

TRAZADO DE CURVAS DE POTENCIA DE UNA TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL CON GEOMETRÍA VARIABLE

TRACKING OF POWER CURVES OF A VERTICAL AXIS WIND TURBINE WITH VARIABLE GEOMETRY

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

(1) Universidad Nacional de San Luis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Avda. 25 de Mayo 384,
Villa Mercedes, San Luis - Argentina
(e-mail: javiercarletto@gmail.com)

Recibido: 28/12/2016 - Evaluado: 03/03/2017 - Aceptado: 26/04/2017

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño y las primeras pruebas de una turbina eólica de eje vertical con geometría variable, diseñado y construido íntegramente en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis - Argentina. Los ensayos de laboratorio, tendientes a conocer el comportamiento integral y determinar los valores de potencia que puede entregar el dispositivo se realizaron en un túnel de viento sometiendo al prototipo a diferentes condiciones operativas. De esta manera se obtuvieron algunos parámetros característicos de las turbinas eólicas y principalmente las curvas de potencia a viento constante para distintas configuraciones de carga. Los valores obtenidos se muestran en las curvas correspondientes, extrayéndose como principales conclusiones el valor de potencia máxima, y las gráficas mencionadas con anterioridad, lo que da un conocimiento del funcionamiento real de la turbina.

ABSTRACT

In this work the design and the first tests of a Vertical Axis Wind Turbine with variable Geometry, which was entirely designed and built in the Faculty of Engineering and Agricultural Sciences of the National University of San Luis – Argentina is described. The laboratory tests, which aimed at knowing the comprehensive performance and determining the power values that the device is able to produce, were performed in a wind tunnel where the device was subjected to different operating conditions. In this way, it was possible obtain some characteristic parameters of the wind turbine and especially built power charts with wind at constant speed and diverse loading configurations. The values obtained are shown in the corresponding curves and it is possible obtain, as main conclusions, the maximum power value as well as the graphs mentioned above, which gives an understanding of the actual operation of the turbine.

Palabras clave: turbina, viento, eje vertical, curvas de potencia

Keywords: turbine, wind, vertical axis, power charts

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las fuentes de energías basadas en hidrocarburos han sido fuertemente cuestionadas debido principalmente al alto grado de contaminación que generan; a esto se le deben sumar los procedimientos de explotación cada vez más invasivos sobre el medio ambiente lo cual trae aparejado una modificación radical en el entorno en el cual se produce la extracción, como así también no es menos importante mencionar que la mayor demanda y consumo energético registrado en el último tiempo hacen necesario incursionar en nuevos métodos que permitan obtener y generar energía eléctrica de manera más eficiente, más económica y que produzca un menor daño al medioambiente (Domínguez, 2008). Además de esto, se debe tener en cuenta la gran variabilidad en el precio internacional del petróleo, lo cual da lugar a constantes crisis en los países dependientes de esta fuente de energía, con consecuencias a escala global (Bastianon, 1994).

Frente a todo esto la energía eólica se presenta como una opción viable para posicionarse como una de las principales fuentes de energía no contaminante. Esto se comprueba por el hecho de que la capacidad instalada acumulada de energía proveniente de fuentes eólicas ha ido aumentando exponencialmente a lo largo de los años (Sawyer & Rave, 2015). A nivel mundial, China es el principal productor de energía eólica concentrando el 34% del mercado global, seguido por Estados Unidos con 17%. En Latinoamérica, Brasil se encuentra en primer lugar, mientras que Argentina aparece en cuarta posición con una participación en el global de 0,06%. Esto se traduce en una situación paradójica debido a que los vientos de la Patagonia poseen como principales características una dirección constante y velocidades elevadas y estables, cualidades que los califican como unos de los mejores a nivel mundial.

