

Desarrollo de una máquina eólica de doble turbina de eje vertical para la generación de energía en un auto eléctrico*

Development of a double turbine wind machine with vertical axis for generating power to an electric car

Nelson Javier Roldán Castro¹

Mario León Isaza Pareja²

Mauricio Olaya Dávila³

Corporación Industrial Minuto de Dios, Colombia

RESUMEN

Se presentan los resultados del desarrollo e integración a un vehículo eléctrico de un prototipo de máquina eólica conformada por dos turbinas de eje vertical tipo Savonius soportadas en los extremos de sus ejes sobre un bastidor y un sistema de piñones, que además de mantenerlas sincronizadas, actúan como elevador de revoluciones para hacer funcionar un generador eléctrico y así extraer corriente eléctrica de ellas. La máquina eólica se instaló en la parte frontal de un prototipo de auto eléctrico diseñado especialmente; así, mientras el auto está en movimiento, el viento que golpea su parte frontal hace girar las turbinas generando corriente eléctrica; se recolectaron datos como velocidad, revoluciones de las turbinas, voltajes y amperaje para realizar el respectivo análisis y conocer el rendimiento del nuevo sistema eólico propuesto.

Palabras clave: Turbina eólica tipo Savonius, Energía eólica, Doble turbina eólica, Turbinas eólicas de eje vertical.

ABSTRACT

Shown are the results of development and integration to electric vehicle prototype wind machine that consists of two vertical axis turbines Savonius type supported at the ends of their axes on a rack and pinions system are presented, in addition to keeping them synchronized they act as rising speed to run an electric generator and then extracting its electric current. The wind machine was installed in the front of a prototype electric car specially designed; so while the car is moving, the wind hitting the front of it turns turbines to generate electricity; data was collected as speed, turbine speed, voltage and amperage for the respective analysis and to learn the performance of the proposed new wind system.

Key words: Wind turbine Savonius type, Wind power, Double wind turbine, Winds turbines of vertical axis.

** Proyecto de investigación financiado por Colciencias denominado: "Fabricación de un vehículo eléctrico funcional para dos personas con un sistema eólico integrado, que genere energía eléctrica para sí mismo cuando el auto está en movimiento, aumentando la autonomía del vehículo, reduciendo el consumo de combustibles fósiles y aprovechando sistemas de energía alternativa" desarrollado por el Grupo de Investigación I3 – Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería de la Corporación Industrial Minuto de Dios. Investigador principal: Mario León Isaza Pareja.*

1. Ingeniero Mecánico, investigador Corporación Industrial Minuto de Dios, Bogotá. Grupo de Investigación I3 – Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería. flatroldan@yahoo.com

2. Ingeniero Industrial, Magíster en Innovación para el desarrollo Empresarial y Especialista en Gerencia de Proyectos, investigador Corporación Industrial Minuto de Dios, Medellín. Grupo de Investigación I3 – Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería. misaza@mdc.org.co

3. Ingeniero Electricista, PhD. en Administración de Negocios y Magíster en Administración, investigador Corporación Industrial Minuto de Dios, Medellín. Grupo de Investigación I3 – Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería. molaya@mdc.org.co

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen distintas máquinas que capturan parte de la energía generada por el viento y la transforman en electricidad para ser usada en diversas actividades humanas.

Según Ahrtz, Fernandez y Munnemann [1], una turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica disponible en su eje, donde en términos generales se tienen dos diferentes tipos de turbinas como son la turbina eólica de eje horizontal (HAWT) y la turbina eólica de eje vertical (VAWT) [2], [3].

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) (*Vertical Axis Wind Turbine*) tienen como característica fundamental que su eje principal es perpendicular al nivel del piso y que sus rotores se mueven en la dirección del viento. Estas turbinas se diferencian por el tipo de aspa o hélice que utilizan, encontrándose tres configuraciones básicas: Los tipos Darrieus, Windside y Savonius.

El rotor tipo Savonius fue propuesto por el inventor finlandés del mismo nombre en 1925 y básicamente consiste en un rotor de eje vertical impulsado por arrastre de fuerza [4].

La principal ventaja que posee el rotor Savonius es que funciona con bajas velocidades de viento y gracias a sus características aerodinámicas presenta un buen rendimiento en el momento del arranque y en la autorregulación [5]. Adicionalmente se acepta que las máquinas eólicas de eje vertical representan una alternativa adecuada para la extracción de la energía eólica en muchos países en desarrollo [6]. Sin embargo, posee desventajas, una es que el viento que golpea por detrás de las aspas puede generar paros, ya que la baja circulación de aire en cercanías del eje de rotación reduce la eficiencia de la turbina, restando momento de rotación [7].

El diseño de generadores eólicos tipo Savonius se ha apoyado recientemente en el uso de herramientas computacionales buscando optimizar los componentes usados así como para evaluar desempeños de configuraciones específicas [8]. Un aspecto importante es que las dimensiones y configuración de las aspas son los aspectos cruciales, ya que de estos depende el rendimiento de la turbina [9].

Este artículo presenta una nueva propuesta de máquina eólica compuesta por dos turbinas de eje vertical similares a las conocidas como Savonius de dos alabes. Estas turbinas trabajan de forma sincronizada e intercalada por medio de un sistema de piñones que además de mantenerlas girando sin chocarse, elevan las revoluciones de la turbina para que el generador eléctrico empiece a operar en su rango de trabajo.

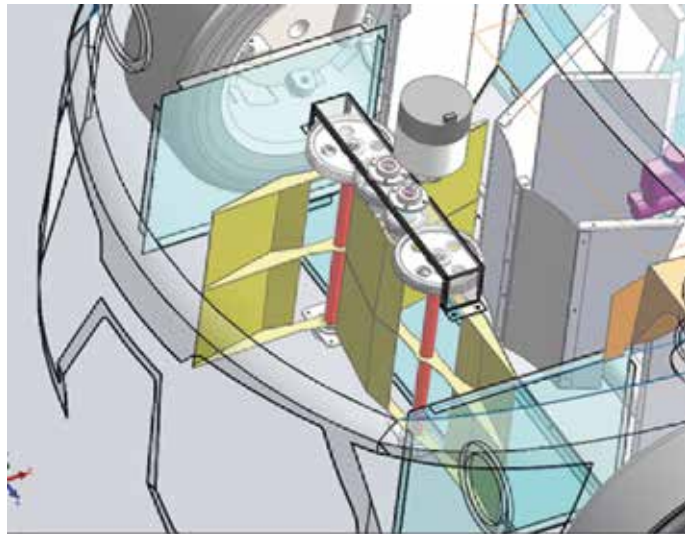


Imagen 1. Configuración del sistema eólico instalado al interior de un auto eléctrico

Fuente: Corporación Industrial Minuto de Dios

Para aprovechar la fuerza del viento que va en contra del desplazamiento del vehículo, se ubicó el sistema eólico en su parte frontal, para lo cual se requirió de la instalación de unas entradas de aire que canalizaran el viento y lo dirigieran a las turbinas. De igual manera, el flujo de aire sale por dos ductos orientados hacia las puertas laterales del auto.



Imagen 2. Ductos de entrada frontal de aire en el auto eléctrico

Fuente: Corporación Industrial Minuto de Dios

Este sistema reúne características que lo hacen distinto en su desempeño respecto a los demás como son:

- Trabaja como una turbina de dos y cuatro alabes al mismo tiempo, es decir, cada turbina está constituida por dos alabes pero al funcionar en conjunto lo hacen como una turbina de cuatro alabes, permitiendo que giren rápidamente.

- El aire es dirigido al alabe que extrae la energía de viento y desviado del otro que está en contra de este, impidiendo que se frene o atasque el sistema.
- El sistema no se direcciona de forma natural con el flujo de viento, su diseño fue concebido para que recibiera el flujo en una sola dirección de acuerdo al movimiento del vehículo.
- La máquina eólica tiene una forma sencilla y fácil de construir.

El hecho que el sistema esté ubicado en la parte delantera en un auto facilitó la realización de pruebas al no depender de un túnel de viento, en vez de esto, el movimiento del auto generaba la velocidad de viento requerida. Para conocer el desempeño de las turbinas eólicas instaladas en el vehículo, se realizó una serie de pruebas en campo durante tres días bajo condiciones climáticas no controladas.

2. METODOLOGÍA

Se partió del diseño de un sistema eólico diferente que fuera susceptible de patentamiento y que adicionalmente pudiera ser implementado en un vehículo eléctrico como fuente de generación de energía complementaria para incrementar su autonomía. Luego de diseñado y validado el concepto se procedió a la fabricación de un prototipo a pequeña escala y sobre el cual se probó su funcionalidad y desempeño.

El sistema eólico se diferencia de sistemas tradicionales, ya que se estructuró en un sistema de doble turbina de eje vertical, que permite su instalación en espacios reducidos como es el interior de un vehículo; su configuración permite que giren simultáneamente los dos ejes de manera sincronizada garantizando que en ningún momento se choquen las turbinas como se aprecia en la Imagen 1.

