

# Design and Implementation of a Low Power Wind Turbine Emulator Through the Induction Motor-Permanent Magnet Generator Arrangement

David-Felipe Bajonero-Sandoval; Jeyson Sanabria-Vargas; César-Leonardo Trujillo-Rodríguez

**Citación:** D.-F. Bajonero-Sandoval, J. Sanabria-Vargas, and C.-L. Trujillo-Rodríguez, “Design and Implementation of a Low Power Wind Turbine Emulator Through the Induction Motor-Permanent Magnet Generator Arrangement,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10530, 2020. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10530>

**Recibido:** Enero 22, 2020; **Aceptado:** Marzo 24, 2020;

**Publicado:** Abril 01, 2020

**Derechos de reproducción:** Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo licencia [CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



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

# Design and Implementation of a Low Power Wind Turbine Emulator Through the Induction Motor-Permanent Magnet Generator Arrangement

David-Felipe Bajonero-Sandoval<sup>1</sup>

Jeyson Sanabria-Vargas<sup>2</sup>

César-Leonardo Trujillo-Rodríguez<sup>3</sup>

## Abstract

This paper presents the design and construction stage of a low power wind turbine emulator, which is used at the laboratory level, to reproduce different wind profiles. There are several types of wind emulators, among which the wind tunnel emulators stand out. These emulators use a motor with a propeller on their axis to obtain the desired wind speed. However, in the present work -and done from a computer-speed control is developed for a three-phase induction motor, thus driving a permanent magnet generator. The motor-generator group is controlled through a program developed in the Labview software. Also, it has the particularity of operating automatically, being able to load different speed data. Such data is associated with a particular power that takes into account the selected wind profile and can operate through manual control of the wind speed. However, this depends on the frequency given. The emulator operation is validated experimentally through two scenarios: the first one emulates the curve presented by the Eolos turbine and

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). ORCID: [0000-0002-1821-2226](https://orcid.org/0000-0002-1821-2226).

<sup>2</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). ORCID: [0000-0002-0214-7626](https://orcid.org/0000-0002-0214-7626).

<sup>3</sup> Ph.D. Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). [cltrujillo@udistrital.edu.co](mailto:cltrujillo@udistrital.edu.co). ORCID: [0000-0002-0985-1472](https://orcid.org/0000-0002-0985-1472).

subsequently compares the results obtained, whereas the second one loads the wind profile of Uribía-Guajira -a region in Colombia- achieving that the emulated wind profile can be accurately seen in the loaded wind profile.

**Keywords:** permanent magnet generator; three-phase induction motor; wind emulator; wind turbine.

## **Diseño e implementación de un emulador para una turbina eólica de baja potencia a través del arreglo motor de inducción-generator de imanes permanentes**

### **Resumen**

En este artículo se presenta la etapa de diseño y construcción de un emulador de una turbina eólica de baja potencia, el cual se utiliza a nivel de laboratorio, con el fin de reproducir diferentes perfiles de viento. Existen varios tipos de emuladores eólicos, entre los que se destacan los de túnel de viento, estos utilizan un motor con hélice en su eje para obtener la velocidad del viento deseada. Sin embargo, en el presente trabajo se desarrolla un control de velocidad desde un computador para un motor de inducción trifásico, impulsando así, un generador de imanes permanentes. El conjunto de equipos motor-generator es controlado a través de un programa desarrollado en el software Labview. Además, tiene la particularidad de operar de manera automática, pudiendo cargar diferentes datos de velocidad, los cuales se encuentran asociados a una potencia en particular, teniendo en cuenta el perfil de viento seleccionado; así mismo, puede operar a través de un control manual de la velocidad del viento, pero en función de la frecuencia. La operación del emulador se valida de forma experimental a través de dos escenarios, el primero emulando la curva presentada por la turbina Eolos y con la posterior comparación de los resultados obtenidos, y la segunda cargando el perfil de viento de Uribía-Guajira, en Colombia, consiguiendo que el perfil de viento emulado logre verse fiel al perfil de viento cargado.

**Palabras clave:** emulador eólico; generador de imanes permanentes; motor de inducción trifásico; turbina eólica.

## **Desenho e implementação de um emulador para uma turbina eólica de baixa potência através do conserto motor de indução-gerador de ímãs permanentes**

### **Resumo**

Neste artigo apresenta-se a etapa de desenho e construção de um emulador de uma turbina eólica de baixa potência, o qual utiliza-se a nível de laboratório, com o fim de reproduzir diferentes perfis de vento. Existem vários tipos de emuladores eólicos, entre os quais se destacam os de túnel de vento, estes utilizam um motor com hélice em seu eixo para obter a velocidade do vento desejada. Porém, no presente trabalho desenvolve-se um controle de velocidade desde um computador para um motor de indução trifásico, impulsando assim, um gerador de ímãs permanentes. O conjunto de equipamentos motor-gerador é controlado através de um programa desenvolvido no software Labview. Ademais, tem a particularidade de operar de maneira automática, podendo carregar diferentes dados de velocidade, os quais encontram-se associados a uma potência em particular, tendo em conta o perfil de vento selecionado; também, pode operar através de um controle manual da velocidade do vento, mas em função da frequência. A operação do emulador valida-se de forma experimental através de dois cenários: o primeiro emulando a curva apresentada pela turbina Eolos e com a posterior comparação dos resultados obtidos, e a segunda carregando o perfil de vento de Uribí-Guajira, na Colômbia, conseguindo que o perfil de vento emulado permita ver-se fiel ao perfil de vento carregado. Finalmente, apresentam-se as conclusões.

**Palavras chave:** emulador eólico; gerador de ímãs permanentes; motor de indução trifásico; turbina eólica.

## I. INTRODUCCIÓN

La precaria situación ambiental actual, producto de la contaminación mundial, muestra que existirá una crisis energético-ambiental, debido a los altos niveles de contaminación y al agotamiento de la mayoría de los recursos naturales no renovables; en consecuencia, se hace indispensable la explotación de energías renovables, siendo una de estas la energía eólica [1].

La demanda de generación de energía por medio de fuentes alternativas ha estado creciendo a nivel global, acercándose a un 25% anual. Este crecimiento ha sido impulsado por un aumento de la demanda mundial de electricidad y el aumento del costo de los combustibles no renovables, entre otros [2].

La generación eléctrica con fuentes de energía renovable logró alcanzar el 21% de la generación mundial en 2012 y, para 2014, alcanzó el 22.8%, del cual el 3.1% corresponde a energía producida a partir de energía eólica [3]. La producción de energía eléctrica a partir de dicho recurso es una excelente alternativa para zonas superpobladas. Países como Canadá y China, entre otros, han establecido ambiciosos objetivos para su desarrollo, buscando no frenar la explotación de esta fuente energética debido a retos de aceptación presentes en las comunidades locales [4], [5]. Resultados como los 8,75 MW eólicos instalados en altamar para 2014, son producto de los grandes avances tecnológicos y el tiempo dedicado al desarrollo de este tipo de producción energética [4].

En Colombia, la energía eólica también es una de las alternativas que tiene el país para suplir el aumento de la demanda energética. Según el plan de expansión de la UPME, se tiene proyectado que en los próximos años en el país se instalen 474 MW eólicos en el norte de la Guajira, que reemplazarían 250 MW térmicos a base de carbón [6]. Dada la importancia que muestra este tipo de energía alternativa para el país, se hace necesario generar espacios de investigación de dicha fuente energética, por lo que el prototipo desarrollado busca servir de herramienta para el estudio de sistemas basados en energía eólica que se puedan interconectar a la red eléctrica y, adicionalmente, trabajar de forma aislada mediante la emulación y manipulación de los perfiles de viento de diferentes zonas de una manera controlada.

Este artículo presenta el diseño, implementación y validación experimental de un emulador de una turbina eólica de baja potencia y se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la introducción; en la sección 2, correspondiente a materiales y métodos, se presentan las principales características que debe tener un emulador eólico, con el fin de establecer los parámetros y las funciones objetivo para el diseño e implementación del emulador en mención. En la sección 3 se presenta la validación experimental del emulador implementado, operando en forma manual (datos suministrados por el fabricante de la turbina Eolos) y automática (carga del perfil de viento de Uribía-Guajira en Colombia). Adicionalmente, se discuten dichos resultados. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones.

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**

La metodología empleada es de tipo experimental con enfoque cuantitativo. Se indaga sobre las principales características que deben tener los emuladores de turbinas eólicas y se plantea un diseño ajustado a los requerimientos del problema a abordar (emuladores de baja potencia con posible incidencia en micro-redes eléctricas). Finalmente, se valida su desarrollo a través de la implementación y un conjunto de pruebas experimentales.

### ***A. Características de los emuladores de turbinas eólicas***

El objetivo de los emuladores eólicos es reproducir el comportamiento estático y dinámico de las turbinas eólicas en un entorno controlado sin la necesidad de depender de la existencia de la turbina eólica real o el recurso real del viento [7].

En la Fig. 1 se puede observar el proceso de conversión de una turbina eólica convencional, así como algunos de sus componentes, donde se aprovecha la energía del viento para hacer mover un generador (transformación de energía mecánica en energía eléctrica). En dicha figura se visualiza una caja reductora, la cual puede ser obviada al momento de la implementación del emulador al usar un generador de imanes permanentes [8], el cual a su vez proporciona el par mecánico al generador eléctrico [9].

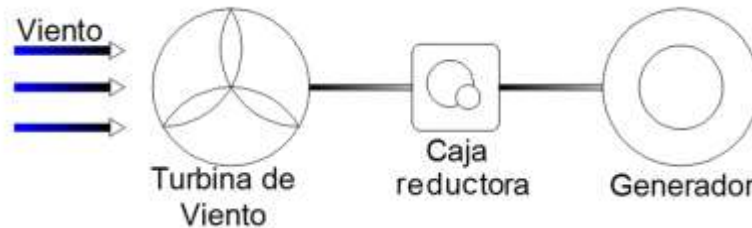


Fig. 1. Esquema de una turbina eólica.

En términos generales, los emuladores eólicos buscan reemplazar la velocidad del viento por un perfil ingresado a un computador o sistema micro-procesado, y la turbina eólica por un motor, estableciendo de esta manera, dos secciones constitutivas del sistema. La primera correspondiente a la sección mecánica (acople motor-generator), y la segunda relacionada con el software desarrollado para propósitos de interfaz, que permite la interacción con el usuario y el correspondiente control de velocidad del motor.

**1) Sección electromecánica.** La mayoría de los emuladores eólicos basados en motor-generator, tienen la particularidad de usar un motor DC, con el fin de emular la turbina eólica, siendo la corriente de entrada uno de los parámetros a manipular para controlar la velocidad del mismo. Por otra parte, el generador empleado se caracteriza por ser de inducción o imanes permanentes, como se puede apreciar en la literatura consultada [10-11]. La selección del generador guarda una relación directa con la turbina o turbinas eólicas a emular, por ejemplo, cuando el generador eléctrico es un motor de inducción o de imanes permanentes y la turbina eólica a emular es de baja velocidad, se hace necesario un generador con un alto número de polos o no llevarlo por encima de las revoluciones por minuto nominales. Teniendo en cuenta estos aspectos, en la sección 3 se presentará el generador utilizado y la razón de su utilización, lo que permitirá delimitar el prototipo desarrollado.

**2) Sección software.** En los emuladores eólicos el software asociado busca, ante todo, permitir la recopilación de los parámetros característicos del modelo matemático de la turbina con el fin de que ésta sea simulada y permita obtener como resultado un valor de potencia de salida particular, teniendo en cuenta la

velocidad del viento registrada en los perfiles de viento, la curva de potencia máxima del generador, el modelo de turbina, y cualquier variable que repercute en el valor de dicha potencia [12].

Los emuladores de turbinas eólicas se consideran altamente dependientes de los equipos desarrollados para su implementación, de allí que se establezcan límites y restricciones desde el punto de vista de potencia y tipo de turbina a emular, en consecuencia, esto genera que se use una determinada estrategia de control de velocidad. Finalmente, el tipo de herramienta informática utilizada determinará la facilidad de uso y el campo de acción de la aplicación, y su interacción con el usuario a partir de una interfaz adecuada.

### ***B. Diseño del emulador***

Teniendo en cuenta las características que deben tener los emuladores de turbinas eólicas basados en motor-generador, se desarrolló un emulador compuesto por un motor de inducción, el cual hace las veces de turbina eólica, un generador de imanes permanentes con un encoder y un variador de frecuencia de 3 HP para controlar la velocidad de giro del motor. Los datos se ingresan mediante un programa desarrollado en LabView, y la comunicación entre la parte electromecánica y el software se hace mediante una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (NI USB-6008, 12 Bits), tal como se puede ver en la Fig. 2.



**Fig. 2.** Disposición de equipos del emulador de turbina eólica.



**1) Selección de equipos.** *Motor de inducción empleado como turbina eólica*, tendrá que actuar tal como lo haría un aerogenerador que cambia de velocidad constantemente cuando aumenta o disminuye la velocidad del viento. El motor seleccionado fue un motor de inducción trifásico jaula de ardilla de la marca WEG de 2 Hp (1.5 kW) ,1800 rpm, 220/240.

*Variador de velocidad*, es el encargado del control de velocidad del motor. El variador de velocidad escogido fue el CFW 500 de la marca WEG. Ofrece además una opción de control vectorial o escalar.

*Generador síncrono de imanes permanentes*, 800 W. Este tipo de generadores tienen como gran ventaja la eliminación de las escobillas y los sistemas reductores, lo que se traduce en ahorro de mantenimiento y espacio. El generador elegido cuenta con un encoder de velocidad que juega un papel importante a la hora de diseñar el sistema de control.

*NI 6008 USB*, tarjeta de adquisición de datos de National Instruments que permite adquirir valores de variables reales para digitalizarlas y generar acciones de control a través de un programa desarrollado en LabView.

**2) Caracterización motor-generador.** Una vez seleccionados los componentes electromagnéticos, se debe verificar su funcionamiento cuando se encuentran operando, con el objetivo de reconocer los parámetros que permitan establecer relaciones directas con el funcionamiento de turbinas eólicas y aerogeneradores. Para caracterizar el grupo motor-generador, se controla la velocidad de giro del motor por medio del variador de velocidad CFW500, cambiando la frecuencia en pequeñas proporciones (0.5 Hz) desde 3Hz hasta 65 Hz. Posteriormente, se realizan mediciones de corriente y de tensión, con el fin de conocer la potencia de trabajo que alcanza el generador, pues ésta depende específicamente de la frecuencia del sistema y de la velocidad a la cual gira el motor de inducción.

Los datos registrados en la prueba muestran el funcionamiento del equipo cuando trabaja alimentando una carga de 10  $\Omega$ , dichos resultados son presentados en la Fig. 3.

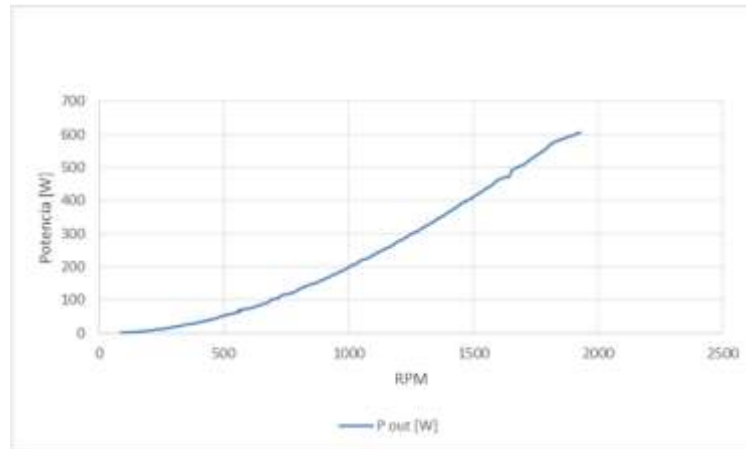


Fig. 3. Caracterización del grupo motor-generador.

**3) Turbina a emular.** Teniendo en cuenta que el generador seleccionado alcanza una potencia de 800 W, el emulador solo podrá emular turbinas con potencias iguales o menores a la potencia definida anteriormente.

En consecuencia, dentro de las turbinas que se estudiaron con el fin de seleccionar la que mejor se adaptara al proceso de emulación, se encontraron las Air 30, Air 40, Wattnier 1kW, Bornay 600, y Eolos de 600 W y 1000 W.

La turbina elegida fue la Eolos 600 W, cuya curva de potencia vs velocidad del viento se presenta en la Fig. 4.



Fig. 4. Curva de potencia de salida turbina Eolos 600W.

Dicha turbina a emular fue seleccionada, entre otras cosas, por el rango de

velocidades que ofrece para generar potencia (entre 3 m/s y 14 m/s), el cual es el rango en el que funcionan las turbinas eólicas de inserción arquitectónica y los aerogeneradores; así como porque el generador de este equipo es muy similar en su forma de construcción a la del generador utilizado para el emulador.

**4) Relación frecuencia vs. velocidad del viento en función de la potencia.** Con los datos obtenidos de la caracterización del motor-generador y los datos de potencia aportados por el fabricante de la turbina (Tabla 1), se obtiene, a través de una regresión polinómica, una ecuación que relaciona la velocidad de viento con la potencia generada.

**Tabla 1.** Datos de potencia dados por el fabricante y generados por el equipo motor-generador.

Potencia [W]	Velocidad del viento [m/s]	RPM Emulador	Frecuencia [Hz]
25	4	341	12
40	5	439	15
90	6	673	23
110	7	722	25
145	8	840	29
190	9	982	33.5
280	10	1202	41
350	11	1361	46.5
470	12	1627	55.5
525	13	1730	59
600	14	1928	66
530	15	1730	59
490	16	1657	57

Dicha regresión polinómica es de sexto orden y se presenta en la ecuación (1)

$$\frac{0.0093X^6 - 0.3811X^5 + 5.7936X^4 - 41.0893X^3 + 143.84X^2 - 201.26X}{117.73} = Y \quad (1)$$

Donde  $X$  representa la velocidad del viento y  $P$  la potencia generada.

La ecuación (1), posteriormente, es ingresada al programa desarrollado en Labview, el cual será explicado más adelante. Esto con el fin de que la ecuación tenga como parámetros de entrada los valores de velocidad del viento ingresados de forma manual o precargado como perfil de viento, para obtener un valor de potencia de salida deseado y de esta forma emular el comportamiento de la turbina seleccionada. Cabe resaltar que el seleccionar otra turbina implica volver a generar una ecuación que permita la correlación planteada anteriormente.

**5) Implementación del control.** El objetivo del software desarrollado es permitir que los usuarios puedan ingresar un perfil de viento para ver cuál sería el comportamiento de la turbina seleccionada, trabajando bajo las condiciones de velocidad del viento descritas en dicho perfil.

El software seleccionado, como se mencionó anteriormente, fue Labview de National Instruments, el cual maneja un entorno de programación gráfico y cuenta con facilidades para el manejo de diferentes tecnologías de comunicación. Otra característica importante que influyó en la selección de LabView fue la posibilidad de efectuar un proceso de adquisición de datos mediante una tarjeta de National Instruments.

Teniendo en cuenta que el generador de imanes permanente cuenta con un encoder, cuya señal es enviada a la tarjeta de adquisición de datos junto con los valores de tensión y corriente generados, es posible, a través de un procesado matemático, establecer la velocidad y, por ende, las revoluciones por minuto a las cuales el emulador eólico está girando.

La interfaz permite al usuario ingresar la velocidad del viento que desee asociar. Por lo tanto, el poder ingresar velocidades de viento diferentes en un lapso de tiempo, es fundamental para el programa. Esto se logra mediante una matriz vinculada a un ciclo case que define el tiempo de trabajo de la simulación del perfil de viento ingresado. Con la señal media y la señal ingresada por el usuario, se calcula el error y se ingresa a un bloque PID. Las constantes de dicho controlador fueron sintonizadas en LabView a partir de la repuesta experimental del emulador mediante el método Ziegler-Nichols, permitiendo de esta forma controlar la variable de interés (velocidad), la cual se usa posteriormente en la ecuación (1) para determinar una salida de potencia similar a la de la turbina eólica previamente seleccionada.

El esquema final del emulador diseñado y expuesto en este artículo se puede ver en la Fig. 5

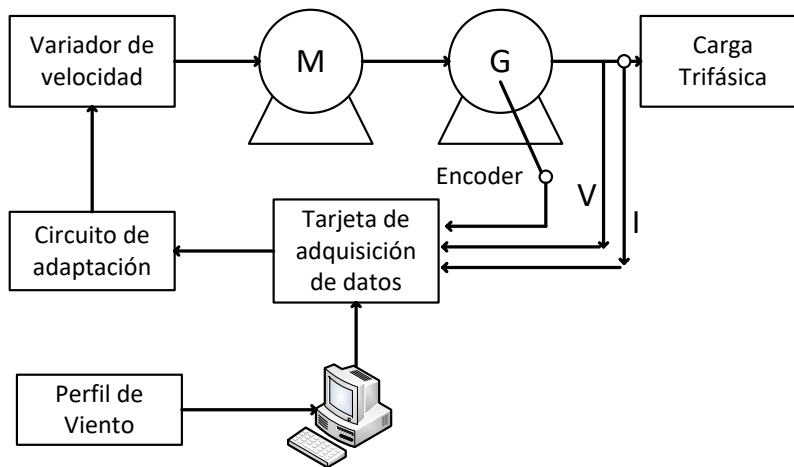


Fig. 5. Esquema general del emulador de la turbina eólica.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El emulador de la turbina de viento desarrollado se muestra en la Fig. 6 y se puede descomponer en tres partes estructurales, una parte electromecánica, una correspondiente a los circuitos de adquisición de datos y otra al software.

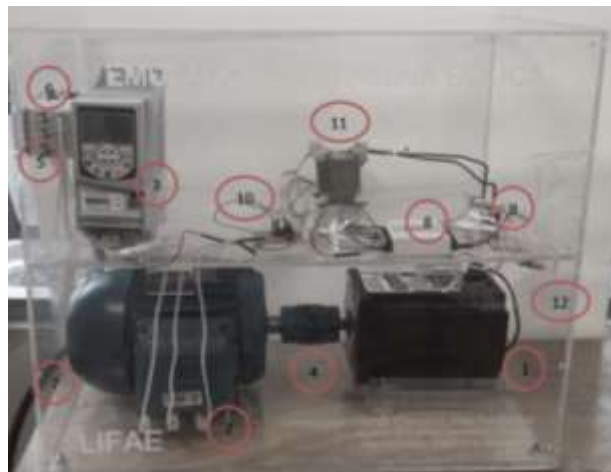


Fig. 6. Partes y componentes del prototipo de emulador eólico.

Partes electromecánicas del emulador:

1. Generador de imanes permanentes
2. Motor de inducción trifásico WEG
3. Variador trifásico 3Hp WEG

4. Acople motor generador
5. Breaker 25 A
6. Fusibles
7. Conector de alimentación

Partes de adquisición de datos:

1. Tarjeta de adquisición de datos NI 6008 USB DAQ
2. Sensor de corriente ASC712 20 A
3. Cable USB DAQ-PC y circuito amplificador no inversor
4. Transformador AC 120/ 14-5 V
5. Punto de conexión de carga.

Software del emulador:

- Ventana para el ingreso del perfil de viento.
- Ventana para la supervisión del comportamiento y actividad del emulador.

El emulador presenta dos opciones de funcionamiento, en una es posible cargar en el software desarrollado diferentes datos de velocidad, los cuales se encuentran asociados a una potencia en particular teniendo en cuenta el perfil de viento seleccionado. La segunda opción de funcionamiento es un control manual de la velocidad del viento, pero en función de la frecuencia.

En las Fig. 7 y 8 se pueden visualizar las dos pantallas de la interfaz, una en donde se realiza el ingreso del perfil de viento y la otra en donde se puede ver la operación del emulador.

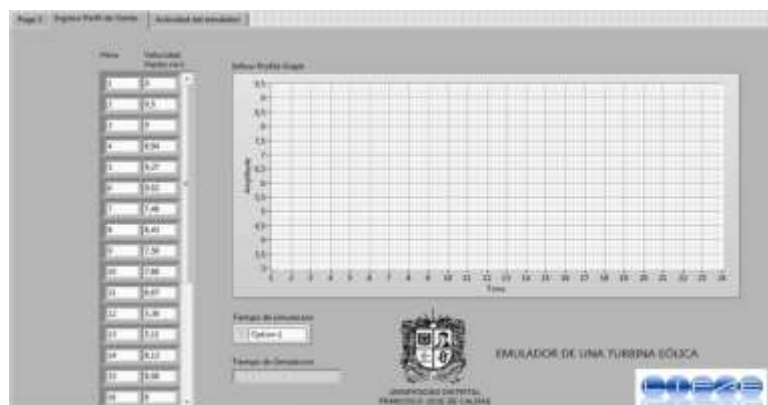


Fig. 7. Pantalla en donde se ingresa el perfil de viento.

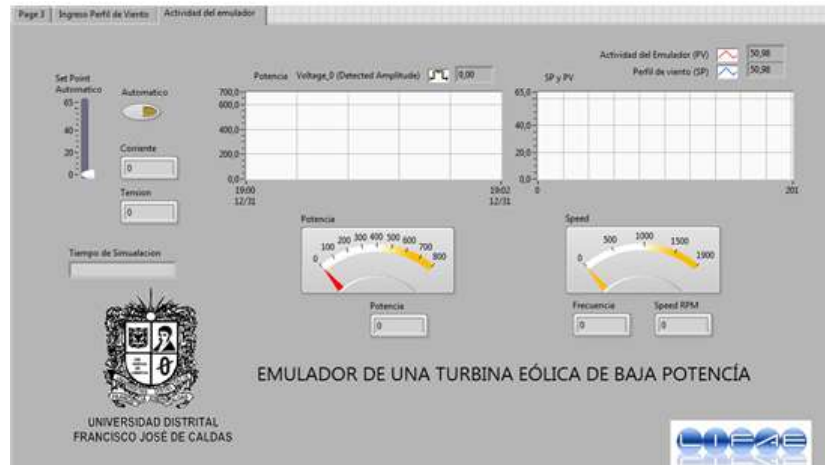


Fig. 8. Pantalla en donde se visualizan las variables del emulador.

Al momento de ejecutar el programa, el emulador inicia su operación a velocidad mínima (3 m/s, aproximadamente) la cual se obtiene para la frecuencia de 3 Hz. En ese instante en la ventana presentada en la Fig. 7 se verá la gráfica del perfil de viento cargado, además de la opción del tiempo de simulación que puede ser de 1 minuto, 10 minutos, 1 hora o en tiempo real.

En la Fig. 9 se muestran las variables de interés medidas en el emulador, éstas son: velocidad, frecuencia de operación, tensión, corriente y potencia generada. Adicionalmente, se encuentra la opción de habilitar o deshabilitar la operación manual para controlar la velocidad de giro en función de la frecuencia, y visualiza el tiempo al cual se está realizando la simulación.



Fig. 9. Comportamiento del emulador durante la prueba en modo manual según la curva de potencia dada por el fabricante de la turbina elegida.

Esta parte del programa también muestra la curva de potencia que se está generando y, a la derecha de dicha gráfica, se ven dos curvas cuando el emulador está en operación, una es el set point y la otra es la curva que muestra cómo está actuando el emulador.

**A. Prueba manual: comparación con la curva entregada por el fabricante de la turbina elegida Eolos 600 W**

Esta primera prueba consiste en comparar la información suministrada por el fabricante de la turbina Eolos 600 W con los datos arrojados por el emulador para las mismas velocidades de viento.

Desde el software, habilitando la opción manual, se observan los valores de potencia obtenidos al momento de ingresar la frecuencia correspondiente a los valores de viento consignados en la tabla de potencia dada por el fabricante de la turbina Eolos 600 W. Igualmente, se mide la potencia a la salida del prototipo. En la Fig. 9 se aprecia una imagen de la interfaz gráfica del emulador, mientras el proceso anteriormente descrito se llevaba a cabo, se pueden apreciar también las curvas de potencia (Negro), el set point (azul) que va cambiando conforme cambia la frecuencia que se va seleccionando, y el comportamiento del emulador (rojo).

En la Tabla 2 se presenta un comparativo de los datos suministrados por el fabricante y los generados por el emulador.

**Tabla 2.** Comparación entre los resultados de potencia dados por el fabricante y la generada por el emulador.

Frecuencia (Hz)	Velocidad del viento (m/s)	P. Turbina (W)	P. Emulador (W)
12	4	25	25.8
15	5	40	35
23	6	90	94.3
25	7	110	112.5
29	8	145	149.35
33,5	9	190	195.69
41	10	280	291.1
46.5	11	350	349.97
55.5	12	470	492.9
59	13	525	548.89
66	14	600	619.5
59	15	530	544.5



Frecuencia (Hz)	Velocidad del viento (m/s)	P. Turbina (W)	P. Emulador (W)
57	16	490	508.25

Con los resultados obtenidos en las pruebas consignadas en la Tabla 2, se calculó el error, el cual se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Error en el emulador eólico.

P. Turbina [W]	P. Emulador [W]	% Error
25	25.8	3%
40	41.3	3%
90	94.3	5%
110	112.5	2%
145	149.35	3%
190	195.69	3%
280	291.1	4%
350	349.97	0%
470	492.9	5%
525	548.89	5%
600	619.5	3%
530	544.5	3%
490	508.25	4%

La prueba del emulador de manera manual arrojó que, en promedio, el emulador tiene un margen de error inferior al 6%, uno de los menores porcentajes de error que se obtuvo a lo largo del desarrollo del emulador.

Con la prueba del programa en modo manual finalizada, el paso siguiente es verificar el funcionamiento del modo automático, en esta función se carga un perfil de viento de 24 horas previamente establecido en unas de las ventanas de la interfaz gráfica implementada en LabView. A continuación, se presenta una prueba donde se utilizan las características de viento consignadas en un perfil de viento de un punto de la geografía colombiana.

### ***B. Perfil de viento: caso particular de estudio en Colombia***

Una de las opciones para poner a prueba el funcionamiento del emulador, es la de cargar un perfil de viento de algún lugar específico, con el fin de mirar su comportamiento para diferentes velocidades de viento en horas diferentes. Cabe destacar que velocidades inferiores a 3 m/s no permiten un adecuado funcionamiento del emulador, esto en razón a que la potencia generada es

insignificante.

En consecuencia, y con el fin de investigar sobre nuevas fuentes de energía alternativa que ayuden a ampliar la matriz energética en Colombia, se escogió el departamento de la Guajira con el fin de seleccionar una ubicación geográfica cuyas condiciones medioambientales fueran idóneas para la explotación de la energía eólica. El lugar seleccionado es el municipio de Uribía en el departamento de la Guajira, reconocido lugar por albergar el único parque eólico existente en Colombia, las coordenadas de este lugar son latitud 12.5, longitud -72.5.

Para el ingreso del perfil de viento al programa, se extrajeron los datos con las coordenadas del lugar de interés mediante la base de datos disponible en línea de la NASA llamada Atmospheric Science Data Center. El promedio mensual entregado por el servicio atmosférico se repite para poder acomodarlo a las horas de entrada en la interfaz de Labview, los datos extraídos pueden verse en la Tabla 4 y se ingresaron tal como se ve en la Tabla 5.

**Tabla 4.** Promedio mensual de velocidad de viento en coordenadas de un municipio de la Guajira.

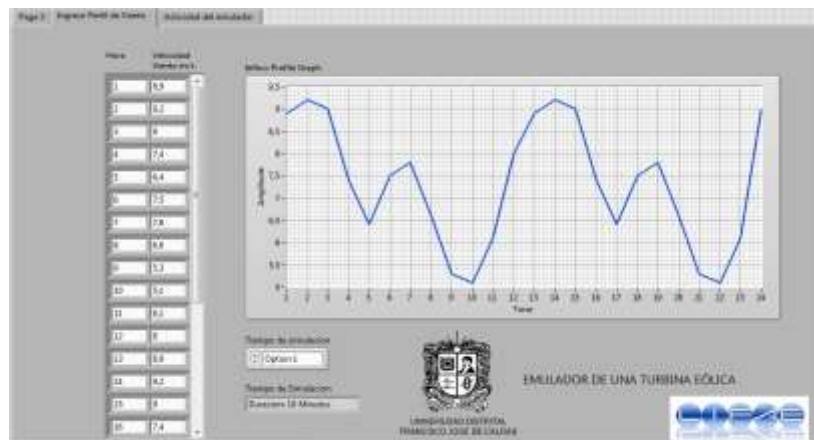
Lat. 12.22	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
Lon. 72.15													
Prom 10 años	8.94	9.27	9.02	7.46	6.43	7.56	7.86	6.67	5.36	5.11	6.13	8.08	7.31

**Tabla 5.** Perfil de viento (Guajira) ingresado para la segunda simulación.

Hora	Velocidad Viento [m/s]
00:00	8.94
01:00	9.27
02:00	9.02
03:00	7.46
04:00	6.46
05:00	7.56
06:00	7.86
07:00	6.67
08:00	5.36
09:00	5.11
10:00	6.13
11:00	8.08
12:00	8.94
13:00	9.27
14:00	9.02
15:00	7.46
16:00	6.46
17:00	7.56
18:00	7.86

Hora	Velocidad Viento [m/s]
19:00	6.67
20:00	5.36
21:00	5.11
22:00	6.13
23:00	8.08

El perfil se carga en el programa al momento en que se inicia la simulación, y en la primera pantalla de la interfaz gráfica se puede visualizar la curva que describe dicho perfil, tal como se aprecia en la Fig. 10, donde no solo se aprecia la curva sino los datos del perfil de viento ubicados en la matriz de la parte izquierda.



**Fig. 10.** Perfil de viento de Uribí-Guajira cargado en el programa del emulador.

Como se describió anteriormente, los tiempos de la simulación pueden cambiarse, el perfil de viento con datos de 24 horas de medición del recurso eólico puede reproducirse en tiempo de 1 minuto, 10 minutos, una hora y en tiempo real. Para este ensayo se consignaron los resultados obtenidos en las simulaciones en un minuto, el comportamiento de esta prueba se ve en la Fig. 11 y con tiempo de simulación 10 minutos en la Fig. 12.