Por otro lado, en lo que respecta a los aerogeneradores de eje vertical, si bien actualmente se considera una tecnología en desuso, existe una tendencia generalizada a afirmar que aún no se ha generado el conocimiento suficiente que permita comprender de manera integral estos dispositivos (Díez, 2006). Es por ello que en los últimos 5 años se ha reflatado la idea de avanzar en este aspecto, avalado por estudios que afirman que los generadores de eje vertical son más eficientes por unidad de superficie que sus pares de eje horizontal. (Caltech, 2011)

Motivado por todo esto es que se pretende desde la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, desarrollar tecnología que trabaje con energías limpias, y que reduzcan al mínimo el impacto ambiental. Y es en este marco en el cual se han estudiado y fabricado prototipos orientados al aprovechamiento eficiente de las energías alternativas, principalmente solar y eólica. Uno de ellos es el molino de viento de eje vertical con geometría variable, el cual es una variante de los aerogeneradores tipo Savonius, y se presenta como una alternativa viable frente a los de aspas fijas. El mismo se construyó en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias dentro del proyecto de Investigación "Extracción de agua a profundidad mediante energías alternativas, solar y eólica" (Rodrigo & Risio, 2008).

METODOLOGÍA

En esta apartado se presenta la información relevante del prototipo como así también los ensayos que se le realizaron y finalmente el análisis de los resultados y las principales conclusiones. Es importante remarcar la constante consulta a la norma Internacional IEC 61400-12-1 (2005), la cual se toma como referencia a fin de otorgar validez a los ensayos.

Descripción del prototipo

El dispositivo fabricado está conformado por dos partes, un rotor y una base unidos entre sí a través de un eje vertical con capacidad de giro. El rotor del prototipo, ubicado en la parte superior del mismo, consta de dos discos paralelos de 0,15 m de radio entre los cuales se encuentran las 8 aspas o palas de sección rectangular de 0,10 x 0,20 m. El diseño curvo de las mismas permite que el giro del rotor sea siempre en sentido antihorario,

considerando una vista superior, independientemente de la dirección con que circule el viento. Por otro lado, cada una de las aspas se une en uno de sus extremos a ejes verticales colocados entre los discos, los cuales le ofrecen a estas la posibilidad de girar libremente en un ángulo máximo de 80°. Dicha limitación de su desplazamiento angular se logra con la presencia de ocho limitadores conformados por varillas roscadas de 1/8", paralelas a los ejes de rotación de las aspas, y al igual que estas, sujetas entre los discos superior e inferior. Con esto se consigue evitar un movimiento de rotación completo de las palas, lo cual produciría un funcionamiento inadecuado del mismo, debido a la colisión de cada aspa con las que se encuentran a ambos lados de la misma, reduciendo el rendimiento general del dispositivo, y generando un movimiento aleatorio del mismo. Los ejes de cada aspa se apoyan en pequeños rodamientos axiales que permiten un movimiento con rozamiento mínimo. De esta manera cada aspa posee dos movimientos de rotación, uno respecto al eje vertical propio (el cual se encuentra limitado), y otro que poseen respecto al eje de rotación central del dispositivo. El conjunto descrito anteriormente conforma el rotor del prototipo, posee una altura de 0,21 m y es el encargado de captar la energía cinética del viento, y transformarla en energía mecánica de rotación en el eje vertical principal del prototipo. En la Figura 1, se pueden observar en detalle, lo mencionado precedentemente.