A partir del diseño del sistema eólico se continuó con el diseño y fabricación de un auto eléctrico funcional que estéticamente mantuviera el concepto de un automóvil convencional y que a su vez fuera aerodinámicamente eficiente; el diseño incluía la integración del sistema eólico en su interior.

Posteriormente se construyó la turbina eólica vertical que se adaptará funcionalmente al auto y generará energía eléctrica aprovechando el desplazamiento del auto y la fuerza que ofrece el viento en oposición a su movimiento.

Por último, se instaló el sistema eólico en el auto y se procedió a la realización de pruebas de campo en una pista corta de carreras para medir el desempeño y el aporte energético que las turbinas eólicas le darían al vehículo.

En general, los pasos para desarrollar el prototipo del vehículo eólico fueron:

- Consulta teórica: Revisión bibliográfica en textos y artículos que comprendan soluciones o desarrollos ligados con el proyecto a realizar al igual que la realización de consultas del equipamiento del vehículo en materia de motor y baterías buscando los mejores proveedores.

- Selección de equipamiento del carro eléctrico: Con base en la consulta realizada, se eligieron las baterías y motor eléctrico aptos para un carro eléctrico funcional con un buen rendimiento. También se contactaron a los proveedores seleccionados buscando mayor información técnica y de costos.
- Diseño inicial del prototipo: En esta fase con base en el sustento teórico y a la selección de equipamiento, se realizaron los diseños pertinentes ligados al desarrollo del carro eléctrico y todas sus componentes fundamentales, así como el diseño estructural de carrocería y chasis del vehículo y el diseño del sistema eléctrico de transformación de energía eólica en eléctrica.
- Prácticas experimentales: Se realizaron pruebas simuladas del generador eólico, se verificaron y pusieron a prueba los sistemas eléctricos diseñados para la generación de energía eléctrica del aerogenerador.
- Recopilación de resultados y análisis de los laboratorios anteriores: Esta fase consistió en la recopilación de información obtenida experimentalmente y en su análisis.
- Rediseño: Consistió en la revisión de los diseños estructurales y mecánicos del vehículo eléctrico en general, ajustes al diseño inicial del sistema de generación eólica basados en la experimentación y análisis recopilados.
- Implementación del prototipo diseñado: En esta fase se realizó el ensamblaje del chasis y carrocería, implementación del sistema eólico, montaje del sistema eléctrico del vehículo (baterías, tren motriz, sistemas de luces, etc.) y ensamblaje del interior del carro.
- Pruebas en campo: Consistieron en la puesta a prueba del prototipo, la medición de parámetros y ensayos de capacidad y desempeño.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El lugar de prácticas fue el autódromo XRP ubicado en el municipio de Cajicá, Colombia. El trazado empleado es un óvalo de 667 metros de longitud y rectas de 200 m, se realizaron 110 giros al óvalo procurando andar a una velocidad promedio de 60 km/h, la velocidad al final de la recta llegaba a 80 km/h.



Imagen 3. Carro eólico girando en la pista XRP de Cajicá

Fuente: Corporación Industrial Minuto de Dios

En cada giro se tomaban datos de velocidad del auto y revoluciones de la turbina en un instante en particular.

3.1. Ensayos

Para conocer el desempeño del sistema eólico, es necesario saber los valores que definen su rendimiento como son TRS y el coeficiente de potencia.

El TSR (*Tip Speed Ratio*, por sus siglas en inglés) relaciona la velocidad de la punta de la turbina respecto a la velocidad del viento; para hallar dicho valor se debe conocer el diámetro de la turbina, número de revoluciones a la cual gira y la velocidad del viento que para el caso específico será la velocidad del auto [10]; de igual forma, se deben determinar ciertos factores ambientales como altitud y temperatura, datos necesarios para conocer la densidad del aire.

Según Moragues y Rapallini [11], conociendo las características de una turbina eólica y la velocidad del viento en un instante dado, es sencillo determinar la potencia útil; a partir de allí, se realizaron los ensayos para hallar cada una de las variables.

3.2. Características de la máquina eólica

La máquina eólica incluye un generador eléctrico, el cual consiste en un alternador que contiene un devanado de campo bobinado de 12 voltios y 90 amperios, esto quiere decir que se debe energizar dicho elemento para que pueda producir energía eléctrica: el efecto que esto tiene sobre la máquina eólica es que endurece o frena el movimiento de las turbinas, así que cuando el auto supera los 70 km/h la fuerza que ejercía el viento sobre las turbinas era lo suficientemente grande para vencer la fuerza que opone el alternador energizado y otras fuerzas de fricción existentes en el sistema.

