

# Induction Generator Characterization for a Medium and Low Wind- Power Generator

Julián-Esteban Camacho-Quintana; Jorge-Enrique Salamanca-  
Céspedes; Adriana-Patricia Gallego-Torres

**Citación:** J.-E. Camacho-Quintana, J.-E. Salamanca-Céspedes, and  
A.-P. Gallego-Torres, “Induction Generator Characterization for a  
Medium and Low Wind- Power Generator,” *Revista Facultad de  
Ingeniería*, vol. 29 (54), e10900, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10900>

**Recibido:** Febrero 28, 2020; **Aceptado:** Abril 17, 2020;

**Publicado:** Abril 22, 2020

**Derechos de reproducción:** Este es un artículo en acceso abierto  
distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



**Conflicto de intereses:** Los autores declaran no tener conflicto de  
intereses.

# Induction Generator Characterization for a Medium and Low Wind-Power Generator

Julián-Esteban Camacho-Quintana<sup>1</sup>

Jorge-Enrique Salamanca-Céspedes<sup>2</sup>

Adriana-Patricia Gallego-Torres<sup>3</sup>

## Abstract

The following paper was part of the research work of the GEOM Seed Plant, which develops medium and low power wind generators. The aim was to develop proposals of prototypes that contribute with innovation and research to the development of non-conventional renewable energies. We studied the behavior of an electric induction generator in order to implement it in a low and medium wind-power generator, the study was characterized by using two points of view: theoretical machine analysis and virtual implementation with software-level technological tools such as Simulink. The resulting model meets the climatological conditions of the city of Bogotá, where there are ideal conditions for the exploitation of wind energy, taking the concept of total available power as reference for the analysis of the generator. The electrical and application advantages and disadvantages were analyzed. Finally, it was determined, based on the analysis processes, that the use of an induction machine is more convenient compared to a synchronous one, in order to perform future implementations that are optimal and efficient and support the study and development process of non-conventional renewable energies, particularly wind energy.

---

<sup>1</sup> Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). [jecamachog@correo.udistrital.edu.co](mailto:jecamachog@correo.udistrital.edu.co). ORCID: [0000-0001-8488-6213](https://orcid.org/0000-0001-8488-6213)

<sup>2</sup> Ph. D. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). [jsalamanca@udistrital.edu.co](mailto:jsalamanca@udistrital.edu.co). ORCID: [0000-0002-9396-2641](https://orcid.org/0000-0002-9396-2641)

<sup>3</sup> Ph. D. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). [adpgallegot@udistrital.edu.co](mailto:adpgallegot@udistrital.edu.co). ORCID: [0000-0002-6654-3177](https://orcid.org/0000-0002-6654-3177)

**Keywords:** asynchronous; generator; induction; power; renewable energy; wind turbine.

## **Caracterización de generador de inducción para un generador eólico de media y baja potencia**

### **Resumen**

El artículo que se presenta a continuación es resultado del trabajo de investigación del semillero GEOM para el desarrollo de generadores eólicos de media y baja potencia. Se planteó la necesidad de generar y desarrollar propuestas de prototipos que contribuyeran desde la innovación y la investigación al desarrollo de las energías renovables no convencionales. Se estudió el comportamiento de un generador eléctrico de inducción con el objetivo de utilizarlo en el diseño e implementación de un generador de energía eólica o aerogenerador de baja y media potencia. El estudio se caracterizó por plantear dos puntos de vista: mediante el uso del análisis teórico de la máquina y, en segundo lugar, mediante la implementación virtual con herramientas tecnológicas, para lo que se empleó el software Simulink. El modelo que resultó se ajusta a las condiciones climatológicas de la ciudad de Bogotá, donde se presentan fenómenos óptimos para el aprovechamiento de la energía del viento, tomando el concepto de potencia total disponible como referencia para el análisis del generador. Se analizaron las ventajas y desventajas tanto eléctricas como de aplicación. Finalmente, se determinó, con base en los procesos de análisis, que es más conveniente el uso de una máquina de inducción en comparación con una síncrona, para efectos de realizar futuras implementaciones que sean óptimas y eficientes, que apoyen al proceso de estudio y desarrollo de las energías renovables no convencionales y, muy particularmente, al desarrollo de la energía eólica.

