



*Diseño y Fabricación de un Generador Eólico de Baja Capacidad para Sectores sin Cableado Eléctrico*

*Design and Manufacturing of a Low Capacity Wind Generator for Sectors without Electrical Wiring*

*Projeto e Fabrico de Gerador Eólico de Baixa Capacidade para Setores sem Cablagem Elétrica*

Shirley Katherine Reinoso-Salazar<sup>I</sup>  
[shirleykatherine13@gmail.com](mailto:shirleykatherine13@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0009-2632-5341>

Bryan Alejandro Castillo-Paguay<sup>II</sup>  
[bryan.castillo.paguay@gmail.com](mailto:bryan.castillo.paguay@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0008-5690-4101>

Bryan Adrian Carrasco-Paredes<sup>III</sup>  
[carrascobryan1d@gmail.com](mailto:carrascobryan1d@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0001-0752-323X>

Jorge Adrián Mera-Cruz<sup>IV</sup>  
[adcraft1012@gmail.com](mailto:adcraft1012@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0003-6005-4895>

**Correspondencia:** [shirleykatherine13@gmail.com](mailto:shirleykatherine13@gmail.com)

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 05 de mayo de 2024 \* **Aceptado:** 20 de junio de 2024 \* **Publicado:** 18 de julio de 2024

- I. Ingeniera Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Investigadora Independiente; Ambato, Ecuador.
- II. Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Investigador Independiente; Quito, Ecuador.
- III. Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Investigador Independiente; Ambato, Ecuador.
- IV. Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Investigador Independiente; Ambato, Ecuador.

## Resumen

Este documento presenta el desarrollo tanto de diseño como de fabricación de un generador eólico de tipo Savonius para viviendas alejadas de la zona urbana en la ciudad de Riobamba al igual que un estudio estadístico para determinar la eficiencia de dicho generador en otras ciudades del Ecuador. Los generadores eólicos son sistemas de producción de energía renovable, que adquieren su energía de la circulación del aire que pasa a través de sus alabes. Pero ellos como todos los sistemas de generación de energía renovable, poseen inconvenientes, como es en este caso el estudio para determinar la eficiencia del generador según su geometría al igual que la dirección y velocidad del viento. La investigación teórica y construcción de prototipo arrojó que el diseño tipo Savonius con una estructura robusta y ancla es de tipo idóneo para la ciudad de Riobamba al momento de generar energía y al más bajo costo.

**Palabras Clave:** Diseño; generador eólico; Savonius; eficiencia; energía renovable; alabes; velocidad del viento; prototipo.

## Abstract

This document presents the development of both the design and manufacturing of a Savonius type wind generator for homes far from the urban area in the city of Riobamba as well as a statistical study to determine the efficiency of said generator in other cities in Ecuador. Wind generators are renewable energy production systems, which acquire their energy from the circulation of air that passes through their blades. But they, like all renewable energy generation systems, have drawbacks, such as in this case the study to determine the efficiency of the generator according to its geometry as well as the direction and speed of the wind. Theoretical research and prototype construction showed that the Savonius-type design with a robust structure and anchor is the ideal type for the city of Riobamba when generating energy and at the lowest cost.

**Keywords:** Design; wind-power generator; Savonius; efficiency; renewable energy; praises; wind speed; prototype.

## Resumo

Este documento apresenta o desenvolvimento do projeto e fabrico de um gerador eólico tipo Savonius para habitações distantes da área urbana da cidade de Riobamba, bem como um estudo estatístico para determinar a eficiência do referido gerador noutras cidades do Equador. Os

geradores eólicos são sistemas de produção de energia renovável, que adquirem a sua energia a partir da circulação do ar que passa pelas suas pás. Mas eles, como todos os sistemas de geração de energia renovável, apresentam desvantagens, como neste caso o estudo para determinar a eficiência do gerador de acordo com a sua geometria, bem como a direção e velocidade do vento. A investigação teórica e a construção do protótipo mostraram que o projeto tipo Savonius com uma estrutura robusta e ancoragem é o tipo ideal para a cidade de Riobamba na geração de energia e a um custo mais baixo.

**Palavras-chave:** Design; gerador eólico; Savónio; eficiência; energia renovável; elogios; velocidade do vento; protótipo.

## Introducción

Los sistemas de energía renovable como cualquier otro sistema poseen ciertos inconvenientes como lo es el no poder brindar energía de manera ininterrumpida como lo explica Guillot & Vilorio en su estudio sobre el abastecimiento constante de energía eólica realizado en el 2015 por lo que se busca potenciar las ventajas al igual que añadir otras como lo es el costo de fabricación opacando así las desventajas con el objetivo de producir un producto de necesidad y uso diario a bajo costo debido a su capacidad para generar energía con un diseño simple y una construcción accesible, aunque tradicionalmente se han considerado menos eficientes para la generación de grandes cantidades de potencia eléctrica en comparación con los generadores de hélice convencionales. A pesar de estas limitaciones, su utilidad radica en su capacidad para operar efectivamente en aplicaciones donde se requiere extraer torque directamente del eje.

A diferencia de los generadores de hélice, que dependen principalmente de la fuerza de sustentación para su funcionamiento, el principio de funcionamiento de un generador Savonius se basa en la diferencia de arrastre entre sus dos aspas, una cóncava y otra convexa. Esta configuración proporciona al generador Savonius una característica única de autorregulación de velocidad (Correa Delgado, 2018). A medida que aumenta la velocidad angular del rotor, las velocidades relativas entre las aspas y el viento cambian, ajustando automáticamente la diferencia de arrastre hasta alcanzar un equilibrio para una velocidad específica. Este punto de equilibrio representa también el punto de máxima eficiencia del generador en términos de conversión de energía cinética del viento en energía mecánica.

En la zona sierra y costa del país se encuentra las zonas que presenta las características climáticas ideales para el aprovechamiento del recurso eólico. Se considera que Riobamba posee una velocidad de viento promedio ideal debido a valores de velocidad y viento útiles son un promedio entre las 7 de la mañana a 7 de la noche. Por lo tanto, se recomienda para futuras investigaciones la implementación de circuitos a corriente alterna.

Este artículo explora de manera practica las características operativas, las ventajas y las limitaciones de los generadores Savonius, destacando su potencial en aplicaciones donde la simplicidad de diseño y la capacidad de auto-regulación son críticas para la viabilidad y la efectividad del sistema. Además, este estudio se desarrolla para encontrar alternativas de solución al consumo de energía eléctrica en zonas rurales donde la electricidad es inaccesible. El diseño del generador se basó en un sistema de almacenamiento de energía alimentado por batería, pero se pudo demostrar que era posible utilizar el generador para alimentar productos domésticos, así como también puedes usar módulos de carga externos y bancos de energía para teléfonos móviles.

## **Metodología**

### **Estudio de los Sistemas Eólicos**

La energía eólica es un tipo de energía renovable o energía limpia. Se considera energía renovable aquella energía que se obtiene de recursos o fuentes naturales considerados inagotables, ya sea por la gran cantidad de energía que se puede producir a partir de ellos o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. La energía eólica es generada a partir de la energía cinética del viento y las corrientes de aire. Su origen se encuentra en la existencia de masas de aire, sobre la tierra, a diferentes temperaturas, originadas por diferentes intensidades de radiación solar, a nivel global o local, las cuales producen corrientes ascendentes y descendentes, formando anillos de circulación del aire. (Pinilla S., 2008)

La energía eólica presenta numerosas ventajas, entre las más importantes están:

- Es renovable, ya que tiene su origen en procesos atmosféricos y se renueva de forma continua.
- Es limpia, ya que no requiere combustión y por lo tanto no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- Puede instalarse en zonas rurales o urbanas.

- Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la autoalimentación de viviendas.
- Es un tipo de energía sostenible, posee la capacidad de reemplazar fuentes energéticas tradicionales, ya sea por su enorme posibilidad de renovación o por su menor efecto contaminante. (Dodero & Fernandez, 2012)

La captación de la energía eólica se proyecta mediante el uso de máquinas motrices. La transformación de la energía captada a la forma que se requiere se realiza por medio de convertidores adecuados debidamente a la máquina eólica. Las teorías generales y particulares del comportamiento de las turbinas eólicas fueron desarrolladas a partir de las máquinas medievales.

### **Clasificación de los Generadores Eólicos**

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre desde hace ya varios siglos, es por esto por lo que en la actualidad ya existen diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, hasta grandes máquinas, utilizadas en parques eólicos. La principal clasificación que se hace a las máquinas eólicas se debe a la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento. De acuerdo con esto, se dividen en aerogeneradores de eje vertical y de eje horizontal. Las cuales, a su vez, se clasifican en diferentes tipos, a saber. (Apaoblaza Augsburguer, 2014)

### **Máquinas eólicas de eje horizontal**

Su eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, de acuerdo con su velocidad de giro. (Cuesta Santianes, Pérez Martínez, & Cabrera Jiménez, 2008)

- **Aerogeneradores lentos:** En general, están constituidos por un número alto de palas, multipalas, que cubren casi toda la superficie del rotor. Poseen un elevado par de arranque, gracias al cual pueden ponerse en marcha incluso con velocidades de viento muy bajas. Su baja velocidad de rotación hace que sean poco útiles para la producción de electricidad, siendo su uso más frecuente para el bombeo de agua.
- **Aerogeneradores rápidos:** Presentan un par de arranque pequeño y requieren velocidades de viento del orden de 4 a 5 m/s para su puesta en marcha. La mayoría poseen tres palas y

se utilizan para la producción de electricidad, a través de su acoplamiento con un alternador. Su gama de potencias es muy amplia.

- **Aerogeneradores de velocidad intermedia:** Tienen entre 3 y 6 palas y sus prestaciones están comprendidas entre las correspondientes a los dos casos anteriores. Se utilizan cuando las condiciones de viento no son muy favorables y en general son de pequeña potencia. Su aplicación principal es en equipos autónomos para producción de electricidad.