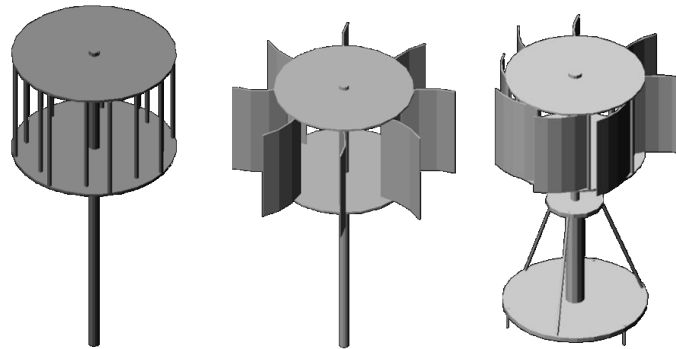


Fig. 1: Renderizado del prototipo de turbina eólica

Ambas partes, rotor y base se encuentran unidas entre sí y atravesadas por un eje de transmisión que posee una longitud de 0,65 m, un diámetro de 0,02 mm y cuyo objetivo es entregar un movimiento de rotación en la parte inferior del prototipo que pueda ser aprovechado para diversos usos, entre ellos, la generación de energía eléctrica a través de la conexión del mismo a través de un sistema de transmisión de engranajes o bien correa-polea a un alternador. Este eje posee en la parte superior y media del mismo un roscado con el fin de sujetar los dos discos del rotor a través de tuercas, de manera que al ser solidarios se pueda transmitir el giro de los discos a dicho eje.

La parte inferior del eje va colocado en el interior de un caño camisa de longitud 0,25 m, en cuyos extremos se encuentra un par de rodamientos rígidos a bolas lo que permite el giro del conjunto rotor-eje, sin que el mismo sea transmitido a la base la cual debe permanecer fija para ofrecer la estabilidad necesaria a todo el conjunto.

La segunda parte del cuerpo del molino, se encuentra también conformada por dos discos, uno superior de 0,15 m de diámetro y otro inferior de 0,3 m de diámetro, vinculados entre sí a través de 3 varillas roscadas de 1/4", las cuales sujetan el caño camisa, sin que exista contacto directo entre éstos y el eje de rotación. Esta base no posee movimiento alguno debido a que su objetivo es el de ofrecer un apoyo sólido que soporte el rotor del prototipo, y permita transmitir el movimiento del eje a la parte inferior.

El extremo inferior del eje principal fue pensado para que se le anexe un sistema de transmisión que se acople a un alternador o generador de CA. Sin embargo, para el presente proyecto se instaló en dicho lugar un adaptador de fabricación propia que permitía acoplar al prototipo un freno magnético para realizar las pruebas pertinentes.

En la Figura 2, se muestran las imágenes del dispositivo construido.

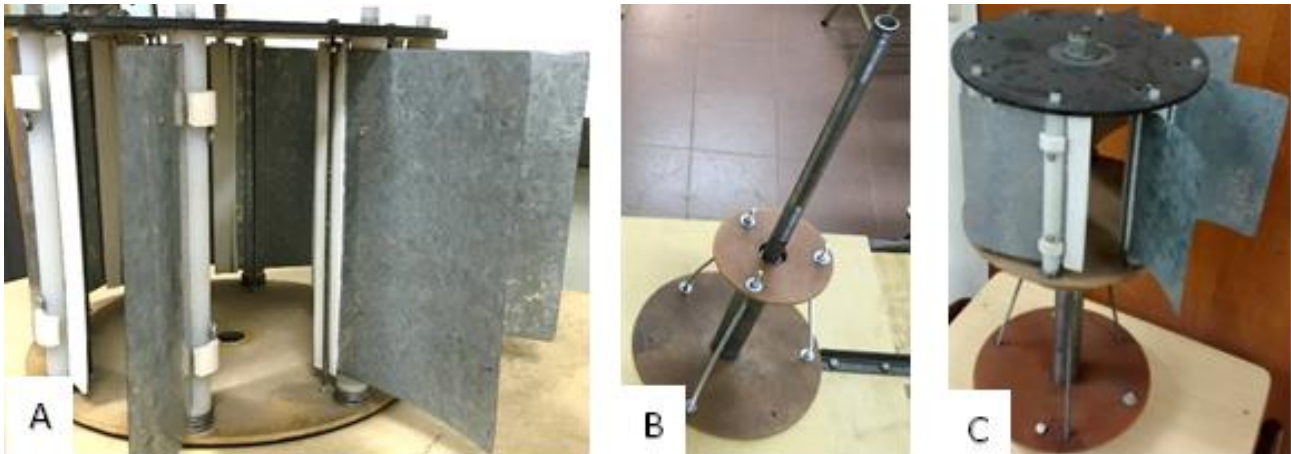


Fig. 2: Fotografías del prototipo construido - A) Rotor, B) Base con eje principal, C) Prototipo ensamblado