**Palabras clave:** aerogenerador; asincrónico; energías renovables no convencionales; generador de inducción; potencia.

## **Caracterização de gerador de indução para um gerador eólico de média e baixa potência**

### **Resumo**

O artigo que se apresenta a continuação é resultado do trabalho de pesquisa do grupo GEOM para o desenvolvimento de geradores eólicos de média e baixa potência. Planteou-se a necessidade de gerar e desenvolver propostas de protótipos que contribuíssem desde a inovação e a pesquisa ao desenvolvimento das energias renováveis não convencionais. Estudou-se o comportamento de um gerador elétrico de indução com o objetivo de utilizá-lo no desenho e implementação de um gerador de energia eólica ou aerogerador de baixa e média potência. O estudo caracterizou-se por plantear dois pontos de vista: mediante o uso da análise teórica da máquina e, em segundo lugar, mediante a implementação virtual com ferramentas tecnológicas, para o qual utilizou-se o software Simulink. O modelo que resultou ajusta-se às condições climatológicas da cidade de Bogotá, onde ocorrem ótimos fenômenos para o aproveitamento da energia do vento, tomando o conceito de potência total disponível como referência para a análise do gerador. Analisaram-se as vantagens e desvantagens tanto elétricas como de aplicação. Finalmente, determinou-se, com base nos processos de análise, que é mais conveniente o uso de uma máquina de indução em comparação com uma síncrona, para efeitos de realizar futuras implementações que sejam ótimas e eficientes, que apoiem o processo de estudo e desenvolvimento das energias renováveis não convencionais e, muito particularmente, o desenvolvimento da energia eólica.

**Palavras chave:** aerogerador; assíncrono; energias renováveis não convencionais; gerador de indução; potência.

## I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de dar solución a los problemas energéticos de la sociedad ha llevado al estudio, diseño y aplicación responsable de nuevas tecnologías para la generación de energía, como es el caso de las energías renovables, lo anterior dado que “las sociedades humanas para poder existir han dependido de los usos que han dado a las diversas fuentes de energía” [1]. Esto conduce a plantear ideas sobre la necesidad de realizar propuestas innovadoras alrededor de prototipos que permitan mitigar los efectos causados por el uso indiscriminado de los recursos energéticos de origen fósil [1-2].

Los generadores eólicos, o aerogeneradores, son sistemas alternativos de generación de energía eléctrica no convencional que aprovechan la fuerza del viento para convertir energía mecánica en energía eléctrica. Los sistemas de generación eólicos aplicados a generación de media y baja potencia serían ideales para instalaciones domésticas, donde podrían solventar el consumo de energía disminuyendo la dependencia de la red eléctrica. Dicha conversión se produce gracias a una máquina eléctrica muy común, denominada generador eléctrico [2-4]. Un generador es una máquina eléctrica capaz de convertir la energía mecánica en forma de movimiento de rotación, en energía eléctrica de corriente alterna (fenómeno conocido como conversión de energía), con una frecuencia que en la mayoría de los casos no es constante [5]. Este fenómeno se produce cuando existe inducción eléctrica en una bobina bajo un efecto de campo magnético en movimiento o variable, generando una corriente eléctrica. El principio de funcionamiento de todos los generadores es el mismo, pero existen varios tipos que se ajustan a las diferentes necesidades y demandas de potencia.

Existen dos tipos de máquinas: sincrónicas y de inducción. El primer tipo es un dispositivo que posee un imán permanente en el rotor y requiere de un movimiento mecánico primario para inducir una corriente. En una máquina asíncrona o de inducción, la velocidad del campo magnético incidente no es la misma que la del rotor. Cuando el campo magnético gira a mayor velocidad que el rotor, se induce una corriente en el estator proporcional a la velocidad de giro del rotor. Entre más

velocidad tiene el rotor, mayor es la potencia que puede generar la máquina [6]. En la Tabla 1 se presentan las características de cada una de las máquinas.

**Tabla 1.** Características de las máquinas eléctricas sincrónicas y asíncronas.

<b>Sincrónica</b>	<b>Asincrónica</b>
Tiene un imán permanente	No tiene imanes en su estructura
Necesita alimentación DC AC	No es necesaria la alimentación DC
Tiene dos embobinados	Tiene un solo embobinado
De coraza grande y alto costo	Económica y compacta
Requiere sistema de control robusto	Requiere control en etapa de potencia y alimentación
No afecta el factor de potencia	Requiere de banco de condensadores

Por las razones mostradas en la tabla anterior, se decide trabajar con una máquina de inducción, pues representa más ventajas en costo, tamaño y funcionamiento. Como se muestra en la Figura 1, el estator es una pieza fija en la máquina eléctrica que tiene apiladas unas láminas con ranuras dentro de un marco de acero. Dentro de estas ranuras hay tres embobinados llamados devanado trifásico [7].



