

Estudio de la eficiencia energética de cuatro diseños de rotores eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial

Energy efficiency assessment of four designs of vertical axis and drag differential wind turbines

J. Pulfer¹, W. Meza², F. Mitjans³

¹Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
Email: jcpulfer@ing.una.py

²Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
Email: walther_meza007@hotmail.com

³Laboratorio de Mecánica y Energía, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay.
Email: felipe.mitjans@gmail.com

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En el presente estudio se comparó la eficiencia energética de cuatro diseños diferentes de rotores eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial manteniendo iguales su altura y diámetro. A parte del clásico modelo Savonius de dos aspas se estudiaron dos derivados del mismo (Schulz y Benesh), así como el casi desconocido rotor de tipo Lenz. En un laboratorio se han determinado las curvas de potencia en función de la velocidad de viento y de la velocidad específica, exponiendo los rotores a velocidades de viento de 1 y 7 m/s. Para evitar diferencias en la fricción entre un ensayo y otro se ha utilizado para los 4 modelos la misma base incluyendo el alternador y los engranajes de multiplicación. El modelo Lenz sobresalió ampliamente con un coeficiente de potencia máximo de 32.5 %, seguidos por los modelos Benesh con 21.4 %, Savonius con 18 % y Schulz con 13 %.

PALABRAS CLAVE: rotores eólicos a eje vertical, rotores de arrastre diferencial, coeficiente de potencia, velocidad específica

ABSTRACT

In the present study was compared the energy efficiency of four different designs of vertical axis and drag differential wind turbines maintaining the same height and diameter. Besides the classical two bladed Savonius model were studied two of its derivatives (Schulz and Benesh), as well as the almost unknown Lenz turbine. In a laboratory were determined the power curves versus the tip speed ratio exposing the turbines to wind speeds between 1 and 7 m/s. To prevent any difference of frictions between the different tests for the 4 models was used the same base including the alternator and the gear. The Lenz turbine had a widely outstanding result with a maximum power coefficient of 32.5 %, followed by the models Benesh with 21.4 %, Savonius with 18 % and Schulz with 13 %.

KEYWORDS: vertical axis wind turbines, drag differential turbines, power coefficient, tip speed ratio

1. INTRODUCCIÓN

En Paraguay el aprovechamiento de la energía eólica se limita prácticamente al bombeo de agua mediante rotores multipala de tipo americano, principalmente en el centro y sur de la región Occidental (Chaco). Son fabricados por empresas locales y se encuentran mayormente en establecimientos ganaderos sin acceso a la red eléctrica para bombear agua de tajamares a tanques con una elevación de unos pocos metros. En cambio, para la generación de electricidad en esas zonas se recurre más a la energía solar fotovoltaica. Los principales motivos son la falta del recurso eólico adecuado en gran parte del territorio nacional y el costo relativamente elevado de los generadores eólicos para la microgeneración (hasta 1 kW), que en su mayoría son del tipo a eje horizontal con aspas aerodinámicas.

Los aerogeneradores a eje vertical de arrastre diferencial son generalmente mucho más sencillos en su diseño, lo que hace que su costo sea potencialmente menor y que sean más fáciles de construir localmente a partir de materiales comunes, pero generalmente son menos eficientes que los a eje horizontal con aspas aerodinámicas. Por otro lado tienen las siguientes ventajas destacables:

- a) son independientes de la dirección del viento, por lo que no precisan de ningún dispositivo de orientación hacia el viento (omnidireccionalidad)
- b) se autoregulan con vientos fuertes, por lo que no precisan de sistema de freno
- c) pueden aprovechar vientos turbulentos
- d) giran relativamente despacio, por lo que no producen ruidos molestos durante la operación

Esas últimas dos ventajas los hacen ideales para zonas urbanas, donde justamente el impacto acústico es un factor crítico para los vecinos y donde predominan las turbulencias causadas por las construcciones y los árboles.

El arrastre diferencial se da por la forma curva de las aspas expuestas de modo normal al viento. Cuando el viento actúa del lado cóncavo del aspa el coeficiente de arrastre es mucho mayor que cuando actúa del lado convexo. En el caso de una semiesfera hueca por ejemplo, como se utilizan para anemómetros de tipo cazuela, el coeficiente de arrastre del lado cóncavo es de 1.42. Del lado convexo en cambio es de solo 0.34.

