

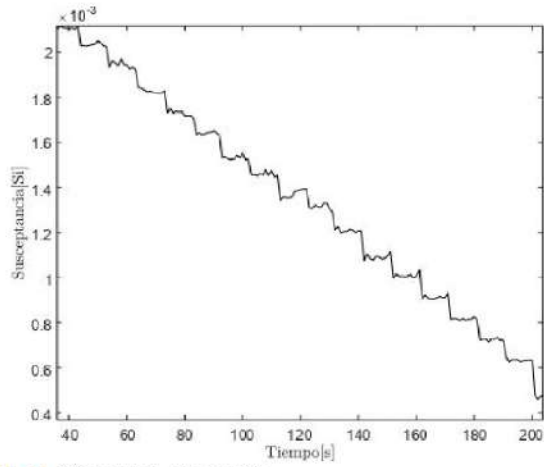


Fig. 12. SVC operando sólo con TCR.

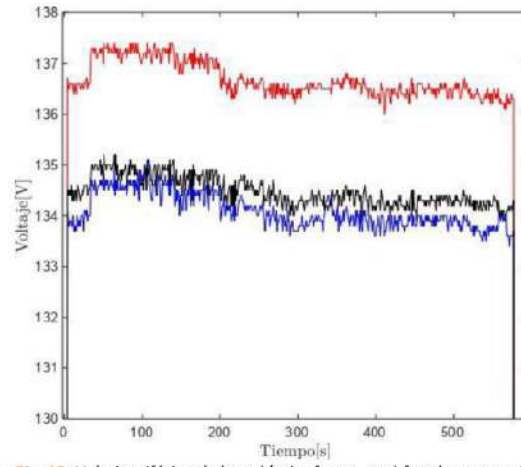


Fig. 15. Voltaje trifásico de la red (roja- fase a, azul- fase b y negro- fase c).

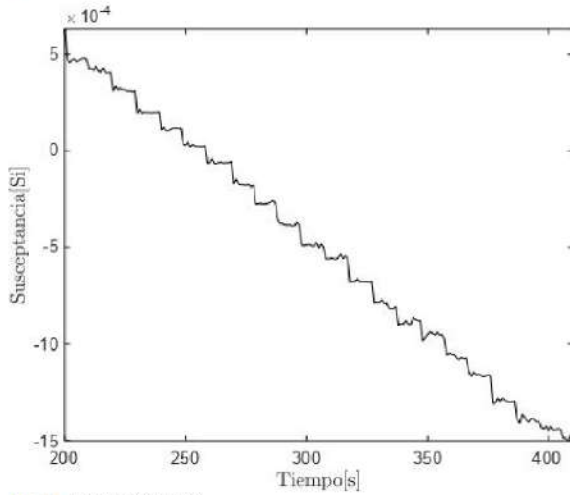


Fig. 13. Caso 2. TCR + TSC.

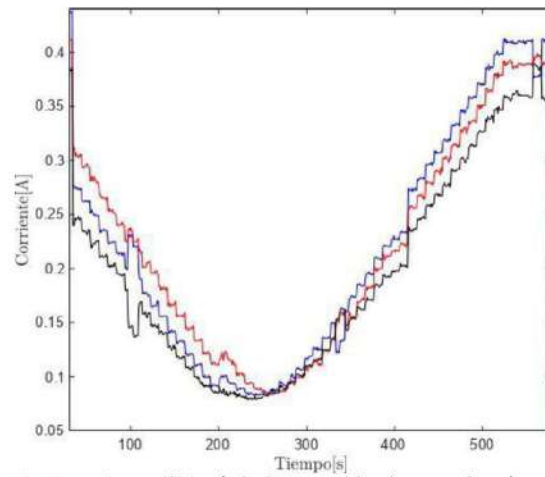


Fig. 16. Corriente trifásica, (roja- fase a, azul- fase b y negro- fase c).

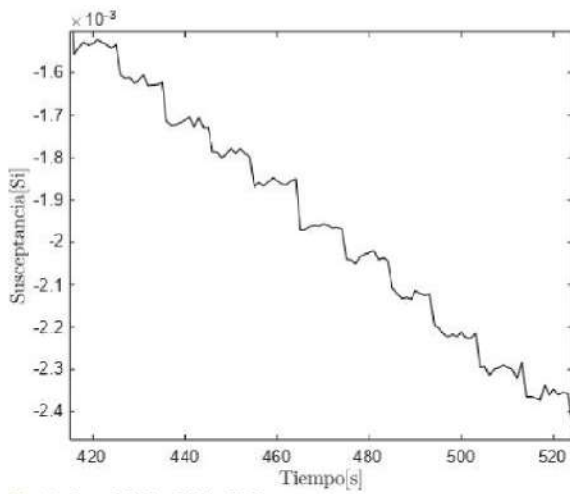


Fig. 14. Caso 3. TCR + TSC1 + TSC2.

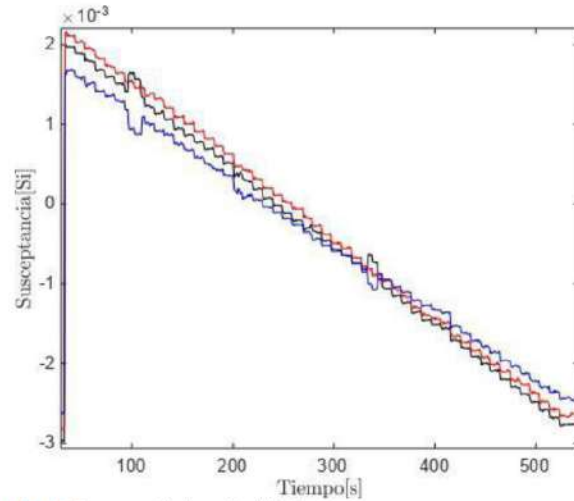


Fig. 17. Susceptancia obtenida del SVC.

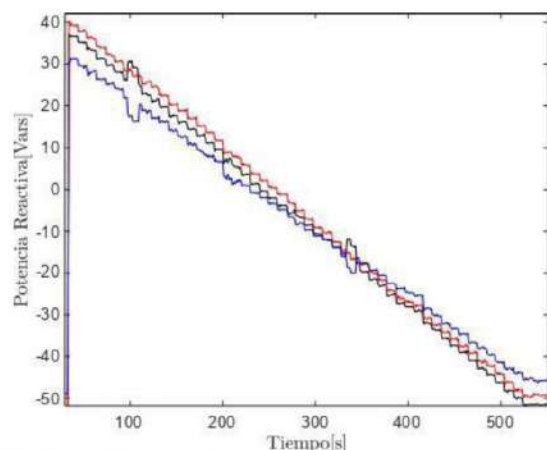


Fig. 18. Potencia reactiva obtenida del SVC.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la implementación del sistema de control de un SVC mediante una placa de desarrollo de bajo costo (aproximadamente \$47 USA). Primeramente, se evaluó el SOGI-PLL en la tarjeta, verificando su correcto funcionamiento para la sincronización con el voltaje de la red eléctrica. Por otro lado, a partir de la implementación experimental del sistema SVC se obtuvieron señales de potencia reactiva y susceptancia como parámetros fundamentales, las cuales presentan condiciones no ideales a partir de valores de voltaje superior al normativo y presencia de distorsión armónica de la red eléctrica. Sin embargo, existe la posibilidad de que las componentes de los módulos de LabVolt porten algún error en sus valores debido a la tolerancia de sus componentes. Adicionalmente, es importante destacar que la carga computacional del sistema de control puede afectar las condiciones de intercambio de datos debido a los algoritmos implementados en el equipo de cómputo.

Los resultados experimentales se consideran adecuados, pues describen el fundamento del principio de operación del SVC. La implementación del sistema de control se presenta como la apertura de una notable continuidad al estudio de control de los dispositivos FACTS, mediante tarjetas de programación de bajo costo, con el fin de abastecer las múltiples problemáticas del sistema eléctrico, siendo este trabajo un punto de partida.

REFERENCIAS

- [1] COMISIÓN REGULADORA DE ENERGÍA, "Resolución Código de Red, Diario Oficial de la Federación," 2021. Accessed: Nov. 30, 2022. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5432507&fecha=08/04/2016
- [2] SENER, "VIII. PROGRAMA DE AMPLIACIÓN Y MODERNIZACIÓN DE LA RED NACIONAL DE TRANSMISIÓN Y LAS REDES GENERALES DE DISTRIBUCIÓN DEL MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA (PAMRNT) VIII.1 Objetivo de los Proyectos de Ampliación y Modernización," pp. 9–11, 2019, Accessed: Nov. 15, 2022. [Online]. Available:

<https://www.cfe.mx/distribucion/cumplimiento/Documents/PAM%20de%20las%20RGD%202018-2032.pdf>

- [3] R. García-Rochin, J. C. Mayo-Maldonado, J. C. Rosas-Caro, and J. E. Valdez-Resendiz, "Implementation and Control of an Industrial Static VAr Compensator," *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Cholula, Puebla, Mexico, pp. 37–43, Jul. 2018, doi: 10.1109/CIEP.2018.8573350.
- [4] R. M. Mathur and R. K. Varma, *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. IEEE, 2002.
- [5] Texas Instruments, *LAUNCHXL-F28379D Overview User's Guide LAUNCHXL-F28379D Overview*. Dallas, 2016. [Online]. Available: www.ti.com
- [6] Kenneth W. Schachter, "Accelerators: Enhancing the Capabilities of the C2000 TM MCU Family," Dallas, Texas, 2016.
- [7] M. Bhardwaj, "Application Report Software Phase Locked Loop Design Using C2000TM Microcontrollers for Single Phase Grid Connected Inverter," 2013. [Online]. Available: www.ti.com
- [8] Kenneth W. Schachter, "Accelerators: Enhancing the Capabilities of the C2000 TM MCU Family," Dallas, Texas, 2016.
- [9] David Nedeljković, Vanja Ambrož, Janko Nastran, and Dušan Hudnik, "Synchronization to the network without voltage zero-cross detection," 1998.
- [10] D. Jovic, "Phase locked loop system for FACTS," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1116–1124, Aug. 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.814885.
- [11] 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, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2606623.
- [12] N. G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press, 2000.
- [13] D. Jovic, "Phase locked loop system for FACTS," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1116–1124, Aug. 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2003.814885.

BIOGRAFÍAS



GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA. Recibió el título de Ingeniero Electricista por la Universidad de Guanajuato. Actualmente, realiza sus estudios de Maestría en Ciencias en el Instituto Tecnológico de Morelia (PGIIE). Sus áreas de interés incluyen los Mercados Energéticos, microrredes y redes inteligentes.



LUIS RAMÓN 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.



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.

Recibido 16 de agosto de 2023. Aceptado 15 de febrero de 2024. Publicado 31 de mayo de 2024.

ISSN: 2448-7775

Modelado e Implementación del Sistema de Control del Prototipo Experimental de un SVC

GABRIEL ALDAIR CONEJO ACOSTA^{1*}, JOSÉ MERCED LOZANO GARCÍA², LUIS RAMÓN MERCHAN VILLALBA².¹ Maestría en Ciencias, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México.² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, México.

*Autor de Correspondencia: ga.conejoacosta@outlook.com

RESUMEN En este trabajo, se presenta la implementación de un sistema de control para un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés), que está compuesto por un Reactor Controlado por Tiristores (TCR) y dos Capacitores Conmutados por Tiristores (TSC). Este SVC es el mismo que se encuentra disponible en el laboratorio de Electrónica de Potencia de la Universidad de Guanajuato. El sistema de control se desarrolla utilizando el microcontrolador.

PALABRAS CLAVE— Tiristores, Simulink, Microcontrolador, SVC.

I. INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica se percibe hoy en día como una herramienta básica de uso cotidiano. Desde su generación, transmisión, distribución hasta el usuario final. El suministro de energía eléctrica representa un proceso esencial para el desarrollo de la sociedad actual, implicando de tal forma, una importante responsiva para garantizar calidad, confiabilidad, continuidad y seguridad al usuario [1], [2].

Dentro de los sistemas eléctricos operan una gran cantidad de sistemas basados en electrónica de potencia que tienen la capacidad de realizar diversas labores, entre ellas, la compensación de potencia reactiva, y la conversión de energía, entre otras aplicaciones.

Las Tecnologías de Sistemas de Transmisión Flexible (FACTS) se han convertido en una novedosa herramienta que garantiza el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y modifica parámetros de la red eléctrica mediante componentes de potencia, con el fin de abordar los nuevos desafíos operativos de la red eléctrica. Mediante estas tecnologías se pueden obtener beneficios como mejorar los niveles de voltaje, aumentar las capacidades de las líneas de transmisión, garantizar la estabilidad de la red, entre otras. Dentro de la familia de los dispositivos FACTS, se encuentra el Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC, por sus siglas en inglés), la cuál es una topología ampliamente utilizada en la industria eléctrica que está basada en el control de tiristores [3]. Los sistemas SVC se caracterizan por tener una notable madurez tecnológica, debido a que su elemento principal de control es el tiristor, siendo este, el elemento de potencia con mayor aplicación. Además, el SVC es capaz de operar en niveles de media tensión con el objetivo de mejorar la calidad de la energía ante la entrada y salida de cargas inductivas, mejorando los niveles de parpadeo de voltaje (flicker) [4]. Por su parte, en niveles de transmisión, es capaz

de implementar un estricto control de compensación de tensión en la red de CA, así como una mayor estabilidad en los transitorios; esto debido a la capacidad de los SVC para actuar de manera eficiente ante las variaciones de carga.

Al operar los tiristores como elementos de control del SVC, es fundamental que estos se encuentren en sincronización con las características operativas de la red eléctrica. No obstante, es necesario implementar técnicas de sincronismo, siendo la más común la técnica de cruce por cero del voltaje, lo cual resulta una herramienta de precisión insuficiente [9]. Siendo los sistemas Circuito de Seguimiento de Fase (PLL, por sus siglas en inglés), el algoritmo más apropiado para sincronizarse con la red eléctrica. En particular, el PLL basado en el integrador generalizado de segundo orden (SOGI-PLL) [10], [11] es comúnmente utilizado debido a su composición y adaptabilidad a la fase y frecuencia después del fenómeno de perturbación de la red eléctrica. De esta forma, debido a la relevancia del SVC en la operación del sistema eléctrico, se deben considerar las amplias aplicaciones que se encuentran dentro del área de ingeniería eléctrica. En este trabajo se presenta el modelado e implementación del sistema de control de un SVC, que corresponde al equipo de laboratorio LabVolt del laboratorio de Electrónica de Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato. Dicho equipo está conformado por dos módulos de Capacitores Conmutados por Tiristores (TSCs) y un Reactor Controlado por Tiristor (TCR).

Este sistema de control se desarrolla mediante la tarjeta LAUNCHXL-728379D, basado en el microcontrolador TMS320F28379D de la empresa Texas Instruments, que es un microcontrolador que incorpora aceleradores de hardware para la implementación de algoritmos matemáticos, bajo una plataforma de desarrollo de bajo costo [5]. Los algoritmos de control se implementan en Simulink, y serán programados en

la tarjeta mediante el paquete de software “Embedded Coder. Support Package for TI C2000- Hardware Support-MATLAB & Simulink” [6], [7], el cual permite interpretar algoritmos matemáticos y programarlos en la tarjeta directamente. La implementación del sistema de control es mediante los módulos de LabVolt disponibles en el laboratorio de Electrónica de Potencia. Posteriormente, se manipulan las variables del SVC en tiempo real mediante el protocolo serial de comunicación [8].

II. MODELADO DEL SVC

El SVC tiene como principal objetivo compensar potencia reactiva, para lo cual opera como susceptancia variable, que puede oscilar entre valores positivos y negativos, de esta forma, adquiere la capacidad de trabajar como un inductor o un capacitor. Dentro de las componentes de dicho sistema, comúnmente se puede encontrar el Reactor Controlado por Tiristores (TCR) y el Capacitor Conmutado por Tiristores (TSC). A continuación, se muestra el modelado de dichas componentes.

A. MODELADO DEL TCR

El Reactor Controlado por Tiristores (TCR), es un elemento que está compuesto por un inductor fijo, y un arreglo de tiristores en antiparalelo, tal como se muestra en la Fig. 1a. La corriente en el inductor es controlada mediante el ángulo de disparo en los tiristores, el cual se establece en función de la señal de voltaje aplicada al TCR [12], tal como se muestra en la Fig. 1b. De esta manera, para una conducción cero, el ángulo $\alpha=90^\circ$, por el contrario, la máxima conducción será cuando el ángulo de disparo $\alpha=0^\circ$. Concluyendo que entre los valores de α entre 0° y 90° se tendrá la posibilidad de controlar la corriente [4], respectivamente. La magnitud de la componente fundamental de la corriente se expresa a través de la Ec. (1), donde V es la magnitud de voltaje de alimentación, L es la inductancia y ω es la frecuencia angular [12].

$$I_L(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (1)$$

El TCR puede controlar continuamente la componente fundamental de la corriente desde cero hasta el valor máximo de manera similar a la variable de admitancia variable. La relación entre voltaje y corriente del TCR se obtiene la susceptancia del mismo, el cual se muestra en la Ec. 2 [12].

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (2)$$

A partir de la Ec. (2), se deduce que cuando $\alpha=0^\circ$ se tiene el mayor valor de susceptancia, por el contrario, el valor mínimo es cuando $\alpha=90^\circ$. En la Fig. 2 se muestra la variación de susceptancia en función del ángulo de disparo [12].

B. MODELADO DEL TSC

El Capacitor Conmutado por Tiristores, está compuesto por un capacitor fijo y un arreglo en antiparalelo de tiristores, en este elemento, el arreglo de tiristores funge como interruptores, (ver Fig. 3).

En la operación del TSC suelen presentarse disturbios de corriente debido a la variación de voltaje, las cuales surgen en la conmutación (on/off) cuando existe disparidad entre el voltaje de entrada y el del capacitor [4], [12].

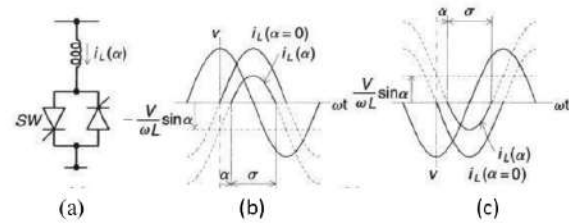


Fig. 1. Reactor controlado por Tiristores (a) TCR, (b) señal de control del semiciclo positivo, (c) señal de control del semiciclo negativo.

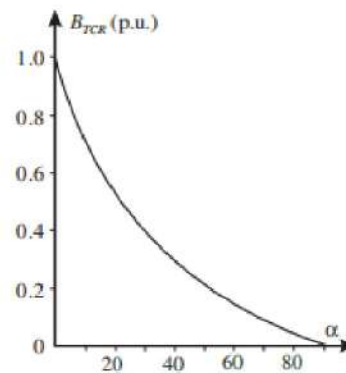


Fig. 2. Susceptancia en por unidad en función de ángulo α .

