

# Construcción del Sistema Electromecánico de un Banco de Ensayos Para Pruebas de Generación

## Construction of the Electromechanical System of a Generation Test Bench

Presentación: 12/08/2024

Doctorando:

**Lisandro M. ROJAS**

Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP), Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional-Argentina  
[lisandrorojas@frbb.utn.edu.ar](mailto:lisandrorojas@frbb.utn.edu.ar)

Director:

**Franco E. DOTTI**

Codirector:

**Sebastian P. MACHADO**

### Resumen

Se informa la construcción de los subsistemas mecánico y eléctrico de un banco de pruebas para un generador eléctrico del tipo sin escobillas o brushless. El objetivo es contar en el laboratorio del GIMAP con un sistema para la realización de pruebas experimentales controladas, que permitan extraer información sobre este tipo de generadores con miras a aplicaciones undimotrices. Así, se busca lograr condiciones similares a las que un generador se vería sometido durante su funcionamiento en ambiente real, acoplado a un convertidor pendular de energía undimotriz de pequeña escala. El enfoque propuesto apunta a una implementación similar a otra realizada previamente para su aplicación en aerogeneradores urbanos. La construcción involucra el sistema impulsor, incluyendo la instalación de un motor eléctrico y una caja reductora, y la selección y montaje del generador eléctrico. No incluye la construcción de la electrónica de acondicionamiento, aunque se indican las pautas para hacerlo.

Palabras clave: Generación eléctrica, generador sin escobillas, energía undimotriz.

### Abstract

The construction of the mechanical and electrical subsystems of a test bench for a brushless electric generator is reported. The objective is to have a system in the GIMAP laboratory to carry out controlled experimental tests for extracting information from this type of generators with the aim to wave-driven applications. Thus, the aim is to achieve similar conditions to those that a generator would be subjected to during its operation in a real environment, coupled to a small-scale wave energy pendulum converter. The proposed approach focuses on an implementation similar to another previously carried out for its application in urban wind turbines. The design comprises the drive system, including the installation of an electric motor and gearbox, and the selection and assembly of an electric generator. However, it does not include the construction of conditioning electronics, although the guidelines for doing so are indicated.

Keywords: Electric generation, brushless generator, wave energy.

## Introducción

El generador eléctrico es un componente fundamental de un convertidor pendular de energía undimotriz, dado que se encarga de convertir la energía mecánica contenida en el movimiento rotacional u oscilatorio de la rueda pendular, en energía eléctrica. En baja potencia y bajo un clima hostil, como es el caso del convertidor pendular a pequeña escala que se planea instalar en el estuario de Bahía Blanca, se planteó la necesidad de contar con un generador eléctrico robusto, que no requiera mantenimiento periódico, y que a su vez sea de bajo costo. Es por ello que se consideró la utilización de un generador eléctrico sin escobillas o brushless, fabricado a partir de la reconfiguración de un motor eléctrico de uso comercial. Esta es una técnica bastante empleada en la actualidad en aerogeneradores de eje horizontal debido al bajo costo que implica tener un generador eléctrico a partir de pequeñas modificaciones mecánicas y eléctricas de un motor disponible en el mercado en distintas potencias y tamaños (Laczko et al., 2018; Liu et al., 2021). Cabe mencionar que no ha sido considerada aun para convertidores undimotrices, ya que éstos en su generalidad, producen energía a partir de movimientos lineales.

Ahora bien, con el fin de establecer la viabilidad de esta propuesta, debe construirse un banco de pruebas que permita ensayar diferentes configuraciones del generador, para así determinar sus parámetros intrínsecos y cuantificar sus capacidades. Además, los estudios a realizarse sobre el generador en cuestión permitirán verificar si existe una configuración de bobinados del estator óptima en términos de generación energética, esto es, de proporcionar la tensión y corriente necesarias para cargar baterías, a partir de rangos de velocidades bajos.

Se presentan en sección 2 los componentes utilizados, mientras que en la sección 3 se describe el proceso de fabricación del banco de ensayo.