**Fig. 1.** Partes de una máquina de inducción [5].

Cuando la máquina funciona como motor, en el estator se producirá el campo magnético rotatorio que moverá el rotor. Cuando trabaja como generador, en las bobinas se inducen corrientes debido al movimiento del rotor, creando una diferencia de potencial entre cada una de las bobinas. Si es trifásica, se espera que la tensión de la salida sean señales sinusoidales desfasadas 120 grados.

Como se observa en la Figura 1, a la izquierda está el rotor, que es la pieza móvil de la máquina, con forma de jaula de ardilla y atravesada con placas transversales de hierro que le permiten la inducción de campos magnéticos en sí mismo y así

moverse. El modo principal de operación de este tipo de máquina es como motor, induciendo una corriente en el estator y produciendo movimiento en el rotor. Su funcionamiento se puede explicar desde los principios más básicos de la física de electromagnetismo. Para ello se hará un análisis matemático que permita escoger el generador que mejor se acople a los requerimientos de tensión y potencia.

## II. PRINCIPIOS FÍSICOS DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN

### A. Fuerza magnetomotriz

De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, la ley de Ampere generalizada queda expresada en la ecuación (1).

$$\nabla \times B = \mu_o J + \mu_o \epsilon_o \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1)$$

Donde  $\mu_o$  es la permeabilidad magnética,  $\epsilon_o$  la permitividad,  $E$  el campo eléctrico,  $B$  el flujo magnético,  $J$  la densidad de corriente y  $t$  es el tiempo. Se observa que la intensidad de un campo magnético es directamente proporcional a la corriente producida por un campo eléctrico variante en el tiempo. Ahora, aplicando una tensión AC en cada devanado, se induce una corriente que, obedeciendo a la ley de Ampere, genera un campo magnético rotatorio denominado "Fuerza magnetomotriz", ecuación (2).

$$F_e = N i_j \quad (2)$$

Donde  $N$  es el número de espiras del embobinado e  $i_j$  se refiere a las corrientes de las fases. Utilizando la ecuación (2) para cada una de las fases se tiene el sistema de ecuaciones (3) a (5).

$$F_{e1} = N i_1 \sin(\theta) \quad (3)$$

$$F_{e2} = N i_2 \sin(\theta - 120) \quad (4)$$

$$F_{e3} = N i_3 \sin(\theta - 240) \quad (5)$$

Donde  $\theta$  es la posición angular.

En base al sistema, se definen las corrientes, cada una como una función sinusoidal con velocidad angular  $\omega$ , de la manera expresada en las ecuaciones (6) a (8).

$$i_1 = I_{max} \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$i_2 = I_{max} \sin(\omega t - 120) \quad (7)$$

$$i_3 = I_{max} \sin(\omega t - 240) \quad (8)$$

Hallando la fuerza magneto motriz total se obtiene la ecuación (9).

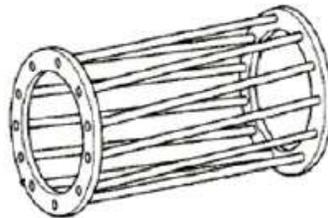
$$F_{mt} = N I_{max} [\sin(\omega t)\sin(\theta) + \sin(\omega t - 120)\sin(\theta - 120) + \sin(\omega t - 240)\sin(\theta - 240)] \quad (9)$$

Donde  $N$  es el número de espiras,  $I_{max}$  es la corriente máxima,  $\theta$  es la posición angular y  $\omega$  es la velocidad angular. Realizando las operaciones respectivas, se encuentra que la fuerza magneto motriz  $F_m$  que será inducida en el estator se representa en (10).

$$F_m = \frac{3}{2} N I_{max} \sin(\omega t - \theta) \quad (10)$$

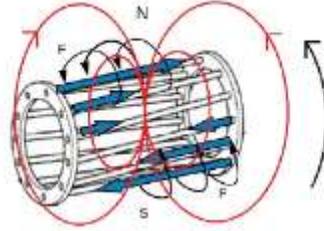
### **B. Movimiento del rotor**

Un rotor de jaula de ardilla es una estructura física que se compone de barras transversales (usualmente de hierro o metales altamente conductivos) unidas por sus extremos por un par de anillos que las cortocircuitan entre sí. Dicha estructura se muestra en la Figura 2.



**Fig. 2.** Rotor de inducción, jaula de ardilla [5].

De acuerdo a las leyes del electromagnetismo, cuando se induce un campo magnético variante en el tiempo en una superficie, se produce una corriente a lo largo del camino de dicha superficie. Cuando el campo rotatorio incide en la jaula de ardilla, se producen corrientes a lo largo de las barras laterales del rotor, la dirección de las corrientes depende de la polaridad del campo magnético, como se observa en la Figura 3.



