

# Vertical Axis Wind Turbine Generator characterization at low velocity

Cristian Pachón, Std<sup>1</sup>, Juan Cortés, Std<sup>2</sup>, Javier Urbano, MEng<sup>3</sup> and Miguel Montoya, PhD<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia

<sup>1</sup>cristian.pachon-b@mail.escuelaing.edu.co, <sup>2</sup>juan.cortes-r@mail.escuelaing.edu.co, <sup>3</sup>javier.urban@escuelaing.edu.co,

<sup>4</sup>miguel.montoya-v@escuelaing.edu.co

*Abstract*—Vertical axis wind turbines, VAWT, can be divided into two main components, the turbine, it transforms the wind power and into mechanical power; and the generator, it transforms mechanical power into electrical power. To achieve an analysis of the turbine and its efficiency, it is vitally important to know the behavior of the generator. This paper shows the uses of a methodology to achieve the characterization of a PMG } type generator commonly used in the construction of these VAWT.

**Keywords:** *Generador eléctrico, VAWT, Turbina Eólica, Characterization, Electric Power*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.624>  
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

**18<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:** “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, July 27-31, 2020, Virtual Edition.

# Caracterización de un Generador para Turbinas Eólicas de Eje Vertical a bajas revoluciones

Cristian Pachón, Std<sup>1</sup>, Juan Cortés, Std<sup>2</sup>, Javier Urbano, MEng<sup>3</sup> and Miguel Montoya, PhD<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Colombia

<sup>1</sup>cristian.pachon-b@mail.escuelaing.edu.co, <sup>2</sup>juan.cortes-r@mail.escuelaing.edu.co, <sup>3</sup>javier.urban@escuelaing.edu.co,

<sup>4</sup>miguel.montoya-v@escuelaing.edu.co

**Resumen** – En la literatura se encuentra poca información acerca de los generadores para turbinas de eje vertical y su caracterización, sin embargo, el comportamiento de este tipo de aparatos se puede analizar como otros tipos de generadores. En este artículo se mostrará la caracterización y las curvas de un generador de imanes permanentes que conecta con una turbina de eje vertical tipo Darrieus. La metodología aplicada es basada en el concepto básico de hacer girar el generador en un ambiente controlado, tanto en la entrada como la salida de potencia mientras se evalúan variables de desempeño como velocidad de giro y potencia eléctrica. Los resultados de la caracterización del generador muestran concordancia con el usual comportamiento que tienen este tipo de dispositivos, además de esta manera es posible conocer el comportamiento del aerogenerador en cualquier punto de su operación.

**Palabras Clave** — Generador eléctrico, PGM, VAWT, Turbina Eólica. Caracterización, potencia eléctrica.

## I. INTRODUCCIÓN

La caracterización de aerogeneradores de eje vertical es de gran importancia para comprender su funcionamiento e identificar los rangos óptimos de operación en función de la velocidad de viento en el lugar de operación y la carga correspondiente que puede requerirse. Varios factores son importantes a la hora de realizar la caracterización, especialmente, que al aerogenerador lo integran dos componentes principales, que son la turbina y el generador.

En la turbina se transforma la potencia eólica en mecánica y se pueden controlar y modificar los parámetros de construcción para así mejorar su rendimiento en determinado régimen de vientos. Por otro lado, en el generador, se convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica siendo importante conocer su eficiencia y puntos de operación, para encontrar una relación directa entre los parámetros característicos de la potencia eólica con la capacidad de transformación de la turbina conectada a un generador específico. Este trabajo muestra el desarrollo de la caracterización de un generador usado en turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) con el fin de utilizar dicha información para identificar el potencial de transformación de potencia eólica a mecánica de una turbina de eje vertical.

## II. ESTADO DEL ARTE

### A. Caracterización de turbinas de eje vertical (VAWT)

Los aerogeneradores se pueden caracterizar mediante la curva de potencia, esta curva compara la potencia generada a

diferentes velocidades de viento, como se puede observar en la fig. 1. Existe una velocidad mínima para que la turbina genere suficiente energía aprovechable (cut-in wind speed) y un tope máximo (cut-off wind speed) para proteger el mecanismo. En el rango de operación normal a medida que va aumentando la velocidad de viento, se tiene un crecimiento cuasi lineal, hasta llegar a un punto máximo o de estabilización donde se alcanza la máxima potencia producida y finalmente empieza a caer. Principalmente lo que más varía en este tipo de curvas es la potencia producida y el régimen a la cual se puede producir un máximo.

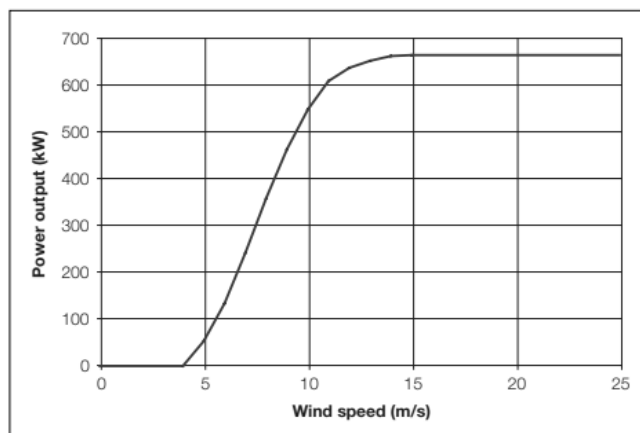


Fig. 1 Curva característica de un aerogenerador [1].