En la mayor parte del territorio paraguayo no se tiene condiciones favorables de viento para su aprovechamiento energético. Eso revela el último estudio realizado sobre el potencial eólico del Paraguay [6]. La zona de mayor potencial es el noroeste de la región occidental en la frontera con Argentina y Bolivia,

donde se tiene a 10 m de altura una energía anual acumulada de 1500 a 2000 kWh/m². En una pequeña zona sobre el río Pilcomayo en la zona de Pozo Hondo se alcanzan incluso 2000 a 2500 kWh/m² (ver fig. 1). A 50 m de altura se registran valores de 3500 a 4000 kWh/m². En casi todo el resto del país en cambio, la energía eólica acumulada se encuentra solamente entre 100 y 1000 kWh/m² a 10 m y entre 1000 y 2500 kWh/m² a 50 m de altura. Este fenómeno del potencial tan elevado en la zona occidental se debe a la relativa cercanía de la cordillera de los Andes que canaliza los vientos predominantes del noreste.

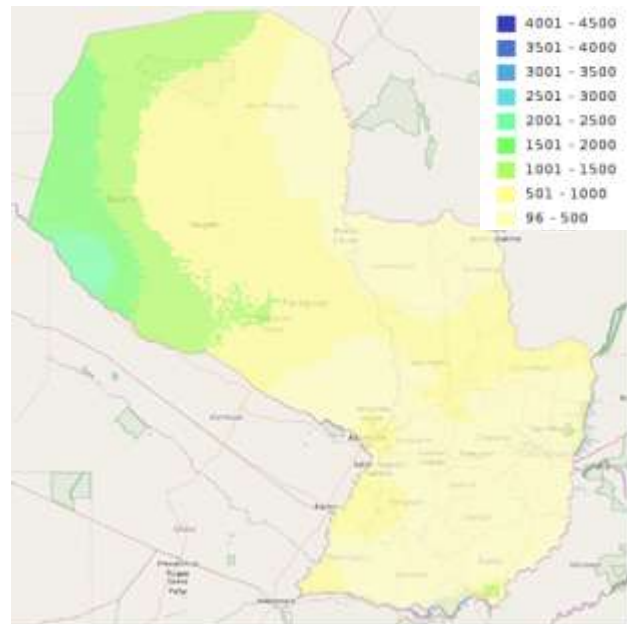


Figura 1. Potencial de energía eólica en Paraguay a 10 m de altura en kWh/m² año. **Fuente.** [6]

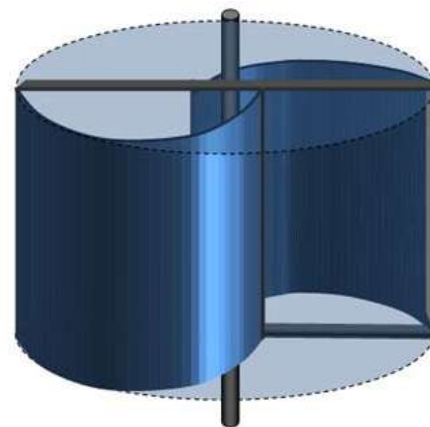


Figura 2. Diseño típico de un rotor a eje vertical de tipo Savonius. **Fuente.** elnegrillo.blogspot.com

En el pasado se han realizado numerosos estudios con el objetivo de diseñar y optimizar rotores eólicos a eje

vertical y de arrastre diferencial [1], [2], [3], en mucho de ellos el clásico modelo de tipo Savonius, que es uno de los más sencillos en su diseño, consistiendo básicamente en 2 cilindros semicirculares contrapuestos y sujetos a un eje vertical (ver fig. 2). El momento giratorio se produce por la diferencia de arrastre que existe entre el aspa cóncava y el aspa convexa, similar a un anemómetro de cazuelas.

