

Motor sin escobillas como generador eléctrico de un aerogenerador

Juan Carlos Agotegaray y
Andrea Pinzón Montes

Instituto de Industria
Universidad Nacional de General
Sarmiento
jagotega@campus.ungs.edu.ar
apinzon@campus.ungs.edu.ar
www.ungs.edu.ar/idei

Nota de la redacción.

El artículo aquí publicado fue presentado originalmente por los autores en el 27° Congreso Argentino de Control y Automatización, realizado en el marco de AADECA 2020 en octubre de 2020.

El generador eléctrico es un componente fundamental de un aerogenerador, dado que se encarga de convertir la energía mecánica que transmite la turbina eólica, en energía eléctrica. En baja potencia, para instalaciones aisladas de la red eléctrica o en zonas urbanas, es necesario un generador eléctrico robusto y de bajo mantenimiento, que no requiera mantenimiento periódico, y que a su vez sea de bajo costo, lo cual impacta en el precio final del sistema completo. En la Universidad Nacional de General Sarmiento se desarrolló un generador eléctrico de flujo axial con imanes permanentes, un diseño ampliamente utilizado en aerogeneradores de baja potencia y mini hidráulica, con muy buenos resultados en los ensayos en cuanto a su rendimiento, pero con un costo elevado debido a los materiales necesarios para su construcción, como los imanes de neodimio y las resinas de epoxi. Teniendo en cuenta esto, se planteó como objetivo el estudio y la construcción de un generador eléctrico, a partir de un motor sin escobillas (brushless) de uso comercial, cuyos bobinados del estator al reconfigurarlos pueden lograr, a partir de rangos de revoluciones por minuto muy bajos, la tensión necesaria para cargar baterías, condición fundamental para aerogeneradores de entornos urbanos. En este trabajo se presenta un panorama de la energía eólica en zonas urbanas, las características del aerogenerador desarrollado, el detalle del motor sin escobillas y sus especificaciones, y por último, se describe cómo se realizaron los ensayos del motor y los resultados obtenidos.

En los aerogeneradores de baja potencia, se prioriza la simpleza y robustez del diseño para reducir el costo y los intervalos de mantenimiento de los equipos, ya que normalmente, son los mismos usuarios los que deben realizarlos.

Introducción

Las tecnologías que aplican las energías renovables como fuentes para la generación de energía eléctrica se han desarrollado en los últimos años con el objetivo de buscar alternativas a los combustibles fósiles, debido al gran impacto que genera la producción de gases de efecto invernadero al medioambiente y la dependencia del combustible para la generación convencional.



Como alternativa a la generación convencional se encuentra la generación distribuida, en la cual los usuarios pueden generar electricidad para su propio consumo, a partir de energías renovables, y a su vez inyectar el excedente de energía a la red de distribución.

En Argentina, a pesar de tener un potencial elevado para explotar distintos tipos de energías renovables, la participación en la matriz energética del país viene creciendo lentamente, debido principalmente al contexto económico. Se han sancionado leyes que impulsan a las energías renovables como la solución al problema energético que atraviesa el país debido a la mayor demanda de energía por parte de la población y la industria. El "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica", establecido a través de la Ley 26.190/06 (modificada con la Ley 27.191), define como objetivo "lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el 8% del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2017, e incrementar ese porcentaje hasta alcanzar el 20% al 31 de diciembre de 2025". En este marco, se implementaron programas como PERMER y RenovAr para estimular los proyectos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables en el Mercado Eléctrico Mayorista. El "Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública" se establece a partir de la Ley 27.424, la cual tiene como objetivo permitir mediante la instalación de equipos de generación distribuida, que los usuarios puedan generar energía eléctrica para el autoconsumo e inyectar los excedentes a la red de distribución, en escala residencial y comercial/industrial [1].

La energía eólica en particular, es una de las fuentes de energías renovables más implementadas en las últimas décadas para la generación eléctrica, debido a su creciente desarrollo tecnológico que dio lugar a la fabricación de equipos cada vez más grandes a costos de producción menores. Esto



Figura 1. Aerogenerador instalado en la terraza de la Universidad Nacional de General Sarmiento

permitted competir en lugares con condiciones de viento favorables con otro tipo de fuentes de energía.

En los aerogeneradores de baja potencia, se prioriza la simpleza y robustez del diseño para reducir el costo y los intervalos de mantenimiento de los equipos, ya que normalmente, son los mismos usuarios los que deben realizarlos y muchas veces los equipos se instalan en zonas aisladas o donde no existe personal para realizarlos. Los aerogeneradores de eje vertical VAWT (por su sigla en inglés, "Vertical Axial Wind Turbine") se presentan como una tecnología capaz de implementar el potencial eólico de zonas urbanas, o en aquellas donde los aerogeneradores de eje horizontal tienen dificultades para funcionar correctamente. Los VAWT tienen su tecnología menos desarrollada, ya que no han



Figura 2. Acople entre los brazos de las palas al generador eléctrico

sido implementados masivamente en alta potencia debido a su menor rendimiento [2].

Aerogenerador desarrollado

Proyecto de investigación

En la Universidad Nacional de General Sarmiento se viene realizando un estudio acerca de aerogeneradores para zonas urbanas y sus posibilidades reales de abastecer de energía eléctrica. En el marco de un proyecto de investigación, se desarrolló un prototipo de aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus H, mostrado en la figura 1, el cual se diseñó y construyó con el fin de estudiar su funcionamiento, analizar su rendimiento y evaluar la viabilidad de implementarlo en zonas urbanas. El primer prototipo se instaló en la terraza del edificio más alto de la Universidad, a una altura de doce metros aproximadamente junto con estaciones meteorológicas, para realizar el registro de información que permita analizar el comportamiento de la generación eléctrica en función del recurso eólico de la zona [3].

Recurso eólico de la zona de instalación

En el campus de la Universidad, utilizando una estación meteorológica cercana a la ubicación del aerogenerador, se realizó la medición de la velocidad y dirección del viento durante un periodo aproximado que permitió obtener el recurso eólico de la zona. A partir de los resultados del estudio



Figura 3. Estator y rotor de imanes del motor sin escobillas

estadístico de las mediciones realizadas se determinó que el valor medio de velocidad del viento es de 2,54 m/s, mientras que su valor máximo ronda los 10 m/s y el 90% de los datos se encuentra por debajo de los 4 m/s. La desviación estándar fue cercana al 50% del valor medio, lo cual indica una alta variabilidad de velocidades en la zona.

El estudio permitió determinar la distribución probabilística de los datos de velocidad, implementando el ajuste de los datos a una distribución de Weibull con un parámetro de escala resultante ($c = 1,85$) y un factor de forma ($k = 1,45$) [4].

Turbina eólica tipo Darrieus H

La turbina implementada es del tipo Darrieus H con tres palas, las cuales tienen una altura de un metro y su diseño parte de un perfil NACA 0018 con una cuerda de 200 mm. Están fabricadas a partir de un bloque de poliestireno expandido de alta densidad (20 kg/m³) de un tamaño aproximado al del perfil aerodinámico. Con una máquina de corte por hilo caliente, se talló la forma del perfil, para dar lugar a un caño de aluminio como larguero, que refuerza la estructura. Para fijar las palas a los brazos del generador, se talló una ventana en el lateral de que permite tener acceso al larguero de aluminio. Las palas están laminadas utilizando resina epoxi 1040 BV y telas de fibra de vidrio tipo Roving 30 de 600g/m². Los extremos de las palas poseen una puntera fabricada con una planchuela de aluminio, que evita el ingreso de agua al larguero y la generación de turbulencias que quiten rendimiento aero-

dinámico, además, están pintadas con esmalte poliuretano acrílico para obtener resistencia química, a los agentes atmosféricos, a la abrasión y al rayado [5].

Las palas se acoplan al generador eléctrico mediante tres brazos dobles fabricados a partir de planchuelas de acero al carbono, fabricadas con la fresadora del Laboratorio de Ingeniería de la Universidad, para darle la forma necesaria que permita que sean livianas pero resistentes. Mediante piezas de PLA (poliácido láctico), fabricadas en una impresora 3D [6], se afirma cada pala al brazo correspondiente, teniendo la posibilidad de realizar correcciones en el ángulo de ataque. En la figura 2 se muestra el acople entre los tres brazos de las palas al generador eléctrico.

Actualmente, los motores sin escobillas (sin escobillas) están siendo cada vez más implementados en distintas aplicaciones como electrodomésticos de eficiencia A o sistemas de transporte como bicicletas o sillas de ruedas, gracias a la electrónica de potencia con la que se los controla.

Motor sin escobillas

Actualmente, los motores sin escobillas (sin escobillas) están siendo cada vez más implementados en distintas aplicaciones como electrodomésticos de eficiencia A o sistemas de transporte como bicicletas o sillas de ruedas, gracias a la electrónica de potencia con la que se los controla. Esto permite que a partir de una señal trifásica modulada se controle la velocidad de rotación del motor sin perder torque. Presentan determinadas ventajas con respecto a los motores asincrónicos convencionales, como un alto torque de arranque, una relación de peso/potencia mejor y requieren un menor mantenimiento. El motor sin escobillas tiene normalmente 36 o 42 bobinas en polos salientes que se agrupan

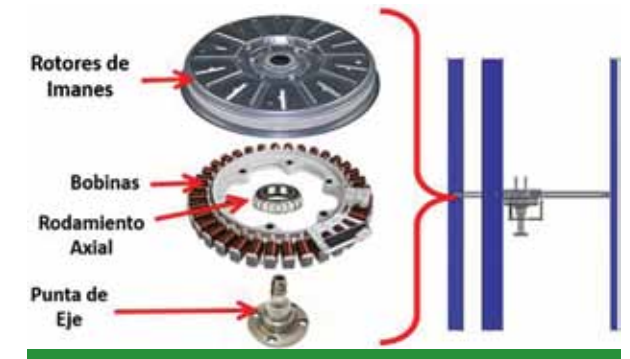


Figura 4. Esquema constructivo del generador eléctrico para el aerogenerador

en tres (de 12 o 14) para obtener una configuración trifásica en estrella que se alimenta con 230 V de tensión de línea. El rotor está compuesto por un disco ferromagnético sobre el cual se montan radialmente 12 imanes de ferrita que interactúan con el campo magnético rotatorio producido por el estator cuando se energiza. El motor implementado en el proyecto es de 36 bobinas, fabricadas con alambre de aluminio esmaltado de 0,5 mm². El estator está dispuesto en un arreglo de 12 bobinas en serie por fase con un centro de estrella. La disposición es de polos salientes, en forma radial. Existen motores más grandes y con bobinas de cobre como, por ejemplo, los fabricados por la empresa Fisher & Pankel, sin embargo se comercializan poco en el país y tienen un costo mayor. La forma del estator y el rotor del motor sin escobillas se muestran en la figura 3.

Aplicación de motor sin escobillas como generador

El uso de un motor sin escobillas como generador eléctrico puede ser una alternativa al diseño y fabricación desde cero de un generador de flujo axial, ya que el costo de los materiales necesarios para construirlo excede el de un motor sin escobillas y su modificación. Los componentes más costosos utilizados en un generador de flujo axial construido desde cero son los imanes de neodimio y la mano de obra para la fabricación por pantógrafo de pie-



Figura 5. Tablero de control y banco de ensayos del generador eléctrico

zas específicas para los rotores y el soporte del estator. Por su parte, al utilizar un motor sin escobillas los costos más importantes son el motor, las piezas específicas cortadas por pantógrafo (en este caso el soporte del estator) y resina epoxi para proteger los bobinados. Teniendo en cuenta la variabilidad en los precios del país, resulta un detalle importante la cantidad de materiales dado que, en investigación, los procedimientos también suelen tener tiempos que hacen que una vez que se aprueben o se ejecuten, los precios hayan variado. Para completar la estructura del aerogenerador es necesario diseñar y fabricar piezas específicas que permitan acoplar el estator a la estructura del aerogenerador y permitir la rotación libre de la turbina eólica.