Si se requiere comparar la operación de diferentes aerogeneradores, luego de caracterizarlos, se construyen curvas de coeficiente de momento, donde en el eje X se tiene el Tip Speed Ratio (TSR) que expresa la velocidad de giro en términos de la velocidad de viento, y en el eje Y el coeficiente de momento ( $C_M$ ) generado por la turbina del aerogenerador.

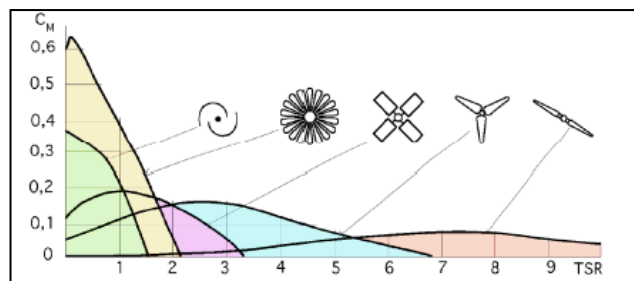


Fig. 2. Curva de Coeficiente de momento Vs TSR [2].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.626>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, July 27-31, 2020, Virtual Edition.

Dichas curvas se pueden construir para diferentes tipos de aerogeneradores de ejes vertical, como es mostrado en la fig. 2 y comparar sus respectivos rangos de operación.

### B. Tipos de Generadores Magnéticos.

Las turbinas de eje vertical pueden usar diferentes tipos de generadores, por consiguiente, el análisis del comportamiento del generador eléctrico es de igual importancia a la hora de caracterizar un aerogenerador.

Actualmente en el mercado se pueden encontrar diferentes generadores eléctricos. Para turbinas eólicas de eje vertical se utilizan especialmente los generadores de imanes permanentes de flujo radial, axial y transversal [3]. Cada uno de estos con unas características importantes de funcionalidad y construcción. En la fig. 3 se puede apreciar un esquema general de los tipos de Generadores Síncronos de Imanes Permanentes o PMSG (por sus siglas en inglés) y sus características principales.

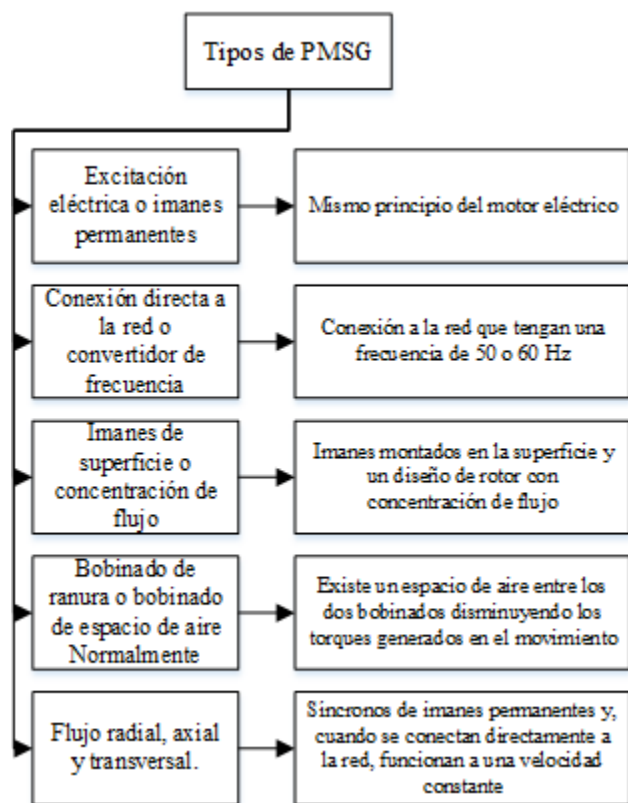


Fig. 3 Tipos de generadores PMSG. Adaptado de [4].

Los generadores de tipo radial; son generadores síncronos de imanes permanentes y, cuando se conectan directamente a la red, funcionan a una velocidad constante. Se han investigado los rotores con imanes de alta energía montados en la superficie, así como los rotores con imanes de ferrita y concentración de flujo, como se puede observar en la fig. 4a. En el caso de flujo axial fig. 4b, lo que cambia básicamente es la dirección de la

corriente, pero es el mismo principio. Debido a la alta velocidad, el generador tiene alta eficiencia y bajo peso.

El generador de flujo transversal, fig. 4c., tiene dos fases y está magnetizado por imanes permanentes con concentración de flujo. Debido a las dos fases, no puede conectarse directamente a la red. En cambio, está conectado a dos rectificadores monofásicos que alimentan un inversor trifásico, este tipo de generador está diseñado para una frecuencia en el rango de 100 a 200 Hz para obtener una alta relación fuerza-peso. Este tipo de generador tiene una relación de fuerza por peso muy alta, una desventaja es la complejidad de su estructura. Si el generador está conectado a un rectificador de diodos, la densidad de fuerza es menor de lo que sería posible lograr con un voltaje de suministro sinusoidal debido a la alta inductancia. Si está conectado a un rectificador de conmutación forzada, el generador de flujo transversal es capaz de producir densidades de fuerza más altas que los diseños de generador convencionales [3].