En el presente trabajo se comparó la eficiencia energética de cuatro diseños muy diferentes de rotores eólicos a eje vertical y de arrastre diferencial teniendo todos la misma altura y el mismo diámetro, para que tengan un área de ataque al viento igual. A parte del modelo Savonius de dos aspas [2] se estudiaron dos derivados del mismo, llamados Schulz [3] y Benesh [1], así como el casi desconocido rotor de tipo Lenz [7], que tiene una cierta semejanza con un rotor de tipo Giromill, pero sin la utilización de perfiles aerodinámicos para las aspas. El presente estudio es inédito, ya que la mayoría de las investigaciones similares realizadas hasta ahora compararon entre sí la eficiencia de rotores del mismo tipo variando algunos parámetros constructivos, como ser: la relación entre altura y diámetro, el solapado de las aspas en el centro del rotor y la cantidad de aspas, con el fin de hallar el diseño con el mayor rendimiento. Para el presente trabajo se trató de seleccionar para cada uno de los 4 modelos el diseño que tenga el mejor rendimiento según las trabajos consultados para poder comparar los mejores entre sí.

2. METODOLOGÍA

2.1. Construcción de las maquetas

Las maquetas que se construyeron de los 4 diseños de rotores a eje vertical tienen todas una altura de 700 mm y un diámetro de 350 mm teniendo de esta forma una área de barrido de 0.245 m^2 , la cual es considerada posteriormente para el cálculo de la potencia teórica máxima. Los modelos fueron diseñados previamente mediante el programa Solid Works.

Para tener condiciones iguales en cuanto a la fricción rotativa a la hora de realizar las mediciones, se utilizó para los 4 diseños (Savonius, Schulz, Benesh y Lenz) el mismo conjunto de eje, rodamientos, masa, transmisión y generador. Dado que los rotores a eje vertical tienen una velocidad de giro relativamente baja, era necesario para la transmisión del movimiento giratorio al generador, que requiere una velocidad de giro elevada, utilizar un mecanismo de multiplicación mediante engranajes. Se fabricaron a partir de nylon y tienen una relación de multiplicación de 7:1. Como generador se utilizó un “dínamo de bicicleta”, que en realidad es un pequeño alternador con imanes permanentes teniendo un voltaje nominal de 6 V y una potencia nominal de 3

W. El eje encastra en una base que sirve para sujetar el equipo completo por una superficie horizontal. Consiste en una placa cuadrada de 150 mm de lado y 8 mm de espesor y en un buje de caño trefilado de 30 mm de diámetro exterior soldado en el centro de la placa de forma perpendicular. Su longitud varía según el modelo de rotor. El eje es de una barra de acero de 147 mm de largo mecanizada en su parte superior de forma a poder recibir dos rodamientos de bolas con una distancia de 66 mm entre sí, los cuales entran a presión en el caño de la masa (ver fig. 3).

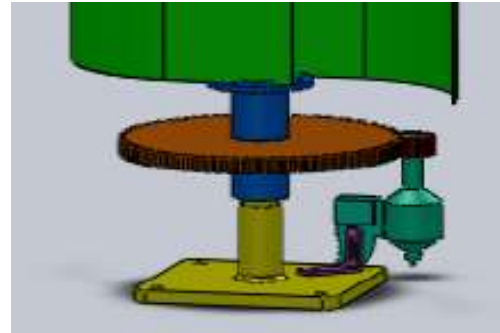


Figura 3. Conjunto de base, eje, masa, transmisión y generador. **Fuente.** Elaboración propia

Las aspas se fabricaron a partir de chapa de acero dulce pintada con la geometría correspondiente a cada uno de los cuatro diseños. Para fijar las aspas entre sí en ambos de sus extremos y ese conjunto a la masa giratoria, se usaron bastidores hechos de planchuelas de acero dulce que se sujetaron a las aspas mediante remaches pop. El extremo superior de la masa cuenta con una brida circular a la cual se atomilló el bastidor inferior.