**Fig. 3.** Fuerzas inducidas en el rotor.

De acuerdo con la Figura 3, las fuerzas  $F$  se producen por las corrientes de corto circuito a lo largo de las barras unidas por los anillos. Esta inducción genera una rotación de 360 grados a una velocidad que depende del número de polos del estator, se debe tener en cuenta que la flecha negra externa que se observa en la Figura 3 indica la dirección de rotación del campo magnético.

### **C. Inducción electromagnética**

Partiendo de la ley de Faraday que dice que la fuerza electromotriz (fem), o tensión inducida  $\epsilon$ , en un número  $N$  de espiras es proporcional a la variación en el tiempo de un flujo magnético  $\phi_B$  con signo negativo [7], se tiene la expresión (11).

$$\epsilon = -N \frac{\partial \phi_B}{\partial t} \quad (11)$$

Entonces, se puede decir que, si se hace girar el rotor a una velocidad determinada, se creará un campo magnético variable en el tiempo, induciendo corrientes en los devanados del estator y generando así una fuerza electromotriz o tensión de la fase al neutro.

### **D. Deslizamiento**

Es la diferencia que existe entre la velocidad síncrona de la máquina ( $v_1$ ) y la velocidad del rotor ( $v$ ). Se puede calcular con la ecuación (12).

$$s = \frac{v_1 - v}{v_1} * 100 \quad (12)$$

Donde  $s$  es el coeficiente de deslizamiento. Se sabe también que la frecuencia de operación de la máquina cuando el deslizamiento es mayor que uno es diferente a la frecuencia fundamental del sistema.

$$F_1 = f_0 * s \quad (13)$$

Donde  $F_1$  es la frecuencia de operación,  $f_0$  es la frecuencia fundamental y  $s$  es el deslizamiento.

Sánchez y Hernández [12], definen que el deslizamiento permitido para una máquina trifásica es 15 % máximo, dado que un deslizamiento superior representa un riesgo para la integridad de la máquina y la calidad de la potencia de salida. Trabajando como generador, cuando se produce un movimiento desde el rotor, se genera un deslizamiento negativo cuando la velocidad de giro supera a la velocidad de sincronismo. Por medio de la autoexcitación del estator empleando un banco de condensadores, se generan corrientes a lo largo de los devanados, cada una desfasada 120 grados respecto a la anterior.

### ***E. Banco de condensadores***

Como se explica en el párrafo anterior, para generar energía eléctrica, las velocidades del rotor y del campo magnético giratorio (velocidad de sincronismo) deben ser diferentes. Solo con el movimiento del rotor no se generará energía, puesto que no existe aún un campo magnético que induzca corrientes. Por esta razón, se conecta un banco de condensadores trifásico en el estator con el fin de suministrar energía que lo excite, generándose corrientes en los devanados que aumentarán hasta que haya un punto de equilibrio entre la velocidad del campo magnético giratorio creado por la inducción electromagnética de las bobinas y la velocidad de giro del rotor [7].

La importancia del banco de condensadores es que permite que el generador se auto-excite, es decir, que la máquina utilice la energía necesaria para mantener un punto de equilibrio que garantice un deslizamiento negativo y generación de energía. Cuando las velocidades alcanzan dicho punto, en las terminales del estator se generan las tensiones trifásicas de salida.

Torres Montalvo [13] plantea que el voltaje de salida del generador depende básicamente de: i) la velocidad del primo motor (en este caso la velocidad del viento que es la que impulsa las hélices del generador); ii) el tamaño de los capacitores; y, iii) la carga conectada.

Se sabe que “si la velocidad del generador se mantiene constante, el voltaje generado depende solamente del tamaño de los capacitores y de la carga conectada” [13], razón por la cual, si la carga del sistema aumenta, la tensión de salida va a decrecer; dicho esto, la capacitancia debe variar continuamente respecto al valor de la carga. Es por ello que en la Tabla 1 se enunció que la máquina de inducción requiere un banco de condensadores y de un sistema de control en la etapa de potencia y alimentación.