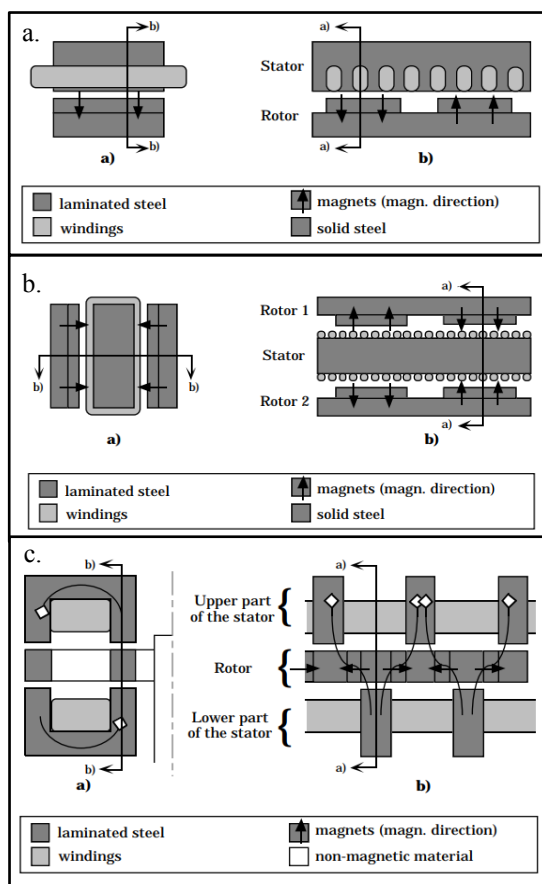


Fig. 4 Esquemas de la construcción de un generador PMG eléctrico, dependiendo el flujo. a. Radial, b. Axial, c. Transversal.[3]

### C. Comportamiento general de los generadores PMSG

El comportamiento de un generador magnético para fines de aplicación usualmente se puede evidenciar midiendo las variables principales de la potencia eléctrica como lo son voltaje y corriente, en función de la velocidad de giro y

adicionalmente analizando su eficiencia al comparar la potencia mecánica de entrada con la eléctrica resultantes a diferentes regímenes y cargas.

Hsiao et al [4] presentan el análisis del comportamiento de un generador donde al analizar los datos, obtuvieron las curvas de la fig. 5. Se tiene que el voltaje y la corriente tienen un comportamiento creciente a medida que el régimen de giro aumenta. Para un generador de 11.13 kW sometido a una carga de 6 y 24 ohm.

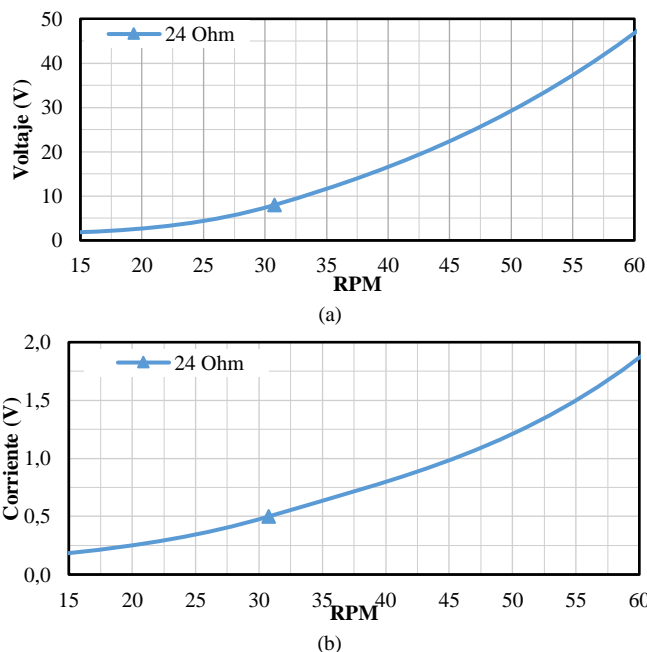


Fig. 5 Curvas (a) Voltaje y (b) corriente en función de régimen de giro para 24 Ohm en un generador PMSG de 78 polos. Adaptadas de [4]

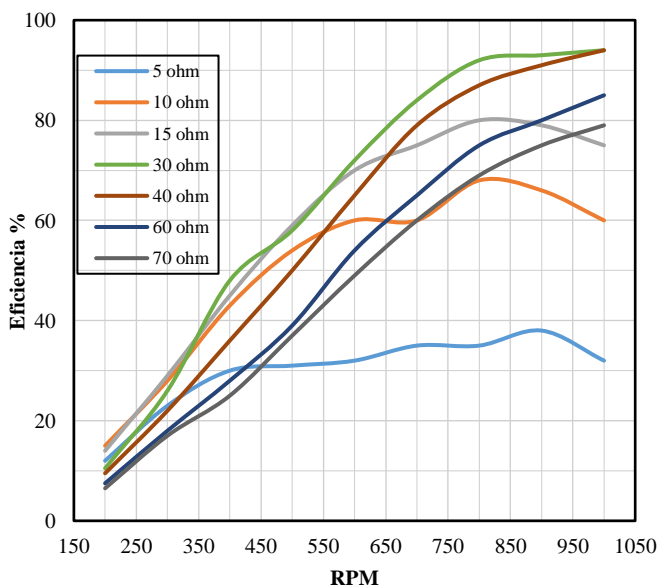


Fig. 6. Curva de eficiencia de un generador. Adaptación propia. [5].