Procedimientos del ensayo

Una vez construido el dispositivo, se dio comienzo a la etapa de pruebas y ensayos. En primer lugar se realizó un ensayo preliminar para corroborar el comportamiento del mismo en diferentes situaciones de viento a la que podía ser sometido, para luego realizar pruebas puntuales que nos permitieran obtener los datos buscados. Estos últimos se basaron en la norma IEC 61400-12-1 Power performance measurements of electricity producing wind turbines; se realizaron en un túnel de viento y los datos fueron tomados con la ayuda de un anemómetro de copas (a fin de dar validez al ensayo, cumplimentando con uno de los requerimientos de la norma), un tacómetro y un freno por corrientes parásitas, empleado en la medición de torque, velocidad de rotación y consecuentemente potencia de máquinas eléctricas rotativas.

Cabe destacar que la norma citada con anterioridad hace hincapié en pruebas realizadas sobre dispositivos reales y su correspondiente estudio de factibilidad de instalación de los mismos. Debido a esto, se deben realizar estudios estadísticos relacionados al cambio de estado del viento, como velocidad y dirección; mientras que en el caso que compete a este trabajo, se llevan a cabo pruebas sobre un prototipo y dentro de un túnel de viento, por lo que este tipo de estudios serán omitidos ya que muchas de las variables son fijadas previamente.

Los ensayos se llevaron a cabo modificando la velocidad de rotación de ventiladores del túnel a través de los variadores de frecuencia (entre 0 y 50 Hz), esto último se realizó a intervalos iguales; y se tradujo consecuentemente en una variación uniforme de la velocidad de viento a la cual fue sometido el dispositivo. Paralelamente se tomaron datos de la velocidad de rotación del prototipo con el objetivo de establecer el tipo de relación existente entre ambas velocidades.

La temperatura a la cual se realizaron las mediciones, estuvo en 23°C, la presión atmosférica fue de 957 hPa, mientras que la humedad relativa y la densidad del aire fueron de 34% y 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 en el apartado 8.1.

Ensayo preliminar: determinación de TSR

Las primeras pruebas consistieron en tomar los datos de velocidad de viento y de rotación del eje, correspondientes a determinados valores de frecuencia de los variadores. A partir de esta información fue posible calcular los valores de velocidad tangencial máxima alcanzada por cada aspa, considerando el radio de

las mismas cuando están totalmente desplegadas (0,25 m) y la velocidad angular correspondiente. Por otro lado, se determinaron los valores de TSR (Tip Speed Ratio - Velocidad de Punta de Aspa por sus siglas en inglés), para cada uno de los valores de velocidad de viento, teniendo en cuenta la relación:

$$TSR = \frac{U}{c} \tag{1}$$

El valor de TSR, expresado en la ecuación 1, es un dato característico de los aerogeneradores, que reemplaza al número específico de revoluciones por minuto del rotor. Permite entre otras cosas comparar en igualdad de condiciones, el desempeño de distintos tipos de aerogeneradores y su valor depende de parámetros y características constructivas, como así también de la velocidad del viento al cual es sometido (Díez, 2006). Toda la información recopilada y calculada se encuentra reflejada en los gráficos de las Figuras 3 y 4. En la Figura 3, se muestra la relación existente entre la velocidad angular o de rotación del eje, en función de la velocidad del viento. En la Figura 4, se puede apreciar la variación de TSR en función de la velocidad de rotación del eje del dispositivo.