### III. METODOLOGÍA - MODELOS ESPERADOS DE LA POTENCIA DISPONIBLE EN BOGOTÁ

#### A. Climatología estimada de Bogotá

Para realizar el modelo del pronóstico climatológico de la ciudad de Bogotá (donde estará ubicado el aerogenerador) es necesario conocer la temperatura, presión, humedad y velocidad del viento: las cuales se determinaron por las siguientes herramientas, de la página web del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, que permiten obtener los siguientes parámetros [10]: i) Atlas interactivo climatológico de Colombia - Velocidad media anual multianual; ii) Atlas interactivo climatológico de Colombia - Velocidad media mensual; iii) Atlas de viento y Energía eólica de Colombia; y, iv) Estudio de la caracterización climática de Bogotá. La Tabla 2 resume la información obtenida.

**Tabla 2.** Caracterización del clima de Bogotá

Parámetro	Valor medio	Desviación	Unidad
Temperatura	15.0	± 2.0	° C
Presión	751.6	± 0.7	hPa
Humedad Relativa	79.5	± 2.0	%
Velocidad del Viento	4.1	± 0.3	m/s

Con los parámetros de temperatura, presión, humedad relativa y velocidad del viento en la ciudad de Bogotá presentes en la Tabla 2, se puede calcular la densidad del aire con la ecuación (14).

$$\rho = \frac{p M_a}{Z R T} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (14)$$

Donde  $p$  es la presión atmosférica,  $T$  temperatura en Kelvin,  $M_a$  es la masa molecular aparente del aire,  $Z$  es el factor de desviación de los gases y  $R$  es la constante universal de los gases ( $10.73 \text{ psi} \frac{\text{ft}^3}{\text{lb mol}}$ ). La humedad  $h$  se utiliza para calcular  $X_v$ , que corresponde a la fracción molar. Finalmente,  $M_v$  es la masa molar del vapor de agua. Posteriormente, se reemplazan los parámetros en la ecuación (14). Para fines prácticos de cálculos de potencia se obtiene que la densidad del aire para Bogotá es:

$$\rho = 0.9027 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}, \pm 0.0062 \quad (15)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área cubierta por las hélices y  $V$  es la velocidad del viento. Es necesario tener en cuenta que el área cubierta por las hélices es circular y no incluye el buje.

### **B. Potencia disponible**

La potencia disponible se refiere a la requerida para mover las partículas de aire a una cierta velocidad o la energía disponible en el viento que fluye a través de un área específica en un tiempo determinado [10]. Se puede calcular con la ecuación (16).

$$P_{ot} = \frac{E_c}{t} = \frac{3}{2} \rho A V^3 \quad (16)$$

Donde  $E_c$  es la energía cinética,  $t$  es el tiempo,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área cubierta por las hélices, y  $V$  es la velocidad del viento.

$$A = \pi r_{helices}^2 - \pi r_{bujes}^2 \quad (17)$$

La variable  $r$  corresponde al radio de las hélices y del buje. Teniendo en cuenta que la longitud de las aspas fue de 3 m, el radio central del buje de 0.2 m y aplicando la ecuación (5), se obtiene que:

$$A = \pi 3.2 \text{ m}^2 - \pi 0.2 \text{ m}^2 = 32.044 \text{ m}^2 \quad (18)$$

Reemplazando los valores conocidos en la ecuación (16), se calcula la densidad de potencia disponible; la potencia máxima que se puede aprovechar con un generador eólico corresponde al 59% del siguiente valor.

$$P_{ot} = 2990.4255 \frac{W}{m^2} \quad (19)$$

De la potencia total disponible en el viento, el aerogenerador solo puede aprovechar como máximo el 59.26%, esto se debe al límite de Betz, entonces la potencia extraíble es:

$$P_T = 0.5926 * P_{ot} = 1772.126 \frac{W}{m^2} \quad (20)$$

#### IV. SIMULACIÓN DE GENERADOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA LÍNEA

En la Figura 4 se observa el bloque en Simulink de un generador de inducción asincrónico y el modelo físico que dicho bloque representa, la imagen se adaptó de la página de MathWorks [14]. La señal del generador de inducción de jaula de ardilla, con una velocidad del viento de 4 m/s a 15 m/s en condiciones ideales y sin carga, genera una señal sinusoidal de aproximadamente 80 Vp; señal trifásica desfasada 120 grados, que corresponde a cada uno de los devanados del estator. En la Figura 5 se observan cada una de las señales mencionadas.

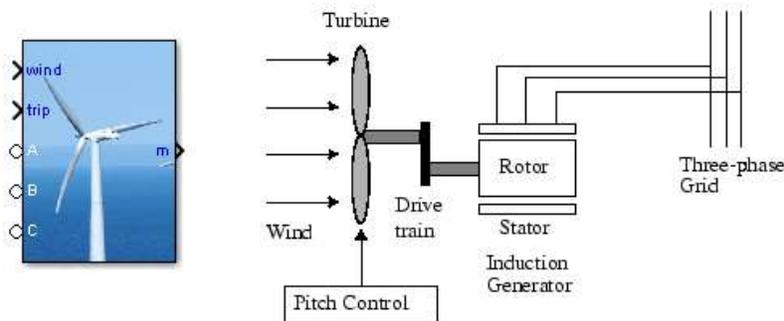


Fig. 4. Bloque en SIMULINK y representación visual. Adaptado de [14].

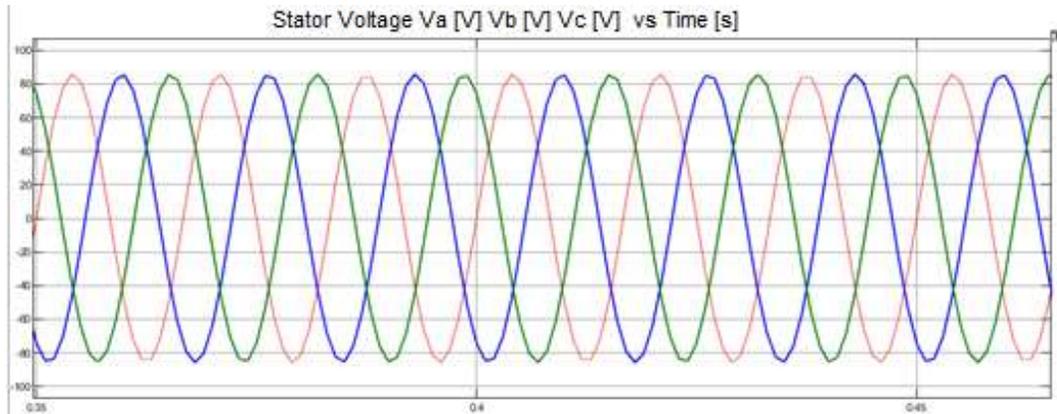


Fig. 5. Señal de Tensión trifásica del devanado del estator.

Usando el bloque “Wind Turbine Induction Generator (Phasor Type)”, se simula una red doméstica de 120 V, conectada a un aerogenerador y a una carga RLC, que simula una sobrecarga en la línea de tensión con el fin de visualizar el comportamiento del generador en condiciones extremas y la señal de potencia de salida generada por la máquina, el esquema se observa en la Figura 6.

El generador representa la red eléctrica de alta tensión. El transformador es la etapa de conversión de tensión de 25 KV a 120 V, a 60 Hz. Se utiliza una carga resistiva y capacitiva que simulan 850 W de consumo que el generador debe proveer. La entrada velocidad del viento corresponde a una función escalón que aumenta hasta 15, representando el aumento de dicho parámetro de 0 m/s a 20 m/s.

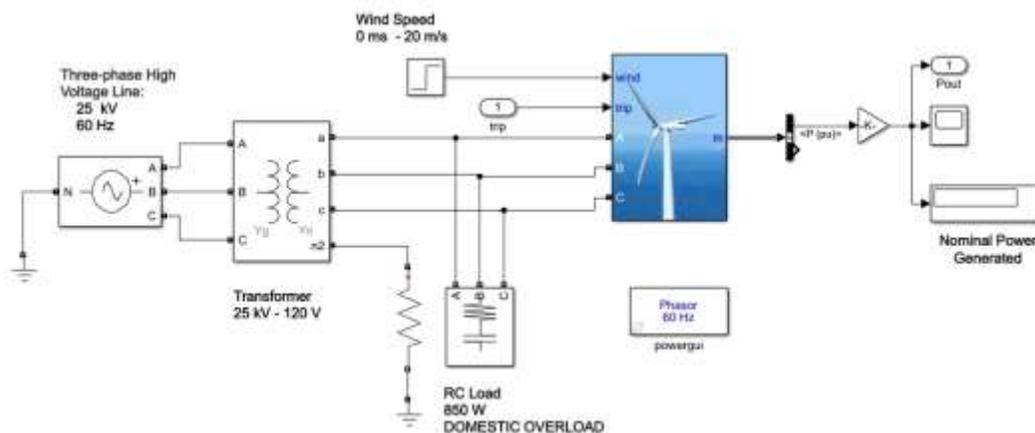
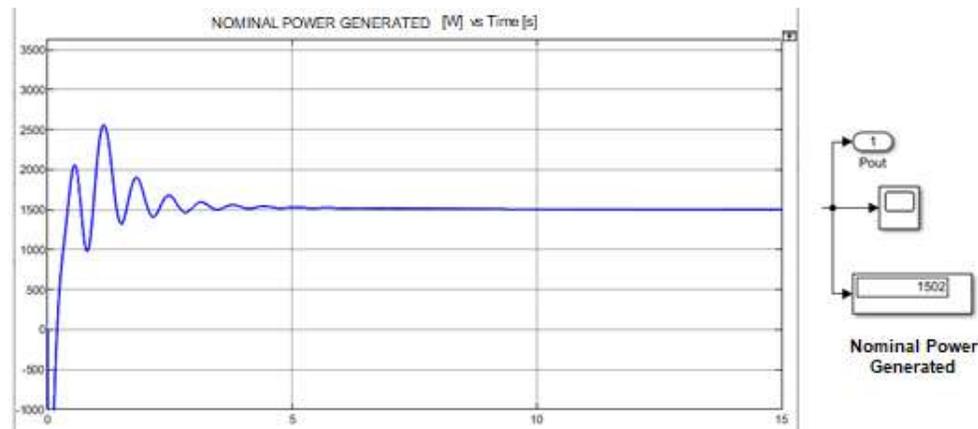


