

# Conformación de un kit didáctico sobre el funcionamiento de un DFIG

## Arrangement of an educational kit on the operation of a DFIG

### **Diego M. Ferreyra**

Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
dferreyra@sanfrancisco.utn.edu.ar

### **Pablo A. Ferrero**

Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
pferrero@facultad.sanfrancisco.utn.edu.ar

### **Kevin D. Knüssel**

Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
kknussel@gmail.com

### **Santiago M. Comba**

Facultad Regional San Francisco, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
santiagomcomba@gmail.com

### **Resumen**

En este trabajo, se detallan generalidades sobre el principio de funcionamiento y aspectos de diseño y montaje de un kit didáctico que replica el funcionamiento de un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG, por sus siglas en inglés), de uso extendido en aplicaciones de energía eólica. Se enumeran los componentes principales con sus valores nominales y se detalla la función de cada uno de ellos. A pesar de algunas limitaciones que impedirían conectar este kit a la red eléctrica como sería esperable de un DFIG real, el sistema de control sencillo implementado con componentes industriales estándares cumple con la finalidad de que la frecuencia de las tensiones generadas se mantenga muy próxima a la frecuencia industrial requerida. Se destaca la utilidad didáctica del kit propuesto, se remarca que algunos de los componentes se recibieron en donación por parte de empresas regionales, y se enuncian aspectos adicionales para completar el proyecto y alternativas para trabajo a futuro.

**Palabras clave:** energía eólica, generador de inducción doblemente alimentado, DFIG, kit didáctico.

### **Abstract**

In this work, general details are given on the working principle and the design and assembly features of an educational kit which replicates the operation of a doubly fed induction generator (DFIG), widely use in wind energy applications. The main components are listed with their rated values and the function for each of them. Despite limitations which prevent the kit from being connected to the grid as would be expected in a real DFIG, the simple control system implemented with standard industrial components meets the goal that the frequency of the generated voltages remains very close to the required industrial frequency. The educational value of the proposed

kit is highlighted, the donation of some of the components by regional companies is emphasized, and additional points are listed for the project to be completed, as well as future work alternatives.

**Keywords:** wind energy, doubly fed induction generator, DFIG, educational kit.

## Introducción

En Argentina, en los últimos años, resulta notorio el ritmo de avance de las fuentes renovables para la generación de energía eléctrica, sobre todo a nivel del mercado mayorista. Una proporción notoria de dicho impulso viene dada por proyectos de energía eólica de diferentes formatos y magnitudes. Esto acompaña el actual auge mundial en estas tecnologías de generación renovable de energía eléctrica y se sustenta en el elevado potencial de generación eólica disponible en nuestro territorio nacional (CADER, 2013; CAMMESA, 2021; Clementi, 2017; DTU, 2021).

Existen diversas configuraciones de generadores eléctricos de aplicación eólica, con diferentes características constructivas y principios de funcionamiento. Tales diferencias dependen principalmente de la modalidad de conexión a red del generador y de la característica de velocidad fija o variable. En este sentido, considerando los de velocidad variable, pueden enunciarse tres grandes familias (Abad, 2011; Díez, 2015):

1. Sin conexión del estator a la red: para alimentar sistemas aislados de la red, lo más frecuente es usar configuraciones con imanes permanentes en el rotor. La potencia CA de tensión y frecuencia variables obtenida en el estator se convierte a DC por medio de un rectificador y se utiliza para la carga de baterías.
2. Con conexión del estator a la red a través de electrónica de potencia: por lo general, son de mayor potencia que los aislados de la red y el rotor incluye algún tipo de regulación de la corriente de campo. Por lo tanto, solo la frecuencia de la potencia CA que se establece en el estator es variable con la velocidad del viento. Esta potencia CA se rectifica, se hace pasar por un bus DC, y atraviesa un inversor que establece la interfaz con la red eléctrica en CA a la frecuencia industrial.
3. Con conexión galvánica del estator a la red: una configuración habitual es el generador de inducción de doble alimentación (*Doubly Fed Induction Generator, DFIG*), donde la velocidad del rotor sigue siendo variable según la velocidad del viento. La particularidad es en que el rotor cuenta con un bobinado polifásico (típicamente trifásico) que se alimenta con un sistema polifásico de tensiones cuya resultante establece el campo principal de excitación; en función de la frecuencia de la alimentación al rotor, dicho campo de excitación es un campo giratorio de magnitud, velocidad y sentido de giro variables a voluntad. La alimentación del rotor se controla de modo tal que en todo momento se compense la discrepancia entre la velocidad de giro del eje y la frecuencia eléctrica requerida en el estator. La principal ventaja de este tipo de máquinas es su contribución favorable a la estabilidad de las líneas eléctricas asociadas.

De las tres configuraciones enumeradas, este trabajo enuncia los aspectos preliminares del diseño y montaje de un kit didáctico que replica el funcionamiento de un DFIG.

En la Facultad Regional San Francisco (en adelante, la Facultad) de la Universidad Tecnológica Nacional (en adelante, UTN), se impulsó este proyecto desde un ámbito de I+D a fin de apoyar la difusión de estas tecnologías en las carreras de grado. Actualmente, se está concretando con un Trabajo Final de Carrera en Ingeniería

Electromecánica desarrollado por dos estudiantes con la supervisión de sendos docentes. Es valioso mencionar que el proyecto se implementa a partir de cuatro componentes principales: uno ya estaba disponible en la Facultad y los otros tres fueron donados por empresas privadas del medio regional.

## Desarrollo

En la Fig. 1, se muestran a modo de ejemplo el esquema de un DFIG, donde se incluye una caja de engranajes multiplicadora que, en la práctica, permite accionar el eje del generador con la mayor velocidad mecánica posible; en el proyecto de este trabajo, la velocidad de accionamiento ya será elevada porque se proporciona con un motor de inducción estándar accionado por un variador de frecuencia. Los convertidores que se muestran en el esquema permiten regular las potencias que el rotor intercambia con la red en diferentes estados de funcionamiento, siempre destinados a mantener constante la frecuencia de las tensiones inducidas en el bobinado del estator (Díez, 2015).

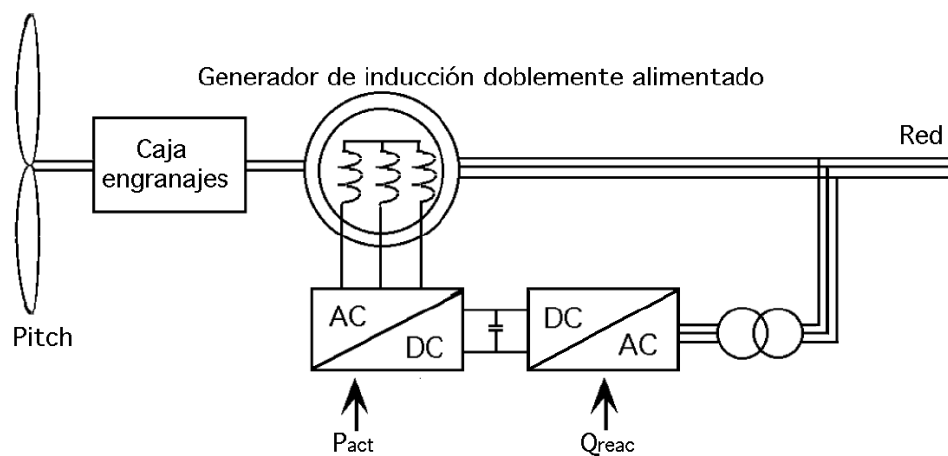


Figura 1. Esquema elemental de los componentes de un DFIG (Díez, 2015).

Para el proyecto aquí presentado, se partió inicialmente de los elementos que se muestran en la Fig. 2: una máquina eléctrica didáctica trifásica de inducción con rotor bobinado; y un motor asincrónico trifásico estándar.

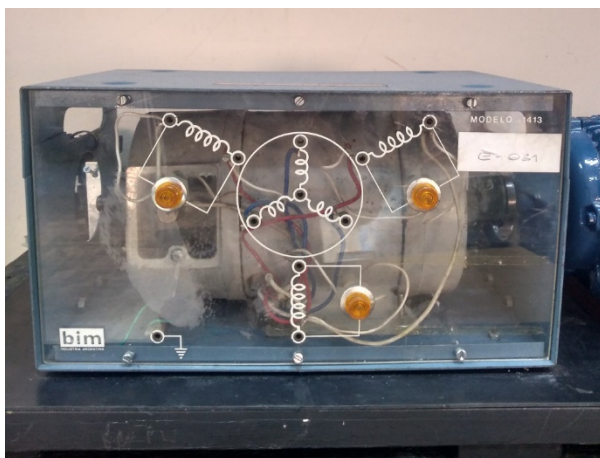


Figura 2. Dos de los componentes principales: (a) máquina eléctrica didáctica trifásica de inducción con rotor bobinado, y (b) motor asincrónico trifásico estándar.

El motor asincrónico marca WEG fue donado por la filial argentina de la marca; su potencia mecánica representa el impulso del viento sobre el eje del generador y tiene por valores nominales principales  $0,25 \text{ kW}$  y  $1380 \text{ min}^{-1}$ ; es similar a líneas comerciales actuales (WEG, 2021b), aunque está discontinuado. La máquina didáctica marca BIM ya era propiedad de la Facultad; representa el DFIG, y sus valores nominales son  $250 \text{ W}$  y  $1420 \text{ min}^{-1}$ . Ambas máquinas son de  $50 \text{ Hz}$  y  $220/380 \text{ V}$ . La particularidad de la máquina didáctica es que el bobinado trifásico en estrella de su rotor se puede alimentar con  $120 \text{ V}$  por medio de anillos rozantes.

En la Fig. 3, se muestran los otros dos componentes principales del proyecto: un variador de frecuencia de última generación con funciones de PLC incorporadas, y un variador de frecuencia tradicional, ambos aptos para las potencias requeridas.



Figura 3. Otros dos de los componentes principales: (a) variador de frecuencia moderno con funciones de PLC incorporadas, y (b) variador de frecuencia tradicional.

Ambos variadores de frecuencia son marca WEG. El CFW500 (WEG, 2021b), más moderno, fue donado por la filial argentina de la marca, mientras que el CFW10 (WEG, 2021c), más tradicional, fue donado por Minimec, una empresa regional dedicada a la fabricación de maquinaria para gastronomía. El CFW500, de alimentación trifásica, tiene un valor nominal de  $4,3 \text{ A}$  para un rango de tensiones nominales de  $380\text{-}480 \text{ V}$  y se destina a alimentar el motor asincrónico trifásico a fin de emular la velocidad variable de una turbina eólica accionada por el viento. Por otro lado, el CFW10, de alimentación monofásica, tiene un valor nominal de  $10 \text{ A}$  para un rango nominal de  $200\text{-}240 \text{ V}$  y se emplea para alimentar con tensión y frecuencia variables el bobinado trifásico del rotor de la máquina didáctica.

En la Fig. 4, se muestra el estado actual de integración de los componentes hasta aquí presentados, con el agregado de cableados y elementos adicionales de accionamiento, protección y señalización. Se destaca la vinculación mecánica entre los ejes de las dos máquinas eléctricas, es decir que ambos giran solidariamente.



Figura 4. Kit didáctico en estado avanzado de montaje

La siguiente es la secuencia de funcionamiento implementada hasta el momento, con el generador en vacío y sin conexión a la red eléctrica:

1. Por medio del variador CFW500, se alimenta el motor de accionamiento con una frecuencia diferente a la nominal, por ejemplo, 40 Hz, con la tensión correspondiente al ajuste V/f establecido.
2. Despreciando el deslizamiento del motor, la velocidad de giro de los ejes solidarios entre sí haría que la máquina didáctica genere un sistema trifásico de tensiones de frecuencia muy próxima a esos 40 Hz.
3. A fin de compensar dicha diferencia de frecuencia en la generación, hay interconectada una salida analógica del CFW500 con una entrada analógica del CFW10. Usando una programación *ad hoc* del PLC interno del CFW500, se logra que el CFW10 alimente el bobinado del rotor del DFIG con una frecuencia y secuencia de fase que, para este ejemplo, será de 10 Hz en el mismo sentido que el del giro del rotor.
4. De esta manera, la frecuencia de las tensiones generadas queda definida por la sumatoria de ambos valores:  $40 \text{ Hz} + 10 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$ , que es el valor de frecuencia industrial requerido.
5. Dada la programación usada en el PLC interno del CFW500, esta secuencia es válida también cuando el motor de alimentación gira a velocidades correspondientes a frecuencias mayores a la industrial. P. ej., si el CFW500 alimenta el motor de accionamiento a 60 Hz, el CFW10 alimentará el rotor del DFIG con 10 Hz en el sentido contrario de giro, y se obtendrá así una frecuencia de salida de  $60 \text{ Hz} - 10 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$ .

Para continuar el proyecto, resta ajustar el control de la corriente que circula por el rotor del DFIG, a fin de que la tensión a los bornes de su estator esté siempre en torno a la nominal (220 V de fase, 380 V de línea). De todos modos, aunque se ajuste con exactitud este comportamiento en tensión, se prevé una limitación que tiene que ver con la frecuencia. Ocurre que la secuencia presentada y la programación del PLC se basan en la medición de la frecuencia de alimentación del motor de accionamiento; por lo tanto, el control propuesto y los cálculos presentados desprecian el deslizamiento de dicho motor asíncrono. Esto implica que la suma final de frecuencias da siempre valores algo por debajo de la frecuencia industrial requerida. Para extender el proyecto, una solución podría ser medir la velocidad de giro de los ejes, pero una interconexión a la red requeriría también la medición de la frecuencia de esta. Si bien esta limitación hace que hoy no se pueda interconectar este DFIG didáctico a la red eléctrica (sobre todo en condiciones de carga), se considera de valor educativo presentar este sistema de control

elemental conformado por equipos industriales estándares para emular un tipo de generador de uso extendido en aplicaciones eólicas.

Otro aspecto por observar es el nivel de las potencias activas y reactivas que el rotor debe intercambiar con la red a través del variador de frecuencia que cumple esa función. Para los márgenes de frecuencia de las pruebas realizadas (aprox.  $\pm 30\%$  de la nominal), y dados los valores nominales relativos de los equipos, no se nota un impacto notorio, pero debe preverse que la tensión del bus DC del variador CFW10 aumentaría en determinadas condiciones, condición que debe corregirse y controlarse.

## Conclusiones

En este trabajo, se detalló el principio de funcionamiento y los aspectos generales de diseño y montaje de un kit didáctico para emular el funcionamiento de un generador de inducción doblemente alimentado. Este tipo de generadores, conocido como DFIG por sus siglas en inglés, es de uso extendido en energía eólica. La implementación del kit didáctico se realiza con componentes industriales, en su mayoría estándares y donados por empresas del medio. A pesar de algunas limitaciones que se describen, el kit cumple con la finalidad de replicar de manera aproximada el funcionamiento de un DFIG real. El proyecto en el que se enmarca este trabajo incluye el desarrollo de un Trabajo Final de Carrera en Ingeniería Electromecánica en la UTN San Francisco, lo cual implica un impacto académico muy favorable.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la UTN por el financiamiento relacionado con este proyecto, que surge del PID ENECBSF0008115 homologado por su Rectorado. También extienden su agradecimiento por las donaciones recibidas de WEG Equipamientos Eléctricos SA (filial argentina de la multinacional WEG), sita en San Francisco (provincia de Córdoba); de Minimec, localizada en Las Petacas (provincia de Santa Fe), en la persona de su titular, Iván F. Losano; y del taller mecánico de Ezio Leurino, ubicado en San Francisco. De similar manera, se agradece especialmente al Ing. Alberto J. Díaz y al Sr. Santiago F. Leurino, de la UTN San Francisco, por la realización de ensayos que permitirán ampliar el presente trabajo.

## Referencias

- Abad, G., López, J., Rodríguez, M., Marroyo, L., Iwanski, G. (2011). *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation (Vol. 85)*. Hoboken (NJ, USA): John Wiley & Sons.
- Cámara Argentina de Energías Renovables (CADER, 2013). "+RENOVABLES 2012/2013. Anuario. Sección Eólica". 4.<sup>a</sup> edición. Buenos Aires, Argentina.
- CAMMESA (2021), Informe Anual 2020. Disponible en <<https://microfe.cammesa.com/static-content/CammesaWeb/download-manager-files/Informe%20Anual/INFORME%20ANUAL%202020%20VF.pdf>>.
- Clementi, L. V. (2017). "Energía Eólica y Territorios en Argentina. Proyectos en el Sur de la Provincia de Buenos Aires entre fines del siglo XX y principios del siglo XXI", Tesis (Doctorado en Geografía), Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Danmarks Tekniske Universitet (DTU, 2021). "Global Wind Atlas", World Bank Group. Disponible en <<https://globalwindatlas.info/>> .

Díez, P. F. (2015). *Energía Eólica*. Santander (Cantabria, España): Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria.

WEG (2021a). "Motor Modular IE1 0.25 kW 4P 71 3F 115/200/230/400//132/230 V 50 Hz IC411 - TEFC - B14T". Disponible en <<https://www.weg.net/catalog/weg/RS/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Motores-para-Aplicaci%C3%B3n-Industrial/Motor-Modular/Motor-Modular-%28Aluminio%29/Motor-Modular-IE1-0-25-kW-4P-71-3F-115-200-230-400-132-230-V-50-Hz-IC411---TEFC---B14T/p/12925335>>.

WEG (2021b). "Convertidor de Frecuencia CFW500". Disponible en <[https://www.weg.net/catalog/weg/AR/es/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/OEM-y-Proposito-General/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/p/MKT\\_WDC\\_GLOBAL\\_VARIABLE\\_SPEED\\_DRIVE\\_CFW500](https://www.weg.net/catalog/weg/AR/es/Drives/Convertidores-de-Frecuencia/OEM-y-Proposito-General/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/Convertidor-de-Frecuencia-CFW500/p/MKT_WDC_GLOBAL_VARIABLE_SPEED_DRIVE_CFW500)>.

WEG (2021c). "Convertidores de Frecuencia CFW10". Disponible en <[https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/Drives/Legacy-Drives/Convertidor-de-Frecuencia-CFW10/Convertidores-de-Frecuencia-CFW10/p/MKT\\_WDC\\_GLOBAL\\_FREQUENCY\\_INVERTER\\_EASY\\_DRIVE\\_CFW10](https://www.weg.net/catalog/weg/US/es/Drives/Legacy-Drives/Convertidor-de-Frecuencia-CFW10/Convertidores-de-Frecuencia-CFW10/p/MKT_WDC_GLOBAL_FREQUENCY_INVERTER_EASY_DRIVE_CFW10)>.