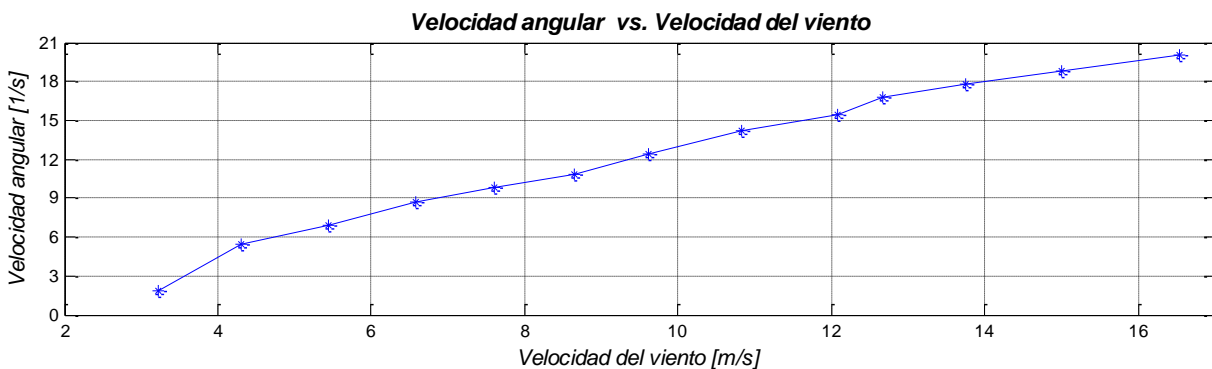


Fig. 3: Variación de la velocidad angular en relación a la velocidad del viento.

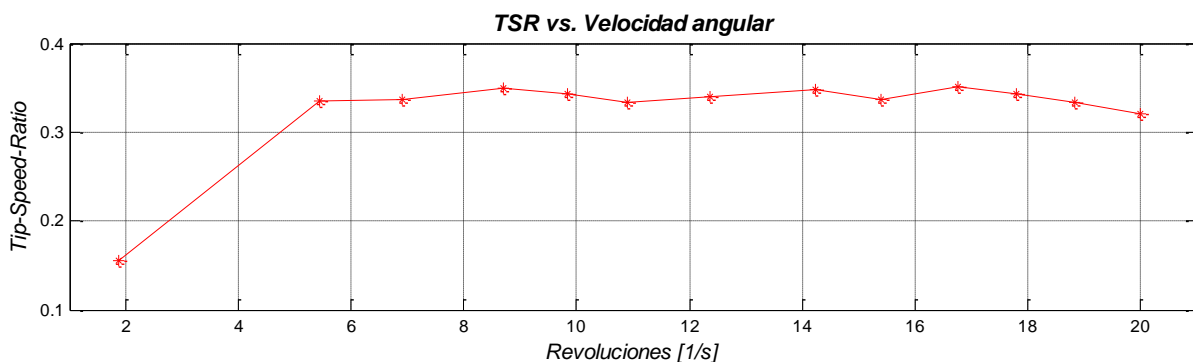


Fig. 4: Variación de la velocidad de punta de aspas (TSR) en relación a las revoluciones del rotor

Trazado de curvas de potencia

Luego de los ensayos precedentes, se llevaron a cabo las pruebas principales a determinados valores de velocidad de viento tendientes a determinar la potencia que posee el dispositivo en el eje en cada una de ellas para diferentes valores de carga aplicados al mismo. Dichos valores de carga representan a cualquier tipo de objeto o sistema de transmisión que se pueda acoplar al eje principal para aprovechar su movimiento de rotación.

El procedimiento llevado a cabo en estas pruebas consistió en fijar una velocidad de viento, e ir aplicándole una cupla frenante determinada al prototipo a través del freno por corrientes parásitas, cuyo valor se iba incrementando progresivamente a lo largo de distintas mediciones. Para conocer el valor de torque que entrega el molino para cada una de las cuplas frenantes a las que se lo sometía, se utilizó un medidor de torque, el cual estaba acoplado al freno. Una vez estabilizadas las rpm, para cada una de las cuplas frenantes, se leían y tomaban los datos de velocidad de rotación y se determinaba la potencia a través de la siguiente ecuación:

$$P_n = Q_A * \omega \tag{2}$$

Cabe aclarar que la nomenclatura se encuentra referenciada a la norma IEC 61400-12-1.