2.1.1. Rotor Savonius

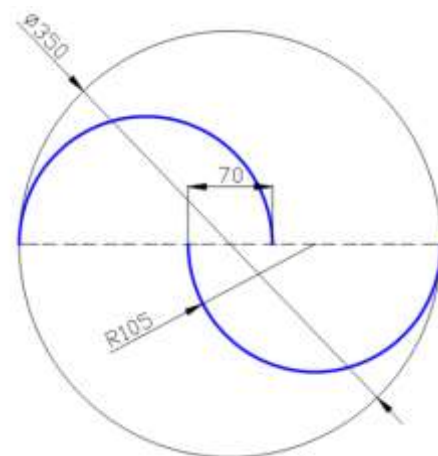


Figura 4. Medidas de la sección transversal del rotor Savonius. **Fuente.** Elaboración propia

La primera maqueta corresponde al rotor Savonius. Es el diseño más conocido y más construido de los rotores a eje vertical y de arrastre diferencial. Fue diseñado por

Sigurd Savonius en 1922 y patentado en 1930. Tiene dos aspas cilíndricas de forma semicircular de un radio de 105 mm cada una y con un solapado entre ambas en el centro del rotor de 70 mm (ver fig. 4). Gracias a esta superposición, parte del viento que llega a la parte cóncava de una de las aspas es desviada en un ángulo de 180° y acciona adicionalmente sobre la otra aspa entregando la energía a esa, lo que ayuda a aumentar su arrastre positivo.

2.1.2. Rotor Schulz

La segunda maqueta fue la del rotor Schulz. Fue diseñado en los años 1970 por Heinz Schulz [3] con el objetivo de mejorar el rendimiento en relación al Savonius tradicional. Es un derivado de ese último que consiste en tres aspas curvas cilíndricas de radio constante de 170 mm y una secante de 210.4 mm. El radio del círculo central por el cual las aspas constituyen la tangente es de 58.3 mm (ver fig. 5).

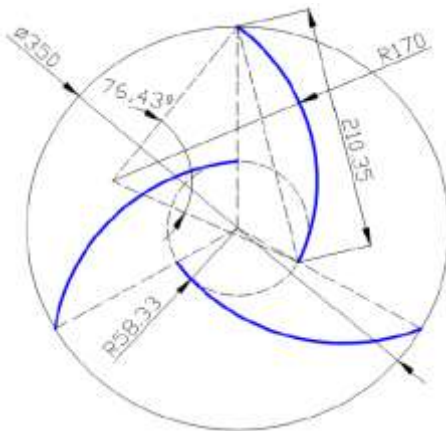


Figura 5. Medidas de la sección transversal del rotor Schulz.
Fuente. Elaboración propia

2.1.3. Rotor Benesh

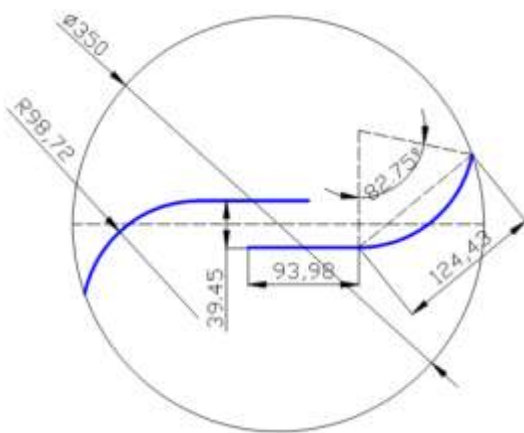


Figura 6. Medidas de la sección transversal del rotor Benesh.
Fuente. Elaboración propia

La tercera maqueta corresponde al rotor de tipo Benesh. Fue desarrollada por Alvin Benesh y patentada en 1996 [1]. Es también un derivado del rotor Savonius, pero sus dos aspas cilíndricas solapadas en la parte céntrica son de una geometría distinta. Tienen una parte recta hacia el centro del rotor de una longitud de 94 mm y una parte curva en su periferia con un radio de 98.7 mm y una secante de 124.4 mm. La separación entre ambas aspas es de 39.5 mm (ver fig. 6).

2.1.4. Rotor Lenz

La cuarta maqueta fue la del rotor Lenz. Es el modelo más moderno de todos y fue desarrollado por Edwin Lenz en los años 2000 [7]. Consiste en tres aspas cilíndricas con un desarrollo relativamente corto en comparación con los demás diseños (ver fig. 7). Tienen una parte casi semicircular con un radio de solo 21.5 mm, cuya secante es radial. Desde el extremo interior de esa curva el asa continúa de manera recta con una longitud de 97.8 mm. Tiene un ángulo en relación a la perpendicular del radio de 9° orientado hacia el centro del rotor.