Fig. 6. Simulación de sistema eólico de media y baja potencia en Simulink, con generador de inducción.

### A. Curva de potencia

Como se observa en la Figura 7, la potencia de salida del generador presenta un estado de régimen transitorio de aproximadamente 4 segundos. Este es el tiempo en el cual la diferencia ente la velocidad del campo magnético y la velocidad de sincronismo son aproximadamente iguales. A partir de los 5 segundos, el generador entrega una salida de potencia constante aproximadamente de 1.5 KW.



**Fig. 7.** Potencia de salida del aerogenerador con máquina de inducción y display de medida en Wattios.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulando el aerogenerador con las condiciones climatológicas promedio de la ciudad de Bogotá reflejados en la Tabla 2, se logró comprobar los cálculos realizados para obtener la potencia total disponible con la ecuación 20; en la simulación se generó una potencia nominal de 1502 W. Dado que el bloque de Simulink tiene en cuenta las pérdidas en los bobinados del generador, la potencia generada no es igual a la potencia disponible, el margen de error se puede calcular con la ecuación (21).

$$e [\%] = \frac{P_T - P_g}{P_T} * 100 \quad (21)$$

Donde  $P_T$  es el valor teórico de la potencia disponible y  $P_g$  es el valor de la potencia generada por el aerogenerador. Aplicando la ecuación (21), se obtiene un error de 15.48% entre la potencia disponible y la generada. Este valor permite tener una

perspectiva de cuánta energía del viento realmente está aprovechando y convirtiendo en energía eléctrica el generador.

Asimismo, se puede decir que los valores superiores a 1772 W no pueden obtenerse prácticamente o simulados, debido al límite de Betz explicado en la ecuación (20), por lo que generar 1.5 KW es un resultado que permite decir que el rendimiento de un aerogenerador de inducción para aplicaciones de media y baja potencia es implementable. Hay que resaltar que se generan pérdidas.

Los generadores síncronos tienen grandes ventajas, como su versatilidad en la transformación de energía mecánica y eléctrica, pero tienen un gran inconveniente: la tensión producida a la salida depende directa y únicamente de la velocidad del campo magnético rotatorio generado por los imanes permanentes en el rotor. Por ello, cualquier cambio en la velocidad del rotor se verá reflejado en las corrientes y tensiones de salida del generador. Dado que la velocidad del viento no es constante, y se desea tener una señal alterna definida y no transitoria, no es de gran utilidad utilizar un generador de este tipo para la generación de energía. Por el contrario, los principios físicos del generador de inducción permiten que en el estator se generen corrientes sinusoidales según lo demuestra la ecuación (10), donde se presentarán transitorios no tan significativos, ya que en esta máquina la tensión de salida no depende en su mayor parte de la velocidad del campo magnético rotativo inducido en el rotor.

## **V. CONCLUSIONES**

En el campo de generación de energías renovables es necesario tener en cuenta el rendimiento de la máquina en función de cambios de las condiciones de carga. Por lo tanto, un generador de inducción es mejor para esta tarea que un generador síncrono, puesto que el sistema se mantiene estable cuando se generan cambios bruscos en la carga, puede variar la corriente de salida, pero la potencia entregada tiende a mantenerse constante en todo momento. Si la carga cambia, y la fuente de energía es un generador síncrono, podría variar su velocidad de rotación, perder el sincronismo y detenerse.

