

Recibido 13 de septiembre de 2022. Aceptado 13 de diciembre de 2022. Publicado 30 de abril de 2023.

ISSN: 2448-7775

Implementación del Sistema de Control de Tiristores en Tiempo Real Basado en SOGI-PLL

GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA^{1*}, GUILLERMO TAPIA TINOCO², JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA¹, ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ¹, LUIS RAMON MERCHÁN VILLALBA¹.

¹Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

²Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Doctorado en Ingeniería Eléctrica.

*Autor de Correspondencia: ga.conejoacosta@ugto.mx

RESUMEN En este trabajo se presenta la implementación del sistema control de tiristores basado en el algoritmo de detección de fase del voltaje PLL-SOGI. Dicho sistema de control es desarrollado mediante un sistema basado en un microcontrolador C2000 de Texas Instruments el cual es programado desde Simulink. Además, se presenta un esquema de control en tiempo real para modificar el ángulo de disparo de los tiristores, desde una computadora a través de la comunicación serial con el microcontrolador.

PALABRAS CLAVE — Control en Tiempo Real, PLL, Tiristores.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de los sistemas eléctricos de potencia actuales opera una gran cantidad de sistemas basados en electrónica de potencia que tienen la capacidad de desarrollar diversas labores, entre ellas, la compensación de potencia en el sistema eléctrico [1], la conversión de energía para su uso final, la integración de fuentes renovables de energía, entre otros [2]. Dentro de estos sistemas se pueden encontrar soluciones basadas en transistores de potencia, diodos de potencia, tiristores, entre otros, donde parámetros como el nivel de potencia, voltaje y frecuencia de operación establecen que tecnología de semiconductores utilizar.

Al operar los sistemas electrónicos de potencia con la red eléctrica, es necesario que estos se encuentren siempre en sintonía con las características operativas de la red tales como magnitud de voltaje, frecuencia y fase, por lo cual, es necesario la implementación de sistemas que brinden esta capacidad de sincronización. Para este fin, se puede hacer uso de diversas técnicas, siendo la más común el uso del cruce por cero del voltaje como elemento de sincronización, lo cual puede resultar en un proceso con baja precisión y errores considerables [3], [4]. De este modo, la forma más apropiada para sincronizarse con la red eléctrica es a través de los sistemas de Phase-Locked Loop (PLL), quienes a partir de una señal oscilatoria obtienen su respectiva fase [5]. En particular, el PLL basado en integrador generalizado de segundo orden (SOGI-PLL) es comúnmente utilizado en aplicaciones monofásicas debido a su composición y adaptabilidad a la frecuencia [6].

Por esta razón en este trabajo se presenta la implementación de un sistema de control para el control de

disparo de tiristores, donde se hace uso de un algoritmo de sincronización con la red eléctrica basado en el SOGI-PLL. Este sistema de control se implementa en la tarjeta de desarrollo LAUNCHXL-728379D [7], basada en el micro controlador TMS320F28379D de Texas Instruments. Los algoritmos de control se implementarán en Simulink, y serán programados en la tarjeta mediante el paquete de software “Embedded Coder Support Package for TI C2000 - Hardware Support - MATLAB & Simulink” [8], que permite compilar los algoritmos de Simulink y programarlos en la tarjeta directamente. El sistema de control actúa sobre un conjunto de tiristores contenidos en un módulo de la marca Labvolt, el cual se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Electrónica de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Finalmente, una vez programada la tarjeta de control, se manipula en tiempo real el ángulo de control de disparo de los tiristores desde una computadora, la cual se comunica mediante el protocolo serial con el sistema de control para entregarle el ángulo que este debe considerar.

De esta forma, debido a la relevancia del sistema de control con una tarjeta de bajo costo se debe contemplar las amplias aplicaciones que se encuentran dentro del área donde se desarrolla la Ingeniería Eléctrica, tales como:

- Sistemas de Compensación de Voltaje o Potencia Reactiva.
- Control de los Componentes de Electrónica a nivel potencia.
- Conversión de energía

Entre otras aplicaciones. En este trabajo, se presenta la implementación del sistema de control de bajo costo que será utilizado para controlar componentes de potencia.

II. SOGI-PLL

El SOGI-PLL consiste en un bloque SOGI que genera dos señales en cuadratura a partir de la señal de entrada de voltaje [6]. Para implementar la función de sincronización, éstas señales en cuadratura se envían a un PLL basado en marcos de referencia, asegurando la precisión automática en situaciones de desviación de frecuencia, debido a que puede ser afectado por corrientes armónicas de segundo orden. Con el objetivo de asegurar la estabilidad y la implementación simple, diversos PLL han sido propuestos en la literatura; sin embargo, han presentado diversos inconvenientes, dando lugar a oportunidades de mejora [8]-[10]. A lo largo del presente trabajo se muestra la implementación de un nuevo SOGI cuyo objetivo es garantizar la estabilidad y la correcta respuesta ante posibles desviaciones de frecuencia.

A. MODELADO DE SOGI-PLL

El modelo del SOGI-PLL se muestra en la Fig. 1, donde Vg representa al voltaje de la señal eléctrica, ω_0 es la frecuencia nominal ($2\pi 60 \text{ rad/s}$), $\hat{\omega}$ y θ corresponden a la frecuencia estimada y ángulo de fase, respectivamente [10]. De acuerdo con la Fig. 1, la transformada de Park está definida como:

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

De acuerdo con la Fórmula Mason, las funciones de transferencia de las señales de alimentación $V\alpha$ y $V\beta$ se pueden definir como Ec. (2) y Ec. (3) [9].

$$G\alpha(s) = \frac{V\alpha(s)}{Vg(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (2)$$

$$G\beta(s) = \frac{V\beta(s)}{Vg(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3)$$

En las Ecs. (2) y (3), se observa que la variable k es el factor de ganancia del SOGI, $Vg = Vpsen(\omega t) = Vpsen(\theta)$ corresponde al voltaje de alimentación, ω and θ son la frecuencia y ángulo de fase, respectivamente [6], [11]. De esta manera, el modelo implementado se deriva bajo condiciones específicas: la frecuencia estimada es similar a la frecuencia real, por otro lado, el ángulo de fase estimado es similar al ángulo de fase real. Con el objetivo de considerar posibles señales de voltajes armónicos, la entrada Vq se puede implementar tal como se observa en la Fig. 2.

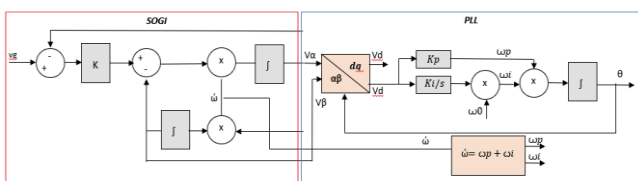


Fig. 1. Diagrama de bloque SOGI-PLL [10].

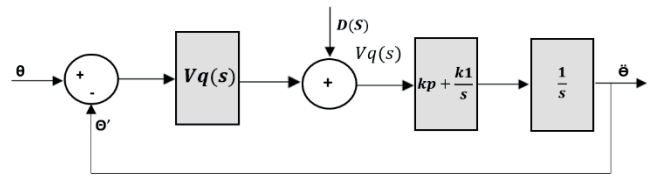


Fig. 2. Modelo de pequeña señal de SOGI-PLL [9].

Un conflicto estimado del SOGI-PLL incluye la sensibilidad a los componentes armónicos de bajo orden y la compensación de DC. Estas condiciones han sido arduamente analizadas, y derivado de esto se han implementado diversas estrategias que se encuentran disponibles en la literatura; sin embargo, a medida que aumenta la integración de redes eléctricas inteligentes, las cargas no lineales basadas en componentes electrónicos de potencia, las fuentes de energía renovables, entre otras, pueden afectar al desempeño de este elemento [9], [12].

B. MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL EN SIMULINK

La implementación del sistema de control se desarrolla mediante las herramientas de Simulink de acuerdo con lo ya mencionado, y se implementa utilizando el módulo de tiristores disponible en el Laboratorio de Electrónica de Potencia. El sistema de control en tiempo real se realiza a través de la comunicación serial entre una computadora y la tarjeta de Texas Instruments C2000.

En la Fig. 3 se presentan los algoritmos programados en la tarjeta. En ésta, se recibe el dato del ángulo de control que proviene de la computadora, además de realizar la medición del voltaje de entrada mediante una tarjeta de adquisición de datos. A partir de la señal de voltaje se obtiene el ángulo de fase utilizando el algoritmo SOGI-PLL, y tomando este valor como referencia, es posible generar los disparos para los tiristores empleando el ángulo de control.

En la Fig. 4 se observa el algoritmo del SOGI-PLL implementado en Simulink, donde se tiene como entrada la medición del voltaje y como salida el ángulo ωt de dicha señal.

Para la generación del ángulo de control en la computadora se considera el algoritmo presentado en la Fig. 5, donde se envía el dato del ángulo mediante comunicación serie. Para no recargar computacionalmente el equipo, previo al envío de un dato este se compara con el dato precedente para ver si son iguales, en cuyo caso simplemente no se envía nada, esperando hasta que ocurra un cambio en el ángulo a enviar. Esto favorece el que la computadora pueda operar en tiempo real al momento de enviar los datos.

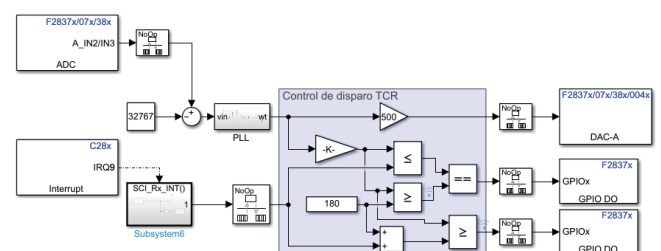


Fig. 3. Algoritmo de comunicación serial con la tarjeta C2000.

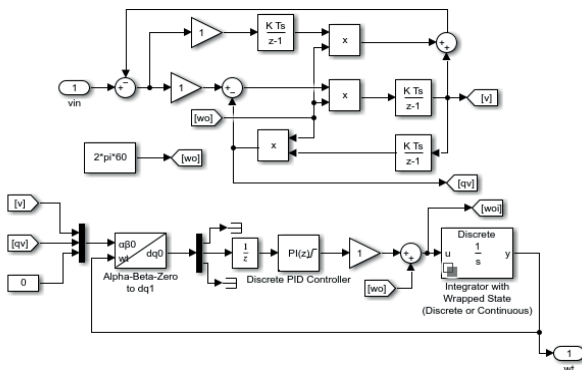


Fig. 4. Algoritmo del SOGI-PLL implementado en Simulink.

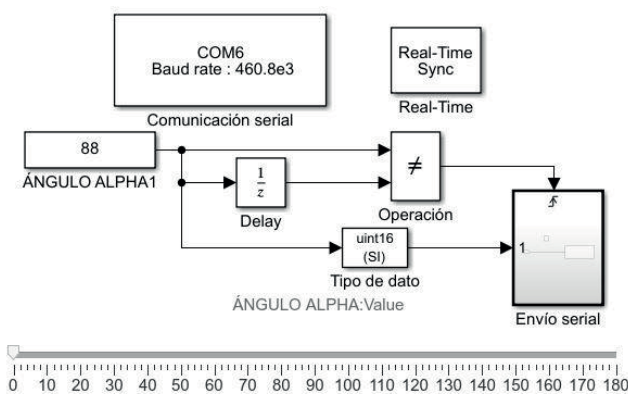


Fig. 5. Algoritmo de control en Simulink.

C. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

En el interior del Laboratorio de Electrónica de Potencia se cuenta con el módulo de tiristores de la empresa LabVolt, así como con módulos de elementos pasivos. El módulo de tiristores integra un sistema de activación en el cual se pueden ingresar señales externas para el control de disparo. El control del ángulo de disparo del tiristor se realiza a través de la comunicación serial ya mencionada anteriormente. En la Fig. 6 se muestra detalladamente el esquema de control de disparo, donde se tiene que la computadora envía a la tarjeta de control el ángulo requerido, y ésta genera los pulsos de disparo para los tiristores. Estas señales son llevadas a los interruptores a través de una etapa de aislamiento basada en los circuitos integrados ISO-7221.

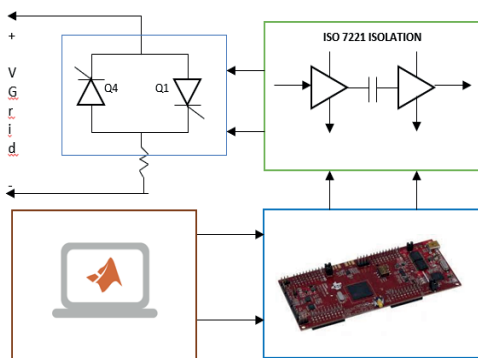


Fig. 6. Diagrama del algoritmo implementado en el sistema de control.

III. RESULTADOS

Con el objetivo de validar el modelo del sistema de control desarrollado, se realizan múltiples pruebas en los módulos de tiristores del Laboratorio, efectuando mediciones del voltaje de alimentación $v(t)$ y mediciones de las señales de corriente, en donde pueden identificarse los instantes en que se disparan los tiristores. Como parte del sistema de prueba se contemplan los siguientes elementos disponibles en módulos de LabVolt:

- Reactores: $170[\Omega]$ $120[V]$ $60[Hz]$.
- Resistencias: $170[\Omega]$ $120[V]$ $60[Hz]$.

Inicialmente, se registran señales considerando la medición realizada en la fase a de la red de alimentación. En la Fig. 7 se puede identificar el resultado del SOGI-PLL, verificando la similitud y la validación de la función del PLL, donde se observa que se detecta correctamente el argumento de la señal del voltaje de alimentación. Además del argumento, se registraron algunas señales de corriente con el fin de validar la precisión del sistema de control a través de los ángulos de disparo.

De este modo, para la realización de las pruebas, se considera un tiristor con carga resistiva (R). Posteriormente, la misma prueba se contempla con carga resistiva-inductiva (RL). De esta forma, para ambos casos se obtienen como resultados las figuras Fig. 8 y Fig. 9, para los casos de cargas R y RL, respectivamente.

En la Fig. 8 se ilustra el control del tiristor a través de una carga resistiva, identificando componentes armónicas en las señales de voltaje.

Los disparos de tiristores con carga RL (Ver Fig. 9) presenta buena respuesta a la variación del ángulo mediante la comunicación serial.

En estas gráficas se permite identificar el correcto funcionamiento del sistema de control. Por otro lado, cabe destacar que se implementaron estrategias computacionales con el objetivo de mejorar el rendimiento del procesador de la computadora de control, logrando así, beneficiar la operación del sistema de control ante la presencia de un pulso que va directo a los módulos del tiristor.

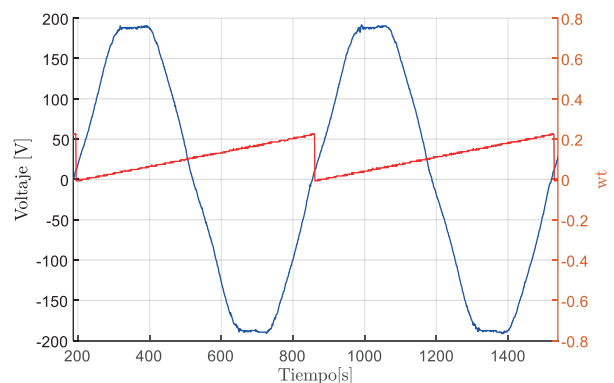


Fig. 7. SOGI-PLL con la señal eléctrica de voltaje.

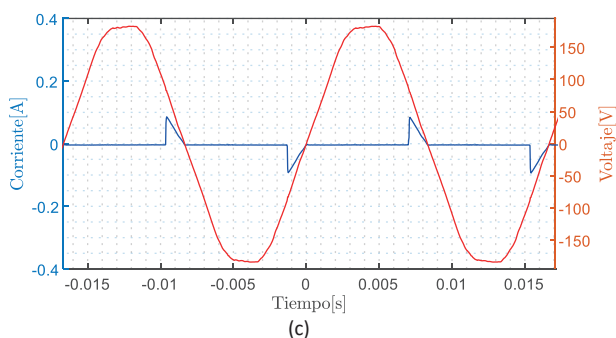
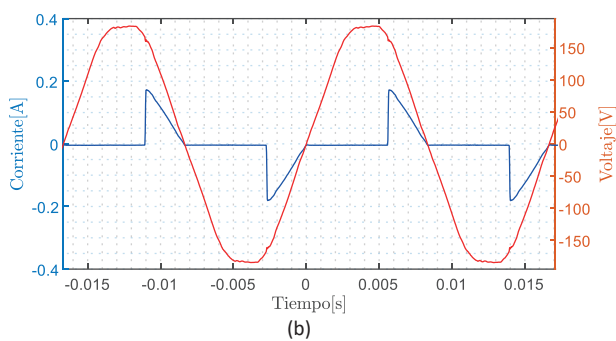
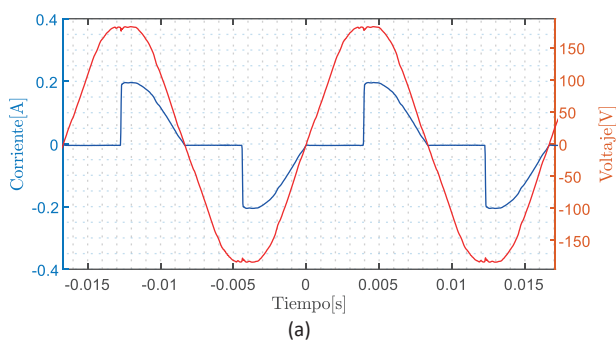


Fig. 8. Disparos de tiristor con carga resistiva (R). (a) Disparo con ángulo $\alpha=90^\circ$; (b) Disparo con ángulo $\alpha=120^\circ$; (c) Disparo con ángulo $\alpha=150^\circ$.

Finalmente, en la Fig. 10 se presenta el experimento implementado en el Laboratorio de Electrónica de Potencia.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la implementación de un sistema de control en tiempo real para tiristores, mediante una placa de desarrollo de bajo costo. El sistema experimental implementado comprende el módulo de tiristores de la marca LabVolt disponible en el laboratorio de Electrónica de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Primeramente, se evaluó la implementación del SOGI-PLL en la tarjeta de control C2000 de TI, verificando su correcta operación mediante pruebas experimentales. A continuación, se realizaron varias pruebas para validar el sistema de control de disparo para los tiristores desarrollado, a partir de las cuales se identificó una adecuada correspondencia en las acciones de control y las señales obtenidas. En las gráficas además se observa un comportamiento de distorsión armónica en la señal de voltaje, aunque dicho fenómeno se atribuye a los parámetros de la red eléctrica.

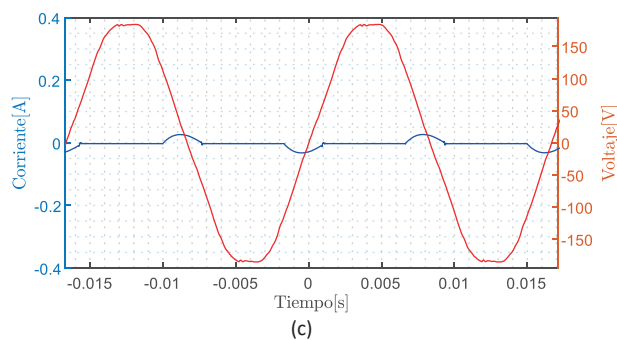
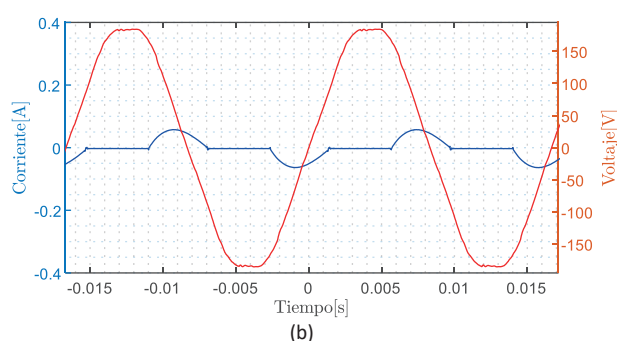
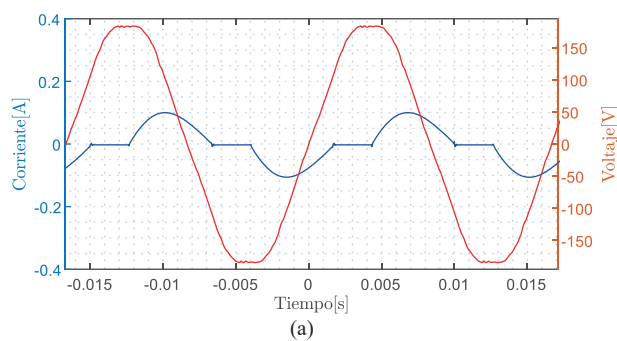


Fig. 9. Disparos de tiristor con carga RL. (a) Disparo con ángulo $\alpha=90^\circ$; (b) Disparo con ángulo $\alpha=120^\circ$; (c) Disparo con ángulo $\alpha=150^\circ$.

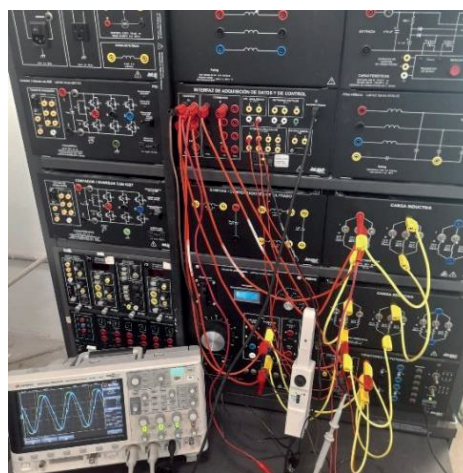


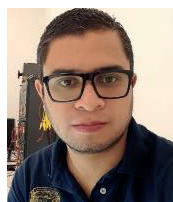
Fig. 10. Fotografía del experimento implementado.

Por lo tanto, es posible concluir que los resultados experimentales obtenidos son de buena calidad y se encuentran en concordancia con el principio de operación de los dispositivos de potencia involucrados en el sistema de prueba.

REFERENCIAS

- [1] N. G. Hingorani, "High Power Electronics and flexible AC Transmission System," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 8, no. 7, pp. 3–4, Jul. 1988.
- [2] A. Ghosh and L. Gerard, "Applications of Power Electronics to Power Distribution Systems - A tutorial," in *IEEE PES General Meeting*, 2005.
- [3] L. Stastny, R. Mego, L. Franek, and Z. Bradac, "Zero Cross Detection Using Phase Locked Loop," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 25, pp. 294–298, 2016.
- [4] D. Nedeljkovic, V. Ambrozic, J. Nastran, and D. Hudnik, "Synchronization to the network without voltage zero-cross detection," *Proc. Mediterr. Electrotech. Conf. - MELECON*, vol. 2, pp. 1228–1232, 1998.
- [5] D. Jovcic, "Phase locked loop system for FACTS," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1116–1124, Aug. 2003.
- [6] J. Xu, H. Qian, Y. Hu, S. Bian, and S. Xie, "Overview of SOGI-Based Single-Phase Phase-Locked Loops for Grid Synchronization under Complex Grid Conditions," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 39275–39291, 2021.
- [7] "LAUNCHXL-F28379D Development kit | TI.com." [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>. [Accessed: 17-Mar-2022].
- [8] "Embedded Coder Support Package for TI C2000 - Hardware Support - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000-embedded-coder.html>. [Accessed: 17-Feb-2022].
- [9] M. Xie, H. Wen, C. Zhu, and Y. Yang, "DC Offset Rejection Improvement in Single-Phase SOGI-PLL Algorithms: Methods Review and Experimental Evaluation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12810–12819, 2017.
- [10] F. Xiao, L. Dong, L. Li, and X. Liao, "A Frequency-Fixed SOGI-Based PLL for Single-Phase Grid-Connected Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1713–1719, 2017.
- [11] K. Liu, X. Xu, M. Chen, B. Liu, L. Wu, and V. C. S. Lee, "A Hierarchical architecture for the future internet of vehicles," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 7, pp. 41–47, 2019.
- [12] S. Kalkoul, H. Benalla, K. Nabti, and A. Reama, "Comparison among Single-phase PLLs Based on SOGI," *Proc. - 2020 6th Int. Conf. Electr. Power Energy Convers. Syst. EPECS 2020*, pp. 118–122, Oct. 2020.

BIOGRAFÍAS



GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA Egresado de la Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca. Su área de interés incluye Electrónica de Potencia y la Calidad de la Energía.



GUILLERMO TAPIA TINOCO Nació en la ciudad de Zamora, Michoacán, el 16 de abril de 1982. Realizó estudios de Licenciatura y Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, obteniendo el grado en 2006 y 2008, respectivamente. Realizó estudios de Doctorado en la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, obteniendo el grado de Doctor en septiembre del 2022. Su área de interés es la aplicación de algoritmos inteligentes aplicados a dispositivos

compensadores en redes inteligentes.



ALEJANDRO PIZANO MARTÍNEZ Recibió el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la Universidad de Colima, Colima, México, en el 2001; y el grado de Maestro en Ingeniería y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, en 2004 y 2010, respectivamente. Actualmente es Profesor de tiempo completo en la Universidad de Guanajuato. Sus

intereses de investigación versan en tópicos de redes eléctricas modernas.



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.



LUIS RAMON MERCHAN VILLALBA Realizó sus estudios de pregrado en la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga, Colombia, obteniendo el título de Ingeniero Electrónico en 2013. En 2015 obtiene su título de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, mismo lugar donde en el año 2020 obtiene su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Sus intereses de investigación incluyen electrónica de potencia, implementación de sistemas electrónicos analógicos-digitales, sistemas eléctricos inteligentes, micro redes, dispositivos FACTS, entre otros.