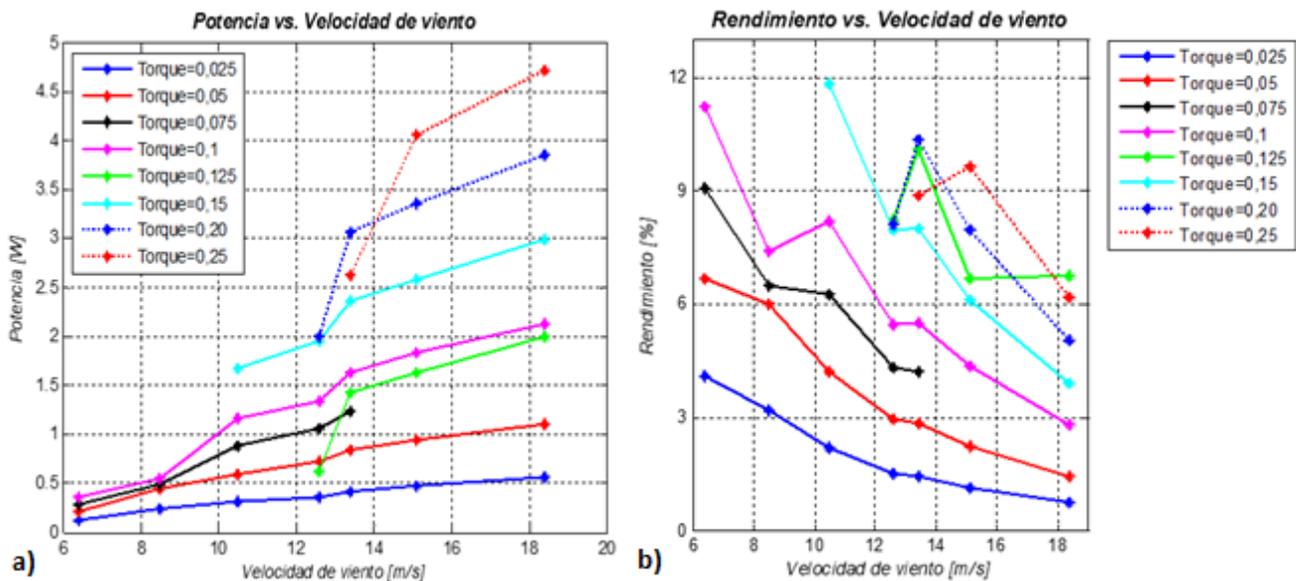


Fig. 3: Potencia (a) y rendimiento (b) en función de la velocidad de viento

Se advierte además la tendencia creciente que existe en el primer gráfico (Fig. 3a), a través del cual, a medida que aumenta la velocidad de viento, la potencia mecánica en el eje del prototipo también lo hace. Sin embargo, esto va en desmedro del rendimiento (Fig. 3b), el cual, se observa que es máximo para valores menores de velocidad de viento.

Considerando las curvas de rendimiento, se aprecia una tendencia decreciente en todas ellas, esto implica que el aprovechamiento de la potencia del viento disminuye a medida que aumenta la velocidad del mismo. Por otro lado también se observan variaciones bruscas en las curvas de rendimiento, las cuales se acentúan con el aumento de la cupla resistente; por el contrario para valores pequeños de carga, las curvas son más suaves y continuas.

CONCLUSIONES

Los ensayos, cálculos y análisis realizados posibilitaron obtener datos cuantitativos que permiten afirmar que, si bien se parte de la base de que la turbina eólica es de baja potencia, la misma presenta un buen potencial de

aprovechamiento si se considera su facilidad de construcción en relación a los otros tipos de turbinas eólicas. A su vez, la comparación de eficiencia y potencia para los distintos puntos de funcionamiento evaluados, permitió determinar como el punto de trabajo en el que se obtiene la mayor potencia no es necesariamente el más eficiente.

Por otro lado se valora positivamente el hecho de que la potencia crezca prácticamente de manera lineal con la velocidad de viento. Sin embargo el rendimiento del dispositivo decrece en este sentido, debido principalmente al aumento de oscilaciones de la estructura del prototipo. Mientras que, por otro lado, estos parámetros son más constantes y suaves para valores de carga pequeños debido a un comportamiento más uniforme del modelo. En contraste, en aquellos casos cuya carga aplicada es mayor, se evidencian los picos que se producen en las curvas de rendimiento. Esto se puede inferir que se debe a la inestabilidad en el funcionamiento del prototipo a velocidades de viento y carga elevadas.

