

Recibido 12 de septiembre de 2022. Aceptado 12 de diciembre de 2022. Publicado 23 de diciembre de 2022.

ISSN: 2448-7775

# Generador eólico conectado a la red a través de un convertidor directo

**DIEGO GUTIERREZ<sup>1\*</sup>, JUAN M. RAMIREZ<sup>1</sup>, JOSE M. LOZANO<sup>2</sup>, LUIS R. MERCHAN<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup>CINVESTAV del IPN – Unidad Guadalajara, Jalisco, México.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, Salamanca, Guanajuato, México.

\*Autor de correspondencia: diego.gutierrez@cinvestav.mx

**RESUMEN** En este trabajo se presenta la implementación de un convertidor CA-CA directo del tipo Convertidor Matricial Directo (CMD), controlado por la técnica de modulación de descomposición en valores singulares (SVD). Mediante un prototipo que emula el comportamiento de una turbina eólica, se utiliza el CMD como enlace entre la red eléctrica y el emulador de la turbina eólica, formando un sistema de conversión de energía eólica (WECS).

**PALABRAS CLAVE**— Conversión CA-CA, convertidor matricial, sistema de conversión de energía eólica, descomposición en valores singulares.

## I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia del proceso de conversión y la mejora de la densidad de potencia de los convertidores es uno de los factores que impulsan el desarrollo moderno de la electrónica de potencia. El convertidor de potencia puede verse como un circuito eléctrico con interruptores y elementos almacenadores de energía, que contribuyen en gran medida al tamaño del convertidor. Por lo que, se espera que la topología con el menor número de semiconductores y elementos pasivos resulte adecuada para las aplicaciones de potencia. Por lo que, el convertidor matricial directo (CMD) se presenta como una alternativa, en la conversión de energía CA-CA, con unas relaciones potencia-volumen y potencia-peso muy superiores a otras alternativas [1].

Los convertidores matriciales han despertado mucho interés desde los años 80 [2], especialmente en la conversión de potencia trifásica CA-CA. Las técnicas de modulación representan un factor importante que ha evolucionado satisfactoriamente. Por ejemplo, las modulaciones de ancho de pulso vectorial espacial (SVM) [3] y de descomposición en valores singulares (SVD) [4].

En cuanto a las aplicaciones, estos convertidores se han utilizado principalmente en el control de motores [1]. Sin embargo, hoy en día se están investigando nuevas aplicaciones en sistemas de potencia, como en los sistemas de generación eólica (WECS), tanto en configuraciones con generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG) [6] y generadores asíncronos doblemente alimentados (DFIG) [5] [8].

Según datos de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE) en México se cuenta con 7.3 MW de capacidad instalada, que representa el 8.16% de la capacidad total, con un crecimiento anual de casi el 27%. Por otra parte, la tendencia actual en WECS presenta topologías a velocidad variable. Este trabajo propone utilizar un CMD como interfaz entre la energía generada (por la turbina eólica) y la red eléctrica, lo que resulta en una alternativa valiosa, por las ventajas anteriormente mencionadas.

En [5] se utiliza un CMD y se estudia el control de la potencia activa y reactiva a diferentes velocidades de viento y se utiliza un generador doblemente alimentado (DFIG). En [6] se utiliza un generador de imanes permanentes, se emplea una estrategia para la extracción de la máxima potencia mediante un control vectorial y un CMD para la conexión a la red. En [7] se realiza un análisis de estabilidad cuando se utiliza un convertidor matricial indirecto (CMI) de fuente cuasi-Z como interfaz de red. En [8] se realiza un análisis de estabilidad para un WECS con topología DFIG-CMD. En [9] se utiliza el CMD con la técnica demodulación SVD, para control de potencia reactiva en un WECS utilizando un PMSG. En [10] se presenta un control de par para un WECS con topología CMD-PMSG. Finalmente, en [11] se propone un control orientado de tensión para un CMI, con el fin de regular el par y el flujo magnético en el PMSG. Sin embargo, la mayoría de las propuestas con topología PMSG-CMD, se limitan a presentar resultados de simulación.

En la sección II es un breve estudio del CMD, la técnica de modulación SVD y se exponen las ventajas prácticas de utilizar dicha técnica de modulación en la aplicación propuesta. En la sección III se describe el sistema completo de generación de energía eólica implementado, con el CMD,

el emulador de la turbina eólica y la red eléctrica. Finalmente, en la sección IV se resumen los resultados obtenidos, del emulador de turbina eólica, y del sistema completo (WECS) implementado.

## II. EL CONVERTIDOR MATRICIAL DIRECTO

Un convertidor de frecuencia modifica una señal alterna en una señal que puede tener diferentes características de amplitud y frecuencia. Mediante la técnica de modulación se puede controlar el factor de potencia a la entrada; y la magnitud y ángulo de la tensión de carga. Además, puede gestionar el flujo de potencia, unidireccional o bidireccional. El CMD es un arreglo de interruptores bidireccionales (IBD) que enlazan de manera directa cada una de las fases de entrada, con cada una de las fases de salida, a través de dichos IBD. La Fig. 1 es el esquema de un CMD, con la fuente trifásica de entrada, filtro de entrada, matriz de IBS 3x3, filtro de salida y carga trifásica. La fuente de tensión con amplitud  $V_S$  y frecuencia  $f_S$  a la entrada. Dicha tensión se transforma en una salida con amplitud  $V_L$  y frecuencia  $f_L$ , donde, la amplitud y la fase de la corriente de carga,  $I_L$  y  $\phi_L$ , dependen de la impedancia de carga.

En el CMD la tensión de salida se crea a partir de la tensión de entrada, mientras que la corriente de entrada se crea a partir de la corriente de salida, como se describe de la Ec. (1) a la Ec. (6).

$$V_{L,ABC} = S V_{S,abc} \quad (1)$$

$$I_{S,abc} = S^T I_{L,ABC} \quad (2)$$

$$S_{abc} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_{hk} \in \{0,1\} \\ S_{h1} + S_{h2} + S_{h3} = 1 \end{cases} \quad h, k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

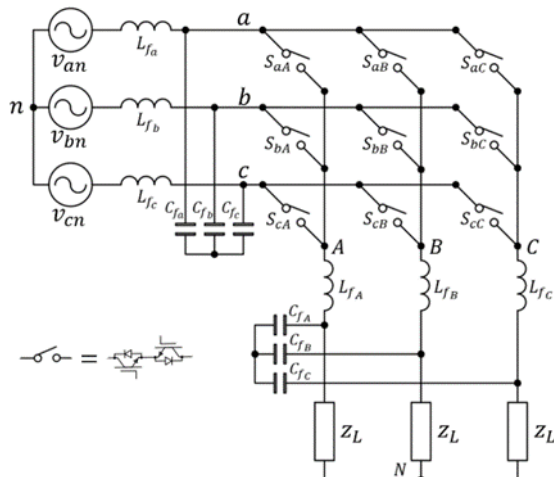


Fig. 1. Diagrama general del convertidor matricial directo trifásico-trifásico.

$$V_{L,ABC} = \begin{bmatrix} v_{LA} \\ v_{LB} \\ v_{LC} \end{bmatrix} \quad I_{L,ABC} = \begin{bmatrix} i_{LA} \\ i_{LB} \\ i_{LC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$V_{S,abc} = \begin{bmatrix} v_{Sa} \\ v_{Sb} \\ v_{Sc} \end{bmatrix} \quad I_{S,abc} = \begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \\ i_{Sc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde,  $S_{hk}$  es una función de conmutación en tiempo;  $V_{S,abc}$  e  $I_{S,abc}$  son las tensiones y corrientes de entrada, respectivamente; y  $V_{L,ABC}$  e  $I_{L,ABC}$  son las tensiones y corrientes de salida, respectivamente.

### A. TÉCNICA DE MODULACIÓN SVD

En la actualidad podemos encontrar diferentes técnicas de modulación, sin embargo, la técnica de modulación de descomposición en valores singulares extiende las capacidades de operación del CMD [4]. Dicha técnica es una modulación de ciclo de trabajo y está definida por Ec. (7) y Ec. (8).

$$M_{abc} = A v e \left\{ S_{abc} \right\}_{T_s} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq m_{hk} \leq 1 \\ m_{h1} + m_{h2} + m_{h3} = 1 \end{cases} \quad h, k = 1, 2, 3 \quad (8)$$

donde cada elemento  $m_{hk}$ , de la matriz  $M_{abc}$ , representa el promedio que dura encendido  $S_{hk}$  en cada ciclo de trabajo  $T_s$ .

Utilizando la transformada de Clarke (Ec. (9)) y realizando una serie de sustituciones en Ec. (1) - Ec. (8) resulta la Ec. (10).

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_{abc} = K^T M_{\alpha\beta 0} K = K^T M_{\alpha\beta} K + K^T M_0 K \quad (10)$$

Al aplicar la descomposición en valores singulares (Ec. (11)) al producto de  $K^T M_{\alpha\beta} K$ , implica que una de las soluciones da como resultado que las columnas de la matriz  $U_L$  representan un marco de referencia ortonormal, que gira a la misma frecuencia de las tensiones y corrientes de salida; mientras que las columnas de la matriz  $U_S$  representan un marco de referencia ortonormal, que gira a la misma frecuencia de las tensiones y corrientes de entrada, Ecs. (12)-(13).

$$M = U_L \Sigma U_S^* \quad (11)$$

$$M_{abc} = P(\theta_L) \begin{bmatrix} q_d & 0 \\ 0 & q_q \end{bmatrix} P(\theta_S) + K^T M_0 K \quad (12)$$

$$P(x) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(x) & \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(x) & -\sin\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$P(x)$  es la transformada de Park modificada. Las condiciones para que  $M_{abc,0}$  exista y se satisfaga la condición de la Ec. (4), se expresan en la Ec. (14).

$$\left. \begin{array}{l} |q_d| + |q_q| \leq 1 \\ \max\{q_d, q_q\} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \end{array} \right\} \quad (14)$$

La Fig. 2 ilustra el diagrama fasorial de la técnica de modulación SVD, con las columnas de  $U_S$  ( $[U_{sd} \ U_{sq}]$ ) y  $U_L$  ( $[U_{ld} \ U_{lq}]$ ) ortonormales.

Utilizar un marco de referencia que gira a la misma frecuencia que las tensiones de entrada y salida, simplifica en gran medida el control en máquinas eléctricas rotatorias. Así mismo, la técnica de modulación SVD resulta apropiada en un WECS, porque la frecuencia es variable en el lado generador y la frecuencia es fija en el lado red.

### III. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

La Fig. 3 es el esquema propuesto para el WECS, incluyendo el generador en serie con el convertidor CA-CA y la red eléctrica.

#### A. TURBINA EÓLICA

El comportamiento de la turbina eólica es emulado mediante un acoplamiento motor-generator, el motor, de Corriente Directa (CD); y el generador, síncrono de imanes permanentes, Fig. 4.

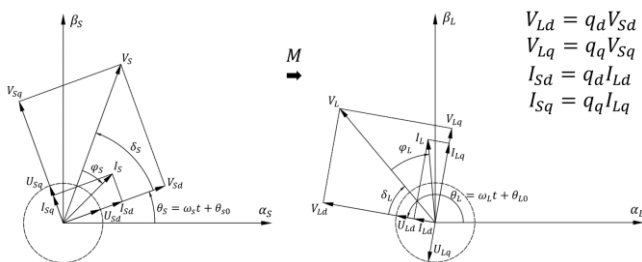


Fig. 2. Diagrama general del convertidor matricial directo trifásico-trifásico.

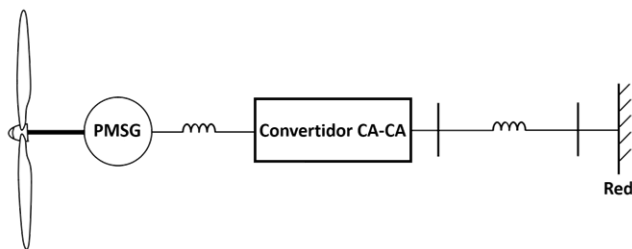


Fig. 3. Esquema propuesto del sistema de conversión de energía eólica.

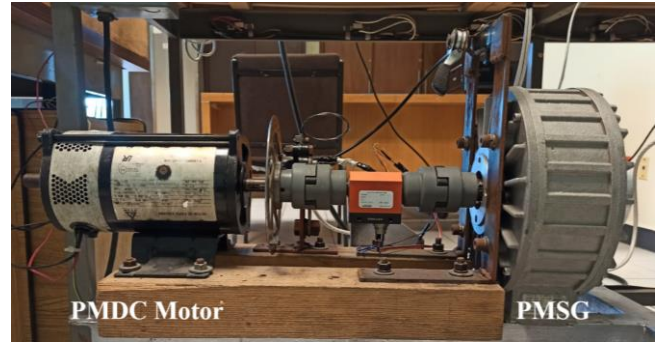


Fig. 4. Acoplamiento del motor-generator para emular la turbina eólica.

La emulación se consigue controlando la corriente de armadura ( $I_{arm}$ ) en el motor de CD. Para esto, se utiliza un convertidor CD-CD tipo Buck. El control se realiza mediante un microcontrolador C2000 de Texas Instruments, al que se carga el modelo matemático de la turbina eólica, y el control de corriente en el microcontrolador, usando la herramienta Matlab/Simulink, Fig. 5.

Para comprobar el funcionamiento del emulador, se realizó una prueba a una velocidad de viento de 6 m/s. Del lado generador se comenzó a variar la impedancia de carga, dando como resultado la Fig. 6, que es la curva típica velocidad-potencia de una turbina eólica.

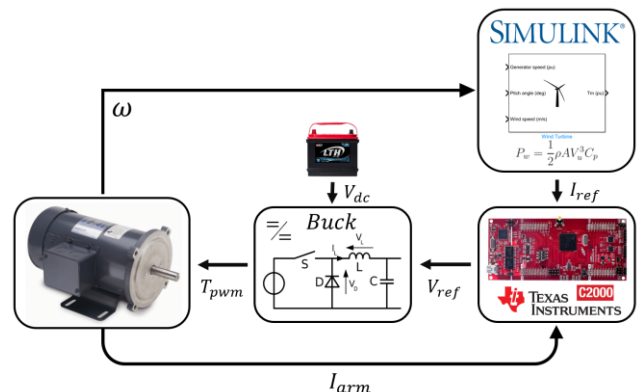


Fig. 5. Esquema de control para el emulador de turbina eólica.

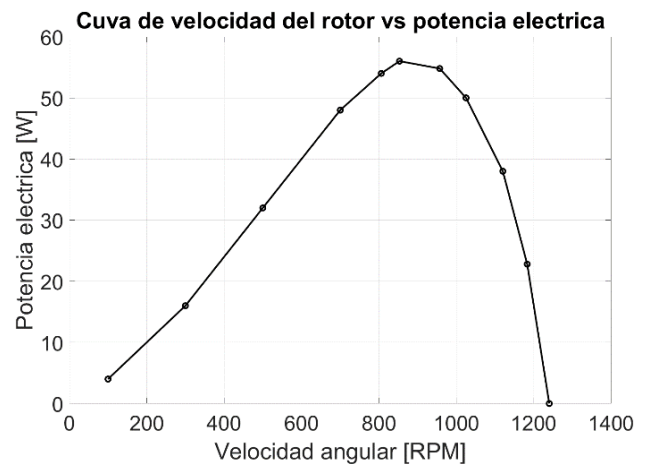


Fig. 6. Curva potencia-velocidad obtenida mediante el emulador de turbina eólica con una velocidad de viento de 6 m/s.

## B. CONVERTIDOR MATRICIAL DIRECTO

El prototipo del CMD se encuentra dividido en módulos, como se indica en la Fig. 7, lo que permite un fácil remplazo de componentes dañados. También, utilizar un convertidor dividido en módulos permite cambiar fácilmente la potencia del convertidor, ya que basta con cambiar el módulo de potencia.

Los módulos que forman el CMD se ilustran en la Fig. 8. El transistor utilizado para formar los IBD es el IRGS4620DPbF en configuración emisor común; el módulo de control es un microcontrolador de Texas Instruments, específicamente el LAUNCHXL-F28379D. Las mediciones de tensión y corriente se realizan mediante la caída de tensión en una resistencia, con el amplificador operacional aislado AMC1301. Para el módulo de disparo se utiliza el optoacoplador HCPL-3120.

En el módulo de control se implementa la técnica de modulación SVD, que simplifica los esquemas de control en máquinas rotatorias al contar con marcos de referencia giratorios en entrada y salida. Esto permite transferir la corriente, del lado generador al lado red, tanto de la potencia activa como de potencia reactiva [9].

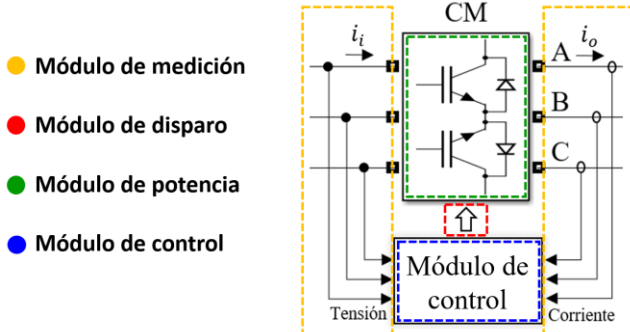


Fig. 7. Esquema del CMD dividido en módulos.

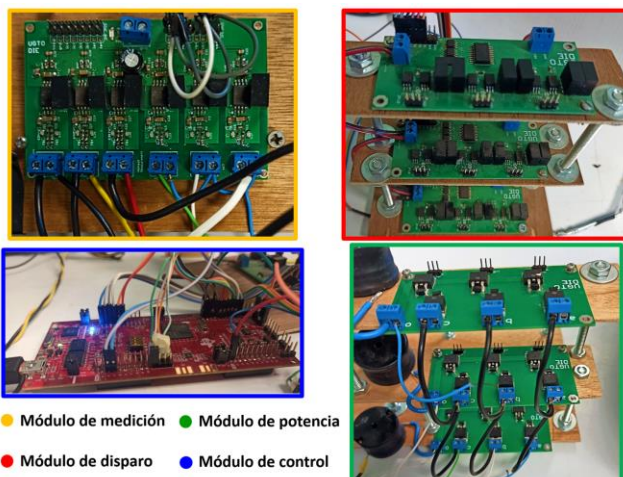


Fig. 8. Módulos del CMD.

## C. RED ELÉCTRICA

Para la red eléctrica se utiliza el módulo de LabVolt mod. 8821-22, Fig. 9.

## D. IMPLEMENTACIÓN DEL WECS EN LABORATORIO

Para la implementación en laboratorio del WECS se utilizó el emulador de turbina eólica, el CMD y la red eléctrica, descritos anteriormente, Fig. 10. La Fig. 11 despliega la tensión de red ( $V_{ab}$  en azul y  $V_{an}$  en morado), la tensión a la salida del CMD ( $V_{AB}$ , en amarillo), y la corriente que fluye entre el CMD y la de red ( $I_A$ , en verde). En la Fig. 11 a) se observa la tensión de red y la tensión a la salida del CMD antes de la sincronización (corriente cero y sin flujo de potencia). Mientras que, en la Fig. 11 b) la tensión de red y la tensión a la salida del CMD se encuentran sincronizadas, pero sin flujo de potencia (corriente cero). En Fig. 11 c) podemos observar que existe un flujo de potencia (corriente diferente de cero). Finalmente, en Fig. 11 d) se indican las mediciones de potencia entre la salida del CMD y la red eléctrica.



Fig. 9. Red eléctrica utilizada para la implementación del WECS.

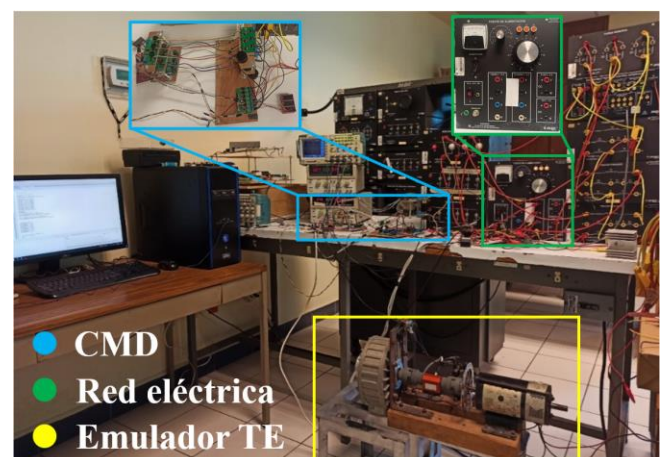
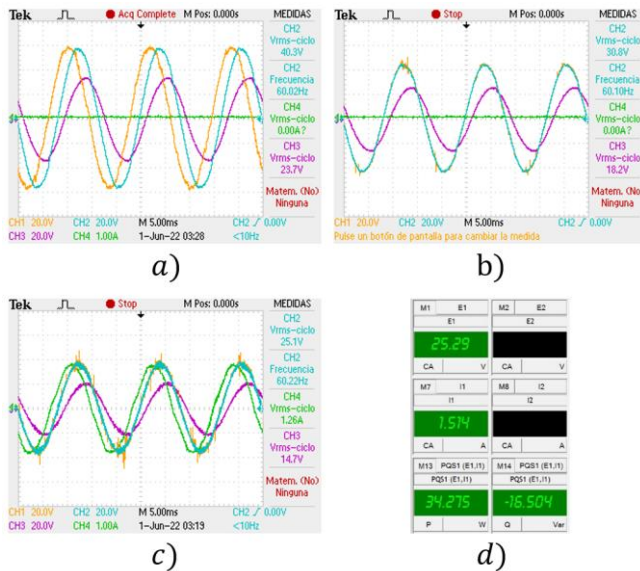


Fig. 10. Implementación de sistema de conversión de energía eólica en laboratorio.



**Fig. 11.** Sincronización y transferencia de potencia del WECS implementado, a) antes de la sincronización, b) sincronizado (sin transferencia de potencia), c) sincronizado (con transferencia de potencia) y d) medición de potencia transferida.

#### IV. CONCLUSIONES

La importancia de buscar estrategias de control para los esquemas de energías renovables es que permiten aprovechar de manera más eficiente y responsable la energía. Estas estrategias permiten aprovechar estos recursos de manera más sostenible, reduciendo los riesgos y los costos. También mejoran la eficiencia y la seguridad de los sistemas energéticos, haciéndolos más confiables para los consumidores. Además, pueden contribuir a reducir la contaminación y los costos de producción. Asimismo, tales estrategias pueden apoyar en la mejora de la calidad de vida de los usuarios, además de contribuir al desarrollo económico del entorno. Finalmente, también ayudan a mejorar la seguridad energética al permitir que un país dependa menos de los combustibles fósiles y aproveche al máximo las energías limpias.

En la tendencia actual de migrar a WECS de velocidad variable, los convertidores CA-CA resultan cruciales para adaptar la energía. Se enfatiza que el CMD no utiliza elementos almacenadores de energía en su topología, lo que permite reducir el volumen, peso y costo final del convertidor.

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de conversión de energía eólica en laboratorio. Se describe la implementación de un emulador de turbina eólica. Éste permite aproximar el comportamiento de una turbina eólica real para pruebas de laboratorio, permitiendo utilizar un perfil de velocidad de viento o velocidad constante. Asimismo, se estudia la implementación del CMD con la técnica de modulación SVD, y se muestra la capacidad del convertidor para gestionar en lazo abierto la transferencia de energía del generador a la red eléctrica.

Los resultados presentados corroboran que el CMD puede gestionar la transferencia de potencia entre el generador y la red eléctrica, validando su funcionamiento en aplicaciones de generación de energía eólica.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo para el desarrollo de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- [1] T. Friedli, J. W. Kolar, J. Rodriguez and P. W. Wheeler, "Comparative Evaluation of Three-Phase AC-AC Matrix Converter and Voltage DC-Link Back-to-Back Converter Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 12, pp. 4487-4510, Dec. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2179278.
- [2] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 2, pp. 276-288, April 2002, doi: 10.1109/41.993260.
- [3] L. Huber and D. Borjovic, "Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 6, pp. 1234-1246, Nov.-Dec. 1995, doi: 10.1109/28.475693.
- [4] H. Hojabri, H. Mokhtari and L. Chang, "A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 3, pp. 949-959, March 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2048836.
- [5] S. Mondal and D. Kasha, "Maximum Active and Reactive Power Capability of a Matrix Converter-Fed DFIG-Based Wind Energy Conversion System," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 3, pp. 1322-1333, Sept. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2697038.
- [6] S. Rajendran, U. Govindarajan and P. Sankar, "Active and reactive power regulation in grid connected wind energy systems with permanent magnet synchronous generator and matrix converter," IET Power Electronics, vol. 7, no. 3, pp. 591-603, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0058.
- [7] M. Alizadeh and S. Kojuri, "Modelling, control, and stability analysis of quasi-Z-source matrix converter as the grid interface of a PMSG-WECS," IET Generation Transmission & Distribution, vol. 11, no. 14, pp. 3576-3585, Sep. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0178.
- [8] R. Cardenas, R. Pena, G. Tobar, J. Clare, P. Wheeler and G. Asher, "Stability Analysis of a Wind Energy Conversion System Based on a Doubly Fed Induction Generator Fed by a Matrix Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 10, pp. 4194-4206, Oct. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2027923.
- [9] H. Hojabri, H. Mokhtari and L. Chang, "Reactive Power Control of Permanent-Magnet Synchronous Wind Generator With Matrix Converter," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 575-584, April 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2229721.
- [10] B. Babes, O. Aissa, N. Hamouda and I. Colak, "Model Based Predictive Direct Torque and Flux Control for Grid Synchronization of a PMSG Driven by a Direct Matrix Converter," 2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), 2022, pp. 208-213, doi: 10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848534.
- [11] A. Soyed, A. Kadri, O. Hassnaoui and F. Bacha, "Voltage Oriented Control of Indirect Matrix Converter Applied to Wind Energy Conversion System using PMSM Generator," 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2020, pp. 790-795, doi: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263781.

## BIOGRAFÍAS



**DIEGO A. J. GUTIÉRREZ TORRES** Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2019, y el título de Maestro en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2022. Actualmente cursa el programa de Doctorado en Ciencias del CINVESTAV Unidad Guadalajara. Su área de interés incluye convertidores de energía y máquinas eléctricas.



**JOSÉ M. LOZANO GARCÍA** Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2003, y el título de Maestro y Doctor en Ciencias por parte del CINVESTAV, Guadalajara, México, en 2006 y 2011, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen convertidores de energía, microrredes y redes inteligentes.



**JUAN M. RAMIREZ** Recibió el título de Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1992. Se incorporó al Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV, Guadalajara, México, en 1999, donde es actualmente profesor de tiempo completo. Sus intereses de investigación incluyen operación y control de redes eléctricas, optimización, smart-grids, y aplicaciones de electrónica de potencia.



**LUIS R. MERCHAN VILLALBA** Recibió el título de Ingeniero Electrónico por la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, en 2014, y el título de Maestro y Doctor en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, México, en 2016 y 2020, respectivamente. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus principales intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, estado estable y modelos dinámicos de dispositivos FACTS.