Posteriormente, a través de los datos obtenidos (Tabla 1), se realizaron las gráficas de Revoluciones vs Torque y Potencia vs Torque a con el objetivo de conocer el comportamiento integral de la turbina.

Tabla 1: Valores de potencia en función del torque aplicado, a velocidad de viento constante.

Torque [Nm]	Potencia1 [W]	Potencia2 [W]	Potencia3 [W]	Potencia4 [W]	Potencia5 [W]	Potencia6 [W]	Potencia7 [W]
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,025	0,13	0,24	0,31	0,36	0,42		
0,05	0,21	0,45	0,60	0,72	0,84	0,94	1,10
0,075	0,29	0,52	0,89	1,06	1,23		
0,1	0,36	0,58	1,16	1,34	1,62	1,83	2,13
0,125		0,62	1,43	1,64	1,99		
0,15			1,68	1,90	2,36	2,58	2,98
0,175			1,61	2,02	2,69		
0,2				1,86	3,06	3,35	3,85
0,225					3,04		
0,25					2,88	4,06	4,74
0,275						4,23	
0,3							5,59

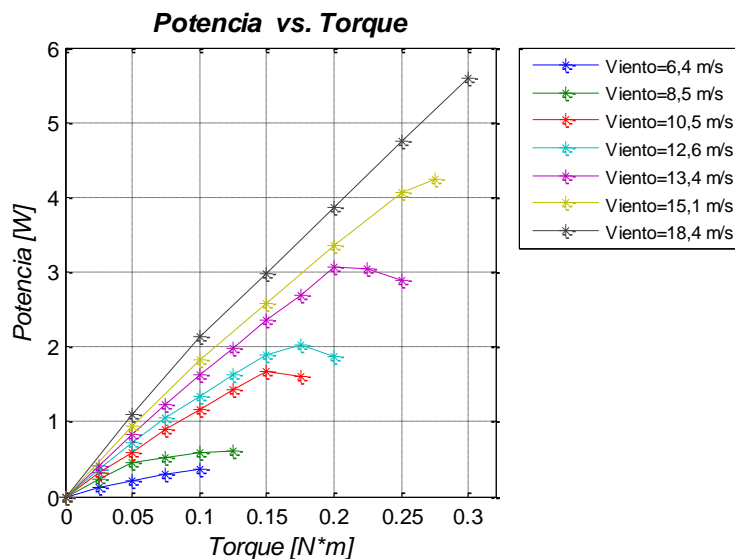


Fig. 5: Potencia en relación al torque aplicado, a velocidad de viento constante

La falta de datos de la columna dos a la 6 (Tabla 1), se debe principalmente a que la velocidad no es lo suficientemente elevada como para generar un torque superior a los medidos. Por otro lado, en las últimas dos columnas los datos faltantes se deben a que la gran vibración del dispositivo se transmitía directamente al eje del freno por corrientes parásitas, lo cual por momentos hacía difícil la lectura de la cupla frenante. Por consiguiente se consideraron solamente los valores más confiables. En la Figura 5, se pueden observar los valores tabulados previamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A nivel cualitativo, del primer ensayo a bajas revoluciones, se puede observar como el dispositivo responde según lo esperado, produciéndose la apertura de las aspas correspondientes ubicadas en uno de los laterales del prototipo, mientras las aspas ubicadas en el lado opuesto se cierran acorde a su diseño. Sin embargo a medida que la velocidad de viento aumenta y consecuentemente lo hacen las revoluciones del rotor, se observa un fenómeno vibratorio producto de la apertura brusca de las aspas, las cuales producen un golpe de gran magnitud sobre los tensores que limitan su movimiento. Esto genera oscilaciones que se acentúan con la velocidad de giro del eje. Como se deduce, este aspecto es contraproducente, ya que en última instancia es energía desaprovechada.