Las características de la máquina eólica se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características geométricas de la máquina eólica

Variable	Medida
Diámetro de la turbina eólica	0,55 m
Área barrida	0,3225 m ²
Peso del sistema (turbinas y piñones)	17 kg

Fuente: Elaboración de los autores

3.3. Resultados

Los resultados finales obtenidos en las pruebas de campo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las pruebas realizadas sobre la maquina eólica

Variable	Resultado
Velocidad en la cual se tomaron los datos	77 km/h
RMP de la turbina a 77 km/h	215
Variable	Resultado
Voltaje obtenido	12 v
Amperaje	14 A
Potencia obtenida del generador eléctrico	168 W
Potencia teórica	1645,78 W
Factor de potencia	10,2 %
TRS	0,29
Densidad del aire	0,95 kg/m ³

Fuente: Elaboración de los autores

La velocidad promedio a la que se condujo el vehículo en el autódromo para realizar las pruebas con una densidad del aire de 0,95 kg/m³ fue de 77 km/h, esto debido a que los tramos rectos eran muy cortos y era necesario reducir la velocidad para entrar en las curvas; a esta velocidad las RMP alcanzadas por la turbina eólica fueron de 215. Cabe anotar que en los tramos rectos se lograban velocidades superiores a los 85 km/h.

Con los datos anteriores se calculó el TRS, el cual dio 0,29.

El Coeficiente de Potencia (Cp) obtenido por la máquina eólica fue de 10,2 %, el cual es un resultado positivo teniendo en cuenta que es de tipo Savonius.

El TRS y el Cp obtenidos permiten ubicar el sistema eólico cercano al límite de Betz, lo que indica que es adecuado dadas sus características y teniendo en cuenta que está instalado muy cerca al suelo.

Si analizamos los resultados obtenidos por el alternador eléctrico en las mencionadas condiciones, se logró generar un voltaje pico de 12 v y 14 A, obteniendo 168 W de potencia y una potencia teórica de 1645,78 W.

Para el caso específico, el punto rojo ubicado al lado inferior izquierdo de la Imagen 4 resume el desempeño de la máquina eólica propuesta en este proyecto. La línea de color púrpura se denomina límite de Betz y representa la máxima eficiencia que se puede obtener de una máquina eólica. De igual manera, se muestran curvas de otras máquinas eólicas convencionales. Sorprende para esta configuración, que el desempeño se hubiera ubicado muy cerca de esta línea púrpura, lo que quiere decir que a pesar de las pérdidas generadas en sistemas de transmisión de potencia mecánica, materiales y la eficiencia del generador eléctrico, el sistema muestra gran potencial al llegar muy cerca de dicho límite.

Los resultados obtenidos en términos generales son muy buenos, dado que se logró una autonomía de 110 km antes de realizar una recarga de las baterías del vehículo.

En términos generales el prototipo desarrollado del vehículo funciona en diferentes tipos de terreno, logrando velocidades de hasta 110 km/h en rectas de 200 m, con una autonomía de 110 km en pista y con el peso de dos ocupantes.

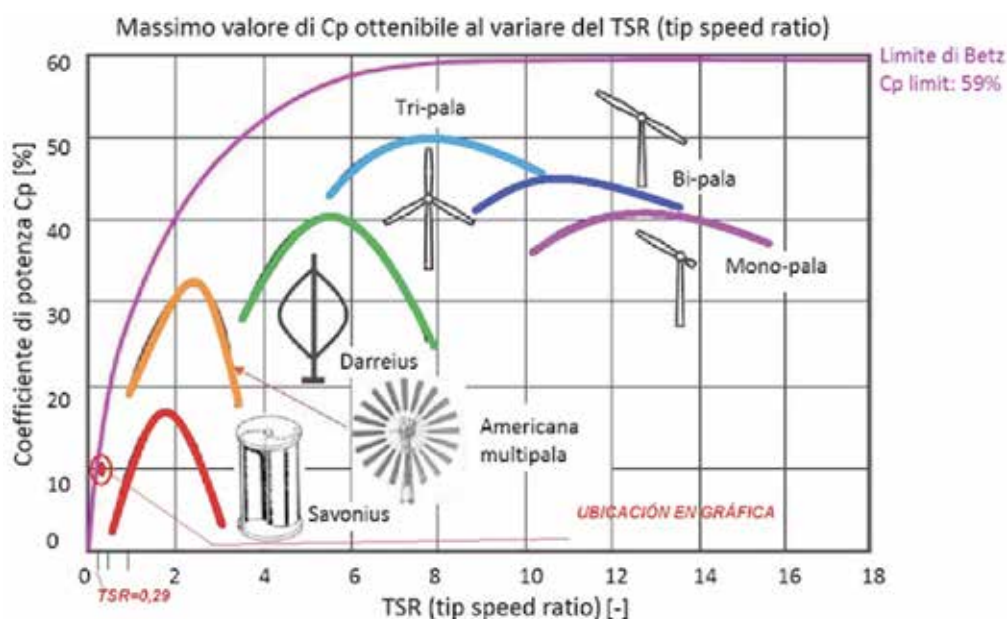


Imagen 4. Rendimiento del sistema eólico

Fuente: Adaptado de [12]

4. CONCLUSIONES

El proyecto demostró que es posible instalar turbinas eólicas funcionales tipo Savonius al interior de un auto eléctrico haciendo que su coeficiente aerodinámico C_x sea relativamente bajo, lo cual conllevaría a un mejor desempeño.

Utilizar conductos de aire que dirijan una mayor cantidad de viento a los alabes de la máquina eólica, hace que aumente la velocidad del viento que llega a estos, permitiendo que el TRS de la turbina eólica llegue muy cerca de su valor óptimo.

La máquina eólica probada logró alcanzar un coeficiente de potencia C_p de 10,2 %, que si bien es baja comparada con otras turbinas eólicas, es relativamente muy buena para configuraciones tipo Savonius; los datos indican una generación de 12 V y 14 A, los cuales pueden ayudar a la alimentación de los sistemas eléctricos de un auto eléctrico, permitiendo que las baterías eléctricas se dediquen a alimentar el tren motriz, logrando un aumento en su autonomía.

Lo que nació como una idea de incorporar una máquina eólica al interior de un auto resultó en el desarrollo de un nuevo sistema eólico con características muy propias; al ubicar su desempeño en la Imagen 4 de C_p vs TRS se posicionó casi sobre el límite de Betz, indicando un gran potencial para estudiar si se tiene en cuenta que el peso del sistema es de 17 kg y que al energizar el generador eléctrico el sistema se frenaba de forma significativa.

Es importante continuar realizando estudios, de manera que se pueda optimizar el tamaño, el peso y el aporte energético del sistema eólico, ya que este ocupa más de un 25 % del espacio del auto eléctrico, esto se puede hacer a través de la utilización de materiales más livianos y resistentes; de igual forma se deben probar diferentes configuraciones de generadores eléctricos que no frenen el sistema de modo que se maximice el desempeño de la máquina eólica.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G.D. Ahrtz, R.D. Fernández y A. Munnemann, "Diseño de una turbina eólica de baja potencia adecuada a la agresividad del clima patagónico", *Tercer Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía - HYFUSEN*, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina, 2011.
- [2] S. Mathew, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer Berlin Heidelberg, New York, 2006, pp. 1-89.
- [3] W. Tia, B. Song, J. VanZwieten and P. Pyakurel, "Computational Fluid Dynamics Prediction of a Modified Savonius Wind Turbine with Novel Blade Shapes", *Energies*, vol. 8, pp. 7915-7929, 2015.
- [4] E. W. Golding, *The Generation of Electricity By Wind Power*. London: E. & F. N. Spon Ltd, 1980.
- [5] M. J. Cuesta, M. Pérez y J. A. Cabrera, *Aerogeneradores de potencia inferior a 100kW*, España: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2008, p. 9.
- [6] R. Gupta, R. Das and K. Sharma, Experimental study of a Savonius-Darrieus wind machine. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Silchar. *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy for Developing Countries*, Assam, India, 2006.
- [7] H. R. DiPrátula, Centro de estudiantes de ingeniería y agrimensura, 2009. Obtenido de <http://www.ceia.uns.edu.ar/cursos/Eolica09/4atecnologia%20aerog%20primer%20parte.pdf>
- [8] L. Arbeloa y J. Zurita, *Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural*. España: Universidad Pública de Navarra, 2012.
- [9] R. E. Sheldahl and P. C. Klimas, *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Estados Unidos de Norteamérica: Sandia National Laboratories, 1981.
- [10] A. Fazlizan, W. T. Chong, S. Y. Yip, W. P. Hew and S. C. Poh, "Design and Experimental Analysis of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator", *Energies*, vol. 8, pp. 6566-6584, 2015.

- [11] J. Moragues y A. Rapallini, *Energía eólica*. Argentina: Instituto Argentino de la Energía, p. 7, 2003.
- [12] Energy Hunters. Turbine eoliche ad asse orizzontale o verticale - un confronto. [En línea]. Disponible en: <http://www.energyhunters.it/content/turbine-eoliche-ad-asse-orizzontale-o-verticale-un-confronto>