

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/336071436>

# Diseño y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes de Bajo Costo para Aplicaciones Eólicas

Conference Paper · September 2019

CITATIONS

0

READS

4,354

3 authors, including:



**Guillermo Catuogno**

Universidad Nacional de San Luis

49 PUBLICATIONS 76 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Juan A. Tapia**

University of Concepción

74 PUBLICATIONS 1,076 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Microgrid for Rural School - Microrred para Escuela Rural (AgregandoValor) [View project](#)



UAV autonomos de largo alcance - Long-range autonomous UAVs [View project](#)

# Diseño y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes de Bajo Costo para Aplicaciones Eólicas

Nicolás E. Lastra <sup>†</sup>

Asesores: Guillermo R. Catuogno <sup>#</sup>, Juan A. Tapia <sup>\*</sup>

<sup>†</sup> <sup>#</sup> Laboratorio de Control Automático (LCA), Universidad Nacional de San Luis, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

<sup>\*</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

<sup>†</sup> niqoo47@hotmail.com

**Resumen**— En el siguiente trabajo se presenta el diseño y la construcción de un generador eléctrico de flujo axial con estator interno y doble rotor externo dotados en su periferia de imanes de tierras raras. El diseño del bobinado trifásico considera 12 polos y 9 bobinas del tipo concéntrico. Este tipo de generador presenta la característica de no poseer pérdidas por torque "cogging" y corrientes parásitas debido a la inexistencia de hierro en su estator (construido con fibra de vidrio y resina poliéster). El mismo está pensado para aplicaciones de generación eólica y cuya característica principal es su bajo costo. En el contenido de este trabajo se plasman las distintas consideraciones tenidas en cuenta en el desarrollo analítico y su posterior implementación, así como también se muestran las distintas mediciones experimentales obtenidas en el laboratorio.

## I. NOMENCLATURA

Parámetro	Símbolo
Nº de polos	$p$
Voltaje DC del bus	$V_{DC}$
Velocidad base	$n_{rpm}$
Pico de densidad del flujo magnético	$B_m$
Nº de bobinas	$n_b$
Nº de bobinas por fase	$n_{bf}$
FEM pico inducida por fase	$e_{fase}$
Frecuencia de la FEM del estator	$\omega_e$
Nº de vueltas por fase	$N_{fase}$
Nº de vueltas por bobina	$N_{bobina}$
Perímetro promedio de bobina	$P_b$
Área promedio de bobina	$A_b$
Inductancia promedio de bobina	$L_b$
Resistencia promedio de bobina	$R_b$
Nº de fases	$m$

## II. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de una comunidad. En los últimos años la contaminación y el uso indiscriminado y excedido de las fuentes de energía no renovables es una de las principales preocupaciones de la población mundial, es por ello que la sociedad es cada vez más conscientes de que se debe encontrar soluciones orientadas hacia un modelo energético sustentable cuyo objetivo es el

cuidado del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales, lo cual es impulsado mediante la promoción y desarrollo de energías limpias y renovables en sustitución de energías fósiles las cuales además, de no ser renovables, generan un impacto negativo al medio ambiente [1].

Dentro del conjunto de energías renovables más destacadas se encuentra energía eólica, solar, geotérmica, de biomasa e hidráulica [1-6].

La generación de energía eólica a pequeña escala, junto con otras formas de energía no convencional (como la solar y la térmica), es una forma eficiente de proporcionar energía en un esquema de generación de energía distribuida. Dado que el consumo de energía está geográficamente disperso, las líneas eléctricas deben llevar la energía de las fuentes de generación a las áreas de consumo. Como resultado, el costo económico, el acceso y la confiabilidad son cuestiones importantes que deben resolverse por utilidad. Un sistema donde la energía se genera en el mismo lugar donde se consume ofrece resultados mucho mejores en comparación con los descritos anteriormente.

Las turbinas eólicas de eje vertical son particularmente útiles si el viento tiene una alta turbulencia y baja velocidad, como áreas urbanas y áreas rurales con obstáculos. En tales casos, es posible desarrollar la producción de energía eólica a pequeña escala.

Para la generación de energía eólica a pequeña escala, la máquina de flujo axial de imanes permanentes (AFPM) ofrece características interesantes que la convierten en una excelente candidata para esta aplicación. El alto número de polos, la alta densidad de potencia y el bajo mantenimiento son atributos naturales de las máquinas AFPM, lo que resulta en la ausencia de una caja de engranajes para acomodar la velocidad de rotación ocupando menos espacio, reduciendo el costo y su peso [7-8].

Por otro lado, las topologías con dientes en los estatores de hierro tradicionales son problemáticas cuando se utilizan imanes de alta energía magnética, como los imanes de neodimio (NdFeB). De hecho, la reluctancia variable vista por los PM girando establece un punto singular en el que el rotor intenta detenerse (reluctancia mínima). Este fenómeno se conoce como "par de reluctancia" y está presente en muchas configuraciones de máquina con IP (imanes permanentes) que

posean un entrehierro irregular (con dientes en su estator). Para fines de generación de energía eólica a pequeña escala, este efecto indeseable requiere energía extra (viento) para superar este par de detención al reducir la capacidad de potencia. Se han propuesto varias técnicas para reducir y/o eliminar este par. Estas técnicas implican modificaciones del estator que aumentan la complejidad de fabricación. Si se retiran los dientes del estator, los imanes ven una superficie lisa, el par de reluctancia ya no está presente y se obtiene un funcionamiento suave sin la necesidad de una potencia adicional para arrancar la máquina. La composición del estator con materiales no magnéticos (ej: fibra de vidrio) pueden usarse para alojar el bobinado del estator, proporcionando rigidez al sistema, simplificando el proceso de fabricación basado en modelado simple y reduciendo los costos. Además, se reduce el peso total de la máquina y el esfuerzo mecánico de la torre que soporta la turbina. Por otro lado, si bien los rotores que alojan a los imanes suelen estar hechos de materiales ferrosos al girar los rotores de forma solidaria (en conjunto) con respecto al estator el cual está compuesto totalmente de material no magnético, no se presentan pérdidas histéresis (imaneación cíclica), debido a que no existe una variación del flujo magnético con respecto a los discos del o los rotores.

### III. GENERADOR DE FLUJO AXIAL

En esta sección se presentará una descripción del análisis realizado en el diseño del generador, mostrando luego su implementación, resaltando algunas consideraciones tenidas en cuenta en el transcurso de la construcción.

#### A. DESCRIPCIÓN

Teniendo en cuenta las diversas topologías existentes de las máquinas de flujo axial con imanes permanentes (AFPM) sin escobillas [9], estas pueden clasificarse de la siguiente manera:

##### Maquinas AFPM de lado simple

- Con estator ranurado (Fig. 1a).
- Con estator sin ranuras.
- Con estator de polos salientes.

##### Maquinas AFPM de doble lado

- Con estator interno (Fig. 1b)
  - Con estator ranurado.
  - Con estator sin ranuras.
    - Con estator de núcleo de hierro.
    - Con estator sin núcleo (Fig. 1d).
    - Sin núcleo en el estator y rotor.
  - Con estator de polos salientes (Fig. 2).
- Con rotor interno (Fig. 1c)
  - Con estator ranurado.
  - Con estator sin ranuras.
  - Con estator de polos salientes (Fig. 3).

##### Maquinas AFPM multietapa (multidisco - Fig. 4)

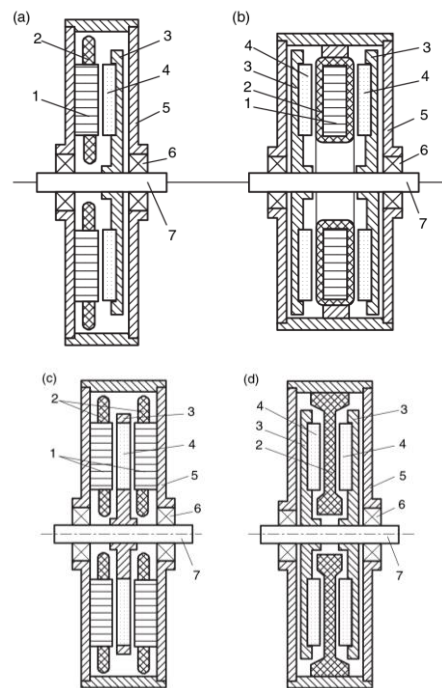


Fig. 1. 1 – Núcleo del estator, 2 - Devanado del estator, 3 - Rotor, 4 - Imán permanente, 5 - Bastidor, 6 - Rodamiento, 7 - Eje.

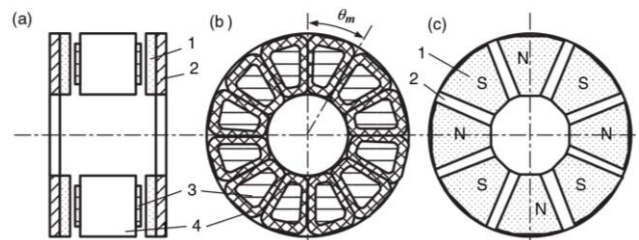


Fig. 2. (a) Construcción, (b) Estator, (c) Rotor. 1 – Imán permanente, 2 – Disco de acero de respaldo del rotor, 3 – Polo del estator, 4 – Bobina del estator.

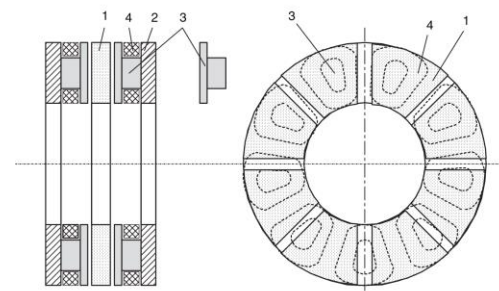


Fig. 3. 1 – Imán permanente, 2 – Disco ferromagnético de respaldo del estator, 3 – Polo del estator, 4 – bobina del estator.

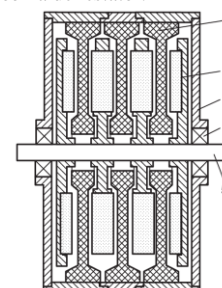


Fig. 4. 1 – Devanado del estator, 2 - Unidad de rotor, 4 – Imán permanente, 3 - Bastidor, 4 - Rodamiento, 5 - Eje.

Dentro de las diversas topologías mencionadas la adoptada para su posterior construcción es la de *doble lado con estator interno sin ranuras y sin núcleo* (Figura 1.d). Esta topología tiene por naturaleza una gran densidad magnética (campo producido por los imanes de ambos rotores enfrentados) que envuelve a las bobinas del estator, el cual es interno en este modelo. Por otro lado, la fabricación de estator interno, si bien no aprovecha tanto el bobinado como las de estator externo (el cual posee dos estatores externos bobinados), su construcción es más fácil y económica. Además, el diseño sin ranuras y sin la presencia de núcleos en el estator permite disminuir el peso, el volumen ocupado y los requerimientos mecánicos sobre el eje, rodamientos del mecanismo etc. En cuanto a la ausencia de ranuras, tiene la ventaja de eliminar el torque de reluctancia ya que los imanes ven una superficie continua sin variaciones de reluctancia.

#### B. ELECCIÓN DE IMANES

Para la confección del generador se utilizó imanes rectangulares de neodimio NdFeB (Neodimio-Hierro-Boro) grado 35 con una dimensión de 40x20x5 [mm] distribuidos en la periferia de ambos rotores.



Fig. 5. Imanes utilizados.

#### C. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE POLOS

En primera instancia, antes de comenzar con la construcción del generador, se determinó la cantidad máxima de polos que era posible distribuir sobre los rotores con la ayuda del software de diseño AutoCAD 2018.

En este diseño la secuencia adoptada es la de dos imanes adyacentes constituyendo un polo, es decir, para un polo norte, se utilizan dos imanes en una disposición (NN), para un polo sur sería (SS), y así sucesivamente, ocupando un ángulo de 30° como muestra la Figura 2.

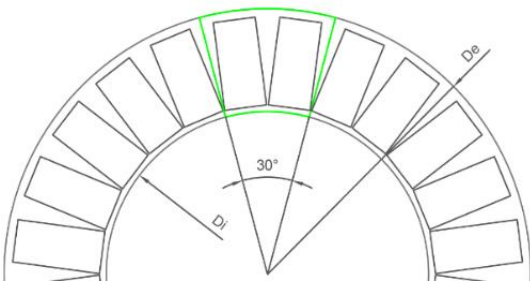


Fig. 6. Determinación del N° de polos.

La determinación de la cantidad de polos en función a la cantidad máxima de imanes que entre en la periferia, si bien, no es un criterio de selección claro, tiene por finalidad obtener la mayor frecuencia posible de la fuerza electromotriz inducida (FEM) a la salida, con un tamaño razonable del generador y teniendo en consideración que el comportamiento del viento no es constante, ni de velocidades elevadas.

Además, la frecuencia de la FEM a la salida del generador no es un limitante del diseño ya que se considera que habrá una

etapa posterior de rectificación y luego de inversión que llevara a la energía a la frecuencia y amplitud final en la que será utilizada.

#### D. CÁLCULO DE BOBINAS

El número de bobinas óptimo a utilizar está directamente relacionado con el número de polos mediante la siguiente expresión [10],

$$n_b = \frac{3}{4}p. \quad (1)$$

Considerando que la generación deseada es trifásica se dividió  $n_b$  por la cantidad de fases  $m$ .

$$n_{bf} = \frac{n_b}{m}. \quad (2)$$

Una vez determinada la cantidad de bobinas a emplear en el estator se calculó el área promedio de cada una de estas con la ayuda del software AutoCAD 2018 como muestra la Figura 3 (línea roja).

A partir del voltaje DC del bus establecido como parámetro de diseño 150 (V), y de la conexión estrella que poseen las bobinas, cada fase debería desarrollar un valor pico de FEM dada por la siguiente expresión

$$e_{fase} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Este valor pico de FEM se deberá producir a una velocidad base mecánica del eje propuesta como valor nominal de 500 (R.P.M), la cual en función de la cantidad de polos deberá simultáneamente desarrollar una frecuencia de la FEM en el estator dada por

$$\omega_e = \frac{n_{rpm} \cdot p}{120}. \quad (4)$$

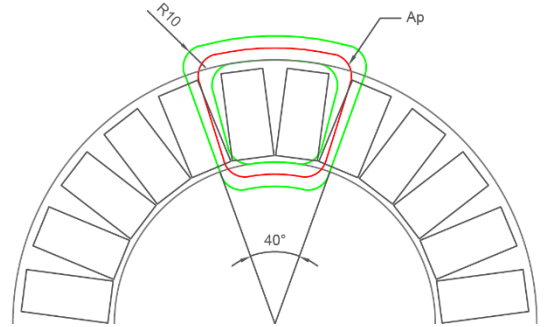


Fig. 7. Determinación del área y el perímetro promedio de las bobinas.

Para determinar el número de vueltas por fase se hace referencia a la ley de Faraday:

$$e_{fase} = N_{fase} \cdot A_b \cdot \frac{dB(\theta)}{dt}. \quad (5)$$

La cual relaciona la FEM del estator con el flujo magnético, variando este último sobre el entrehierro de la siguiente manera:

$$B(\theta) = B_m \sin(\omega_e t). \quad (6)$$

Siendo  $B_m$  el valor pico de la densidad de flujo magnético que hay en el entrehierro. En este caso para la estimación de este último parámetro se utilizó el software ANSYS Maxwell

2018 a través de un análisis magneto-estático del modelo CAD del generador.

Relacionando las expresiones anteriores el número de vueltas requeridas por fase para producir el valor pico de FEM deseado es [10],

$$N_{fase} = \frac{e_{fase}}{A_b \cdot \omega_e \cdot B_m}. \quad (7)$$

Este número de vueltas por fase es 358. Debido a que existen 3 bobinas por fase conectadas en serie, cada una deberá tener 119 vueltas aproximadamente.

Por lo anterior, las especificaciones de diseño y los parámetros encontrados a partir de los cálculos se resumen en la siguiente tabla.

TABLA I – ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS OBTENIDOS

Parámetro	Valor
$p$	12
$n_b$	9
$n_{bf}$	3
$m$	3
$V_{DC}$	150 (V)
$e_{fase}$	86,6 (V)
$\omega_e$	314,16 (rad/seg)
$P_b$	$1,93 \times 10^{-4}$ (m)
$A_b$	$2,70 \times 10^{-3}$ (m <sup>2</sup> )
$R_b$	0,8 ( $\Omega$ )
$L_b$	1,05 (mH)
$B_m$	0,285 (T)
$N_{fase}$	358
$N_{fase}$	119

#### IV. CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR

Una vez determinados todos los parámetros necesarios para la construcción de los rotores y de las bobinas, se procedió a su implementación.

En primera instancia, para la confección del rotor, sabiendo el número máximo de polos que podía distribuirse en su periferia, determinado anteriormente; se realizó un trazado temporal sobre la cara de cada uno utilizando una microfibr, una regla milimetrada y un semicírculo, resaltando en cada rotor la posición relativa del imán sobre los mismo, como muestra la Figura 8.

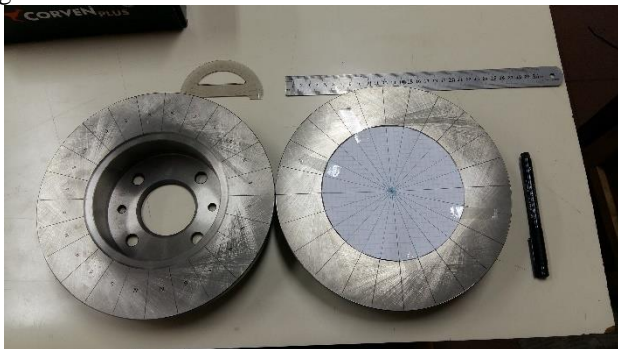


Fig. 8. Trazado de rotores.

El siguiente paso fue la adición de los imanes a la superficie de los rotores con un pegamento magnético (epoxi metálico), con una disposición NN-SS-NN-SS-... como se presenta en la Figura 9.



Fig. 9. Pegado de imanes.

En segunda instancia, determinado el número de vueltas y la forma de las bobinas en la sección anterior, se llevó a cabo su construcción. Para ellos se realizó un molde en una impresora 3D (de 9mm de espesor) delimitando la forma de la bobina como muestra la Figura 10.



Fig. 10. Tapas y molde de bobina.

Utilizando alambre de cobre esmaltado a base de resina de poliéster Edflex 200 (AWG 20), se realizó el bobinado de estas a través de la bobinadora manual del laboratorio, teniendo principal cuidado en la cantidad de vueltas realizadas, y además tratando de lograr la mayor uniformidad de las capas, para lograr un factor de apilamiento óptimo.

Una vez construidas todas las bobinas se realizó la medición de su resistencia e inductancia con un instrumento de medición adecuado (gw instek lcr-6200).

Posteriormente, al igual que en la construcción de las bobinas, se realizó un molde (con su negativo y tapas) para la confección del estator; en este caso el molde es negativo ya que el estator está constituido por dos capas de fibra de vidrio (dotando de rigidez a la estructura del estator) y resina poliéster (la cual es líquida previo a su aplicación). La elección de la resina está relacionada no solamente con la reducción del peso del generador (en comparación de un estator macizo) sino que también con las ventajas que ofrece relacionadas con la inexistencia de torques de reluctancia y corrientes de Foucault.

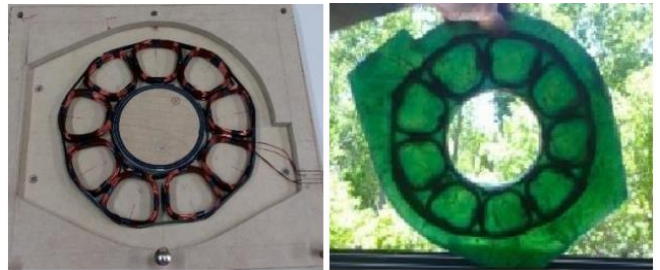


Fig. 11. Molde de estator y estator finalizado.

#### V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Finalmente, luego de la construcción del generador y de su estructura, se realizó el armado del conjunto Figura 12. Para evaluar experimentalmente su desempeño se acoplo a el



generador un motor de inducción de 2,2 (KW). Como carga se conectó un rectificador trifásico pasivo con un capacitor de 390 ( $\mu\text{F}$ ) y una resistencia de potencia de 12,5 ( $\Omega$ ).

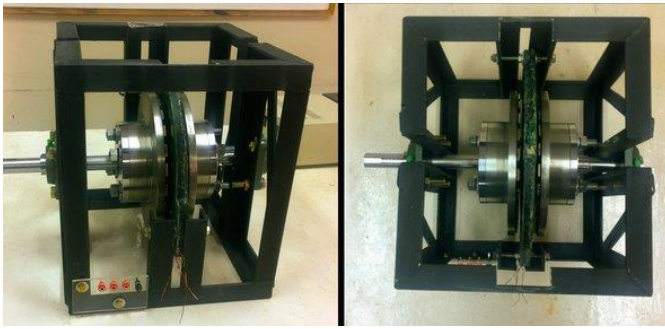


Fig. 12. Conjunto armado (generador y estructura).

En las Fig. 13 se presentan las tensiones generadas en vacío de fase y línea. Se puede observar de esta figura que la tensión de fase posee un tercer armónico en su forma de onda.

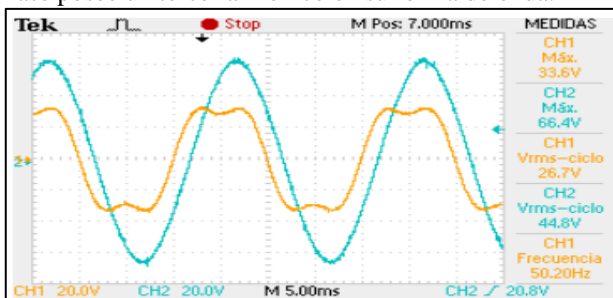


Fig. 13. Tensión de fase y línea del generador en vacío a 500 rpm.

En la Fig. 14 se presentan la tensión, corriente y potencia generada en corriente continua; esta medición se realizó a la salida de un rectificador trifásico que se conectó al generador.

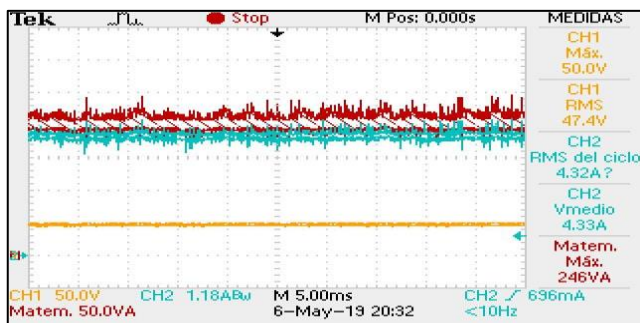


Fig. 14. Voltaje, corriente y potencia DC a la salida del rectificador con una resistencia de 12,5  $\Omega$  a 600 RPM.

En las Fig. 15-17 se presenta la variación de la tensión, corriente y potencia en función de la velocidad del rotor.

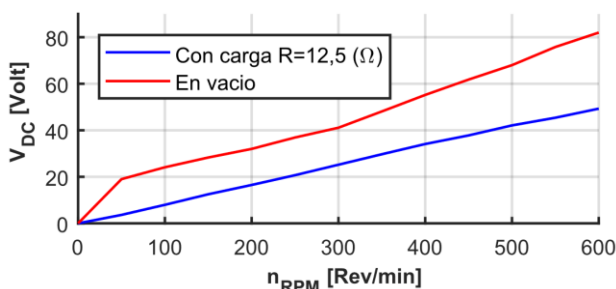


Fig. 15.  $V_{DC}$  vs  $n_{rpm}$  a la salida del rectificador.

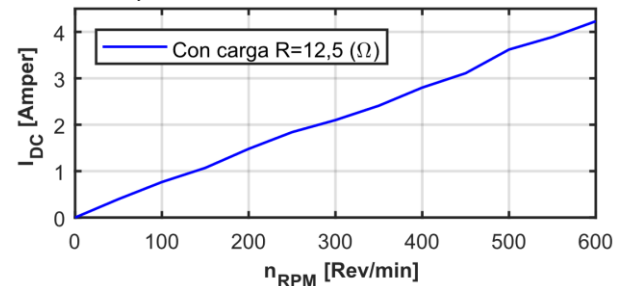


Fig. 16.  $I_{DC}$  vs  $n_{rpm}$  a la salida del rectificador.

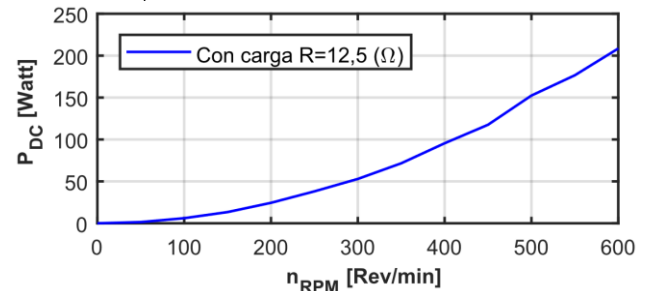


Fig. 17.  $P_{DC}$  vs  $n_{rpm}$  a la salida del rectificador.

Finalmente se realiza un estudio térmico del comportamiento del generador para determinar el valor máximo de potencia posible, para esto se consideraron los diferentes límites de temperatura de los componentes del generador, entre ellos tenemos el alambre de cobre tipo EdFlex 200 (max. temp. 220 °C), los imanes de neodimio tipo N35 (max temp. 80 °C) y finalmente la resina poliéster (max. Temp. 70 °C).

En base a lo anterior, el componente más crítico del generador es la resina poliéster, por lo que se realizaron ensayos con una cámara termográfica con el objetivo de determinar la potencia máxima sin deteriorar el generador.

En la Fig. 18 se presentan ensayos donde se mide la temperatura para dos velocidades con la misma carga.

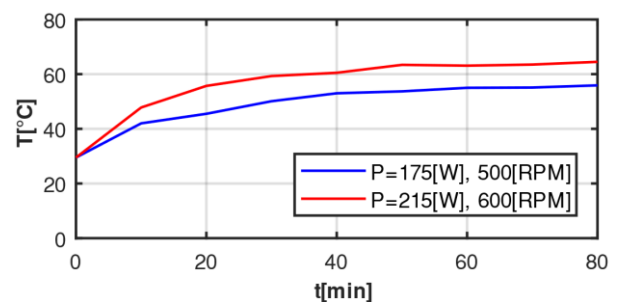


Fig. 18. Evolución de la temperatura de las bobinas del estator.

En base a los ensayos realizados, se obtuvo que para una potencia de 200 W luego de un cierto tiempo el generador se estabiliza en una temperatura de 60 °C, tomando este valor como potencia máxima admisible del generador.

En la Fig. 19 se presentan imágenes del generador a plena carga.

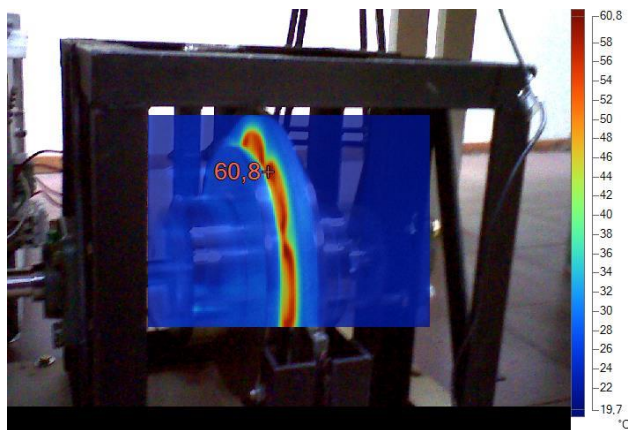


Fig. 19. Imágenes termográficas del generador a plena carga.

En base a los ensayos realizados se obtuvieron los siguientes valores nominales del generador

TABLA II – ESPECIFICACIONES Y PARAMETROS OBTENIDOS.

Parámetro	Valor
$n_{rpm}$	500 (RPM)
$v_{fase} (vacío)$	33,6 (V)
$v_{línea} (vacío)$	66,4 (V)
$v_{fase} / \omega$	$\approx 0,64$ (V/s)
$T_{trabajo}$	60 (°C)
$P_n$	200 (W)

## VI. LIMITACIONES Y DIFICULTADES DURANTE LA CONFECCIÓN DEL GENERADOR.

### Imanes

- La forma y el grado del imán tiene un impacto apreciable tanto en la forma de la onda de la f.e.m. inducida en las bobinas, como en el valor de amplitud de esta.
- Además, el grado y el tamaño son parámetros limitantes en la selección de la longitud del entrehierro, y por lo tanto limitan el espesor de las bobinas del estator en este tipo de diseño (estator interno).

### Polos

- La cantidad de polos en el diseño es un parámetro que se establece desde un inicio. Si bien el criterio para aplicaciones eólicas es generalmente gran cantidad de polos, con el objeto de obtener frecuencias elevadas de la FEM con una baja velocidad de rotación mecánica del eje, incrementar el número de polos para un mismo diámetro externo puede ocasionar que la disminución de la distancia entre polos adyacentes de un mismo rotor genere grandes flujos de dispersión entre los mismos y reduzca el flujo a través del entrehierro.
- Por otro lado, como se mencionó, si el criterio de selección es la mayor cantidad de polos que entre sobre la periferia del rotor, un limitante siempre va a ser el diámetro de este, por lo cual son cuestiones para considerar previo a la construcción.

### Flujo magnético

- Uno de los parámetros que presento mayor dificultad para obtener en el diseño, fue el de pico de densidad de flujo magnético que existe en el entrehierro; si bien existen

instrumentos de medición para tales fines, en este caso se obtuvo a través de un software ANSYS Maxwell 2018 el cual utiliza la técnica de cálculo por elemento finito.

### Bobinas

- Un parámetro importante en el cálculo y posterior construcción de las bobinas es el factor de apilamiento, el cual tiene un valor puramente empírico (práctico), ya que de antemano es difícil saber con qué eficiencia se va a realizar el bobinado. Por ello, resulta útil utilizar valores conservadores en los cálculos de estas.
- Otra dificultad que se presenta en las bobinas es posicionarlas correctamente y que no se desplacen luego de verter y sellar el molde con resina.

## VII. CONCLUSIÓN

En este informe se presentó el diseño y la construcción de un generador de flujo axial de imanes permanentes de doble lado con estator interno. Este diseño estuvo orientado a la obtención de una máquina con una relación potencia/costo aceptable en aplicaciones de generación eólica.

En el desarrollo de esta práctica se pudo observar las distintas dificultades y limitaciones que se presentan en la construcción de la máquina, los cuales se mencionan en apartados anteriores.

De los resultados experimentales presentados, se observa que se obtuvo una potencia máxima de 200W a 500RPM, logrando una potencia aceptable para aplicaciones de baja potencia.

Como trabajo futuro se espera continuar trabajando en el diseño de generadores de flujo axial incorporando nuevos conocimientos a partir de la experiencia realizada.

## AGRADECIMIENTOS

El autor reconoce el apoyo financiero proporcionado por la Dirección Nacional de Desarrollo Universitario y Voluntariado, bajo el nombre de PUyDP “Generador Eólico de Bajo Costo”, código D22-UNSL7235; al Grupo de Electrónica Aplicada de la UNRC por el préstamo de la cámara termográfica así como también agradecen al Laboratorio de Control Automático (LCA) de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA) por la disposición de un establecimiento donde desarrollar el trabajo presentado.

## REFERENCIAS

- [1] “Descripción, desarrollo y perspectivas de las energías renovables en la argentina y en el mundo”, (mayo de 2004), secretaría de energía de la nación.
- [2] <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- [3] <https://erenovable.com/energias-limpias/>
- [4] <https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>
- [5] <https://remicaserviciosenergeticos.es/blog/tipos-de-energia/>
- [6] <https://www.argentina.gob.ar/energia>
- [7] Werner Jara, Alejandro Martin, Juan A. Tapia “Axial flux PM Machine for Low Wind Power Generation”. University of Concepcion, Chile. XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [8] Enriques Espinos Iglesias “Diseño de un Aerogenerador de imanes permanentes para bajas velocidades de viento”, Universidad Tecnológica de Panamá.
- [9] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang and Maarten J. Kamper “Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines” (book), Springer Netherlands
- [10] Todd D. Batzel, Andrew M. Skraba, Ray D. Massi “Design and Test of an Ironless Axial Flux Permanent Magnet Machine using Halbach Array”, Penn State University, Altoona College