En cuanto al desempeño del dispositivo, se destaca el golpe brusco de las palas por el aumento de velocidad del rotor lo cual ocasiona que los ciclos de apertura y cierre de las mismas no se produzca en los instantes correspondientes, produciendo pérdidas de energía.

Los resultados de eficiencia obtenidos y la comparación con otros modelos de turbinas Savonius, permiten concluir que a pesar de no encontrarse dentro de los valores más elevados, si están cercanos al rango de valores presentados en la bibliografía, y esto resulta prometedor, ya que implica la posibilidad de aplicar mejoras sobre ciertas deficiencias estructurales del prototipo que permitan mejorar los resultados. Algunos de estos aspectos apuntan directamente a reducir las oscilaciones generadas desarrollando, por ejemplo, una estructura rígida que permita absorber en mayor medida las vibraciones que se producen con la estructura actual. La misma podría evitar este efecto, aumentando el rendimiento global del sistema. Por otro lado, se debe analizar la factibilidad de diseñar un mecanismo que evite que las aspas que se encuentran en oposición al viento se abran por efecto de la inercia, lo cual evitaría la aparición de fuerzas que tiendan a frenar el rotor, principalmente a altas velocidades, como así también reducir el número de aspas del prototipo en concordancia con los prototipos de aspas fijas. Sobre esto último, se encuentra trabajando el actual equipo de investigación.

NOMENCLATURA

TSR:	Tip Speed Ratio – Velocidad de punta de aspa
U:	Velocidad del viento [m/s]
η :	Rendimiento del prototipo [%]
P_n :	Potencia mecánica (en el eje del prototipo) [W]
P_v :	Potencia del viento [W]
A:	Área de cada aspa [m ²]
ρ :	Densidad del aire [kg/m ³]
Qa:	Cupla frenante [Nm]
ω :	Velocidad angular del prototipo [1/s]

REFERENCIAS

1. Akwa, V., Vielmo, H. & Petry, P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3054 - 3064.
2. Bergoglio, M., Medaglia, C., Carletto, J. & Rodrigo, V. (2017). Trazado de curvas de potencia de una turbina eólica de eje vertical con geometría variable. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 8 (3), 13-20. <http://www.exeedu.com/publishing.cl/inicio.php?lnk=ctnd&id=401>
3. Domínguez Gómez, José A. (2008). *Energías Alternativas*. 3º edición. Ed. Equipo Sirius, Madrid, España.

4. Caltech-California Institute of Technology (2011). *Wind-turbine placement produces tenfold power increase, researchers say*. Science Daily. ScienceDaily, 17 August 2011. Sitio Web: <www.sciencedaily.com/releases/2011/07/110713092153.htm>. Consultado en Julio de 2018.
5. Damak, A., Driss, Z. & Abid, M.S. (2018). Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 174, 80-93.
6. Díez Fernández, P. (2006). *Energía Eólica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. Santander, España. Sitio Web: <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=6>. Consultado en Junio de 2018.
7. International Standard IEC 61400-12-1 (2005). *Wind Turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. 1° Edition. International Electrotechnical Commission.
8. Rodrigo, R. & Risio, M. (2008). *Molino de viento de eje vertical con geometría variable*. Trabajo Final de Carrera. Dpto. de Ingeniería. Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico-Sociales, Universidad Nacional de San Luis. Villa Mercedes, San Luis, Argentina.
9. Sawyer, S. & Rave, K. (2016). *Global Wind Energy Outlook*. Consultado, agosto 2018, desde <http://files.gwec.net/files/GlobalWindEnergyOutlook2016>.
10. Wenehenubun, F., Saputra, A. & Sutanto, H. (2014). *An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades*. 2nd International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, ICSEEA 2014 (pp. 297-304). Berlín, Alemania.
11. Wenlong, T., Zhaoyong, M., Baoshou, Z. & Yanjun, L. (2017). Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides. *Renewable Energy*, 117, 287-299.
12. Zemamou, M., Aggour, M. & Toumi, A. (2017). *Review of savonius wind turbine design and performance*. 4th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (pp. 25-29). Berlín, Alemania.