En un principio, para realizar las primeras pruebas se diseñaron piezas que se fabricaron en impresora 3D a partir de PLA como material. De esta manera, se realizó un montaje de pruebas para poder simular el funcionamiento del motor sin escobillas en un banco de ensayos. En la figura 4 se muestra cómo se consideró el diseño del motor para que sea el generador eléctrico del aerogenerador.

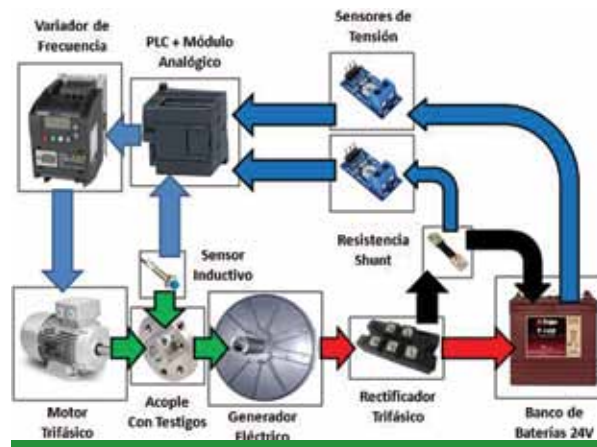


Figura 6. Esquema de ensayos de generadores eléctricos para aplicaciones en energía eólica

Ensayos

Ensayos del generador eléctrico

El estudio se realizó con el fin de determinar su comportamiento eléctrico en función de las RPM, realizando las mediciones sobre la máquina en vacío, conectado a una resistencia trifásica y a una batería de gel de 12 V.

Para simular las condiciones de funcionamiento a distintas velocidades de rotación que le transmitirá la turbina eólica a un generador eléctrico, este se acciona de forma directa por un motor trifásico *Siemens 1LE0102-OEC4* de 1,1 kW. El funcionamiento del motor trifásico se controla con un variador de frecuencia *Siemens V20* de 1,5 kW, el cual puede recibir las órdenes de funcionamiento a través de un panel de operador. El motor trifásico está montado sobre una estructura metálica construida para soportar y fijar distintos tipos de generadores eléctricos teniendo en cuenta el requerimiento de soportes y acoples para cada caso.

Se usó un tablero de control formado por un PLC *Siemens S7 200 CPU 222* con un módulo EM 235 para procesar señales analógicas. Este equipamiento permite realizar mediciones y procesar señales digitales y analógicas provenientes de los sensores instalados sobre el generador eléctrico. También se encarga de controlar el funcionamiento del varia-

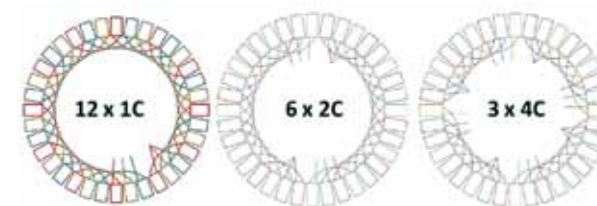


Figura 7. Configuraciones de bobinados ensayadas

dor de frecuencia enviándole órdenes mediante señales digitales y la consigna de velocidad necesaria con una señal analógica. En la figura 5 se observa la máquina y el tablero de control.

La medición de las RPM se realiza con un sensor inductivo sobre el acople del eje con testigos ferromagnéticos, que genera una señal de alta frecuencia que depende linealmente de la velocidad de rotación. Esa señal es leída por una entrada rápida del PLC y procesada para obtener el valor real de revoluciones por minuto. Se espera a futuro poder medir también el torque que transmite el motor trifásico al generador eléctrico, y de esta manera, calcular la potencia mecánica que ingresa al generador eléctrico. Las mediciones eléctricas que se realizan son la tensión en bornes del banco de batería y corriente a la salida del rectificador, con lo cual se determina la potencia eléctrica en corriente continua. La medición de corriente se realiza con una resistencia shunt, la cual entrega una tensión directamente proporcional a la corriente que está circulando a través de ella. Las tensiones se miden con un sensor formado por un divisor resistivo que entrega una salida analógica con un rango de 0 a 5 V, la cual se mide con el módulo analógico del PLC. En la figura 6 se muestra un esquema de los ensayos de generadores eléctricos, incluyendo los actuadores y sensores.

Configuración de bobinados

El estator del generador posee doce bobinas en serie por fase y un centro de estrella (12 x 1C). Como se mencionó anteriormente, las bobinas están fabricadas con alambre de aluminio esmaltado de

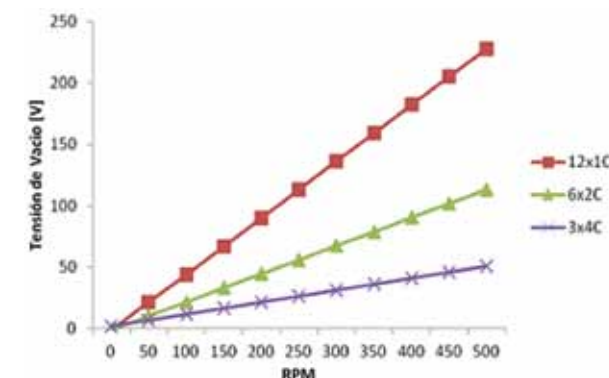


Figura 8. Tensión en vacío (DC) de línea para cada configuración en función de las RPM

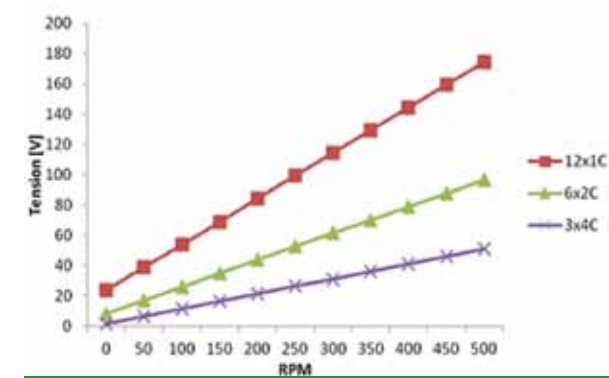


Figura 9. Tensión con carga resistiva para cada configuración en función de las RPM

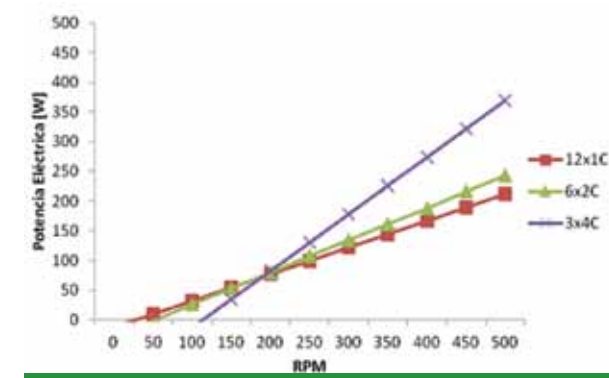


Figura 10. Comparación de la potencia de carga de batería en las diferentes configuraciones

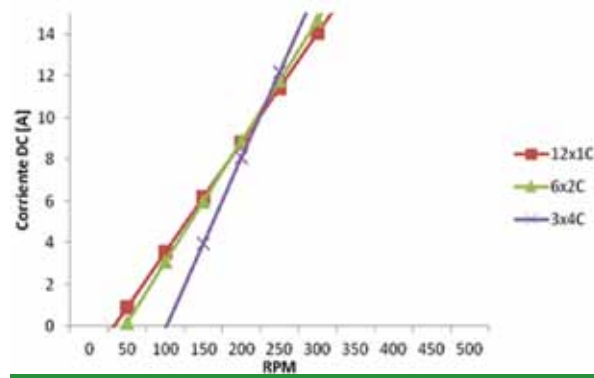


Figura 11. Comparación de la corriente DC por los bobinados del generador en carga de batería en las diferentes configuraciones

0,5 mm². Sin embargo, a fin de estudiar la máquina como generador y determinar su desempeño eléctrico en función de las revoluciones por minuto, se seccionaron y reconectaron los bobinados, generando nuevas configuraciones.

A fin de minimizar la cantidad de modificaciones maximizando a la vez la cantidad de configuraciones posibles, se decidió seccionar el bobinado en cuatro partes; cada sección posee tres bobinas en serie por fase, y esto permite obtener tres configuraciones diferentes, poniendo diferentes tramos en serie o creando nuevos centros de estrella: 12 x 1C, 6 x 2C y 3 x 4C. Se pueden observar en la figura 7.

Para implementar con aerogeneradores de eje vertical, con un rango de funcionamiento de 50 a 300 rpm, son preferibles las configuraciones 12 x 1C o 2 x 6C.

Mediciones y resultados

Con el fin de caracterizar adecuadamente el desempeño del generador, se diseñaron y llevaron a cabo los siguientes ensayos en el rango de 0 a 500 rpm:

- » Ensayo de vacío: se mide la tensión en bornes del rectificador, sin carga, para cada configuración de los bobinados, en función de la velocidad de rotación, para determinar la tensión inducida por el generador.
- » Ensayo de potencia con carga resistiva: se mide el desempeño del generador alimentando una carga aislada, midiendo tensión en bornes y corriente en la carga, en función de la velocidad de rotación. Se compara con los resultados en vacío para conocer cuál es la caída de tensión interna que tiene el generador.
- » Ensayo de potencia en carga de baterías: se repite el ensayo anterior, pero empleando como carga, en este caso, una batería de 12 V. Esto tiene la particularidad de fijar la tensión en bornes del rectificador (y por ende del generador), cambiando su comportamiento.

Las figuras 8, 9, 10 y 11 muestran los resultados de los ensayos realizados con el generador para las tres configuraciones de bobinados en el rango de 0 a 500 rpm.

En el ensayo de vacío, se observó que, debido a las características constructivas del generador, este funciona mejor a tensiones relativamente elevadas y corrientes bajas. En la configuración original 12 x 1C, en un rango de velocidades de 150 a 400 rpm, que es la zona de operación normal de un aerogenerador de eje vertical, se obtuvo una tensión de 60 a 180 V. En las demás configuraciones, las tensiones fueron menores, especialmente en la 3 x 4C. Los resultados de este ensayo se observan en la figura 8.

El ensayo con carga resistiva se realizó para permitir la circulación de corriente y ver cuál es la caída interna del generador. Para el mismo rango de revoluciones por minuto, la configuración que mayor tensión generó fue la 12 x 1C, la cual, a 150 rpm casi no tuvo diferencias con el ensayo de vacío, mientras que a 400 rpm la tensión con carga resistiva disminuyó a casi 140 V. Los resultados se observan en la figura 9.

En el ensayo de carga de una batería, la tensión en bornes queda fijada a 12 V y se realizó la medición de la corriente entregada por el generador. Esta crece rápidamente en las tres configuraciones, superando los 14 A a las 300 rpm, lo cual, el ensayo se limitó a estos valores para evitar el daño del esmaltado de los bobinados debido al calibre del alambre de aluminio. Se destaca que, a bajas revoluciones por minuto, la 12 x 1C entrega más corriente, pero a partir de las 200 rpm, la 3 x 4C aumenta rápidamente. Los resultados se observan en la figura 11. Se observó, además, un par resistente muy elevado, debido a la alta corriente que circula por los bobinados, incluso a bajas velocidades.