Los sistemas de generación de energías renovables deben ser totalmente autónomos para funcionar en todo momento. En un sistema de baja potencia, donde la velocidad del viento no supera los 10 m/s (idealmente), una máquina síncrona no operaría correctamente debido a la baja velocidad de rotación del rotor, el sistema podría apagarse y es necesario utilizar un complejo sistema de arranque para no afectar el factor de potencia de la línea de tensión. El generador de inducción puede ser auto-excitado con un banco de condensadores, y esta energía puede ser inyectada en la red eléctrica si es necesario. El banco de condensadores puede ser utilizado también para arrancar la máquina, haciéndola girar hasta que entre en un estado de generación permanente.

El mantenimiento de un sistema eólico puede ser costoso; al no tener piezas delicadas como escobillas, el generador de inducción no tiene elementos sujetos a desgaste por fricción mecánica, como sí ocurre en la máquina síncrona. Por otro lado, la máquina de inducción resulta más económica ya sea al construirla, comprarla o hacerle mantenimiento. La comparación de los pesos de las máquinas es relativa, dado que depende de la potencia que generen, pero usualmente las máquinas asíncronas pesan menos.

Es de suponer que, si la velocidad del viento promedio anual en Bogotá es de 4 a 6 m/s y la velocidad del viento requerida para alcanzar la potencia calculada en la ecuación (20) es de 20 m/s, se requiere acoplar desde el buje de la hélice una caja multiplicadora de velocidad a partir de engranajes, con su respectivo sistema de control.

Los transitorios en la curva de potencia son representativos cuando la velocidad del viento varía bruscamente. Para reducir el margen de error de los datos simulados y los calculados, es necesario caracterizar el generador con las pruebas de corto circuito y circuito abierto con cargas variables, con el fin de medir las impedancias internas y resistencias propias de la máquina eléctrica.

## REFERENCIAS

- [1] J. E. Castro-Montaña, and A. P. Gallego-Torres, "La educación energética una prioridad para el milenio," *Revista Científica*, vol. 1 (21), pp. 97-110, 2015. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.rc.2015.21.a11>

- [2] D. E. Albadan Molano, and J. E. Salamanca Céspedes, "Diseño de hélices eólicas para aerogenerador de eje horizontal: modelo 3D," *Visión electrónica*, vol. 13 (1), pp. 135-143, 2019. <https://doi.org/10.14483/22484728.14400>
- [3] W. Vásquez, and J. Játiva, "Modelación, simulación y control de aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado utilizando Matlab," *Revista Técnica Energía*, vol. 11, pp. 143-152, 2015. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v11.n1.2015.82>
- [4] R. S. Mena, "Aerogeneradores con sistemas de almacenamiento de energía-wind power generation with energy storage systems," Doctoral Thesis, Universidad de Cadiz, Cadiz, Spain, 2016.
- [5] I. Kosow, *Máquinas eléctricas y transformadores*, United States, New York: Pearson Educación, 1993.
- [6] F. Eraso Checa, and E. Escobar Rosero, "Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres-Nariño," *Revista Científica*, vol. 1 (31), pp. 19-31, 2018. <https://doi.org/10.14483/23448350.12304>
- [7] S. Chapman, *Máquinas eléctricas*, Mexico, Mexico City: McGraw-Hill, 2000.
- [8] P. Tipler, and G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*. Spain, Barcelona: Reverte, 2010.
- [9] J. M. Villalba, L. Ferreira, E. Arribas, A. Nájera, and A. Beléndez, "Estudio experimental de la inducción electromagnética entre dos bobinas: Dependencia con la corriente eléctrica," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 1 (37), pp. 1313-1317, 2015.
- [10] G. Bernal, M. Rosero, M. Cadena, J. Montealegre, and F. Sanabria, "Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y cuenca alta del Río Tunjuelo," Colombia, Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM-Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE, 2007.
- [11] D. Albadan-Molano, J. Salamanca, and A. Gallego-Torres, "Diseño de hélices horizontales para eje horizontal," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 27 (47), pp. 129-136, 2018. <https://doi.org/10.19053/01211129.v27.n47.2018.7929>
- [12] J. Sánchez, and O. Hernández, *Análisis mecánico de una máquina de inducción con rotor jaula de ardilla empleando modelo digital*, Mexico, Mexico City: Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [13] E. Torres Montalvo, *Control de voltaje del generación de inducción auto-excitado para aplicaciones de micro/mini generación de energía eléctrica*, Mexico, Guadalajara, 2006.
- [14] Mathworks, Mathworks Physsics Model. <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbineinductiongeneratorphasortype.html>