

Diseño y construcción de un generador de imanes permanentes para su uso en microaerogeneradores

Romina Tripodi, Gina A. Lucio, Lucio M. E. Ponzoni, María J. Ganiele, Sara O. Montenegro, María C. Pereira, Diego Cowes, Paula Nicoletti, Andrea F. Villanueva

RESUMEN

Los generadores eléctricos más eficientes para su uso en aerogeneradores de baja potencia son los de imanes permanentes, siendo este uno de los componentes más costosos del aerogenerador. En este trabajo, se diseñó y construyó un prototipo de generador sincrónico de flujo axial a base de imanes permanentes de Neodimio-Hierro-Boro, para ser instalado en aerogeneradores de baja potencia (menor al 0,5 KW). El trabajo se basó en las siguientes premisas: 1) Diseñar y especificar los componentes eléctricos y mecánicos del sistema de generación para Aerogeneradores, 2) Construir el sistema de generación de energía, 3) Realizar pruebas y mediciones del prototipo construido. Se diseñaron y construyeron todas las partes del generador (rotor, estator, eje, base y bobinas) empleándose la siguiente maquinaria: pantógrafo, amoladora, taladro de banco, lijadora de banco, soldador de estaño, bobinadora, secador industrial, torno giratorio. El resultado fue un generador trifásico axial de 12 pares de polos, con 24 imanes ubicados en un rotor de 165 mm de diámetro y 9 bobinas conectadas en forma de estrella, desfasadas en 40° una de otra. Las pruebas arrojaron una máxima tensión prueba de 7,6 Volt a 493 rpm, obteniendo una relación lineal entre tensión y las revoluciones de giro. Si bien, este diseño es de muy baja potencia, su construcción permitió obtener la experiencia y conocimiento necesario para el desarrollo de futuros generadores eléctricos para aerogeneradores de baja potencia que se encuentran en desarrollo por el grupo de investigación de Aerogeneradores de la Universidad Nacional de Tres de Febrero y de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

ABSTRACT

The most efficient electric generators to use in low power wind turbines are those of permanent magnets, this being one of the most expensive components of wind turbine. In this work, a prototype of a synchronic generator of axial flow was designed and built, based on Neodymium-Iron-Boron permanent magnets to be installed in low power wind turbines (less than 0.5 KW). The work was based on the following premises: 1) Designing and specification of the electrical and mechanical components of the generation system for wind turbines, 2) Building the power

generation system, 3) Realizing tests and measurements of the constructed prototype. All the parts of the generator (rotor, stator, AXIS, base and coils) were designed and built using the following machinery: pantograph, grinder, bench drill, bench sander, tin soldering iron, winder, industrial dryer, rotating lathe. The result was a three-phase axial generator with 12 pairs of poles, with 24 magnets located in a rotor of 165 mm diameter and 9 coils connected in a star shape, offset by 40 degrees from one another. The tests yielded a maximum voltage test of 7.6 Volt at 493 rpm, obtaining a linear relationship between voltage and rotational speed. Although this design is very low power, its construction allowed obtaining the experience and knowledge necessary for the development of future electric generators for low power wind turbines that are under development by the Wind Turbine research group at the National University of Tres Febrero and the National Atomic Energy Commission.

PALABRAS CLAVE

Imanes permanentes, generador, estator, rotor, aerogenerador.

KEY WORDS

Permanent magnet, generator, stator, rotor, wind turbine.

INTRODUCCIÓN

El modelo de desarrollo económico actual a nivel mundial está basado en el uso intensivo de recursos energéticos de origen fósil, principalmente en los países subdesarrollados. Estos combustibles no son renovables, son recursos finitos y por lo tanto agotan progresivamente las reservas. Por otro lado, su extracción, procesado y combustión aumentan la proporción de gases de efecto invernadero y liberan a la atmósfera gases muy tóxicos. En este contexto, el uso de estos recursos como fuentes energéticas genera impactos negativos que desequilibran el ambiente y forjan inestabilidad socioeconómica. Esta situación obligó a definir un nuevo modelo económico a nivel mundial.

El desarrollo sostenible, en un plano energético propone independizarse del uso de combustibles fósiles [1]. Sin embargo, la transición energética de estos a la producción de energías renovables a gran escala conlleva la necesidad de una planificación a largo plazo y desafíos para su cumplimiento. En este contexto, el presente trabajo plantea un modelo a pequeña escala como primera aproximación en busca de soberanía energética regional a largo plazo, sembrando a su vez concientización ambiental. En respuesta a la problemática mencionada, surgió desde la carrera Ingeniería Ambiental el proyecto “Aerogenerador Social” cuyo objetivo radica en el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia construidos en su mayoría con materiales reutilizados para ser instalados en comunidades de bajos recursos. Para lograr el objetivo planteado, se diseñó, construyó e instaló un prototipo de aerogenerador que servirá como base para ajustar las variables de diseño. Actualmente, el dispositivo se encuentra montado en la sede de Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero como se puede observar en la Figura 1.

Figura 1. Primer prototipo de aerogenerador ubicado en Villa Lynch, Buenos Aires.



Fuente: Elaboración Propia

COLABORADORES

Dra. María Petraglia, Ing. Julio Sola, Fundación Weiba. Tec. Daniel Anello.

CONTEXTO

En este trabajo se diseñó y construyó un generador de imanes permanentes para ser instalado en un aerogenerador de baja potencia como el instalado en la Sede Villa Lynch de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. El propósito de esta investigación, es contribuir al Proyecto "Aerogenerador Social", línea de investigación llevada adelante por Investigadores de la Universidad Nacional de Tres de Febrero y la Comisión Nacional de Energía Atómica, bajo la dirección del Dr. Lucio Ponzoni. El proyecto tiene como objetivo construir aerogeneradores de baja potencia con materiales reutilizados, destinados a comunidades de bajos recursos, donde el suministro de energía eléctrica representa un problema importante a resolver.

OBJETIVOS

Entre los objetivos generales de este trabajo de investigación, se encuentran el diseño y construcción de un generador sincrónico de flujo axial a base de imanes permanentes a escala de laboratorio, a fin de avanzar en el conocimiento y desarrollo de esta temática en el grupo de investigación. Además se espera que el mismo sea aplicado en los prototipos de aerogeneradores venideros desarrollados en el grupo de investigación.

Entre los objetivos específicos de este trabajo podemos nombrar los siguientes puntos:

- Diseñar y especificar los componentes eléctricos y mecánicos del sistema de generación.
- Construir el sistema de generación de energía propuesto.
- Realizar pruebas y mediciones.

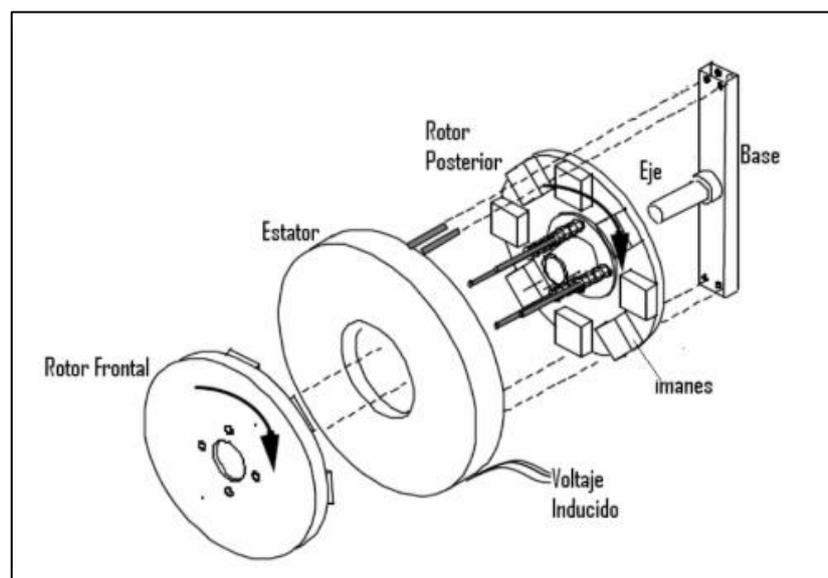
METODOLOGÍA

El sistema de generación de energía propuesto consiste en un generador sincrónico de flujo axial a base de imanes permanentes [2]. El mismo consiste de un generador sincrónico a base de discos móviles de imanes permanentes. La razón de este diseño se basa a partir de los siguientes puntos:

- Los rotores, con los imanes que los componen actúan como ventiladores, enfriando las bobinas del estator.
- La autoexcitación debido a imanes permanentes permite una operación a un factor de potencia alto y una alta eficiencia. La eficiencia es más alta que en la máquina de inducción.
- Alta relación potencia/tamaño.
- Se aumenta la confiabilidad del equipo al disminuir las piezas que lo componen.
- Los materiales usados para producir imanes permanentes son costosos, sin embargo, el beneficio es que se pueden reutilizar los imanes, por ejemplo, de los discos duros [3].

En un generador de este tipo, el flujo magnético pasa por las bobinas en dirección paralela al eje de la máquina. Este dispositivo se compone de dos rotores y un estator. Ambos rotores están unidos por un eje longitudinal y el estator está montado en una base fija. Este último contiene bobinas de alambre de cobre en las cuales se induce la tensión producto del flujo variable que produce el campo magnético de los imanes ubicados en los rotores móviles. Los imanes se ubican de forma tal que permita el paso del flujo magnético de un rotor a otro, cruzando a través de las bobinas del estator, mientras el eje del rotor gira; se induce así el voltaje sinusoidal en los terminales de las bobinas [4], como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Estructura de un generador de flujo axial.



Fuente: Rosenman, P. B. [4].

Diseño

Polos y bobinas: El número de polos (p) de un generador y el número de bobinas(Q) se puede obtener con la ecuación 1 [5].

$$(1) 0.5 = \frac{2Q}{3p}$$

A partir de dicha ecuación se deriva la tabla siguiente.

Tabla 1: Combinaciones: Número de pares polos- Número de bobinas

8 – 6	12 – 9	16 – 12	20 – 15	24 – 18	28 - 21
-------	--------	---------	---------	---------	---------

Fuente: Elaboración propia basado en Latoufis, Messinis, & Hatziargyriou [5].

La combinación seleccionada es la resaltada en azul, donde:

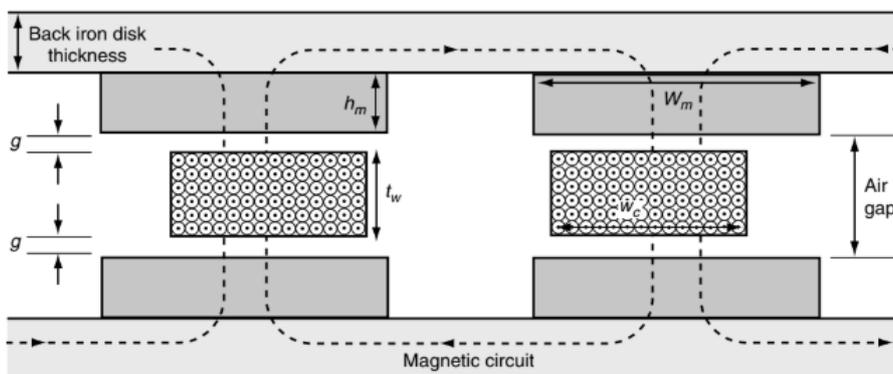
Pares polo (p): 12

Bobinas (Q): 9

Los imanes permanentes seleccionados para este generador son imanes rectangulares de Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB, grado N40). Cabe destacar que es posible reutilizar los imanes contenidos en los discos duros de computadoras para reducir el costo de construcción del sistema de generación y a su vez contribuir de forma positiva con el ambiente. En esta oportunidad, por falta de tiempo para su recolección, se utilizaron imanes nuevos.

Dimensiones axiales del generador: Incluye el espacio libre mecánico (g), el grosor del estator (t_w), el grosor de los rotores (h_r) y el grosor de los imanes (h_m), como se puede observar en el esquema 2 [6].

Figura 3: Dimensiones axiales del generador



Fuente: Latoufis, Messinis, & Hatziargyriou [5].

Medidas de los rotores: Se utilizó una "regla general" que indica que el grosor de la placa debe ser igual al grosor del imán (3 mm), de esta forma se evita la saturación magnética y se reduce al máximo el peso de los rotores.

Grosor del estator (t_w): Debido a que los imanes son de NdFeB N40, se puede usar la ecuación 2 para obtener el grosor del estator (t_w):

$$(2) t_w = 2h_m - 2g = 2(3mm) - 2(1mm) = 4mm$$

Número de vueltas por bobina (N_c): Usando ecuaciones básicas para la inducción electromagnética y suponiendo una densidad de flujo magnético casi sinusoidal, se pueden calcular el número de vueltas requerido por bobina [7]. Inicialmente, el flujo máximo por polo Φ_{max} se calcula utilizando la ecuación 3:

$$(3) \Phi_{max} = B_{mg} * w_m * l_a = 0.64T * 0.01m * 0.02m = 1.28 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Luego, el número de vueltas por bobina N_c se calcula utilizando la ecuación 4, donde k_w es un coeficiente de devanado igual a 0.95, Q es el número de bobinas por fase, n es la RPM en el momento del corte y E_r es el voltaje inducido correspondiente durante el corte.

$$(4) N_c = \frac{\sqrt{2}E_f}{Q * 2\pi * k_w * \Phi_{max} * n * \frac{p}{120}} = \frac{\sqrt{2} * 12V}{3 * 2\pi * 0.95 * 1.28 \times 10^{-4} \text{ Wb} * 160 \text{ rpm} * \frac{12}{120}}$$

$$N_c = 462.74 \text{ vueltas}$$

Ancho de la bobina (w_c): El ancho de la pata de la bobina (w_c) se calcula a partir de la ecuación 5 para un valor del coeficiente de calor cq igual a 0.3 W/cm². I_{ACmax} es la corriente máxima del generador y ρ es la resistividad eléctrica del cobre.

$$(5) w_c = \frac{I_{ACmax} * N_c}{\sqrt{\frac{2 * cq * k_f * t_w}{\rho}}}$$

El factor de relleno de las bobinas, que significa la relación entre el área de cobre y el área total de una sección transversal de una bobina, se representa con k_f . Un valor cercano a 0,55 es adecuado para este factor en lo que respecta a las bobinas construidas manualmente [8].

Coeficiente de calor cq y máxima densidad de corriente J_{max} : Junto con el coeficiente de calor cq , la máxima densidad de corriente J_{max} del devanado debe calcularse como

se muestra en la ecuación 11. Esto se da después realizar la ecuación 6 para $I_{ACm\acute{a}x}$, donde en lugar de I_{AC} , que es la corriente CA del generador para P_{nom} , se usa $I_{ACm\acute{a}x}$, que es la corriente máxima producida momentáneamente en una ráfaga de viento con un 10% más de potencia que la potencia nominal P_{nom} [5]. Asimismo, debe calcularse la ecuación 12 correspondiente al área transversal de cobre S_c .

$$(6) I_{ACm\acute{a}x} = \frac{1.1 * P_{prom}}{3 * E_{fnom} * \eta} = 0.933 A$$

Para conocer el valor de $I_{ACm\acute{a}x}$ es necesario calcular E_{fnom} a partir de la siguiente ecuación:

$$(7) E_{fnom} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} * E_{fcutin} = 15.28 V$$

Para calcular E_{fnom} es necesario resolver las ecuaciones 8, 9 y 10 como se muestra a continuación:

$$(8) E_{cutin} = \frac{E_f + 1.4}{\sqrt{3} * 1.35} = \frac{12 V + 1.4}{\sqrt{3} * 1.35} = 5.74 V$$

$$(9) n_{nom} = \frac{60 * v_w * \lambda_{nom}}{2\pi * R_{turb}} = \frac{60 * 10 \frac{m}{s} * 7}{2\pi * 1.5m} = 445.63 rpm$$

$$(10) n_{cutin} = \frac{60 * v_{cutin} * \lambda_{cutin}}{2\pi * R_{turb}} = \frac{60 * 3 \frac{m}{s} * 8.75}{2\pi * 1.5m} = 167.11 rpm$$

Se utilizó un valor de E_f de 12 V para la carga de la batería, una velocidad mínima de 3 m/s y una velocidad nominal de 10 m/s, de acuerdo a condiciones de viento estandares. Así mismo, se utilizó un valor de λ_{cutin} de 8.75, un valor de λ_{nom} de 7 y un R_{turb} de 1.5m según las dimensiones del prototipo. Una vez conocido el valor de $I_{ACm\acute{a}x}$ se puede calcular el ancho lateral de la bobina (w_c) con la ecuación 5.

$$w_c = 0,01598 m.$$

Un enfoque estándar para el diseño de turbinas eólicas pequeñas sería un valor para la densidad de corriente de 6 A / mm².

$$(11) J_{m\acute{a}x} = \frac{I_{ACm\acute{a}x}}{S_c}$$

Diámetro del cobre (d_c):

$$(12) s_c = \frac{k_f * w_c * t_w}{N_c} = 7,0569 \times 10^{-8} m^2$$

$$(13) d_c = \sqrt{\frac{4 * s_c}{\pi}} = 2.997 \times 10^{-4} m$$

Con el resultado obtenido en 12 se obtiene $J_{m\acute{a}x}$ de la ecuación 11, dando como resultado $13221102,75 \frac{A}{mm^2}$.

Forma de las bobinas:

Se considera como "regla general" que la forma interna de la bobina debe tener las mismas dimensiones que la forma de los imanes.

El radio del generador:

$$(14) R_{in} = \frac{(2Q * w_c) + (p * w_m)}{2\pi} = \frac{(2 * 9 * 0.01598521181 m) + (12 * 0.01 m)}{2\pi} \\ = 0.0648 m$$

$$(15) D_{out} = D_{in} + 2l_a = (2 * 0.0648 m) + (2 * 0.02m) = 0.1697m$$

Construcción del sistema de generación

La construcción del estator comenzó con el bobinado de los alambres de cobre de 0.3 mm de diámetro. Lo dicho anteriormente se realizó con una maquina bobinadora que posee contador de vueltas y permite configurar diferentes velocidades para el bobinado. Se desarrolló un dispositivo que funciona como molde (carrete) que permite contener la medida justa del alambre (espesor y ancho) y a su vez, darle la forma deseada como se muestra en la Figura 4.

A continuación, se realizaron las 9 bobinas y se colocaron en un molde rectangular de plástico para luego ser cubiertos con parafina. Para ello se realizó de forma manual una circunferencia dividida en 9 partes iguales para asegurar la ubicación exacta de las bobinas. Posteriormente, se procedió a iniciar la conexión trifásica. Las bobinas 1,2,3 conformaron la primera fase (cable azul), 4,5,6 la segunda (cable rojo) y 7,8,9 la tercera (cable negro). A continuación, se calentó 250 g de parafina hasta alcanzar la

fase líquida y se colocó en el molde para formar el estator. Se obtuvo como resultado un estator de 19.6 cm de ancho x 19.6 cm de largo y un espesor de 6.1 cm.

Figura 4. Etapas de elaboración de las bobinas del estator.



(a) Piezas de acrílico



(b) Carrete



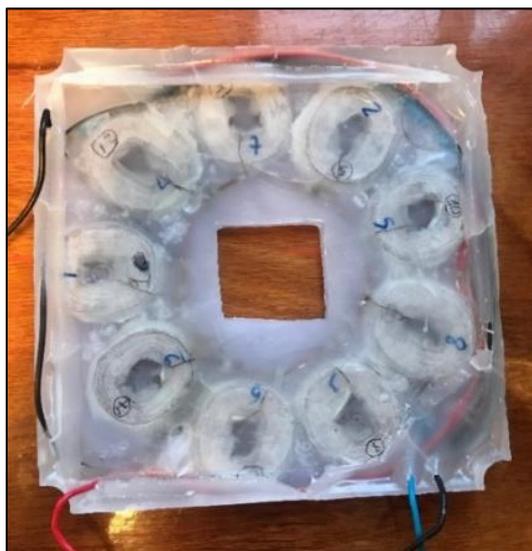
(c) Bobinadora



(d) Interior de bobina

Fuente: Elaboración Propia

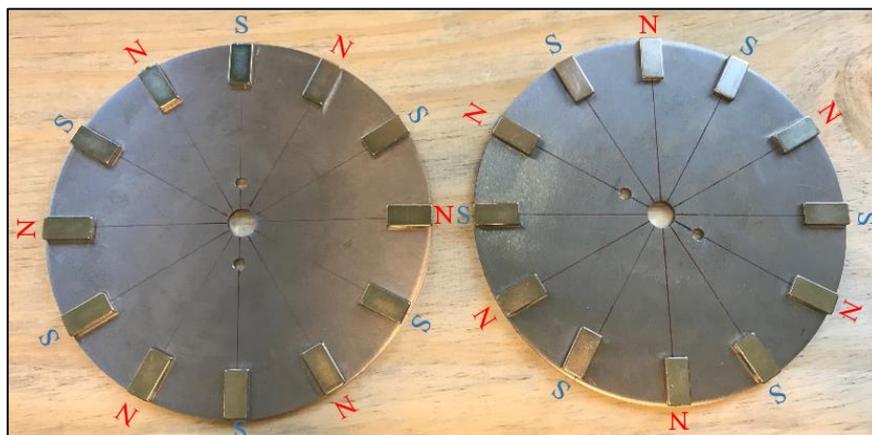
Figura 4e. Estator con conexión trifásica a base de parafina.



Fuente: Elaboración propia

La construcción continuó con el armado de los rotores. Para ello, se utilizaron dos placas de acero bajo en carbono, imanes y pegamento para unir las partes. Primero se procedió a realizar el corte de las placas mediante un pantógrafo. Antes de incorporar los imanes a las placas, se realizaron tres perforaciones en cada una. La principal en su centro para el paso del eje (de 12 mm) y las otras dos se hicieron para lograr que ambas giren a la misma velocidad. Los polos de los imanes se ubicaron alternados.

Figura 5. Rotores móviles de imanes permanentes



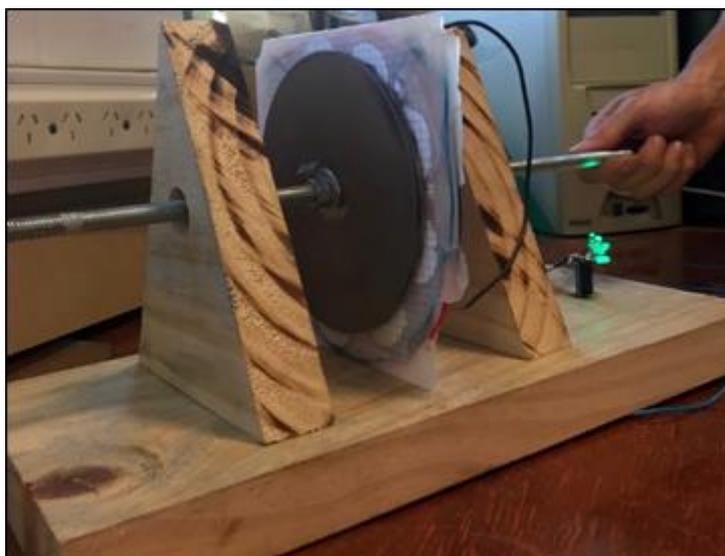
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se realizó el montaje del sistema de generación para su posterior experimentación. Ambos rotors fueron unidos a través de un eje longitudinal y el estator fue montado sobre una base fija. Los imanes se ubicaron de forma tal que permita el paso del flujo magnético de un rotor a otro, cruzando a través de las bobinas del estator.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Medición del campo magnético: Luego de calibrar el equipo, se colocó el sensor entre las dos imanes opuestas de ambas placas y se realizó la medición con un gaussímetro. El valor del campo obtenido fue -2.63051 kG a una temperatura de $24.02 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 6. Generador sincrónico de flujo axial a base de imanes permanentes



Fuente: Elaboración Propia

Figura 7. Campo magnético del rotor.



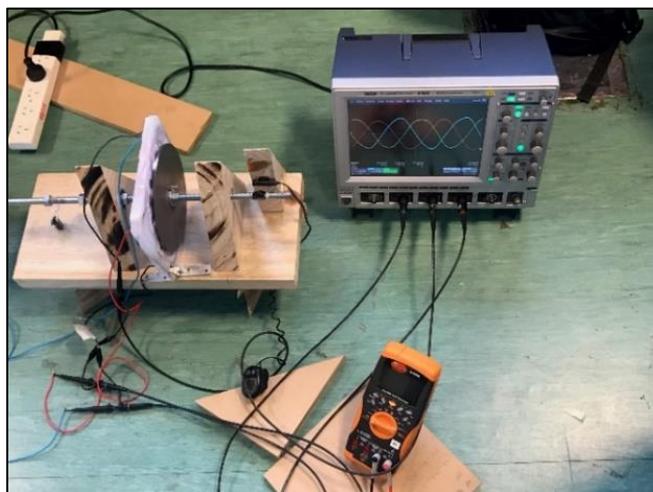
Medición del campo magnéticos

Resultado obtenido del Gaussímetro.

Fuente: Elaboración Propia

Curva sinusoidal: En la Figura 8 se aprecia la pantalla del osciloscopio la cual exhibe las tres fases características del generador trifásico.

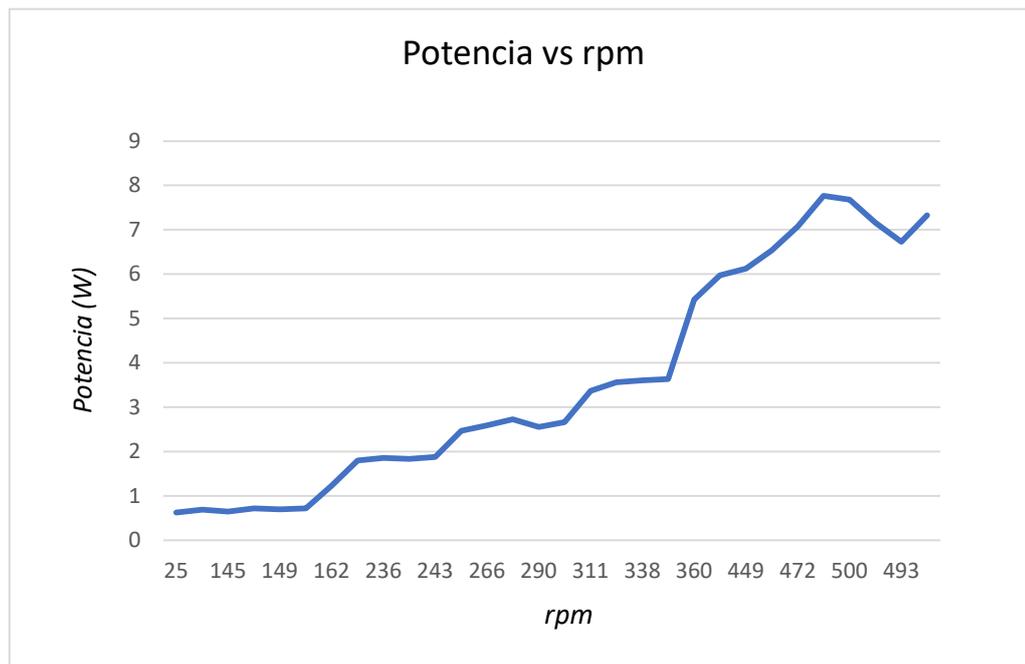
Figura 8. Curva sinusoidal del sistema trifásico.