El comportamiento de la eficiencia de un generador se puede evaluar para diferentes niveles de carga variando la velocidad y validando el punto óptimo de operación, donde su eficiencia es mejor. Para una misma velocidad la eficiencia aumenta a medida que se aumenta la carga hasta llegar a un punto máximo para luego disminuir progresivamente, ver fig. 6. Lo anterior permite determinar para un generador la velocidad óptima y la carga a la cual se tendrá la mejor eficiencia, para este caso entre 800 y 1000 rpm y de 30 a 40 ohmios de carga.

#### D. Análisis Experimental y Simulaciones

Un método para caracterizar generadores de imanes permanentes sincrónicos es mediante el uso de inteligencia artificial como lo presentan Halil Gor et al. [5] donde mediante el uso de un motor, variador y el uso de una red neuronal, que permite predecir el comportamiento de un sistema a partir del entrenamiento de un algoritmo con datos reales, pudieron llegar a datos con poca desviación con respecto a los reales. Los pesos de conexión se ajustan iterativamente por un algoritmo hasta que la entrada presentada y la coincidencia de patrones de salida se completa en un cierto éxito permitiendo finalmente construir las curvas características del generador [5].

Otro método es presentado por Ting y Yeh [6], donde se realiza un montaje similar al anterior eliminando la red neural que es remplazada por un sistema de medición que se conecta a una resistencia ajustable y a un software para la toma de datos, el generador utilizado es de flujo axial de estructura multicapa. Este sistema tiene diferentes bobinas que por medio de un sistema de control son activadas o no para generar, lo que permite que el rango de eficiencia pueda mantenerse alto para diferentes velocidades de giro del eje principal. La caracterización de este generador se hace generando la potencia mecánica en un banco que tiene un motor eléctrico que simula el eje principal de la turbina eólica y con un circuito de carga variable se evalúa la potencia eléctrica generada [6].

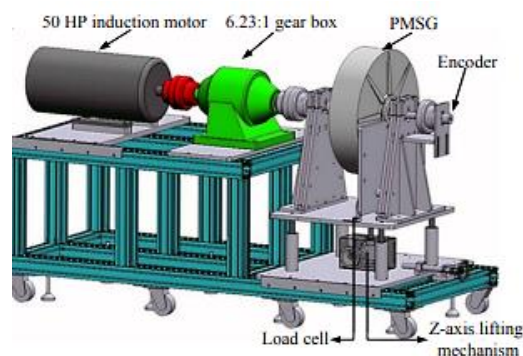


Fig. 8 Montaje experimental por Hsiao et al [4].

### III. INSTALACIÓN Y PRUEBAS

Generalmente para la caracterización de un generador eléctrico se puede realizar diferentes tipos de experimentos dependiendo del tipo de generador con el que se cuenta. Sin

embargo, el común denominador es que se hace girar el generador a diferentes velocidades y cargas para realizar mediciones de la potencia entrante y saliente. Lo que más varía es el procesamiento y la forma de obtención de los datos. Hsiao et al [4] presenta un montaje, como el mostrado en la fig. 8, para poder realizar medidas y obtener los datos característicos de un generador PMG.

Para caracterizar un generador se requiere conocer tanto la Potencia de entrada ( $P$  mecánica), como la potencia de salida ( $P$  eléctrica), con lo cual se puede calcular la eficiencia mediante (1), y resolviendo para variables medibles se obtiene (2) con el que se puede calcular dicha eficiencia, a partir de la velocidad de giro ( $\omega$ ), el torque ( $T$ ), voltaje ( $V$ ) y corriente ( $I$ ).

$$\eta_{generador} = \frac{P_{eléctrica}}{P_{mecánica}} \quad (1)$$

$$\eta_{generador} = \frac{V * I}{T * \omega} \quad (2)$$

Para generar variaciones a la potencia de entrada y la potencia de salida y que permitan simular condiciones de operación, se desarrolló un montaje experimental en un banco de pruebas. La entrada de potencia es simulada por un motor con variador de velocidad conectado a una transmisión que en su salida está alineado con un torquímetro rotodinámico acoplado a la entrada mecánica del generador. A la salida de potencia eléctrica del generador PMG Trifásico AC de rotor externo y flujo axial se implementó un sistema de medición de Voltaje y corriente AC, antes del controlador-conversor (AC-DC) del generador que funciona como carga junto con una resistencia variable, como se puede ver en el esquema general de la fig. 9.