## Desarrollo

La configuración que se propuso para el banco de ensayo se muestra en el esquema de la Fig. 1, en la cual se indican la mayoría de los componentes. A continuación, se describen los componentes principales.

1. **Generador eléctrico.** A partir del estudio de una implementación previa en aerogeneradores eólicos (Agotegaray y Pinzón Montes, 2020), se optó por construir un generador a partir de la reconfiguración de un motor sin escobillas comercial. Así, el generador montado sobre el banco, que potencialmente será utilizado en el convertidor undimotriz está conformado por el rotor y estator de un motor trifásico sin escobillas Whirlpool WLF10AB (ver Fig. 2). El estator cuenta con 27 bobinas en polos salientes dispuestas en un arreglo de 9 bobinas en serie por fase, con la posibilidad de alterar esta configuración con el objetivo de lograr diferentes valores de tensión y corriente generada. El rotor, por su parte cuenta con 36 imanes ferríticos. El uso de un motor sin escobillas comercial como generador eléctrico surgió como una alternativa al diseño y la fabricación desde cero de un generador, lo cual correspondió a la primera opción. La alternativa fue seleccionada ya que el costo de los materiales necesarios para fabricar un generador excedía con creces el costo de un motor sin escobillas comercial y su potencial reconfiguración. En esencia, el generador es una máquina relativamente sencilla donde los componentes más costosos empleados en la fabricación son los imanes de neodimio y la mano de obra para la fabricación por pantógrafo de pie. El resultado final de fabricar un generador desde cero hubiese sido muy similar al conformado mediante la alternativa seleccionada, pero a un costo mucho mayor y con un tiempo mucho mayor también insumido en el diseño.
2. **Conjunto impulsor.** El dispositivo encargado de brindar energía mecánica al generador trata de un motor eléctrico trifásico 3×380 V marca Mochos, modelo D71, con 0.5 HP de potencia. Dado que el motor funciona a una velocidad nominal de 1500 rpm, se lo utiliza en serie con una caja reductora de relación 1:40, comunicándose ambos con una transmisión de tipo correa y poleas. Por su parte, la velocidad del motor es controlada mediante un variador de frecuencia marca Mochos, modelo CFM30-0.75-4T. De esta forma, la velocidad teórica máxima que puede alcanzar el generador en el banco de ensayo es de 24.1 rpm, un valor en el orden de magnitud del esperado bajo el oleaje del estuario, pero pueden realizarse ensayos en todo el rango de velocidades desde 0 a ese valor máximo.

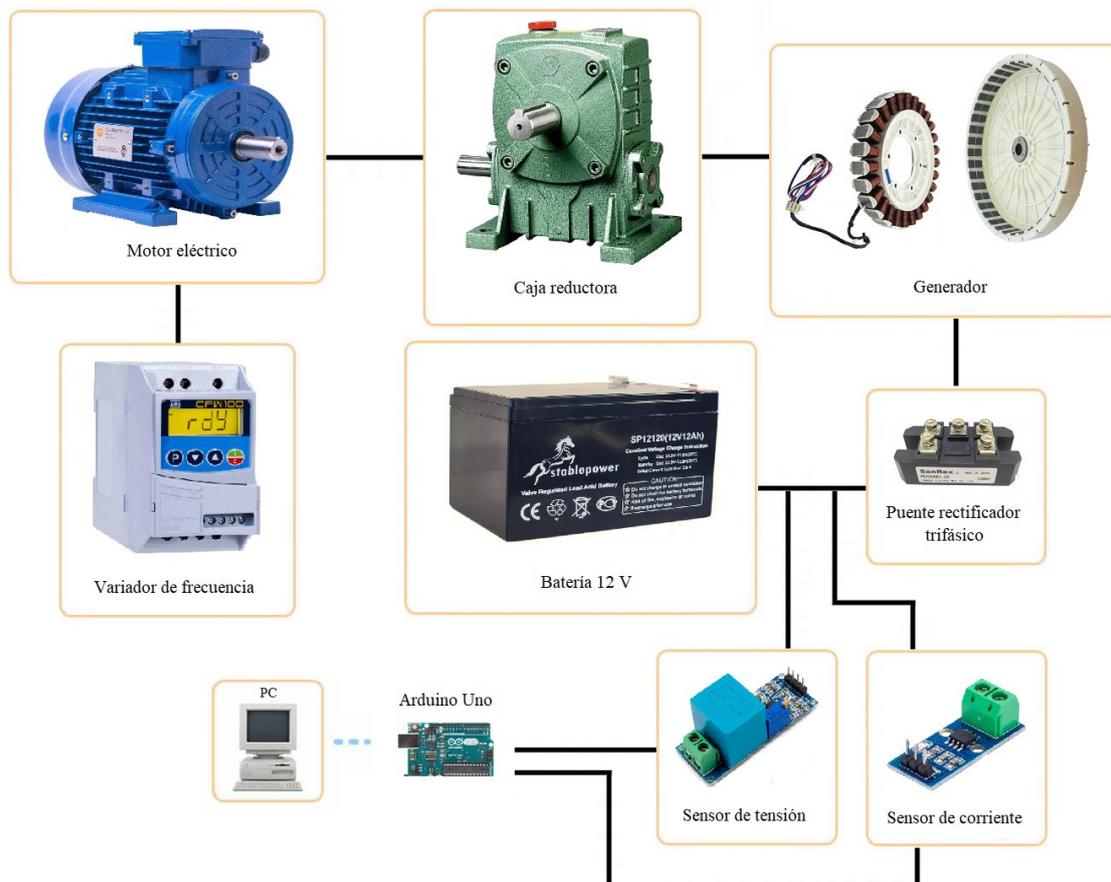


Figura 1. Configuración base propuesta para el banco de ensayos.

3. Circuito rectificador/regulador. Para la primera fase de experimentos, donde se considerará al generador con su configuración trifásica original, se requiere de un rectificador trifásico de onda completa que permita tomar la potencia en corriente alterna generada y convertirla en potencia en corriente continua para la posterior carga de la batería. Originalmente se planteó el uso de un puente rectificador trifásico comercial, como el indicado en el esquema de la Fig. 1. No obstante se abandonó esta idea dado que las altas potencias de diseño de estos componentes resultan demasiado alejadas de la que producirá un convertidor undimotriz.

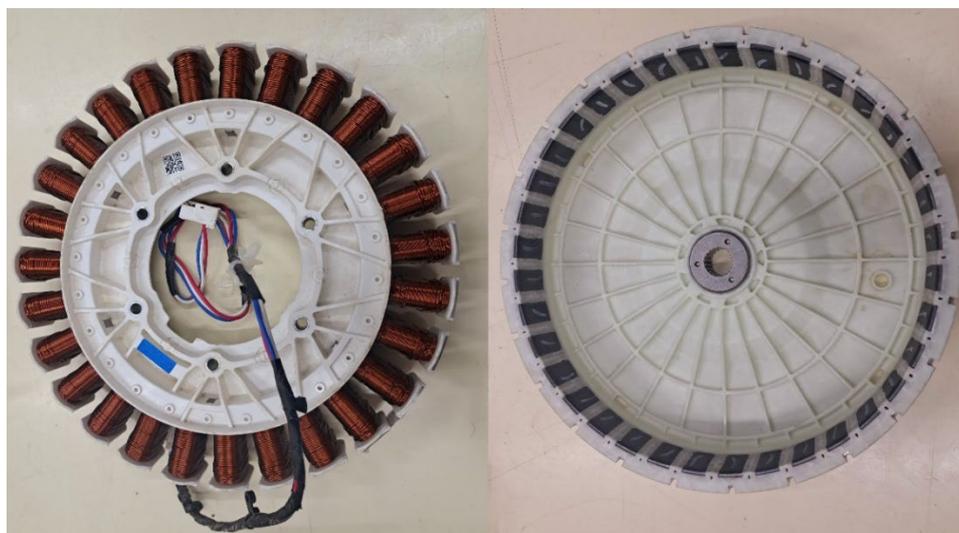


Figura 2. Estator y rotor del motor sin escobillas Whirlpool WLF10AB.



Figura 3. Rectificador/regulador de carga para aerogeneradores comercial empleado en el proyecto. Permite la carga de baterías de 12 V ó 24 V, y soporta hasta una potencia de 600 W.

Por otra parte, se adquirió un rectificador/regulador de carga empleado en aerogeneradores para realizar un estudio de su adaptabilidad. Este componente, que se muestra en la Fig. 3, cuenta con un diseño optimizado de circuitería y permitiría la carga de baterías de 12 V ó 24 V, requiriendo que la tensión nominal a la salida del generador supere los 12 V. Tal requerimiento implicará casi con seguridad la reconfiguración de los bobinados originales del generador, lo cual supone en principio una desventaja. Otra desventaja presupuesta corresponde a la complejidad electrónica asociada al circuito regulador de carga y frenado del aerogenerador. La acción de frenado no se requiere en el convertidor pendular, ya que su propia dinámica limita la velocidad de rotación de manera natural, impidiendo que la misma alcance valores fuera de control. La regulación de carga de este componente comercial se concibe para baterías mucho más delicadas en su proceso de carga que las que serán empleadas en este proyecto, por lo cual el circuito regulador resultaría quizá innecesariamente complejo, influyendo consecuentemente en el rendimiento. Además de las dos opciones previas, se prevé la fabricación de un sistema de rectificación, apuntando a lograr un diseño a medida del recolector undimotriz que pueda convertir la potencia con mayor rendimiento. Así, se diseñaron dos versiones de rectificador sobre placas experimentales perforadas, empleando diodos 1N4001 y 1N5819, respectivamente. Los diodos 1N4001 son de aplicación clásica en rectificación. Los diodos 1N5819, denominados Schottky, tienen una menor caída de tensión en directa, por lo que proporcionarían una mayor eficiencia, pero cuentan también con una mayor corriente inversa. En principio, se pondrá a punto este circuito mediante experimentos empleando resistencias. Luego se pasará a una segunda etapa, correspondiente a la carga de batería. No se prevé en principio para esta opción un circuito regulador de carga, sino que tal regulación se hará por software a partir del sensado de voltaje y corriente de carga de la batería.

4. **Batería.** Se realizarán pruebas con dos baterías recargables selladas de plomo-ácido, de 12 V y capacidad de carga 4.0 Ah y de 6 V y capacidad 4.2 Ah. De los resultados de la experimentación surgirá la más apta para almacenar la energía generada en el convertidor undimotriz. Este tipo de baterías se seleccionó casi exclusivamente por su robustez a la hora de soportar variabilidad en el voltaje de carga. Originalmente se barajó la idea de emplear baterías del tipo litio-ion, pero esta opción se descartó al menos para las primeras pruebas debido a una mayor propensión a averías frente a variabilidad en la carga, y al requerimiento de un cargador específico de naturaleza compleja para adaptarse a esta tecnología.
5. **Sensorización.** Se conectan entre el rectificador y la carga (resistencia o baterías, según se trate) sensores de medición de voltaje y corriente directa. El sensor de voltaje se conecta entre los terminales positivo y negativo del rectificador, mientras que el de corriente se conecta en serie en la línea positiva. Los datos medidos por estos sensores son procesados por un microordenador tipo Arduino Uno y analizados en

tiempo real en una computadora dedicada. En el caso de carga de batería, estos sensores junto con una rutina de programación actúan como regulador de carga. Así, se hace un corte por software relé mediante, en el caso que se detecte carga completa de la batería. La medición de la velocidad del motor se mide directamente desde el variador de frecuencia.

## Resultados

La Fig. 4 muestra el banco de ensayos terminado. En la Fig. 4a se aprecia el motor eléctrico y la caja de engranajes reductores, vinculados mediante una correa A19. Se observa el generador montado sobre su estructura soporte, unido a la caja reductora a través de un eje mecanizado en acero. En el frente del equipo se observa el variador de frecuencia, encargado de brindar arranque y parada suaves, como así también setear de manera precisa la velocidad de giro del motor. La Fig. 4b muestra el lateral del equipo, donde se observa la llave contactora encargada de alimentar el variador con potencia trifásica.

La primera actividad en la etapa de construcción correspondió al diseño y la fabricación de la estructura portante, debiendo ser ésta lo suficientemente rígida y estable para contener al generador, motor y caja reductora. Se optó por fabricar esta estructura en chapa comercial, empleando uniones atornilladas. La zona de sujeción del generador se resolvió como una chapa en voladizo, con refuerzos estructurales ángulo. Luego se procedió al montaje del motor y la caja reductora, con su correspondiente transmisión mediante correa y poleas.



(a)



(b)

Figura 4. Dos vistas generales del banco de ensayos terminado en el laboratorio del GIMAP. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

El motor configuración del motor Whirlpool WLF10AB cuenta con una configuración trifásica de 9 bobinas por fase, que deben ser alimentadas por la red, esto es 220 V de corriente alterna. La activación alternada de las bobinas se realiza mediante control electrónico. Sin embargo, su función como generador será la de alimentar baterías de 6 V ó 12 V de corriente continua. De esta forma, además de probarse la configuración original, deberá realizarse una reconexión de los bobinados en serie y paralelo para realizar otras pruebas, en búsqueda de la configuración más apropiada para la velocidad brindada por el convertidor pendular. Así, en el banco de

ensayos deberán obtenerse las curvas de tensión de generación en vacío, tensión en carga, corriente y potencia, en función de la velocidad angular.

Con el fin de caracterizar adecuadamente el desempeño del generador, se deberán llevar a cabo ensayos en el rango de velocidades de 0 a 30 rpm. Estos ensayos, similares a los propuestos por Agotegaray y Pinzón (2020) para una aplicación eólica, deberán incluir:

1. Ensayo de vacío. En este ensayo se determina la tensión en bornes a la salida del rectificador, para el estado sin carga y para cada configuración de los bobinados.

2. Ensayo de potencia con carga resistiva. Se cuantifica 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.

1. Ensayo de potencia en carga de baterías. Corresponde a la repetición del ensayo anterior, pero empleando ahora como carga una batería. Dependiendo de la tensión proporcionada por los ensayos anteriores, la batería podrá ser de 6 V o de 12 V. Este ensayo impone la tensión en bornes del rectificador y en consecuencia del generador, alterando su comportamiento.

## Conclusiones

Se presentaron los componentes utilizados y se describió el proceso de fabricación del sistema electromecánico de un banco de ensayo para el estudio de un generador sin escobillas, el cual es obtenido a partir de la reconfiguración de un motor de uso comercial. Este generador es parte integrante de un convertidor pendular undimotriz de pequeña escala que se planea instalar en el estuario de Bahía Blanca. El objetivo de este banco es el de contar con un sistema experimental que permita la cuantificación del funcionamiento de este tipo de generadores, de los cuales no se cuenta con información en la literatura.

Se indican tres posibilidades de estudio del proceso de rectificación/regulación de la corriente alterna trifásica (o multifásica) que otorga el generador, con el objetivo de convertirla lo más eficientemente posible en corriente continua para la carga de baterías.

Por último, se dan lineamientos de los ensayos que deben realizarse para poder establecer los parámetros del sistema y su comportamiento en condiciones similares a los que se vería sometido al ser impulsado por un convertidor undimotriz. Estos ensayos permitirán definir la configuración más adecuada en cuanto a bobinados del generador y rectificación.

## Referencias

- Agotegaray J, Pinzón Montes A (2020). Motor sin escobillas como generador eléctrico de un aerogenerador. *Revista Ingeniería Eléctrica* 359:2-9.
- Laczko A., Brisset, S., y Radulescu, M. (2018). Design of a brushless DC permanent-magnet generator for use in micro-wind turbine applications. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 56(S1), 3-15.
- Liu, Y., Zhu, H., y Xu, B. (2022). Mathematical modelling and control of bearingless brushless direct current machine with motor and generator double modes for flywheel battery. *IET Power Electronics*, 15(13), 1249-1263.