Fuente: Elaboración Propia

Potencia vs rpm: Para obtener la gráfica de tensión con carga en función de las rpm, se conectó una fase con 3 resistores de 1 ohm cada uno. Sabiendo que la potencia es $tensión^2/Resistencia$, se multiplicó por 3 para obtener la potencia entregada a las tres cargas.

Figura 9. Potencia eléctrica respecto el numero de vueltas de giro.



Fuente: Elaboración propia

El maximo voltaje obtenido fue 1.6091 V a los 493 rpm entregando una potencia de 7.76 W por fase.

CONCLUSIÓN

La generación de energía por medio de la aplicación de la Ley Faraday-Lenz a partir de imanes permanentes representa una buena alternativa para ser instalada en el prototipo de aerogenerador ubicado en Villa Lynch. El presente desarrollo, a partir de su propuesta a pequeña escala, encarna una potencial solución a la crisis que actualmente nos abruma en todo el mundo referente al agotamiento de los recursos y el calentamiento global.

Las etapas de diseño, construcción y experimentación efectuados durante el presente trabajo representaron un incentivo para continuar investigando sobre el aprovechamiento del recurso eólico. Este desarrollo permitió identificar los métodos de construcción que mejor se adaptan a bajos presupuestos de fabricación y a cortos lapsos constructivo. Asimismo, se lograron identificar los problemas asociados al diseño y a los materiales utilizados. Se propone como aspecto a mejorar, implementar el diseño de piezas 3D en reemplazo de la parafina utilizada en el estator y utilizar una bobinadora de precisión para obtener resultados más cercanos a los valores de diseño.

Es claro que con la potencia lograda con este prototipo no se suplen las necesidades energéticas para alimentar todo el circuito de iluminación de la Universidad. Sin embargo, al aumentar la escala en próximos desarrollos y mediante la optimización de las variables de operación se pueden llegar a obtener cantidades considerables de energía.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Informe Brundtland, Organización de las Naciones Unidas, 1987.
- [2] Mauricio Carrillo-Rosero, Cristian Claudio-Medina, Alex Mayorga-Pardo. "Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica." Revista de Ciencia y Tecnología, Vol. 19, 2018.
- [3] Pinilla, M., & Martinez, S. "Optimal design of permanent-magnet direct-drive generator for wind energy considering the cost uncertainty in raw materials." Renewable Energy, Vol. 41, 267–276, 2012.
- [4] Rosenman, P. B. "Diseño de Aerogeneradores con imanes permanentes para aplicaciones en electrificación rural.", Santiago de Chile: Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica., pp. 20-30, 2007.
- [5] Latoufis, K. C., Messinis, G. M., & Hatziargyriou, N. D. "Wind Engineering", Atenas: Universidad Técnica Nacional de Atenas, Vol. 36, pp 411-430. ,2012.
- [6] W. Gonzalez, J.A. Tapia, R. Wallace, M.A. Valenzuela. "Magnetic design considerations for an axial flux PM machine with field control capability", Flux magazine Cedrat technologies, No. 51, 2006.
- [7] Luisa Herrera, Alexander Alarcón, Edwin Rivas Trujillo. "Diseño de un generador de flujo axial usando el método de elementos finitos"; Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá – Colombia, 2013.
- [8] Colonel WM. T. Mcllyman. "Transformer and inductor design handbook, third edition, revised and expanded." Pasadena, California, 2004.
- [9] J. R. Bumby and R. Martin. "Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 5, pp. 1065-1075, 2005.
- [10] Laxminarayan, S. S., Singh, M., Saifee, A. H., & Mittal, A. "Design, modeling and simulation of variable speed Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator." Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 19, 114–124, 2017.

- [11] Ghulam Ahmad, Uzma Amin. “Design, construction and study of small scale vertical axis wind turbine based on a magnetically levitated axial flux permanent magnet generator.” Renewable Energy, Vol. 101, 286-292, 2016.