Para el montaje en banco de pruebas, de acuerdo con el esquema anteriormente descrito, ver fig. 10. se realizó un esquema de pruebas usando los rangos presentados en la Tabla I para las variables de potencia de entrada y carga. Al definir un valor de carga, se realizó la medición de variables para diferentes velocidades de giro y luego se cambió el valor de la resistencia, modificando así la carga e iniciando el ciclo.

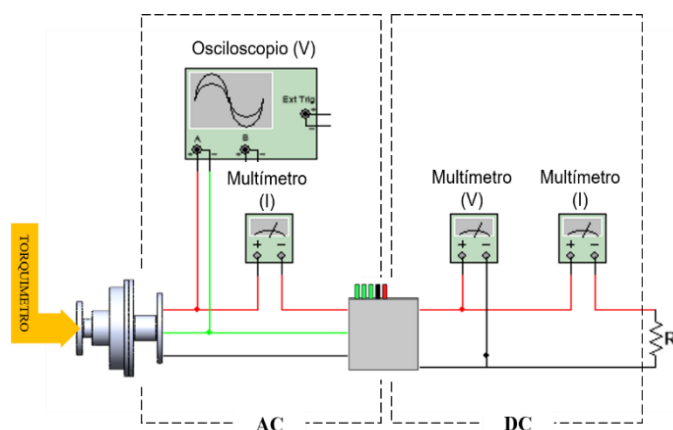


Fig. 9 Esquema del montaje para colección de datos.

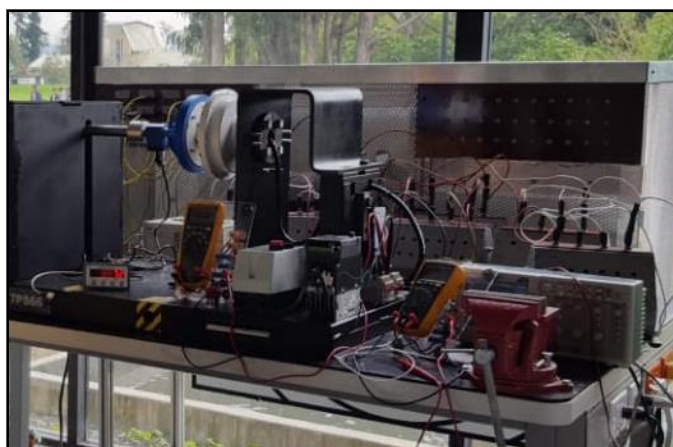


Fig. 10 Montaje en banco de pruebas.

TABLA I  
VALORES DE VARIABLES DE ENTRADA

Variables	Rango de Valores
Velocidad (rpm)	20-55 (200) <sup>a</sup>
Resistencia ( $\Omega$ )	1-16
Velocidad Nominal del Motor (rpm)	1800

<sup>a</sup> Se analizarán en detalle entre (20 y 55 rpm)

Adicionalmente se realizó un experimento para determinar la posible velocidad de giro del eje del aerogenerador bajo condiciones reales de viento. Usando un montaje similar al realizado por Urbano et al [7] en un banco para techo, se reprodujo dicho montaje en un pseudotúnel de viento, ver fig. 11, que permitiera validar para ciertas velocidad de viento estables las posibles velocidades de giro del conjunto aerogenerador a diferentes regímenes de carga.

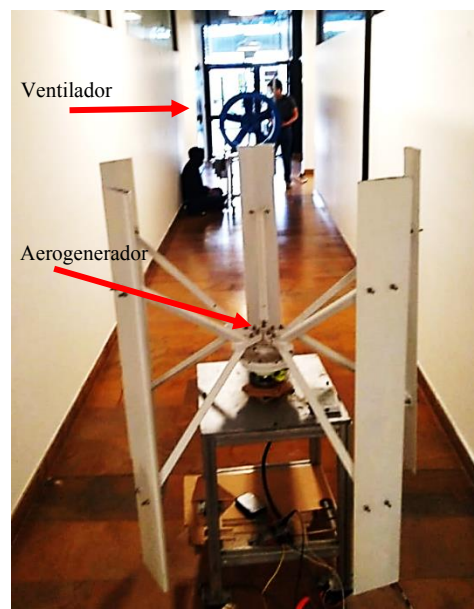


Fig. 11. Montaje en pseudotúnel de viento.

Debido a que en este experimento de túnel de viento se obtuvo un rango de velocidades entre 20 y 55 rpm, solo es

posible generar una correlación de estos datos con los del montaje en el banco de pruebas en estos valores de velocidad, por lo que se analizó en detalle este último rango de velocidades.

#### IV. RESULTADOS

Al realizar el montaje en seudo túnel de viento se determinó el rango posible de velocidades de giro de un aerogenerador tipo H-Darrius de acuerdo con diferentes velocidades de viento que se encuentran en la región donde se desea validar el comportamiento del aerogenerador. La fig. 12 muestra la correlación entre la velocidad de viento controlada y la velocidad de giro del eje para diferentes cargas.

Con esta información se procedió a evaluar el generador en banco de pruebas en todo el rango de velocidades que lo permite. La potencia eléctrica generada en función de la velocidad de giro del eje se muestra en la fig. 13, donde se encuentra una buena correlación de los datos obtenidos para diferentes cargas. Adicionalmente y adaptando la información sobre la caracterización y específicamente de potencia generada respecto a la velocidad de giro de Hsiao et al [4], se encuentra un similar comportamiento, como se evidencia en la fig. 14.

Una vez validada la potencia eléctrica del generador, se analiza en detalle el rango de velocidades identificadas en la prueba de seudo túnel, especialmente en los rangos de 15 a 60 rpm y para el cual se amplió la carga a 16 ohmios.

Debido a que uno de los objetivos es caracterizar la turbina y la potencia de salida, es de principal interés determinar la relación entre el torque y la velocidad para las cargas previstas. En la fig. 15 cuando la resistencia es más pequeña, la carga en el generador es mayor y requiere un mayor torque, y viceversa con una resistencia más grande. Esto concuerda con los datos en Orduz y Suárez [7] para las pruebas de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. En términos prácticos no es común encontrar esta curva en aerogeneradores, pero para términos de diseño de elementos mecánicos y diseño de transmisión la información de la Fig. 15 es muy útil.

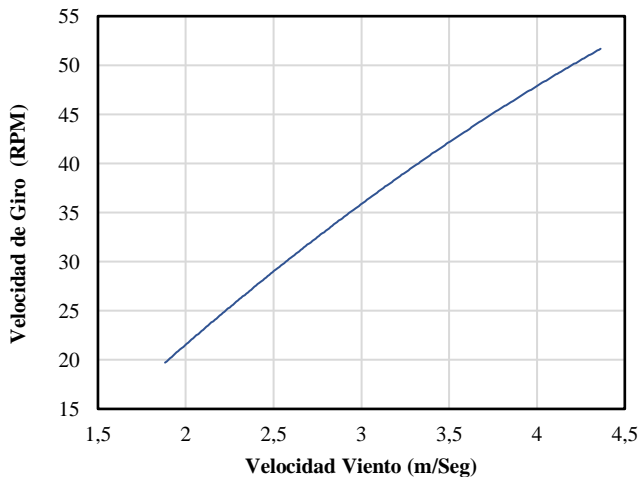


Fig. 12 Curva de velocidad de giro respecto a la velocidad del viento.

Resultado de los datos colectados anteriormente se calculan la potencia mecánica según (2) y (3) a diferentes velocidades y de acuerdo con las cargas en estudio. Se aprecia en la Fig. 16, una clara tendencia ascendente correspondiente al aumento de torque para mantener el balance con la carga eléctrica. Esta información es básica en el cálculo de la eficiencia del generador.

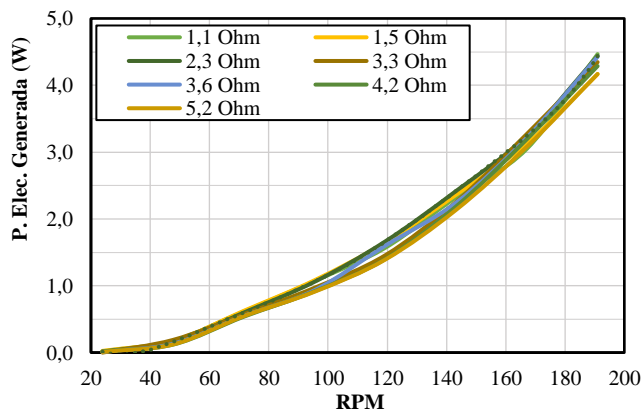


Fig. 13 Potencia eléctrica generada para diferentes velocidades.

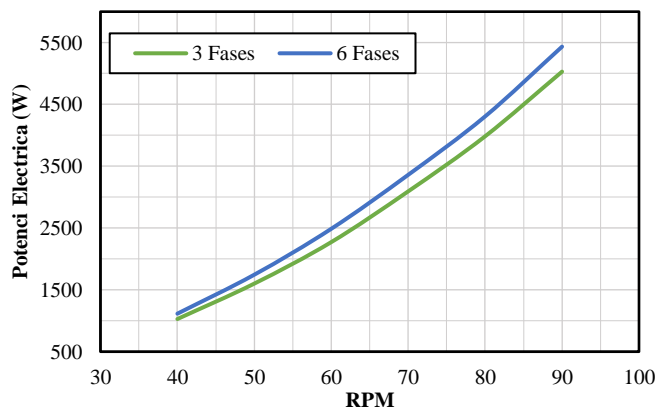


Fig. 14 Potencia eléctrica generada para dos tipos de Generadores, adaptación propia [5].

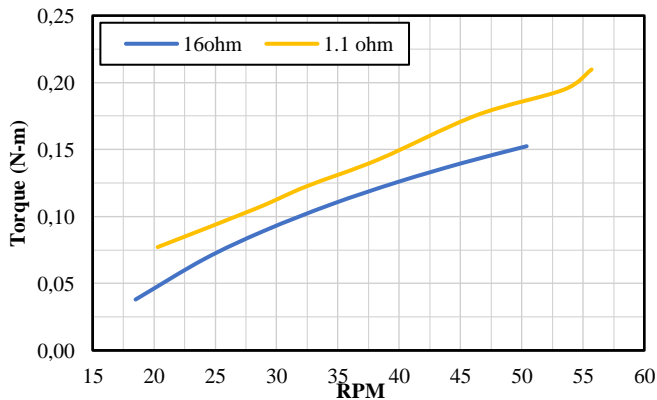


Fig. 15 Torque para diferentes grados de carga.

Se colectaron los datos de corriente, voltaje y se calculó la respectiva potencia eléctrica para los puntos de prueba, que se pueden ver en las Fig. 17 a, b y c, respectivamente.

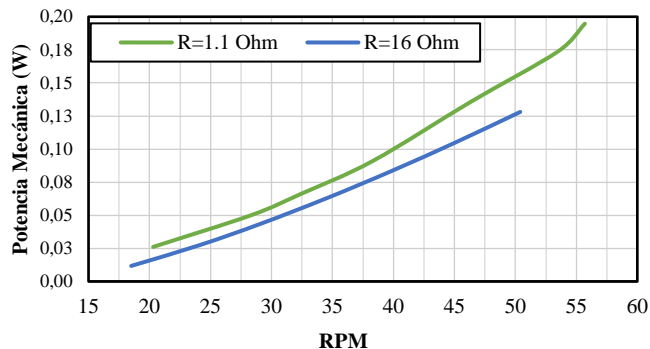
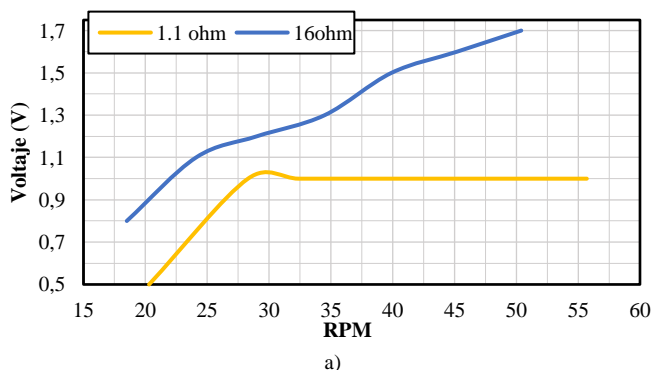
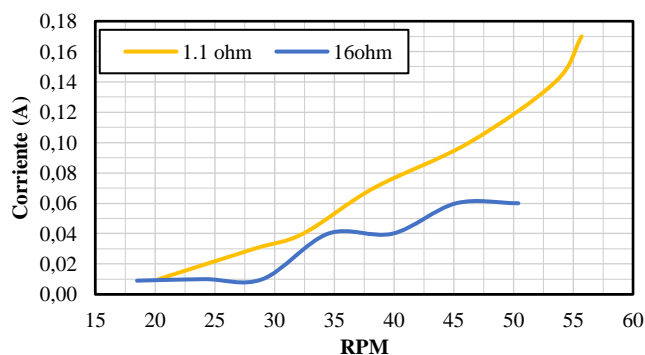


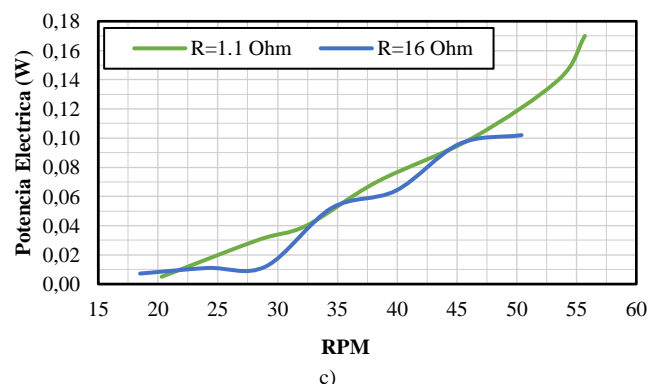
Fig. 16. Potencia mecánica para diferentes grados de carga



a)



b)



c)

Fig. 17. Estimación de la potencia Generada a diferentes velocidades. (a) Corriente, (b) Voltaje y (c) Potencia eléctrica.

El comportamiento de la corriente tiene una tendencia más potencial respecto a la velocidad de giro que el voltaje que tiene un comportamiento más lineal. La potencia eléctrica máxima para la carga y el rango de velocidad estimado fue de 0.17 W a 50 rpm. Lo anterior se evidencia en el comportamiento potencial de la curva de potencia eléctrica. La gráfica de potencia eléctrica es similar a la descripción del comportamiento de un aerogenerador, según lo descrito en la fig. 1, donde a bajo regimen empieza a aumentar la potencia electrica y se puede apreciar esto en el rango de baja velocidad.

Finalmente, se calcularon las eficiencias del generador de acuerdo con (2) y para cada carga se graficaron para realizar su comparación, ver Fig. 18. Para resistencias bajas (1.1 ohmios) la eficiencia aumento hasta valores aproximados de 80% ubicados a 50 rpm. Para resistencias mayores en este caso de 16 ohmios la eficiencia aumentó hasta valores aproximados de 95% a 45 rpm.

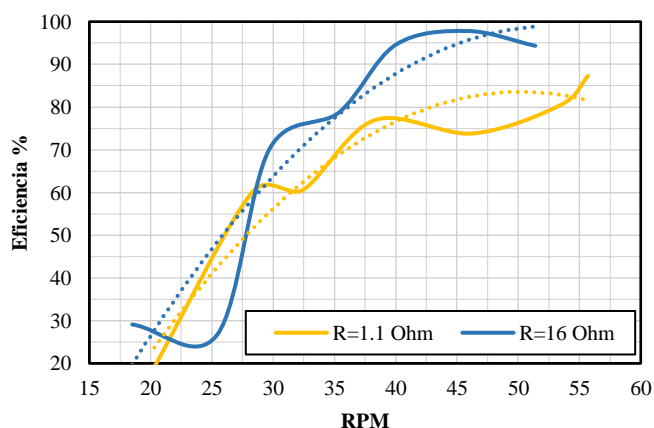


Fig. 18 Eficiencia generador para diferentes grados de carga entre 20 y 60 rpm.

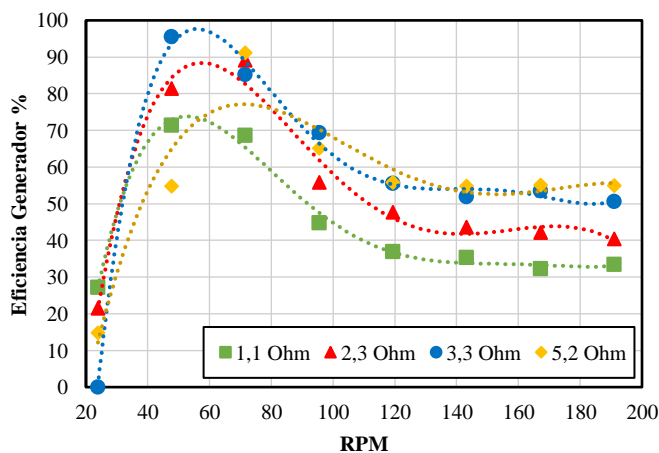


Fig. 19 Eficiencia generador para diferentes grados de carga hasta 200rpm.

La eficiencia del generador extendida al análisis de banco en todo el rango de velocidades del generador, Fig. 19, es consistente con el análisis en pseudotúnel de viento mostrando para máximos de eficiencia en velocidades cercanas

a 50 rpm, con variaciones de acuerdo con la carga. Es notable el retroceso en el punto de máxima eficiencia a medida que aumenta la resistencia en el rango de cargas observado.

## V. CONCLUSIONES

Se encontró que con cargas entre 1.1 ohmios y 16 ohmios, la potencia generada fue de máximo 0.17W a una velocidad de 50 rpm. Se encontró congruencia en la evaluación de datos de banco de generador y de seudotúnel de viento, lo cual permite confirmar que los datos obtenidos son válidos para su estudio.

Una vez confirmado el comportamiento del generador y conociendo la relación entre la potencia eléctrica y la velocidad de rotación, es posible de forma inversa, conocer el torque y la potencia mecánica generada por la turbina solo con conocer la velocidad de giro bajo condiciones de carga idénticas, permitiendo caracterizar de forma global el aerogenerador.

Al realizar la caracterización completa del generador es posible aplicar esta información y metodología en todo el aerogenerador en operación real, y de esta manera mejorar la comprensión del comportamiento real de la turbina para posteriormente su optimizarla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico derivado de un proyecto de Investigación de Convocatoria Interna Grandes rubros de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito desarrollado por el grupo de investigación DSIM (Diseño Sostenible en Ingeniería Mecánica) del programa de Ingeniería Mecánica.

## REFERENCIAS

- [1] A. Kalmikov, "Wind Power Fundamentals," *Wind Energy Eng. A Handb. Onshore Offshore Wind Turbines*, no. December 2017, pp. 17–24, 2017.
- [2] I. V. P. D. E. Diseño, "Iv.- parámetros de diseño," pp. 73–102.
- [3] T. R. No, C. Engineering, and E. P. Engineering, *Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators by Anders Grauers*, no. 292. 1996.
- [4] C. Hsiao, S. Yeh, and J. Hwang, "Design of High Performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators," pp. 7105–7124, 2014.
- [5] E. Kurt, "ScienceDirect Application of artificial neural network to estimate power generation and efficiency of a new axial flux permanent magnet synchronous generator," vol. 2, pp. 4–11, 2017.
- [6] C. Ting and L. Yeh, "Electrical Power and Energy Systems Developing the full-field wind electric generator," vol. 55, pp. 420–428, 2014.
- [7] O. I. Orduz Berdugo and J. E. Suárez Perez, "Diseño y Construcción De Un Prototipo De Turbina Eólica De Eje Vertical Para Generación A Baja Potencia," 2011.
- [8] J. Urbano, C. Pachón, S. Cortes, N. Cuevas, S. Cancelado, M. Montoya, A. Bermúdez, C. Hernández, "Diseño De Un Banco De Pruebas En Techo Para Caracterizar El Desempeño De Turbinas Eólicas De Eje Vertical", EIEI ACOFI 2019.