**Fig. 11.** Comportamiento del emulador, reproduciendo el perfil de viento de la Guajira y simulándolo con un tiempo de 1 minuto.



**Fig. 12.** Comportamiento del emulador, reproduciendo el perfil de viento de la Guajira y simulándolo con un tiempo de 10 minutos.

Puede verse cómo, en promedio, durante la prueba al cargar el perfil de viento originario de la Guajira, se generaron 100 W; también se ve cómo el emulador, al momento de simular en un tiempo de un minuto, no logra estabilizarse ni igualar el comportamiento del perfil de viento cargado, al menos en los aumentos considerables de la velocidad del viento, debido a la rapidez con la que éste cambia.

Por otra parte, en la prueba con un tiempo de simulación de 10 minutos, el programa cuenta con más tiempo para hacer todo el procesamiento, lo que ocasiona que la curva que muestra el comportamiento del emulador logre verse similar a la del perfil de viento cargado, tal como se ve en la Fig. 12.

#### **IV. CONCLUSIONES**

Se diseñó e implementó un emulador de una turbina eólica de pequeña potencia, mediante el acople de un motor de inducción trifásico y un generador de imanes permanentes. Dicho emulador posee una interfaz gráfica desarrollada en Labview, la cual registra la actividad del emulador y es allí en donde se puede visualizar la potencia generada. Adicionalmente, permite el ingreso de perfiles de viento (velocidad del viento vs tiempo) los cuales se procesan junto a las señales capturadas por el encoder del generador de imanes permanentes, a fin de determinar el error, para su posterior ingreso a un bloque PID, cuyas constantes fueron sintonizadas a través de Ziegler-Nichols, en LabView, sobre la respuesta experimental del sistema. Esto con el propósito de controlar la variable de interés (velocidad), y a través de su subsecuente procesamiento matemático, determinar la potencia de salida a generar por el emulador.

El sistema presenta dos opciones de funcionamiento. Una en la que es posible cargar diferentes datos de velocidad, los cuales se encuentran asociados a una potencia en particular teniendo en cuenta el perfil de viento seleccionado, y la segunda opción de funcionamiento es un control manual de la velocidad del viento.

La prueba del emulador de manera manual arrojó que en promedio el emulador tiene un margen de error inferior al 6% en comparación con los datos suministrados por el fabricante de la turbina, lo que convierte al emulador en un elemento confiable para operar en un ambiente controlado de laboratorio.

#### **CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES**

Trujillo-Rodríguez fue el generador de la idea central de investigación y supervisor del montaje y la verificación experimental del prototipo. Bajonero-Sandoval y Sanabria-Vargas desarrollaron el montaje y ejecutaron las pruebas de laboratorio. Todos los autores se encargaron de la redacción y la validación del documento.

## FINANCIAMIENTO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Proyecto: 2-5-596-19).

## REFERENCIAS

- [1] J. G. González-Hernández, and R. Salas-Cabrera, "Representation and estimation of the power coefficient in wind energy conversion systems," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 28 (50), pp. 77-90, 2019. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n50.2019.8816>
- [2] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19 (5), pp. 1184-1194, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833453>
- [3] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century-REN21, *Renewables 2015: Global Status*, REN21 Secretariat, Paris, France, 2015.
- [4] Global Wind Energy Council-GWEC, *Global Wind Report 2014*, Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium, 2015.
- [5] I. Khorsand, C. Kormos, E. G. Macdonald, and C. Crawford, "Wind energy in the city: An interurban comparison of social acceptance of wind energy projects," *Energy Research & Social Science*, vol. 8, pp. 66-77, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.04.008>
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética-UPME, *Plan de Expansión de Referencia Generación Transmisión 2015-2029*, Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Bogotá, Colombia, 2016.
- [7] I. Moussa, A. Bouallegue, and A. Khedher, "New wind turbine emulator based on DC machine: Hardware implementation using FPGA board for an open-loop operation," *IET Circuits, Devices & Systems*, vol. 13 (6), pp. 896-898, 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-cds.2018.5530>
- [8] M. El Mokadem, V. Courtecuisse, C. Saudemont, B. Robyns, and J. Deuse, "Experimental study of variable speed wind generator contribution to primary frequency control," *Renewable Energy*, vol. 34 (3), pp. 833-844, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.033>
- [9] J. M. Guerrero, C. Lumberras, D. D. Reigosa, P. Garcia, and F. Briz, "Control and Emulation of Small Wind Turbines Using Torque Estimators," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53 (5), pp. 4863-4876, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2708027>
- [10] F. Martinez, L. C. Herrero, and S. de Pablo, "Open loop wind turbine emulator," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 212-221, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.019>
- [11] N. Thodsaporn, C. Choorak, and V. Kinnares, "Wind turbine simulator based grid connected asymmetrical two-phase induction generator," in *18th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2015.7385127>
- [12] Z. Dekali, L. Baghli, and A. Boumediene, "Experimental Emulation of a Small Wind Turbine under Operating Modes Using DC Motor," in *4th International Conference on Power Electronics and their Applications*, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICPEA1.2019.8911194>