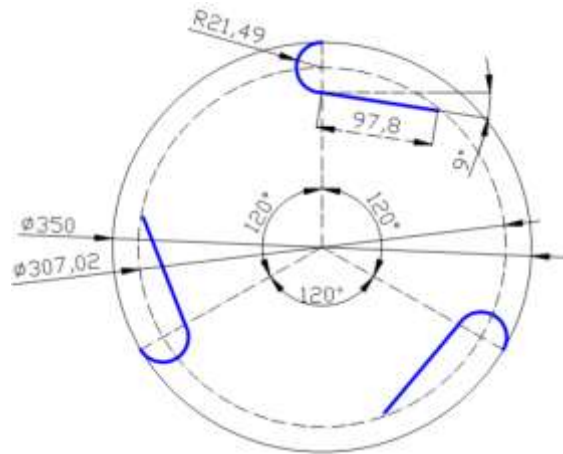


Figura 7. Medidas de la sección transversal del rotor Lenz.
Fuente. Elaboración propia

2.2. Condiciones típicas de viento

Para determinar en qué rango de velocidades de viento los rotores eólicos estudiados estarían funcionando en un ambiente real se utilizaron las mediciones hechas por López entre 2009 y 2010 en la cima del edificio “Torre Wilson” de la ciudad de Asunción, ya que esos rotores a eje vertical están justamente pensados para el uso en zonas urbanas del Paraguay, particularmente en donde haya una buena exposición al viento, como es la cima de edificios en altura [5].

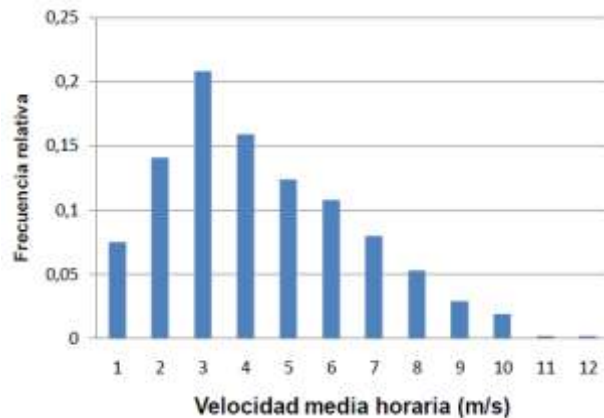


Figura 8. Distribución de la velocidad de viento medida en la cima del edificio Torre Wilson. **Fuente.** [5]

En dichas mediciones se obtuvo un promedio de 4.4 m/s y un factor de forma de la distribución Weibull resultante de 2.0 y un factor de escala de 4.9 m/s.

2.3. Medición del desempeño de los rotores

Las mediciones del desempeño de las cuatro maquetas se realizaron en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción. Como generador de viento se utilizó un túnel de viento educativo de circuito abierto de tipo Aerolab EWT; pero dado que su cámara de ensayos es demasiado pequeña (30.5x30.5x61cm) para recibir las maquetas de los rotores eólicos que se construyeron, se utilizó la zona

de salida de aire del mismo, aprovechando el viento que genera el ventilador. La velocidad de viento se varió cambiando la velocidad de giro del ventilador mediante el variador de frecuencia del motor.

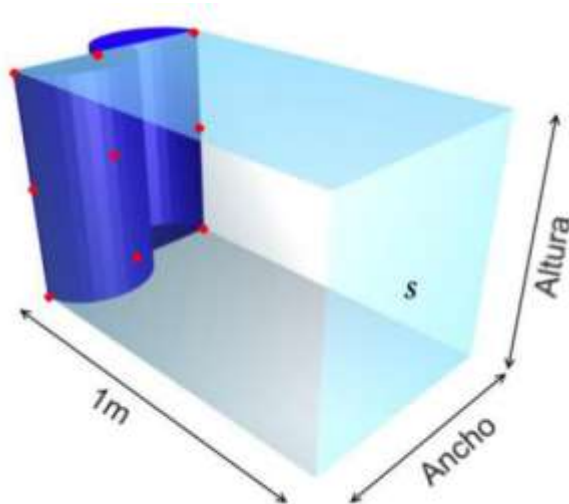


Figura 9. Puntos de medición de la velocidad de viento (puntos rojos) y superficie de ataque (S) de los rotores eólicos. **Fuente.** Elaboración propia

Para calibrar la velocidad de viento en función de las revoluciones del ventilador se utilizó un anemómetro a una distancia de 1 m de la salida del túnel de viento en la dirección de la prolongación de su eje, que corresponde a la misma distancia en la cual se ubicaron luego las maquetas para la realización de las mediciones.

Se anotaron las RPM del motor para las velocidades de 1 a 7 m/s con pasos de 1 m/s. Para verificar si el flujo de aire sobre la totalidad de la superficie de ataque de los rotores sea suficientemente homogénea se realizaron mediciones en nueve puntos de dicha superficie de una matriz 3x3 (ver fig. 9). El punto central se encuentra en la dirección del eje del ventilador. Se pudo constatar que las velocidades del aire eran prácticamente constantes entre los distintos puntos. La variación máxima era de solo 5 % en relación al valor nominal.

Las mediciones tuvieron como principal objetivo el de determinar el coeficiente de potencia C_p de los cuatro modelos de rotores en función de la velocidad de viento respectivamente de la velocidad específica (TSR). Ese es un parámetro adimensional, siendo la relación entre la velocidad de desplazamiento de la punta del rotor y la velocidad del viento. El coeficiente de potencia es definida como la relación entre la energía generada por el rotor eólico y la energía cinética contenida en el viento, para la cual se consideró en este caso una densidad del aire de 1.225 kg/m^3 . A 7 m/s la potencia contenida en el viento es entonces de 51.5 W considerando un área de ataque de 0.245 m^2 .

Se midieron para cada velocidad de viento el voltaje y la corriente a la salida del generador con dos multímetro, así como la cantidad de revoluciones por minuto de los rotores mediante un tachímetro. Para simular la carga para el alternador se colocó entre ambos polos del mismo una resistencia de 5Ω . Para cada velocidad y cada tipo de rotor se realizaron 3 mediciones, cuyos resultados fueron luego promediados. A partir del voltaje y la corriente se calculó la potencia eléctrica del generador.

3. RESULTADOS

Los resultados de las mediciones con los cuatro rotores son representados en las tablas 1 a 4. Muestran para cada velocidad del viento de 1 a 7 m/s las rotaciones por minuto del rotor eólico (RPM), la tensión eléctrica en V entre los polos del alternador, la corriente que genera el alternador en A, la potencia eléctrica generada por el alternador como producto entre los dos parámetros anteriores, la velocidad específica (TSR) y el coeficiente

de potencia (C_p). En los cuatro modelos recién a partir de los 4 m/s los rotores comenzaron a girar y por ende el alternador a generar energía.

En los cuatro casos con la creciente velocidad de viento aumentaron todos los parámetros llegando al máximo con una velocidad de 7 m/s. Entre los cuatro diseños de rotores eólicos se destacó claramente el modelo Lenz, en el cual se obtuvo un coeficiente de potencia de 0.305 a 7 m/s (ver tabla 4), mientras que los demás diseños alcanzaron solamente valores entre 0.127 y 0.219 a esa misma velocidad (ver tablas 1 a 3).

Tabla 1. Datos promedio de las mediciones del rotor Savonius

Velocidad (m/s)	RPM	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	TSR	C_p
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	40,48	0,247	0,051	0,013	0,297	0,118
5	45,87	0,360	0,073	0,026	0,420	0,126
6	64,27	0,533	0,107	0,057	0,706	0,158
7	81,15	0,723	0,142	0,103	1,040	0,180

Fuente. Elaboración propia.