Como se puede observar en la Figura 3, existe una correlación lineal directa entre la velocidad de rotación del prototipo y la velocidad del viento. Esto no es un dato menor, ya que permite inferir con un gran nivel de confianza (al menos entre los límites establecidos) los valores intermedios de rapidez angular que toma el dispositivo para una velocidad de viento determinada. Además, se puede observar, en la Figura 4, como el valor de TSR permanece prácticamente invariable a lo largo del gráfico (exceptuando el primer dato, el cual se puede despreciar si se considera que se tomó en el momento que el eje rompió la inercia y su movimiento es muy variable).

Del segundo ensayo (Ver Figura 5), se pudieron determinar las curvas de potencia a velocidad de viento constante y carga variable. De las mismas se pudo determinar el valor de potencia máxima que genera el dispositivo para las distintas velocidades de viento a las que fue sometido. La misma se dio a velocidad de viento y torque máximos. Además, del mismo gráfico se puede destacar la ausencia de cambios bruscos en el comportamiento del dispositivo, es decir existen valores que rompan la uniformidad de la curva lo que permite predecir, entre ciertos límites, las variables de funcionamiento del mismo y aproximar dichas curvas por medio de funciones matemáticas que permitan un estudio analítico de esas variables del prototipo.

CONCLUSIONES

A través de las distintas pruebas fue posible obtener datos que permiten inferir un comportamiento satisfactorio del dispositivo. No obstante, se pudo observar un aspecto negativo relacionado directamente a la gran vibración producida con el aumento de la velocidad del viento, lo cual se debe en gran parte al golpe brusco que producen las aspas en el momento de su apertura.

Otro fenómeno que se observa a elevadas revoluciones, es la apertura por fuerzas de inercia de las aspas cuya velocidad tangencial es contraria a la del viento. Esto produce un par frenante, contraproducente para el dispositivo, ya que disminuye la potencia mecánica disponible en el eje. De los ensayos se obtuvieron valores cuantificables de esta variable, los cuales se consideran aceptables si se tiene en cuenta que este tipo de molinos se encuentran entre los que se consideran "de baja potencia". Además, por ser de eje vertical, posee las características propias de estos dispositivos, entre las que se destacan, no precisar de elementos de orientación; los elementos transmisores de potencia se pueden colocar a nivel del piso; se ponen en funcionamiento a bajas velocidades de viento, entre otras.

Estos datos recabados hasta el momento hacen que el prototipo posea gran interés, ya que existen varios puntos de mejora que pueden aumentar la potencia disponible en el eje del mismo, por consiguiente, es factible

continuar con su estudio a fin de poder extraer más conclusiones que permitan optimizarlo, es decir el prototipo posee un gran potencial que se puede explotar con el desarrollo de las mejoras propuestas.

NOMENCLATURA

TSR: Tip Speed Ratio – Velocidad de punta de aspa
c: velocidad tangencial en el extremo del aspa [m/s]
U: velocidad del viento [m/s]
 P_n : Potencia [W]
 Q_A : Torque o cupla frenante [Nm]
 ω : Velocidad Angular [s^{-1}]

REFERENCIAS

1. Bastianon, R. (1994). *Energía del viento y diseño de turbinas eólicas*. 2º edición. Tiempo de Cultura Ediciones, Buenos Aires, Argentina.
2. International Standard IEC 61400-12-1 (2005). *Wind Turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*. 1º Edition. International Electrotechnical Commission.
3. Caltech-California Institute of Technology (2011). "Wind-turbine placement produces tenfold power increase, researchers say." ScienceDaily. ScienceDaily, 17 August 2011. Sitio Web: <www.sciencedaily.com/releases/2011/07/110713092153.htm>. Consultado en octubre de 2016.
4. 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 marzo de 2016.
5. Domínguez Gómez, José A. (2008). *Energías Alternativas*. 3º edición. Ed. Equipo Sirius, Madrid, España.
6. 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. Consultado en marzo del 2016.
7. Sawyer, S. & Rave, K. (2015). *Global Wind Report, Annual Market Update*. Consultado noviembre 2016, desde http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf