

Rebobinado y Caracterización de un Generador Brushless DC de Imanes Permanentes de Flujo Axial

Cristhian Alexander Bejarano Murillo; Luis Enrique Monsalve Vásquez; Jose Alejandro Posada Montoya

Departamento de Ingeniería
Institución Universitaria Pascual Bravo
Medellín Colombia

c.bejarano@pascualbravo.edu.co; lui.monsalve@pascualbravo.edu.co

Resumen — En este artículo se especifica el proceso para el rebobinado y la caracterización de un generador síncrono de imanes permanentes capaz de producir 500 W a una velocidad de 200 RPM, GDG 0.5kW-200. Este generador va a ser usado para la generación de energía eléctrica mediante una planta de vórtices gravitacionales. Este generador no traía las curvas por lo que se construyó un banco de ensayo. Durante las pruebas, la vibración del motor aflojo el acople del eje del generador ocasionando un corto en el bobinado. Este artículo mostrará el paso a paso del rebobinado y caracterización del generador Brushless DC de imanes permanentes.

Palabras Clave — Generación; Imanes Permanentes; Brushless DC; outrunner, flujo axial.

Abstract - This article specifies the process for rewinding and the characteristic of a permanent magnet generator capable of producing 500 W at a speed of 200 RPM, GDG 0.5kW-200. This generator was used for the generation of electrical energy by means of a plant with gravitational vortices. This generator did not bring the curves so a test bench was built. During the tests, the vibration of the motor loosens the coupling of the shaft of the generator causing a short in the winding. This article shows the step by step of rewinding and the characterization of the DC generator without permanent brushes.

Keywords - Generation; Permanent Magnets; Brushless DC; outrunner, axial flow; Coupling

I. INTRODUCCIÓN

El generador brushless DC outrunner GDG 0.5kW-200 (Greef, 2018) va a ser usado para la generación de energía eléctrica mediante una planta de vórtices gravitacionales. Este generador es muy utilizado en aquellos casos en los que no importa que la tensión caiga, en cierto grado o siempre que se aplique electrónica a la salida del generador. Su principal beneficio es que cuando hay un cortocircuito en el generador síncrono son capaces de suministrar la energía necesaria al regulador para que este sobreexcita al generador y poder mantener la tensión el tiempo suficiente para que salten las protecciones. La principal ventaja es su simplicidad, la

fabricación y montaje del rotor es más barata si se usan imanes. No necesitan mantenimiento ya que no llevan escobillas. Además, la consistencia mecánica de un generador con imanes permanentes es muy superior, por tal motivo se puede llegar a ahorrar un 20% de energía simplemente por usar imanes. [1]

El modelo de generador seleccionado y sus características se mostrarán en Tabla 1:

TABLA 1
HOJA DE DATOS DE DESEMPEÑO DEL GENERADOR

RPM	Power(W)	Voltage (V)	Torque(N.M)	Efficiency
0	0	0	0.00	50%
20	16	2	2.89	65%
40	40	4	5.95	74%
60	65	7	8.62	79%
80	100	9	11.68	82%
100	148	11	14.57	84%
120	205	14	17.47	86%
140	265	17	20.36	87%
160	325	19	23.26	89%
180	400	21	26.15	90%
200	500	24	29.10	90%
220	620	26	32.31	90%

En rojo se resalta el voltaje nominal a 200 RPM.

Este generador no traía las curvas por lo que se construyó un banco de ensayo. Durante las pruebas, la vibración del motor aflojo el acople del eje del generador ocasionando un corto en el bobinado. Este artículo mostrará el paso a paso del rebobinado y caracterización del generador Brushless DC de imanes permanentes.

Un generador de imanes permanentes es un generador en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. Su bobinado se encuentra con un núcleo de aire y hay escasez de metal alguno, aumentando así su efectividad, este sólo se encuentra cubierto de un material aislante y rígido el cual se le conoce como resina epoxi, que es un material utilizado para dejar fijas las bobinas con un determinado molde y que no se produzca vibración alguna en él. La configuración básica consiste en un estator de imanes permanentes de neodimio ferrítico, para establecer el flujo magnético de forma axial sobre la bobina que se encuentra ubicada en el rotor [2].

Antes del desarrollo de los imanes de tierras raras, la tecnología solo disponía de dos opciones: los diversos grados

de Alnico con su característica principal; su alta remanencia y baja coercitividad (intensidad de campo) y ferritas; baja remanencia y alta coercitividad. Con la implementación de los imanes de tierras raras logran fusionar en un solo compuesto las mejores características mencionadas de los dos anteriores imanes así logrando alta remanencia y alta coercitividad, los primeros imanes desarrollados en 1960 fueron los de Samario-Cobalto permitiendo reemplazar las viejas generaciones con un peso mucho menor, el inconveniente era su alto costo, el cual se justificaba para aplicaciones tales como en la industria aeronáutica. Posteriormente en 1984 aparecen los imanes de Neodimio-Hierro-Boro, que superan las propiedades magnéticas del Samario Cobalto a un precio mucho menor. Estos imanes, fabricados con aleaciones de neodimio, hierro y boro para formar la estructura cristalina $Nd_2Fe_{14}B$ tetragonal, han sido muy efectivos y de última tecnología en la industria [3], pero su desventaja era que se desmagnetizan a temperaturas muy altas y baja resistencia a la corrosión, los cuales fueron mejorados mediante ajustes de composición y otros recursos [3].

Las nuevas tecnologías desarrolladas frente a imanes permanentes se conocieron entre el año 2016 y 2017 el primer mundialmente probado fue el imán resistivo que alcanzó un campo magnético de 41.4 Tesla, seguido por el imán Series Connected híbrido de 36 Teslas, el tercero del ranking mundial fue el descubierto por el Laboratorio de Campo Magnético Alto con sede en la Universidad de Florida consiguiendo otro récord mundial con el imán que alcanzó un campo magnético de 32 Teslas dando origen a su nombre 32T, es 33 % más fuerte que lo que anteriormente era el imán superconductor más fuerte utilizado en investigaciones y 3.000 veces más fuerte que un imán pequeño de refrigerador [4].

Depende del uso, escoger los imanes.

En los siguientes casos, se recomienda especialmente el uso de imanes de ferrita:

- Presupuesto reducido
- Temperaturas altas (80-250 °C)
- Uso en exteriores
- Necesidades estéticas reducidas

En los siguientes casos, recomendamos especialmente el uso de imanes de neodimio:

- Necesidad de una gran fuerza de sujeción
- Espacio limitado (miniaturización)
- Necesidad de peso reducido
- Estética (revestimiento elegante)

Algunas de las ventajas de los imanes de Neodimio son:

- Entre 8 y 10 veces superior a la de un imán de ferrita del mismo tamaño.
- Las temperaturas inferiores a -40 °C no afectan en absoluto a los imanes de neodimio.
- Los imanes de neodimio cuentan siempre con una tolerancia de +/- 0,1 mm. [5]

TABLA 2
HOJA DE DATOS DE DESEMPEÑO DE IMANES

Tipos de materiales	Símbolo	Remanencia (Gauss)	Pr. Energía BH max (MGOe)	Densidad (g/cm3)	Tmax °C
Alnico	Al	6500-12500	5	7.3	425
Ferrita	Fe	2000-4000	3.7	5	250
Neodimio-Hierro-Boro	NdFeB	10500-11500	35	7.5	80-150
Samario-Cobalto	Sa-Co	9000-10500	28	8.3	250

Los generadores de flujo axial se caracterizan porque sus imanes se distribuyen simétricamente alrededor del disco del rotor (en este caso en el estator) alternando la forma en que se orientan los polos magnéticos Norte y sur.

La empresa ABB creó el primer generador de velocidad media (150 a 500 RPM) en el año 2000, y en el año 2003 el primer generador de imanes permanentes de alta velocidad (0 a 3000 RPM) HS PMG [5].

Los generadores axiales son utilizados generalmente en turbinas eólicas y otros dispositivos de generación que requieren generar energía a bajas velocidades de rotación. Además, su frecuencia se puede modificar aumentando o disminuyendo las velocidades de rotación del generador. Esto lo hace ser un generador de una muy alta eficiencia para el uso de turbinas eólicas y de generación por medio de caudales de agua que no alcanzan velocidades de rotación altas, pero sí pueden tener un par de rotación muy alto [6].

El generador brushless GDG-0.5kW-200 está compuesto por los componentes mostrados en la (Fig. 1)

- Material del generador: Aleación de aluminio
- Material del eje: Acero al carbono
- N° rodamientos: 2 NSK USA
- N° de bobinas: 30 bobinas
- N° de imanes: 40
- Bobinas por fase: 10 bobinas
- N° de vueltas por bobina: 138
- Calibre de cobre: ·23 AWG
- 10 tornillos y tuercas de ¼"



Fig. 1. Desagregación técnica del generador.

En la Tabla 3 se observa la ficha técnica del generador.

TABLA 3
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL GENERADOR GDG-0.5kW-200

Modelo	GDG-0.5kW-200
Potencia Nominal	0.5 kW
Velocidad de Giro Nominal	200 RPM
Voltaje Nominal	56 VDC
Corriente Nominal	9 A
Eficiencia	>85 %
Método de envío	Y
Torque Inicial	< 0.1 Nm
Tipo de Fase	3 fases
Estructura	Outrunner
Diámetro de la Carcasa	320 mm
Longitud de la Carcasa	232 mm
Peso	20 kg
Diámetro del Eje	45 mm

Estos componentes livianos y el bobinado trifásico en estrella permiten la generación eficiente a bajas revoluciones.

Las ventajas que brindan estos generadores son:

- Diseño de varios polos para mejorar la frecuencia y la eficiencia de rectificadores e inversores.
- Aislamiento Clase H, mediante un proceso de impregnación que trabaja con resina epoxi y conocido como la depresión de la impregnación o también llamado VPI. (Vacuum Pressure Impregnation)
- Rodamientos NSK de larga vida útil, confiabilidad, resistencia y diseño respetuoso con el medio ambiente. [7]
- Factor de potencia cerca de 1, no es necesario agregar el equipo de compensación de factor de potencia.
- Permite agregar ventilador de enfriamiento o refrigeración por agua.

Se analizan todas las características del generador Brushless para su rebobinado y caracterización, desde materiales hasta las mismas medidas obtenidas del generador en su estado original, y así poder lograr el objetivo de reconstruir la bobina, los imanes y poner en marcha el generador para su caracterización.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la reparación del generador y su caracterización se utilizaron los siguientes elementos:

- Carrete de cobre con un peso de 2.5 kg, calibre 23 AWG esmaltado, para el bobinado.

- Cinta aislante 3M y correíllas multiusos 2.5x150 mm de plástico.

- Un núcleo de madera en forma de trapecio, con medidas en la parte superior de 17 mm, en la parte inferior una medida de 38 mm y sus dos laterales con medidas de 67 mm.

- Dos tapas de madera 10 mm más grandes que cada lado del trapecio para que el cable de cobre esmaltado no se saliera del núcleo, dándole un aspecto de carrete para el molde del bobinado.

- Dos tornillos de ¼" de 20 mm para el acople del núcleo con las tapas.

- Kit de soldadura, comprendido por estaño, pomada para soldar y caufín.

- Extractor de tapas del generador compuesto por dos espárragos ⅜" de 600 mm cada uno, un ángulo ¼" de 200 mm, el cual lleva perforaciones de ⅜" a los 50 mm de cada borde de ángulo.

- Adhesivo de resina epoxi marca SinteSolda el cual permite reparar y adherir los imanes desprendidos a las tapas del generador.

- Motor Delcrosa NV71b4 para hacer girar el generador a través de un acople en el eje.

- Se utilizó un variador de velocidad Altivar Process 360 con sus respectivos cables de conexión el cual permite variar la velocidad a través de las RPM.

- Para disolver la resina de la anterior bobina se utilizó removedor de pintura al 100% y se dejó sumergido durante aproximadamente 24 horas.

- Multímetro digital RMS 117 (Fluke, 2018) FLUKE, Pinza Voltiamperimetrica UT202A (UNI-T,2018) 600 Amperios, tacómetro DM-6234P (VICTOR, 2018).

Se buscó ayuda en un taller de mecánica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, ya que los imanes de neodimio que traen internamente las cubiertas son muy difíciles de separar por su fuerte atracción magnética.

Para destapar el generador la primera vez se utilizaron destornilladores, cinceles y almádanas (Fig. 2), lo que ocasionó algunos daños en los imanes y en el bobinado.



Fig. 2. Desarme del generador Brushless.

Al destapar el generador se encontró que estaba compuesto por dos tapas en las cuales venían adheridos 40 imanes, 20 en cubierta, un eje (rotor) sujeto al bobinado, el cual estaba sumergido en resina epoxi negra sólida, obstaculizando la vista de la conexión de la bobina, dos rodamientos y un aro de aluminio que es el encargado de separar la cubierta inferior de la superior. También se pudo observar el daño ocasionado a los imanes y a la bobina (Fig. 3).



Fig. 3. Daños a imanes y bobina.

Debido al desajuste en la posición de los imanes se procedió a desmontar los 20 imanes pertenecientes a una de las cubiertas, teniendo en cuenta la medida de separación entre imanes, para su correcto ensamblaje.

Para la reparación de los imanes se optó por mantenerlos fijos en la cubierta utilizando un adhesivo epòxico de dos componentes: resina y endurecedor, los cuales tienen una excelente adherencia y no se dilatan, además de ser un aislante eléctrico, también se cortaron palos de paleta con una medida de 5mm para ayudar a la separación de los imanes. Referente al bobinado no se encontró el corto superficialmente los que obligó a su rebobinado, para por último caracterizar el generador y compararlo con su curva de fábrica.

Para evidenciar la conexión entre las bobinas y su configuración, se procedió a remover la resina. Se realizaron varios intentos, pero debido a su resistencia, se dejó reposar la bobina en removedor de pintura al 100% durante 24h. Para satisfacción esta fue perdiendo rigidez y fue fácil su remoción con un martillo.

Al retirar la resina de la bobina del generador, se evidencio que esta, está conformada por un alambre de cobre calibre 23

AWG esmaltado y con núcleo de aire. Para el enrollado se utilizó un núcleo de madera con la forma trapezoidal, dándole a cada bobina un total de 138 vueltas con un total de 10 bobinas en serie por fase, es decir, 1380 vueltas por fase y posteriormente ser retirado como muestra la (Fig.4) el proceso del bobinado y la (Fig.5) que es una fase ya terminada.



Fig. 4. Diseño y construcción de la bobina



Fig. 5. Fase compuesta por 10 bobinas

Estas serán conectadas en estrella, lo que permite que las fases entreguen la misma corriente y resistencia. También que generen un equilibrio entre ellas y posibilita sacar un neutro en el punto común. El esquema de conexión de las bobinas que va interno se muestra en las (Fig. 6).

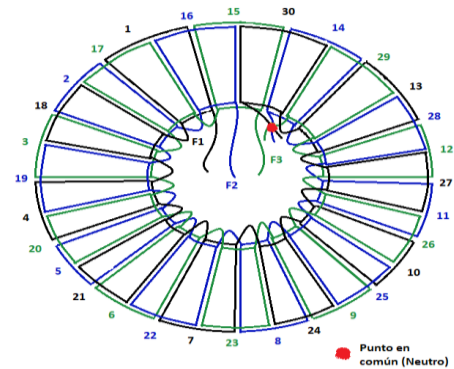


Fig. 6. Conexión bobina del generador Brushless.

En la anterior figura se observa que hay una secuencia de bobinas ubicadas por encima y por debajo respectivamente. Vale aclarar que el tamaño de las bobinas es exactamente el mismo tanto por encima como por debajo, pero en el esquema se hicieron unas más pequeñas que otras solamente para visualización.

Después de tener todos los datos y resultados con respecto a la ubicación de los imanes y la conexión de la bobina, se inició

la fabricación del molde de la bobina por medio de la tecnología de la impresión 3D con la ayuda del personal encargado del laboratorio de mecatrónica de la Institución Universitaria Pascual Bravo, allí se llevó a cabo gran parte del diseño y ejecución del prototipo del molde para cubrirlo en alginato que es un gel utilizado en la rama de la odontología para fabricar moldes.

En la (Fig. 7) se muestran el diseño del molde para la bobina realizado en el software SolidWorks dando como registro las medidas reales realizadas antes de la remover la resina epoxi del bobinado, lo cual permitió realizar el molde para el nuevo bobinado que proteja el cobre esmaltado y unifica el centro de aluminio que se acopla al eje del rotor. Todos estos análisis a la bobina son necesarios para la óptima reconstrucción y por tanto se ha tenido rigurosidad a la hora de realizar sus debidos cálculos y medidas.

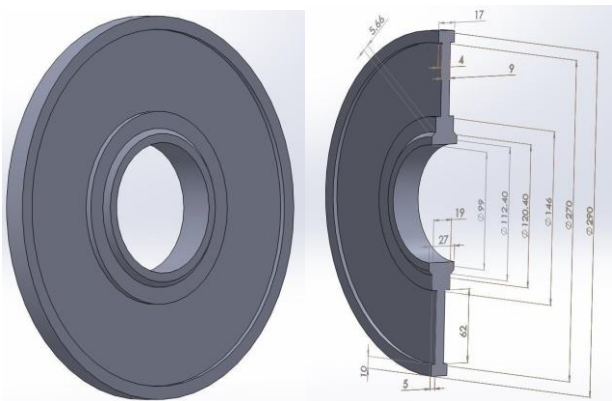


Fig. 7. Estructura del bobinado sumergido en resina y medidas dadas en mm.

Al estar la bobina terminada sumergida en la resina, se analizó que esta quedo con las medidas un poco más grandes de lo estipulado y para que esto no generara inconvenientes en el funcionamiento del generador, se procedió a retirar el aro de aluminio que separaba las tapas y se reemplazo con bujes de aluminio para que el bobinado no rozara y que el estator girara libremente como se muestra en la (Fig. 8).



Fig. 8. Generador con bujes de aluminio.

Al armar generador, se acopla en el banco de ensayo para posteriormente caracterizarlo y comparar las con las curvas obtenidas con las del fabricante. Estas curvas tendrán que ser iguales o semejantes para poder cumplir con los objetivos.

En la caracterización del generador, se utilizó un motor Delcrosa NV71b4, el cual hizo girar el generador en un banco de pruebas diseñado y construido en el Pascual (Fig. 9).

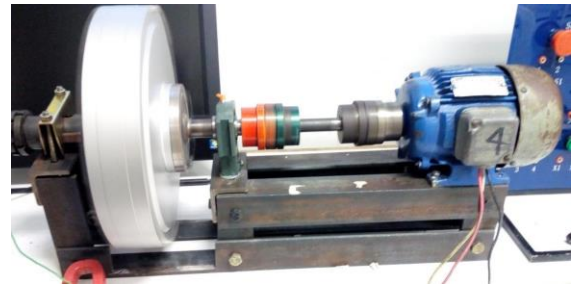


Fig. 9. Banco de ensayos.

No se poseían las curvas del este motor por lo que se caracterizó con el variador de velocidad Altivar Process 360 en el laboratorio de PLC de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Las RPM del motor en una escala de 50 en 50 comenzando desde 0 hasta 450 RPM.

En la primera ilustración se muestra los instrumentos utilizados para la caracterización del generador PMG GDG-0.5kW-200, los cuales son; variador de velocidad (Altivar Process 360), fuente de voltaje y motor (Delcrosa NV71b4) como se muestra en la (Fig. 10), el cual vamos a desglosar uno por uno para un mejor análisis.



Fig. 10. Ensamble caracterización del motor.

La fuente de alimentación trifásica mostrada en la (Fig. 11) es un componente esencial, que cuenta con tres fases de voltaje, la forma más común es balanceada, quiere decir de la misma amplitud y misma frecuencia, pero desfasada 120° eléctricos entre sí.



Fig. 11. Fuente de potencia.

Motor de inducción trifásico utilizado para dar giro al generador (Fig. 12).



Fig. 12. Motor Delcrosa NV71b4

Este módulo mostrado en la (Fig. 13) muestra el variador de velocidad Altivar Process 360, con servicios integrados dedicados al proceso industrial e instalaciones, para el control de motores trifásicos asíncronos, sincrónicos y motores especiales. [8]



Fig. 13. Módulo variador de velocidad.

Los variadores Altivar Process integran una función de medición de energía con una precisión del 5%, basada en la medición de la tensión del motor y de la alimentación:

- Detección de las desviaciones del proceso para la fiabilidad de la instalación a lo largo de todo el ciclo de vida
- Información útil sobre el rendimiento del sistema proporcionada mediante la comparación entre la energía consumida y la energía producida

Los usuarios pueden por tanto supervisar y analizar la potencia de entrada, la energía producida directamente desde el variador o desde el sistema de gestión de procesos. [9]

III. RESULTADOS.

III.I CARACTERIZACIÓN DEL MOTOR

Las Tablas 4 y 5 muestran los resultados de la caracterización del motor Delcrosa sin acoplar y acoplado al generador, respectivamente.

TABLA 4
CARACTERIZACIÓN DE MOTOR SIN ACOPLE DE GENERADOR

MOTOR SIN ACOPLE DEL GENERADOR						
Nº	MODELO	RPM	POTENCIA (W)	VOLTAJE (V)	TORQUE (N*m)	CORRIENTE (A)
1	DELGROSA NV71b4	0	0	0	0	0
2		50	12,18	14	0,93	0,87
3		100	22,4	20	1,03	1,12
4		150	32,5	25	1	1,3
5		200	41,54	31	0,94	1,34
6		250	47,6	35	0,87	1,36
7		300	54,4	40	0,81	1,36
8		350	62,56	46	0,7	1,36
9		400	68	50	0,63	1,36
10		450	76,16	56	0,54	1,36

TABLA 5
CARACTERIZACIÓN DE MOTOR CON ACOPLE DE GENERADOR

MOTOR CON ACOPLE DEL GENERADOR						
Nº	MODELO	RPM	POTENCIA (W)	VOLTAJE (V)	TORQUE (N*m)	CORRIENTE (A)
1	DELGROSA NV71b4 y GREEF (GDG 0.5KW-200)	0	0	0	0	0
2		50	14,84	14	0,97	1,06
3		100	24,4	20	1,09	1,22
4		150	33,54	26	1,11	1,29
5		200	41,92	32	1,09	1,31
6		250	49,58	37	1,07	1,34
7		300	56,7	42	1,05	1,35
8		350	64,32	48	0,99	1,34
9		400	71,02	53	0,93	1,34
10		450	77,72	58	0,9	1,34

Las curvas características del motor fueron sin acople y con acople del generador, estas fueron obtenidas con el variador de velocidad con el cual se reguló, gracias a las gráficas arrojadas por los datos tomados se determinó cuál fue el rendimiento del motor en vacío, comparándolo con carga en sus mismas revoluciones.

En la curva de potencia (Fig. 14) se observa que a medida que se va aumentando las RPM, la potencia también va aumentando.

Cuando se acoplo el generador al motor se notó que el motor redujo su potencia de una a dos décimas, no lo suficiente para dejar de trabajar adecuadamente, como el fabricante lo demanda, lo que no impide su buen funcionamiento a la hora de las pruebas realizadas.

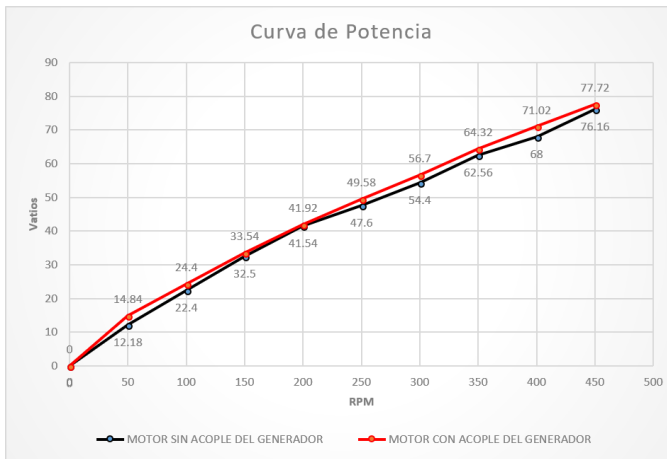


Fig. 14. Curva de potencia.

En la curva de voltaje (Fig. 15) se puede observar que si se incrementan las RPM aumenta proporcionalmente el voltaje, creado una gráfica casi lineal la cual mantiene subiendo hasta que el motor llegue a sus RPM nominales para establecerse en un voltaje nominal.

Con el acople de motor se notó que, hasta 100 RPM, el motor demanda el mismo voltaje que en la curva del fabricante. Pero de 150 RPM hasta 450 RPM el motor fue demandando menos voltaje que en las pruebas realizadas en vacío, lo cual indica que cuando se inyecta carga al motor se reduce el voltaje, no muy significativamente gracias a que el generador tiene rodamientos internos que facilitan el giro del mismo.

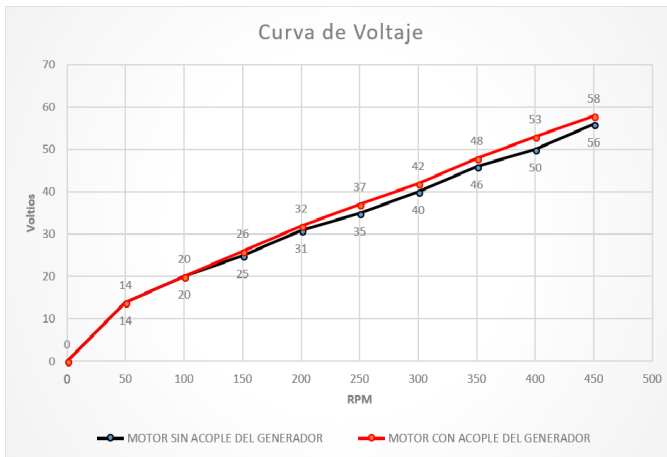


Fig. 15. Curva de voltaje.

En la curva de corriente (Fig. 16) al igual que las anteriores gráficas se refleja que el motor necesita un impulso de 1.3 A para llegar a su estabilidad, la cual se mantiene en 1.34 A desde los 200 RPM hasta finalizar la prueba en 450 RPM.

Acoplando el generador demanda más corriente en las primeras 100 RPM para lograr su estabilidad, la cual aproximadamente es la misma en ambas curvas manteniéndose entre 1.31 A hasta 1.34 A.

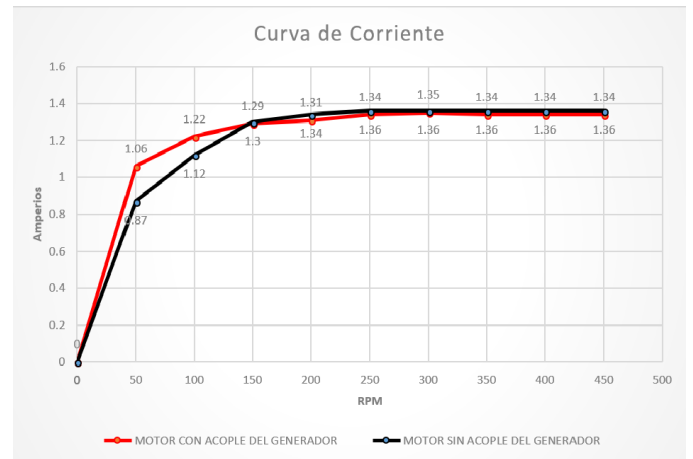


Fig. 16. Curva de corriente.

En la (Fig. 17) se puede concluir que es una curva ligeramente ascendente en su inicio, pero alcanza el torque máximo a los 100 RPM el cual genera un torque de 1.03 Nm ese es el momento en el que el motor alcanza su esfuerzo de torsión máximo, el cual se mantiene unos segundos para luego empezar a decaer lo que es un comportamiento normal para una gráfica de torque.

En el caso del acople del generador su torque máximo se alcanza a las 150 RPM equivalente a 1.09 Nm se ve que el torque empieza a decaer, pero es mucho mayor que el de la curva de fábrica, lo cual es normal ya que tiene que mover una máquina mucho más pesada, que cuando estaba en vacío.

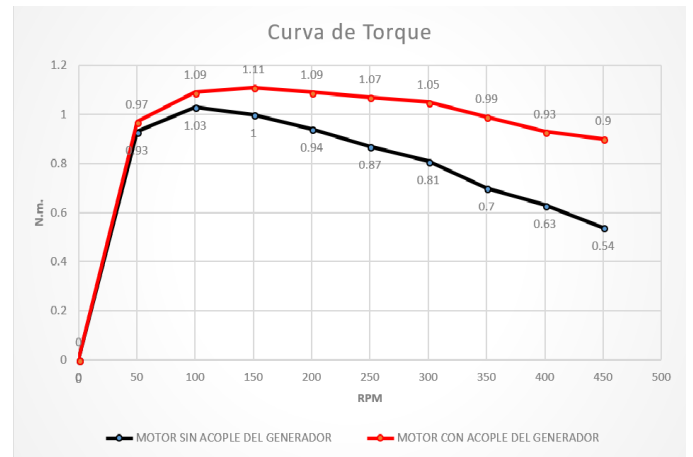


Fig. 17. Curva de torque.

III.II REPARACIÓN DE LOS IMANES

Los imanes de neodimio o imán neo, fabricados con aleaciones de neodimio, hierro y boro para formar la estructura cristalina $Nd_2Fe_{14}B$ tetragonal, han sido muy efectivos y de última tecnología en la industria. Se ha elegido uno con forma trapezoidal, con las dimensiones ya estipuladas en la Tabla 6 y la (Fig. 18).

TABLA 6
DIMENSIONES DE LOS IMANES DE NEODIMIO

N°	Descripción	Medida
1	Largo del imán	59 mm
2	Ancho superior	35.03 mm
3	Ancho inferior	15.09 mm
4	Profundidad	9 mm

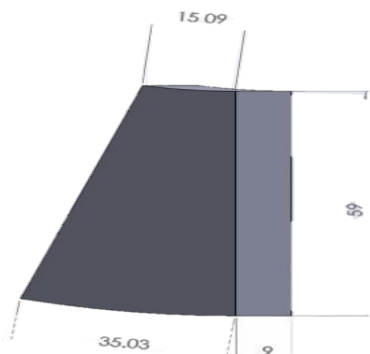


Fig. 18. Imán permanente de Neodimio, medidas dadas en mm.

La (Fig. 19) muestra la cubierta trasera del generador reparada, obteniendo un resultado.

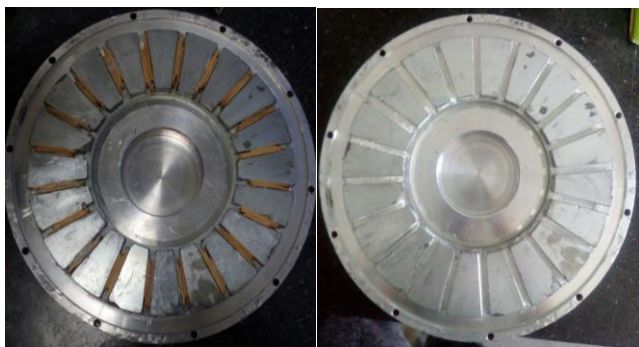


Fig. 19. Reparación de imanes.

III. REBOBINADO DEL GENERADOR

La (Fig. 20) refleja el resultado obtenido al sumergir la bobina con resina en el removedor de pintura.



Fig. 20. Remojo y eliminado de resina con removedor de pintura.

Al conectar las 30 bobinas de las tres fases en el orden especificado anteriormente y colocando la soldadura, se obtiene de la bobina terminada, sin aun ser sumergida en la resina como se muestra en la (Fig.21).

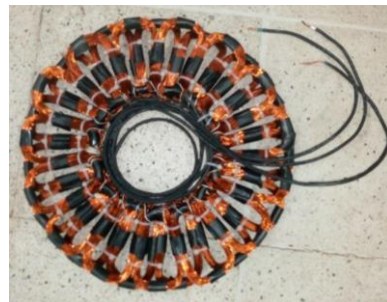


Fig. 21. Conexión real bobina del generador Brushless.

Al terminar el proceso del rebobinado creación del molde y de secado de la resina epoxi, se obtendrá una bobina sólida que se encaja al eje como en la siguiente (Fig. 22).



Fig. 22. Bobina unida al eje.

IV. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Luego de haber hecho las pruebas y definir que el motor y el generador son adecuados para su uso con acople por la similitud en su comportamiento se procede entonces a hacer las pruebas finales al generador, esta vez con el fin de analizar cómo quedó con respecto a los datos iniciales que entrega el fabricante, esto se hace para poder definir entonces si el generador reparado se trabajará bajo las mismas condiciones de fabricante o si se deben tener en cuenta particularidades luego de su reparación.

Se compararon los resultados de las pruebas hechas al generador, con los datos de voltaje, potencia, torque y eficiencia que entrega el fabricante obteniendo los siguientes resultados.

TABLA 7
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR SEGÚN EL FABRICANTE

CARACTERÍSTICAS GENERADOR ORIGINAL				
RPM	Power(W)	Voltaje (V)	Torque(N.M)	Eficiencia
0	0	0	0	50%
20	16	2	2,89	65%
40	40	4	5,95	74%
60	65	7	8,62	79%
80	100	9	11,68	82%
100	148	11	14,57	84%
120	205	14	17,47	86%
140	265	17	20,36	87%
160	325	19	23,26	89%
180	400	21	26,15	90%
200	500	24	29,10	90%
220	620	26	32,31	90%

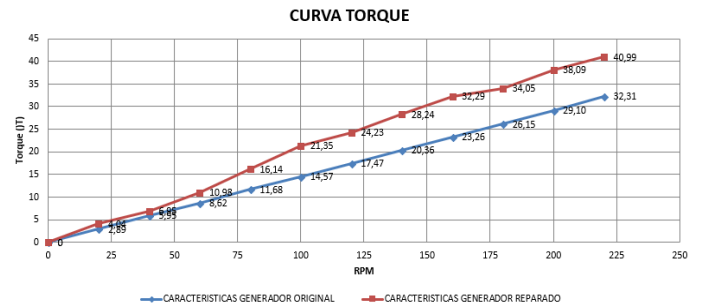


Fig. 25. Curva de torque reparación vs fabricante.

TABLA 8
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR REPARADO

CARACTERÍSTICAS GENERADOR REPARADO				
RPM	Power(W)	Voltaje (V)	Torque(N.M)	Eficiencia
0	0,00	0	0	50%
20	8,47	7	4,04	57%
40	29,12	13	6,95	69%
60	69,00	20	10,98	81%
80	135,24	28	16,14	83%
100	223,56	36	21,35	87%
120	304,50	42	24,23	88%
140	414,05	49	28,24	90%
160	540,96	56	32,23	90%
180	641,72	61	34,05	90%
200	797,64	68	38,09	90%
220	944,24	74	40,99	90%

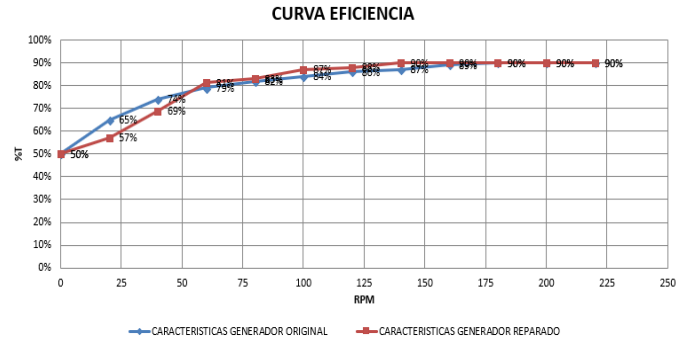


Fig. 26. Curva de eficiencia reparación vs fabricante.

Se obtienen al final resultados satisfactorios, todos medibles y con comportamiento acorde al de los generadores Brushless DC de Imanes Permanentes de Flujo Axial, se encuentra que difieren en muchos puntos los valores de voltaje, potencia y eficiencia lo cual significa que las nuevas curvas y valores de referencia luego de la reparación no serán los del fabricante sino los obtenidos luego de la reparación para no cometer errores posteriores.

III. CONCLUSIONES

1. Se puede concluir con el rebobinado y caracterización del generador Brushless DC de Imanes Permanentes de Flujo Axial, que la metodología aplicada es correcta puesto que al mirar las curvas resultantes tanto del fabricante como de los resultados obtenidos los comportamientos son similares, aunque difieren en sus valores a medida que aumentan las RPM, pero no deja de corresponder al comportamiento del generador.

2. Se concluye que las curvas del fabricante sirven para seleccionar los motores con los que se hagan las pruebas a los nuevos generadores y a su vez, saber si un nuevo generador cumple con los parámetros para funcionar como tal, más no sirven para determinar los valores de los nuevos generadores ya que como se mostró en las tablas 6 y 7 pueden variar.

3. Los generadores de flujo axial presentan ventajas significativas en los puntos de vista mecánico y de montaje, ya que son generadores no tan robustos como los convencionales y ofrece distintas velocidades para el acople a turbinas de generación

CURVA VOLTAJE

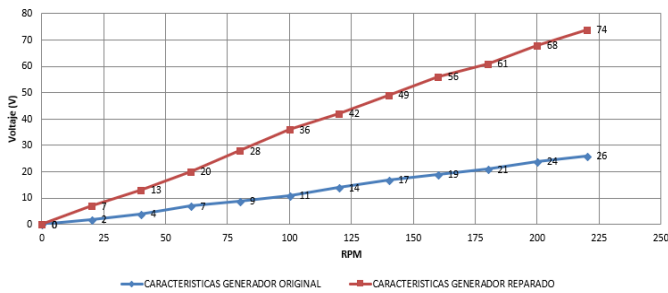


Fig. 23. Curva de voltaje reparación vs fabricante.

CURVA POWER

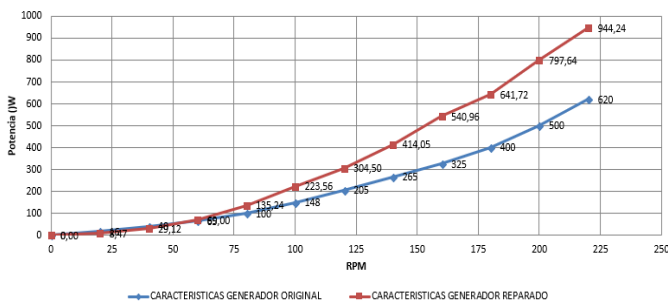


Fig. 24. Curva de potencia reparación vs fabricante.

eólicas o como en este caso las turbinas para generación de vórtices gravitacionales.

4. Se concluye de igual modo que si se desea trabajar con el nuevo generador con valores parecidos a los que ofrece el fabricante, se deben limitar nuevas tablas de valores ya que por ejemplo mientras según el fabricante a 220RPM hay 620W, esta potencia se consigue a 180 RPM del generador reparado lo cual es de cuidado a la hora de guiarse en los valores a trabajar.

5. A pesar de que los valores del generador reparado difieran con respecto a los entregados por el fabricante en algunos de sus puntos, al ser sus comportamientos de curvas similares y no haber mucha diferencia en las eficiencias obtenidas (Ver Fig. 27), buscar las RPM que le entreguen la potencia que necesita será suficiente para trabajar con la seguridad de que no se perderá mayor parte de la energía en el proceso.

6. Si se desea trabajar con valores más precisos en la reparación de este tipo de generadores, se pueden ajustar corrientes y voltajes de acuerdo a la potencia esperada y verificar que no se altere la eficiencia en el trabajo a realizar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar darle los agradecimientos a nuestro señor cristo Jesús que nos permitió tener la sabiduría y fuerza para enfrentar los obstáculos presentados durante todo el proyecto y cumplir una meta más en nuestras vidas, al profesor José Alejandro Posada que nos tendió la mano cuando más lo necesitábamos ayudándonos a enfrentar todas las dificultades presentadas en este trabajo, a nuestros padres Javier Monsalve y Amanda Murillo que nos apoyaron desde el inicio y durante toda la carrera, no solo en lo económico sino también en lo moral y anímico, a todos los profesores involucrados de una u otra forma ayudándonos con asesoría, como lo fueron los docentes Sergio Saldarriaga Zuluaga, Humberto Ochoa, Carlos Mario Moreno, Rafael Marulanda y Jortin Vargas. A todos los estudiantes involucrados como los son laboratoristas de mecánica, eléctrica y al compañero Edwar Ríos Tobón que contribuyeron para que este proyecto fuera una realidad.

REFERENCES

[1] P. A. Watterson, «CSIRO Division of Telecommunications and Industrial Physic, » 24 10 2007. [En línea]. Available:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.463.8122&rep=rep1&type=pdf>. [Último acceso: 10 05 2018].

[2] ABB, «new ABB,» 14 05 2003. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/motors-generators/es/generadores/generadores-para-turbinas-eolicas/generadores-de-iman-permanentes/generadores-de-iman-permanentes-de-alta-velocidad/technical-data>. [Último acceso: 17 05 2018].

[3] A. A. Luisa Herrera, «DISEÑO DE UN GENERADOR DE FLUJO AXIAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS,» *revistas udistrital*, vol. 4, N.º 2, pp. 2-3-4, 2013.

[4] F. Mecafenix, «Ingeniería mecafenix,» 12 04 2017. [En línea]. Available: <http://www.ingmecafenix.com/electronica/bobinas/>. [Último acceso: 15 05 2018].

[5] P. A. Iscoa, «Slideshare,» 24 04 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/paai1989/motores-de-induccion-14912459>. [Último acceso: 17 05 2018].

[6] S. Electric, «Life is On Schneider Electric, » 17 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.schneider-electric.es/es/product-range/62317-altivar-process-atv600?parent-category-id=2900&filter=business-1-industrial-automation-and-control>. [Último acceso: 17 05 2018].

O. S.A, «Obeki,» 23 07 2004. [En línea]. Available: <http://www.obeki.com/productos/Generadores%20de%20Imanes%20Permanentes.pdf>. [Último acceso: 2018 05 15].

[9] https://www.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/311000/FA311994/es_ES/ATV600_Catalogo.pdf