### **Máquinas eólicas de eje vertical**

Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento. Actualmente existen 2 diseños básicos. (Cuesta Santianes, Pérez Martínez, & Cabrera Jiménez, 2008)

- **Darrieus:** patentadas por G. Darrieus el año 1931 y desarrolladas luego por el Laboratorio Sandia en los años 70. Están formados por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico y tienen características parecidas a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño. Los laboratorios Sandia construyó en 1974 un primer prototipo de 5 m de diámetro Su potencia es pequeña y aunque su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados.
- **Savonius:** patentada por el finlandés Sigurd Savonius en 1922 (Apaoblaza Augsburguer, 2014). Su principal ventaja consiste en trabajar con velocidades de viento muy bajas. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro, en el diseño original estaban separados una pequeña distancia el uno del otro. La fuerza que el viento ejerce en las caras de los cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que las hace girar alrededor del eje. Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Su campo de aplicación está en la producción autónoma de electricidad o el bombeo de agua. Además, como lo explica Dodero & Fernandez, (2012) el generador Savonius tiene la ventaja adicional de ser construido reciclando recipientes o también denominados tambores de aceite más específicamente de 200 litros u simplemente cortándolos a la mitad.

### **Características de los rotores eólicos**

Las características salientes de los rotores eólicos verticales según Moragues & Rapallini, (2003) que se consideraron como información adicional para seleccionar el más idóneo debido las circunstancias son:

➤ **Darrieus:**

- Tiene un rendimiento máximo de 0.35
- 5-500 kW
- No requiere ser orientado
- No arranca solo
- Altas velocidades
- Buen rendimiento
- 2 a 3 palas

➤ **Savonius:**

- Tiene un rendimiento máximo de 0.30
- 0-1,5 kW
- No requiere ser orientado
- Alto par de arranque
- Bajas velocidades
- 2 a 4 palas

Como información adicional el generador Savonius con respecto a su funcionamiento Díaz, Pajaro, & Salas (2015) explican que este aparte de no depende de la dirección del viento este opera a velocidades de viento bajas y su construcción es más barata y menos compleja que la de otras turbinas.

## **Componentes de un Aerogenerador**

La energía cinética del aire se convierte en energía de rotación (del rotor) y, por tanto, en energía mecánica. Normalmente, las turbinas eólicas disponen de un sistema de transmisión mecánica con el propósito de incrementar el número de revoluciones del rotor hasta el número de revoluciones del generador eléctrico. Posteriormente, la energía mecánica es transformada en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

Se pueden identificar los siguientes subsistemas de generación eólica:

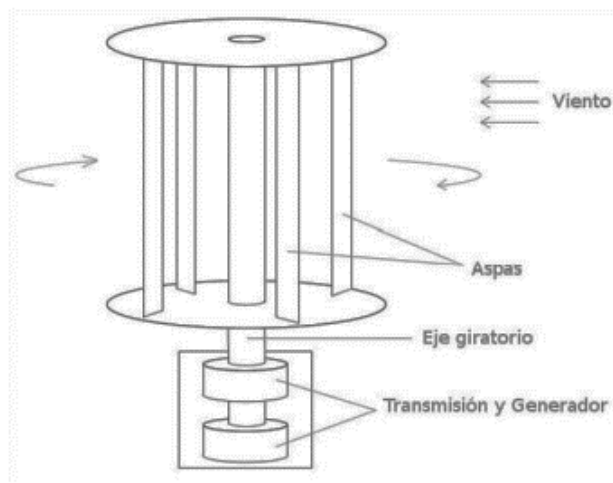
- Subsistema de captación
- Subsistema de transmisión mecánica
- Subsistema de generación eléctrica
- Subsistema de regulación y control

- Subsistema de soporte
- Subsistema de almacenamiento de energía

Esta investigación se centra en la geometría del generador eólico por lo que el subsistema analizado es el de captación donde este es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. Está integrado por el rotor, el cual se compone principalmente de los álabes, las tapas y el árbol. (Saha, Thotla, & Maity, 2008)

**Figura N° 1**

*Partes del generador*



*Fuente: Centrales de Energías Renovables. J. A. Carta González*

Los componentes más importantes del rotor son los álabes. Ellos son los dispositivos que convierten la fuerza del viento en el par necesario para generar potencia útil. La forma básica y dimensiones de los álabes vienen dadas inicialmente por la aerodinámica y el diseño global de la turbina.

Los subsistemas aledaños que analizar para obtención de resultados y generación del prototipo son los de transmisión mecánica y de generación eléctrica.

La transmisión mecánica está compuesta por todas las partes en rotación de la turbina. Éstas incluyen un árbol de baja velocidad (en el lado del rotor), acoplamientos, caja multiplicadora de engranajes, y un árbol de alta velocidad (en el lado del generador) (Carta González et al., 2009)

Toda turbina tiene un árbol principal, algunas veces denominado árbol de baja velocidad o árbol del rotor. El árbol principal transfiere el par torsor desde el rotor al resto del tren de potencia. Los



acoplamiento tienen como función conectar los árboles. El multiplicador tiene como función adaptar la baja velocidad de rotación del eje del rotor a las mayores velocidades de operación del generador eléctrico.

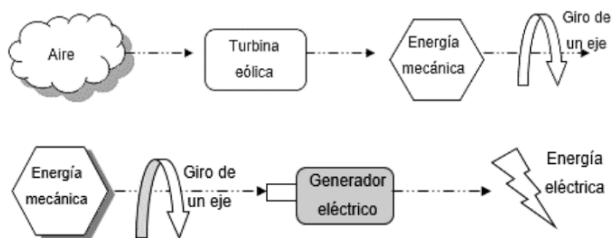
El segundo subsistema aludido como se mencionó anteriormente es el de generación eléctrica por lo que el sistema eléctrico de un aerogenerador incluye todos los dispositivos que intervienen en el proceso de conversión de la energía mecánica en energía eléctrica. El generador es el dispositivo más importante de este subsistema.

**Generador eléctrico:** Conceptualmente, un generador eléctrico es un sistema que convierte la energía mecánica (rotación de un eje a una cierta velocidad y con un cierto par) en energía eléctrica (que se transmite por un circuito eléctrico).

Los generadores eléctricos se pueden clasificar básicamente en generadores de corriente continua y de corriente alterna.

**Figura N° 1**

*Energía del viento*



**Fuente:** Centrales de Energías Renovables. J. A. Carta González

## El viento y su energía

El viento constituye uno de los elementos fundamentales en el campo del conocimiento atmosférico, permite identificar el estado dinámico del aire y se reconoce como el aire en movimiento (UPME, 2006). El peso del aire sobre un objeto ejerce una fuerza por unidad de área en el mismo, esta fuerza es conocida como la presión. Las variaciones en la presión llevan a que se desarrollen los vientos.

## Velocidad del viento

La velocidad del viento,  $v$ , es una magnitud vectorial. Aunque el vector de la velocidad tiene tres componentes, en aplicaciones de energía eólica solo se consideran las componentes en el plano horizontal (plano paralelo a la superficie terrestre). La velocidad del viento se caracteriza por el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal y su dirección (Villarrubia López, 2013)

### Potencial energético del viento

La velocidad del viento es un factor muy importante para determinar cuanta energía puede transformar un equipo en electricidad. Es variable, en función de la hora, del día, de la situación geográfica general y de la topografía local. Por razones técnicas, es imposible extraer toda la energía cinética existente en una corriente de aire. La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección  $A$ , perpendicular al flujo de viento,  $v$ , viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo.

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico del aire y  $\rho$  es la densidad del aire, que varía con la altitud y con las condiciones atmosféricas. Por tanto, la potencia del viento depende de la densidad del aire, de la superficie sobre la que incide o área de barrido y del cubo de la velocidad del viento.

Por ello, las turbinas reales podrán extraer una energía inferior a la planteada por Betz; el cociente entre la potencia extraída y la potencia total del fluido, se denomina coeficiente de potencia  $C_p$ , el cual será, siempre inferior a 0,593.

### Ley de Betz

De todo el potencial de energía calculado con la ecuación, solo será posible extraer una parte, ya que, si le quitáramos toda esa energía cinética al aire, detrás de la turbina éste estaría quieto. El límite de extracción teórico máximo fue calculado por Albert Betz (1885-1968), físico alemán que participó en la elaboración de las bases teóricas de los modernos aerogeneradores, quién publicó en 1919 una teoría, conocida como ley de Betz. Según esta ley no puede convertirse más del 16/27 (el 59,3%) de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica (Fernández Díez, 1993)

## Rendimiento de los aerogeneradores

Como se describió anteriormente, no se puede convertir toda la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, por ello para conocer la potencia mecánica de una turbina eólica se debe tener en cuenta lo siguiente:

$$P = C_p \left( \frac{1}{2} \rho A v^2 \right) \quad (2)$$

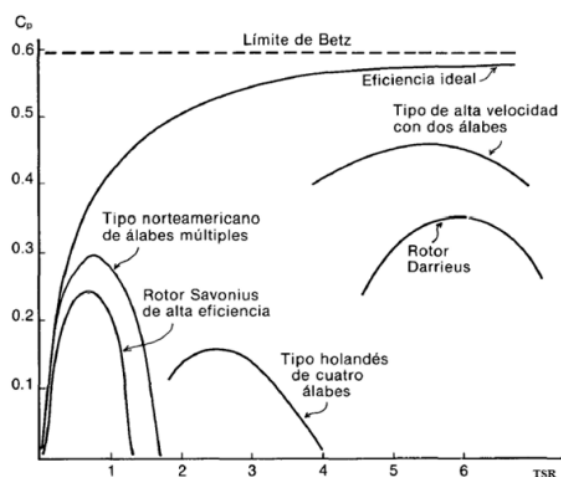
dónde  $A$  es el área barrida por el rotor,  $\rho$  la densidad del aire,  $v$  la velocidad del viento y  $C_p$  es el coeficiente de potencia del aerogenerador (que depende de la forma aerodinámica de la pala), el cual no puede superar el límite de Betz y puede ser hallado en las curvas de la figura (Carta González et al., 2009)

Para relacionar el coeficiente de potencia del generador en la figura, es necesario conocer la relación de velocidad tangencial o  $TSR$ , típicos sobre el rendimiento aerodinámico (Canalejo & Font, 2011), la cual sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica y se define como:

$$TSR = \frac{2\pi \cdot n \cdot r}{v \cdot 60} \quad (3)$$

Donde  $r$  es el radio del aerogenerador [m],  $n$  son las revoluciones por minuto y  $v$  es la velocidad del viento [m/s]

**Figura N° 3**  
*Ley de Betz*



*Fuente: Centrales de Energías Renovables. J. A. Carta González*

## Resultados

### Diseño del rotor

El primer componente para llevar a cabo el proceso de conversión de energía e interactuar con el viento es el rotor, el cual está diseñado con 2 módulos cada uno de ellos con sus respectivos alabes y tapas circulares, los cuales deberán estar fabricados de materiales de baja densidad para que el rotor sea liviano.

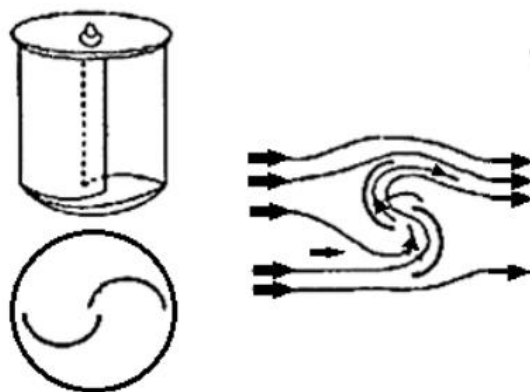
Para el diseño de los álabes se debe considerar que el coeficiente de potencia del aerogenerador depende de la forma que tengan. Debido a que la turbina eólica a diseñar es sencilla, se considerará que los álabes tienen una forma semicilíndrica hueca.

### Determinación del perfil del alabe

El rotor Savonius está formado por dos semicilindros cuyos ejes están desplazados entre sí. El desplazamiento entre los ejes facilita el cambio de dirección de flujo, por lo que además de la acción de las fuerzas de origen aerodinámico se aprovecha la variación de la cantidad de movimiento del fluido. Además, cuando los alabes están conectados en el rotor de eje vertical, también denominado pasaje del alabe cerrado, esta circulación del viento ocasiona un vacío parcial. (Cueva Barrazueta, 2015)

*Figura N°4*

*Rotor Savonius*



*Fuente: Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. M. J. Cuesta Santianes*

El aerogenerador tipo Savonius, experimenta una fuerza en la dirección del movimiento relativo del fluido respecto del objeto, denominada fuerza de arrastre o resistencia drag (FD), y se expresa así:

$$F_D = C_D \frac{\rho V^2}{2} A \quad (4)$$

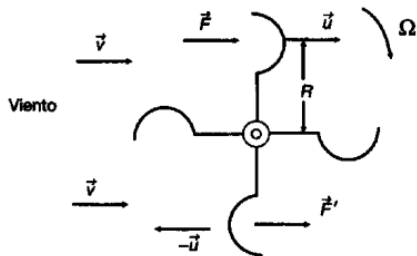
Donde:

- $C_D$  es el coeficiente de arrastre
- $\rho$  es la densidad del fluido
- $A$  es el área transversal
- $v$  la velocidad relativa del aire respecto al objeto.

La acción del viento origina distintas fuerzas en las partes cóncava y convexa de los álabes, lo que produce un par de fuerzas que hace que el rotor gire. Por esta razón, este tipo de rotor se denomina de arrastre diferencial.

**Figura N° 5**

*Acción del viento sobre las alabes*



*Fuente: Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW. M. J. Cuesta Santianes*

De esta manera, se tienen dos fuerzas,  $F$  y  $F'$ , que actúan en los álabes opuestos, que vendrán determinadas por las siguientes expresiones:

$$F = C_D \frac{1}{2} \rho A (v + u)^2 \quad (5)$$

$$F' = C_D' \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 \quad (6)$$

Donde:

- $u$ : velocidad lineal de los álabes
- $v$ : velocidad absoluta del viento

- v-u: velocidad relativa del viento a la cazoleta superior
- v+u: velocidad relativa del viento a la cazoleta inferior

La potencia ejercida por el viento sobre el rotor es la diferencia de ambas fuerzas por la velocidad lineal (u) de las paletas, es decir:

$$P = u(F - F') = \frac{1}{2} \rho A u [C_D (v - u)^2 - C_D' (v + u)^2] \quad (7)$$

El valor de la potencia P se hace máximo para una velocidad lineal (U<sub>m</sub>) de los álabes, obtenida derivando la expresión anterior e igualándola a cero. Este valor es:

$$U_m = v \frac{2(C_D + C_D') - \sqrt{4(C_D + C_D')^2 - 3(C_D - C_D')^2}}{3(C_D - C_D')} \quad (8)$$

Como se investigó anteriormente, el coeficiente de arrastre para la parte cóncava tendrá un valor de C<sub>D</sub> = 1,00 y para el lado convexo C<sub>D</sub>' = 0,2, con lo que se tiene 0,184V obteniendo así una potencia máxima

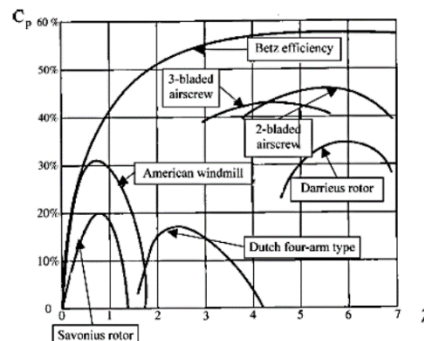
$$P_{max} = 0.071 \left( \frac{1}{2} \rho A v^3 \right) \quad (9)$$

Para el presente proyecto se utilizará un perfil de álabes semicilíndrico, ya que es más económico y fácil de construir. Para mejorar el valor del coeficiente de potencia de este perfil, se toma como referencia el análisis hecho por (Saha 2008), quien a través de un estudio de diferentes configuraciones de rotor Savonius, por medio de experimentos en túnel de viento, concluye que la disposición que presenta un comportamiento óptimo es un rotor con 2 álabes y 2 módulos, ya que el coeficiente de potencia mejora con esta disposición.

Se diseñará el presente rotor, teniendo en cuenta un C<sub>p</sub> = 0,20. Basados en los cálculos expresados en el siguiente gráfico.

**Figura N° 6**

*Gráfico comparativo entre generadores*



**Fuente:** *Diseño estructural de una turbina de eje vertical para aplicaciones urbanas. M. J. Cuesta Santianes*

## Determinación de las dimensiones del rotor

La eficiencia mecánica total equivale al producto de todas las eficiencias de los componentes mecánicos del sistema. Para el presente análisis, la eficiencia mecánica depende del sistema de transmisión y de los rodamientos (Ocampo Gil, 1993). Por lo tanto:

$$\eta_m = \eta_{rod} * \eta_{trans} \quad (10)$$

$$\eta_e = \eta_{gen} * \eta_{cont} \quad (11)$$

La eficiencia eléctrica total equivale al producto de todas las eficiencias de los componentes eléctricos del sistema. Para el presente análisis, la eficiencia eléctrica depende del generador y el controlador. Por lo tanto, da como resultados de 0,941 para la eficiencia mecánica y de 0,723 para la eficiencia eléctrica total equivalente.

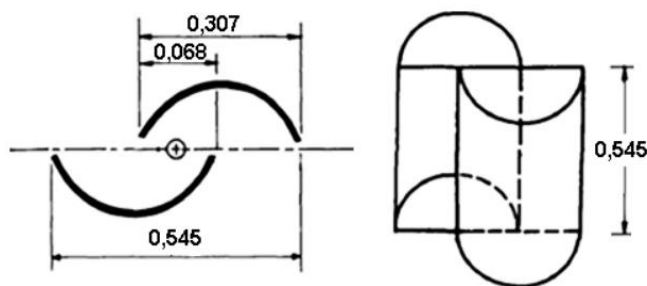
La ecuación utilizada para encontrar el área necesaria para producir la potencia necesaria es la siguiente, dando un resultado de 3,573 metros cuadrados:

$$A = \frac{2.P_e}{\eta_m.\eta_e.C_p.\rho.v^3} \quad (12)$$

Para un adecuado diseño las dimensiones del rotor deberán ser  $h = 2d$  y recordando que  $s/d = 0.125$  por lo cual las dimensiones del rotor quedarían de la siguiente manera:

**Figura N° 7**

*Geometría de las alabes*



**Fuente:** *Diseño estructural de una turbina de eje vertical para aplicaciones urbanas*

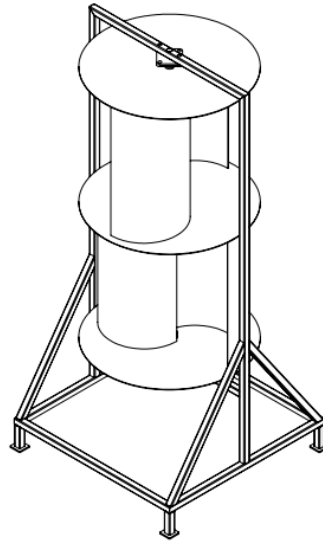
## Modelado y pruebas del prototipo

En esta sección se analiza los valores obtenidos de las pruebas del prototipo a diferentes velocidades de viento, con el objetivo principal es realizar la comparación de los resultados finales de las pruebas realizadas al prototipo al someter a diferentes velocidades de viento, así como

analizar los costos para la construcción y pruebas del prototipo de aerogenerador eólico tipo Savonius.

**Figura N° 8**

*Modelado del generador eólico de tipo Savonius*



*Fuente: Autores*

### Curva de Potencia

La curva de potencia se calculó en base a los datos obtenidos de la velocidad del viento, así como la medición del voltaje generado y el consumo nominal de una bobilla incandescente, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla N° 1**

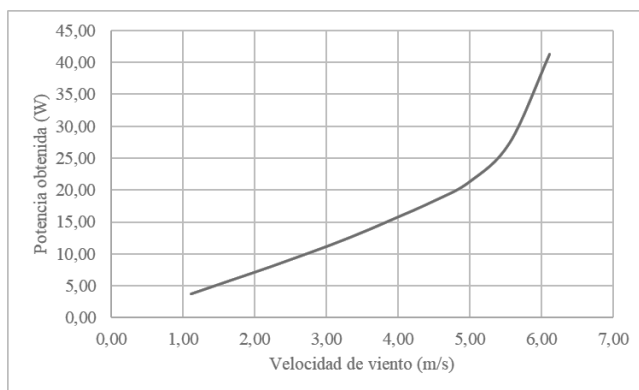
*Datos Obtenidos de la Velocidad del Viento*

Km/h	m/s	Potencia W	Voltaje V
4	1,11	3,70	2,8
6	1,67	5,84	4,3
8	2,22	7,97	5,7
10	2,78	10,21	7,1
12	3,33	12,58	8,5
14	3,89	15,23	10
16.2	4,50	18,28	12
18	5,00	21,32	14
20	5,56	27,41	18
22	6,11	41,27	27,1

*Fuente: Autores*

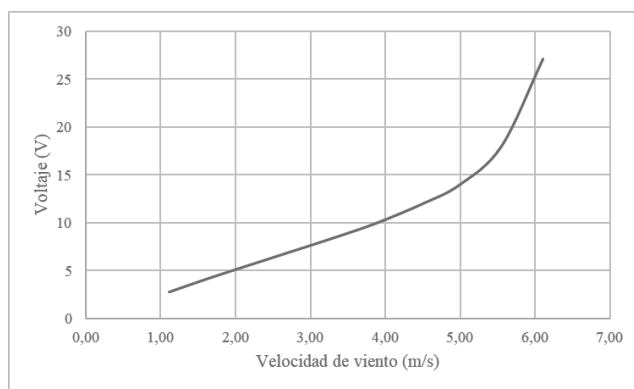


**Figura N° 9**  
*Potencia nominal*



*Fuente: Autores*

**Figura N° 10**  
*Voltaje registrado*



*Fuente: Autores*

### **Curva de torque calculado en el rotor del generador**

En base a los datos obtenidos de velocidad de giro del rotor y potencia del generador calculado con una carga de consumo de una bombilla incandescente, se pudo estimar el valor de la potencia registrada por el generador, tales valores se expresan en la siguiente tabla:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (13)$$

**Tabla N° 2**

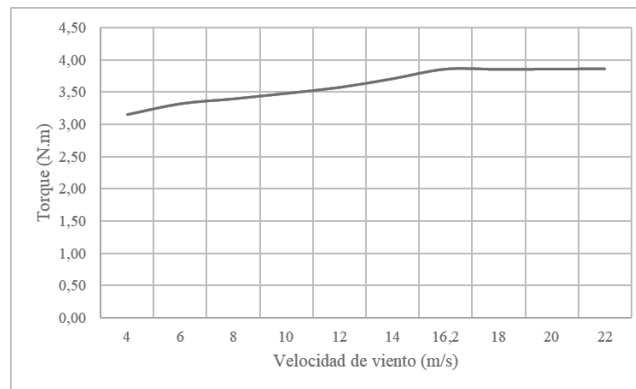
*Torque Calculado*

Km/h	Relación de transmisión	RPM del motor	RPM del rotor	Rad/s	Torque N.m
4	5	280	56	5,86	3,15
6		420	84	8,80	3,32
8		560	112	11,73	3,40
10		700	140	14,66	3,48
12		840	168	17,59	3,58
14		980	196	20,53	3,71
16.2		1130	226	23,67	3,86
18		1320	264	27,65	3,86
20		1695	339	35,50	3,86
22		2550	510	53,41	3,86

*Fuente: Autores*

**Figura N° 11**

*Torque Calculado*



*Fuente: Autores*

### Aplicación de la energía generada

Esta investigación se desarrolla con el fin de encontrar una solución alternativa al consumo de energía eléctrica en zonas rurales, donde no es posible acceder al suministro de luz eléctrica. En una primera instancia el diseño del generador está basado principalmente en un sistema para el almacenamiento de energía por medio de baterías, para lo cual se requiere un valor bajo de amperaje, pero gracias a la etapa de prueba se pudo demostrar que es factible una conexión directa con un transformador con el cual se podría alimentar momentáneamente y por periodos tiempo moderados a productos de uso doméstico, así como sistemas de bombeo o módulos de carga externos, como powerbanks para teléfonos celulares. La etapa de pruebas demuestra que el generador tiene la capacidad de alimentar a componentes eléctricos de corriente continua que requieran de hasta 2 amperios, a un máximo de 30 voltios, esto es posible si existen grandes

corrientes de viento, es por ello que se debe realizar un estudio previo de la zona en la que se va a instalar el generador, esto para asegurar un buen funcionamiento del mismo.

## Conclusiones

- La eficiencia del aerogenerador depende en gran parte del lugar donde se situó el aerogenerador, del tipo de conversión mecánico eléctrico que posea el sistema y del tipo de aerogenerador que se escoja en caso de altas velocidades de viento o en bajas velocidades de viento.
- También se puede aumentar la eficiencia del generador aumentando la altura de este, pero hay que tener en cuenta que a mayor altura posea el aerogenerador más complejo tiene que ser la estructura de soporte.
- En los aerogeneradores de eje vertical como el que se ha diseñado funcionan a velocidades del viento muy altas, ya que necesitan tener un par grande para mover el generador eléctrico, y por eso el diámetro del rotor es mayor y la velocidad angular menor.
- De todos modos, se tendría que fabricar un prototipo para ver el rendimiento real y TSR real del rotor ya que en estos cálculos se utilizan modelos estándares que no tienen por qué coincidir 100% con los resultados teóricos.
- El único punto sobre el que quedan algunas dudas es la durabilidad. Si bien en los cálculos se acostumbra a tomar 20 años de vida útil, por el momento, ninguna de las máquinas actualmente en operación ha alcanzado ese tope.
- Una vez concluido el prototipo del generador eólico se logró apreciar que es necesario colocar el equipo sobre una altura mayor a los 10 metros, ya que a dicha altura existen menos obstáculos para que el viento tenga mayor velocidad, la velocidad lograda sobre dicha altura fue de 4 m/s a 10 m/s la cual fue obtenida con ayuda de un anemómetro digital.
- El prototipo creado se puede mejorar utilizando más compartimientos de alabes, colocándolos simétricamente en el rotor. Ya que se pudo apreciar mediante experimentación que mientras más compartimientos tiene, el generador aprovecha de mejor manera el viento, con lo cual tiene mayores revoluciones y su eficiencia mejora.
- Como resultado de las experimentaciones se obtuvieron valores de potencia mínimas de 10.21 KW con una velocidad de viento de 10 km/h, la potencia máxima obtenida fue de 41.27

KW con una velocidad de viento de 22km/h y la potencia nominal fue de 18.28 KW con una velocidad de 16.2 Km/h.

## Referencias

1. J. A. Carta González, R. Calero Pérez, A. Colmenar Santos, and M. A. Castro Gil, Centrales De Energias Renovables Generacion Electrica Con Energias Renovables. 2009.
2. P. Fernández Díez, Energía eólica. Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, 1993.
3. M. J. Cuesta Santianes, M. Pérez Martínez, and J. A. Cabrera Jiménez, “Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW,” Cent. Investig. Ciemat, pp. 1–37, 2008.
4. U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, “Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments,” J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 96, pp. 1359–1375, 2008.
5. L. F. Ocampo Gil, Diseño de accionamientos y transmisión de máquinas. Universidad Tecnológica de Pereira, 1993.
6. P. I. Apaoblaza Augsburger, “Diseño estructural de una turbina de eje vertical para aplicaciones urbanas,” Universidad de Chile, 2014.
7. Á. Pinilla S., “El poder del viento. Wind power,” Rev. Ing., no. 28, pp. 64–69, 2008.
8. UPME, “Atlas de Viento y de Energía Eólica de Colombia. Anexo 1: Definición y clasificación de vientos en la atmósfera.” 2006.
9. M. Villarrubia López, Ingeniería de la energía eólica. Alfaomega Colombia, 2013.
10. J. Guillot, A. Vilorio. Estudio sobre el abastecimiento constante de energía eólica. 2015.
11. D. Canalejo, X. Font. Generador eólico para uso doméstico. Universidad Politecnica de Cataluña. 2011
12. J. Dodero, G. Fernandez. Generador eolico de baja potencia. Universidad de Buenos Aires. 2012
13. J. Moragues, A. Rapallini. Energía eólica. Instituto Argentino de la energía “General Mosconi”. 2003
14. Díaz, A. P., Pajaro, G. J., & Salas, K. U. (2015). Computational model of Savonius turbine. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(3), 406-412.

15. Cueva Barraqueta, L. V. (2015). Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo Savonius para producir 20 watts (Bachelor's thesis, Quito, 2015.).
16. Correa Delgado, J. F. (2018). Guía para diseño de generadores eólicos verticales tipo Savonius.

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).