Para poder despejar el valor del rendimiento combinado del alternador y del sistema de transmisión se utilizó el coeficiente de potencia del rotor Savonius a una velocidad específica cercana a la unidad obtenida por un estudio anterior con el valor del 18 % [4]. Ese TSR de casi 1 se obtuvo a una velocidad del viento de 7 m/s (ver tabla 1). La potencia del rotor Savonius multiplicando la potencia contenida en el viento a esa velocidad del viento con el coeficiente de potencia supuesto de 18 % es entonces de 9.27 W; pero la potencia eléctrica que se midió con el rotor Savonius a 7 m/s era de solo 0.103 W. El rendimiento combinado del alternador y del sistema de transmisión es entonces de solo 0.0111, lo que es un valor bajísimo. Se presume que ese mal rendimiento se debe principalmente a la baja eficiencia del alternador. Para todas las demás mediciones se utilizó este mismo valor considerándolo como una constante para calcular los respectivos coeficientes de potencia de los rotores eólicos. Esa presunción es válida, ya que para los 4 diseños de rotor eólico se utilizó la misma masa, el mismo sistema de transmisión y el mismo alternador teniendo de esta forma las mismas magnitudes de rozamiento en las diferentes piezas giratorias.

Velocidad (m/s)	RPM	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	TSR	C_p
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	15,47	0,198	0,018	0,004	0,113	0,034
5	20,80	0,366	0,025	0,009	0,190	0,045
6	43,96	0,575	0,066	0,038	0,483	0,105
7	49,03	0,677	0,108	0,073	0,629	0,127

Tabla 2. Datos promedio de las mediciones del rotor Schulz
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 3. Datos promedio de las mediciones del rotor Benesh

Velocidad (m/s)	RPM	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	TSR	C_p
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	21,99	0,219	0,045	0,010	0,161	0,092
5	45,40	0,415	0,086	0,036	0,416	0,171
6	65,16	0,620	0,124	0,077	0,716	0,214
7	73,08	0,789	0,158	0,125	0,937	0,219

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 4. Datos promedio de las mediciones del rotor Lenz

Velocidad (m/s)	RPM	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	TSR	C_p
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	15,96	0,198	0,041	0,008	0,117	0,076
5	36,93	0,423	0,086	0,036	0,338	0,174
6	75,03	0,701	0,141	0,099	0,825	0,275
7	142,24	0,931	0,187	0,174	1,824	0,305

Fuente. Elaboración propia.

A partir de los valores de TSR y de C_p obtenidos por las mediciones se graficaron para los cuatro diseños de rotores eólicos las respectivas curvas de potencia utilizando la herramienta de tendencia que ofrece la aplicación del Excel basada en una función polinómica de tercer grado. Como era de esperarse, en el rotor Savonius el máximo coeficiente de potencia se tenía con un TSR cercano a la unidad (ver fig. 10).

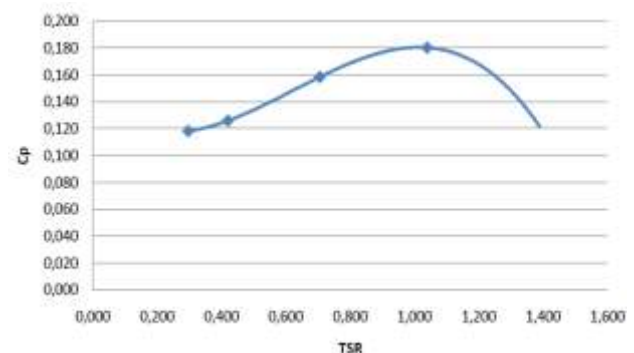


Figura 10. Coeficiente de potencia vs. velocidad específica del rotor Savonius. **Fuente.** Elaboración propia.

En el caso del rotor Lenz, el máximo del coeficiente de potencia se produjo a un TSR de alrededor de 1.4 alcanzando un valor de 0.338, lo que coincide a una velocidad del viento de 6.5 m/s (ver fig. 11).

En la figura 12 son graficadas las curvas de potencia de los cuatro diseños de rotores estudiados, donde se

puede notar claramente la superioridad del rotor Lenz sobre los demás diseños.

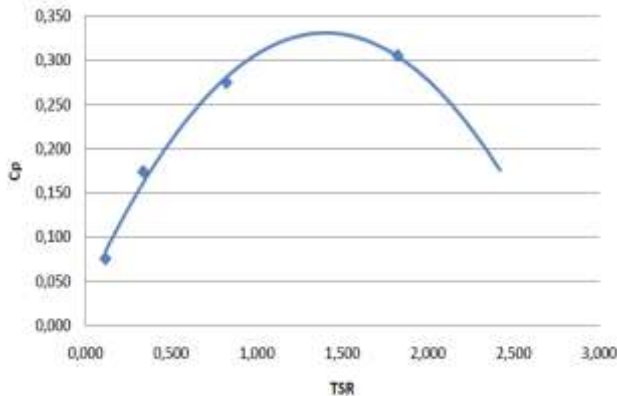


Figura 11. Coeficiente de potencia vs. velocidad específica del rotor Lenz. **Fuente.** Elaboración propia.

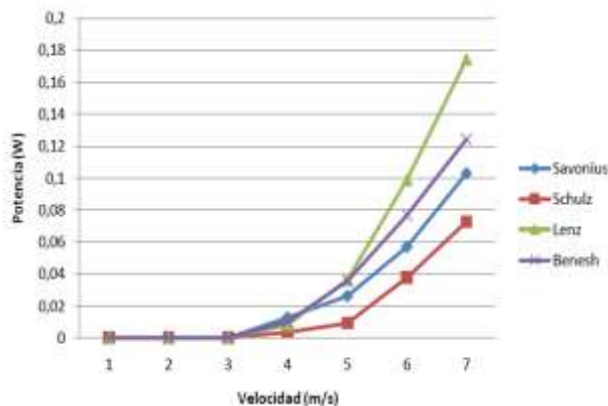


Figura 12. Curvas de potencia de los 4 rotores eólicos. **Fuente.** Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

La presente investigación tuvo como objetivo principal comparar la eficiencia de 4 diseños diferentes de rotores eólicos de eje vertical y de arrastre diferencial a escala reducida. En un laboratorio se han determinado las curvas de potencia en función de la velocidad de viento y de la velocidad específica, exponiendo los rotores a velocidades de viento de 1 y 7 m/s. Para evitar diferencias en la fricción entre un ensayo y otro se ha utilizado para los 4 modelos la misma base incluyendo el alternador y los engranajes de multiplicación. El modelo Lenz sobresalió ampliamente con un coeficiente de potencia máximo de 32,5 %, seguidos por los modelos Benesh con 21,4 %, Savonius con 18 % y Schulz con 13 %.

5. RECOMENDACIONES

Dado que la presente investigación se realizó con rotores eólicos a escala reducida, no son realmente aptos para la generación de electricidad a escala real. Para continuar en esta misma línea de investigación recomendamos, que se diseñe y se construya un prototipo de generador eólico del tipo Lenz a una mayor escala, por ejemplo con una potencia eléctrica nominal de unos 100 W, y que se someta el mismo a pruebas de funcionamiento en condiciones reales de uso en un sitio con un potencial eólico adecuado.

6. REFERENCIAS

Artículos científicos:

- [1] N. Burány y A. Zachár, "Evaluation of a Wind Turbine with Savonius-Type Rotor", 2012
- [2] J.-L. Menet y N. Bourabaa, "Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation", 2004

Libros:

- [3] H. Schulz, *Der Savonius Rotor: eine Bauanleitung*, 1 ed. Freiburg i. Br., Alemania: Ökobuch Verlag, 1989
- [4] M. Villarubia, "Eólica de rotor de arrastre diferencial: rotor Savonius" en *Ingeniería de la Energía eólica*, 1 ed. Barcelona, España: Editorial Marcombo, 2013, cap. 6, sec. 6.3.1.

Tesis y disertaciones:

- [5] F. López, "Estudio de factibilidad para la utilización de la energía eólica en edificios de altura para la obtención de un ahorro cercano a la mitad de la energía total consumida de la red para las áreas comunes" tesis de maestría, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Asunción, Paraguay, 2014

Páginas web:

- [6] Parque Tecnológico Itaipú, "Potencial Energético Solar y Eólico", <http://pese.pti.org.py/> consultado junio 2017
- [7] Windstuff Now, "Lenz2 turbine", diseñado por E. Lenz, 2005, originalmente disponible en www.windstuffnow.com, ahora suspendido
- [8] Amarilla, F. R. M. (2015, January). Analysis of technical and economic feasibility for the implementation of a system of power generation using wind power in the Paraguayan Chaco. In *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica-SICEL (Vol. 8)*.