En la figura 10 se observan los resultados del ensayo de carga de batería teniendo en cuenta la corriente producida por el generador y la tensión de referencia. Se determina que la configuración que mayor potencia eléctrica en corriente continua es la 3 x 4C, y la 12 x 1C es la que menos produce. Sin embargo, la 3 x 4C lo hace a partir de las 100 RPM, mientras que las otras dos configuraciones lo hacen a partir de las 50 rpm. La configuración 2 x 6C entrega la potencia de forma equilibrada a bajas y altas revoluciones por minuto. La configuración 12 x 1C tiene el mismo comportamiento, pero en menor medida.

De esta forma, se determinó que la configuración 3 x 4C es la mejor para la carga de baterías de 12 V, cuando se necesita funcionar en un rango de revoluciones por minuto superior a las 200, por ejemplo, en aerogeneradores de eje horizontal. Para implementar con aerogeneradores de eje vertical, con un rango de funcionamiento de 50 a 300 rpm, son preferibles las configuraciones 12 x 1C o 2 x 6C, ya que poseen un buen desempeño a bajas revoluciones por minuto, y mantienen buena potencia a mayores velocidades.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre un motor sin escobillas de uso comercial en electrodomésticos, se concluyó que

es posible utilizarlo como generador eléctrico para ser implementado acoplado a una turbina eólica y otros tipos máquinas motoras que puedan transmitirle potencia mecánica. Se realizó el ensayo de tres configuraciones de bobinados diferentes para el uso en aerogeneradores, teniendo en cuenta los requisitos de tensión de 12 V en continua para un rango de velocidad de 50 a 300 rpm.

Habiendo realizado los ensayos se comenzará con el diseño de piezas específicas para adaptarlo al aerogenerador, teniendo en cuenta la posibilidad de replicarlo fácilmente.

Una vez que se implemente el generador eléctrico en el aerogenerador, se verificará su robustez ante las inclemencias climáticas y cómo afectan estas a la generación eléctrica. ■

Referencias

- [1] Gil, G., Alvarez, M., Pedace, R. "Resumen Ejecutivo. De renovables y generación distribuida". FARN. 2017.
- [2] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. Wind Energy Handbook. John Wiley and Sons, Ltd. London. 2001.
- [3] Agotegaray, J. C., Pinzon Montes, A. L., & Iratchet Prado, M. S. "Prototipo de aerogenerador de eje vertical Giromill". CLADI 2017. Congreso Latinoamericano de Ingeniería. Paraná, Argentina. 2017.
- [4] Scagliotti, A., Llera, M., Jorge, G. "Plan de diseño, desarrollo e instalación de estaciones remotas de medición de calidad de aire de bajo costo en el noroeste del Conurbano Bonaerense". XIII Congreso Argentino de Meteorología. Rosario, Argentina. 2018.
- [5] Agotegaray, J., Pinzón, A., Hernández, S., Ferreyra, F., Bortolotto. "Desafíos en la fabricación de las palas de una turbina eólica de eje vertical de baja potencia". 18° SAM-CONAMET Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. San Carlos de Bariloche, Argentina. 2018.
- [6] Agotegaray, J., Pinzón, A., & Prado Iratchet, S. "Implementación de tecnología 3D para la fabricación de prototipos de aerogeneradores". ASADES 2015-XXXVIII Reunión de Trabajos. San Rafael, Argentina. 2015.
- [7] Whaley, D. M. "Low cost small-scale wind power generation. Thesis: Doctor of Philosophy". The School of Electrical & Electronic Engineering, University of Adelaide, Australia. 2019.
- [8] <http://www.ripplephex.com.au/energy2.html>, último acceso 2/12/2019