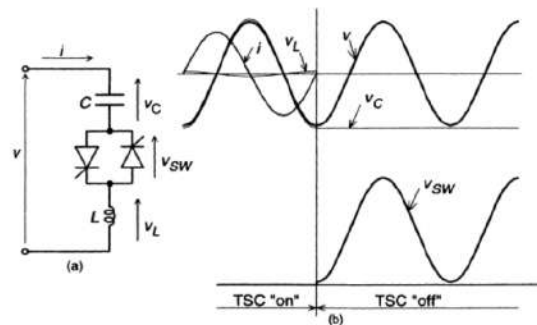


Fig. 3. Capacitor Conmutado por Tiristores.

III. ALGORITMOS DE SINCRONIZACIÓN

Muchos dispositivos de electrónica de potencia requieren ser sincronizados a la red eléctrica dentro de su esquema de operación. Entre ellos el TCR requiere ser sincronizado con la red eléctrica con el objetivo de generar el ángulo de disparo. Por otra parte, el TSC requiere de criterios específicos tales como garantizar que el voltaje de la red eléctrica es el mismo que el voltaje del capacitor. A lo largo del presente trabajo se muestra la implementación de un Integrador Generalizado de Segundo Orden (SOGI-PLL), como técnica de sincronización, cuyo objetivo es garantizar la estabilidad y la correcta respuesta ante posibles desviaciones de frecuencia [13].

A. INTEGRADOR GENERALIZADO DE SEGUNDO ORDEN (SOGI-PLL)

El modelo del SOGI-PLL se muestra en la Fig. 4, donde V_g representa al voltaje de la señal eléctrica, ω_0 es la frecuencia nominal ($2\pi 60$ rad/s), $\hat{\omega}$ y θ corresponden a la frecuencia estimada y ángulo de fase, respectivamente [11].

B. MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control consta de cuatro etapas: Medición de voltaje, procesamiento, envío de dato desde la PC y salidas digitales, tal como se muestra en el esquema de la Fig. 5. En particular la primera etapa corresponde a la medición de voltaje de la red eléctrica con el fin de desarrollar el control del TCR de los módulos de LabVolt. Por su parte, el envío de dato desde la PC corresponde a la susceptancia requerida; dicho dato, es enviado desde el procesamiento, con el objetivo de habilitar el trabajo del sistema de control mediante algoritmos y condiciones establecidas. Finalmente, las etapas de salidas digitales reciben las señales de control y de conmutación para los TSC.

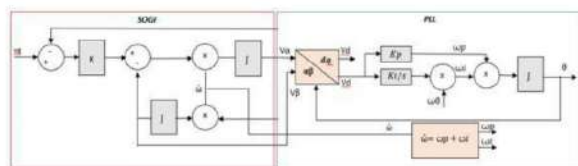


Fig. 4. Diagrama del bloque SOGI-PLL.

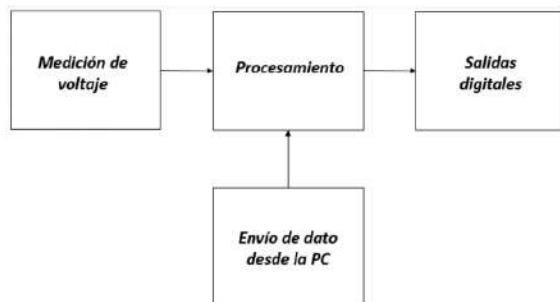


Fig. 5. Etapas del sistema de control.

C. MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL EN SIMULINK

La implementación del sistema de control se desarrolla mediante las herramientas disponibles en Simulink, y se implementa utilizando el módulo de tiristores disponible en el Laboratorio de Electrónica de Potencia. El sistema de control se realiza mediante comunicación serial entre una computadora y la tarjeta C2000™ de Texas Instruments. En la Fig. 6, se presentan los algoritmos programados en la tarjeta. En esta tarjeta, se recibe el dato del ángulo de disparo del TCR y el dato de conmutación de los TSC. A partir de la señal de voltaje se obtiene el ángulo de fase utilizando el algoritmo de SOGI-PLL.

En la Fig. 7, se observa el algoritmo del SOGI-PLL implementado en Simulink, donde se tiene como entrada la medición de voltaje de la red eléctrica y como salida ωt de la señal. La implementación del circuito SOGI-PLL se ejecuta de acuerdo con el esquema mostrado en la Fig. 5.

El valor del ángulo α y la activación de los TSCs se obtiene del valor deseado de susceptancia del SVC, la cual viene desde el microcontrolador proveniente de la comunicación con la computadora mediante el protocolo UART. Los algoritmos, se muestra en la Fig. 8.

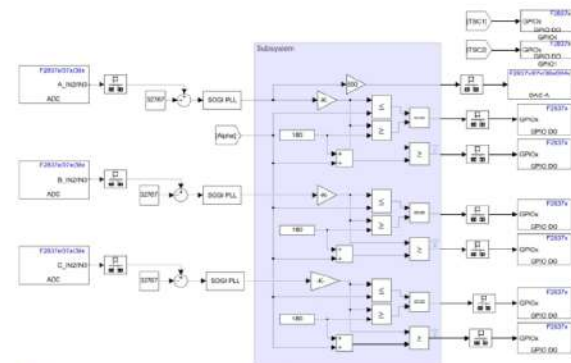


Fig. 6. Algoritmos de control en Simulink.

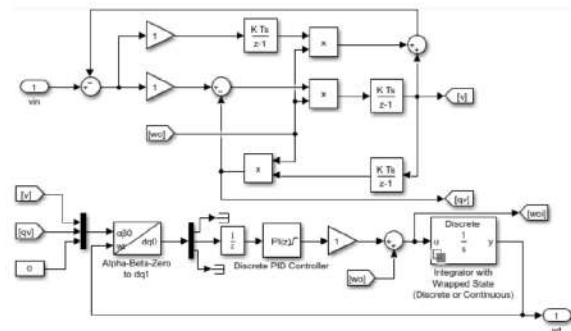


Fig. 7. Implementación del SOGI-PLL en Simulink.

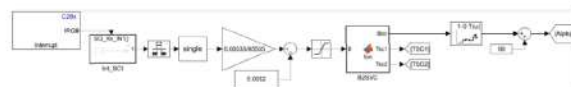


Fig. 8. Sistema de Control de los elementos del SVC.

Para la generación de la susceptancia requerida se considera el algoritmo presentado en la Fig. 9, donde se envía el dato de la susceptancia mediante la comunicación serie.

D. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL EN EL LABORATORIO DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

En el interior del Laboratorio de Electrónica de Potencia se cuenta con el módulo de SVC de la empresa LabVolt, así como elementos pasivos. En la Fig. 10, se ilustra el esquema de envío de señales. Estas señales son dirigidas a los interruptores a través de una etapa de aislamiento basada en los circuitos integrados ISO-7221. En la Fig. 11, se muestra el esquema de conexión del SVC en los módulos LabVolt.

IV. RESULTADOS

Con el objetivo de validar el modelo del sistema de control, se efectuó su implementación con el SVC real disponible en el Laboratorio de Electrónica de Potencia, efectuando mediciones de las señales eléctricas resultantes. Los parámetros del sistema son los siguientes:

- ✓ Reactores: 465 [Ω], 120 [V], 60[Hz].
- ✓ Capacitores: 600[Ω], 120 [V], 60[Hz].
- ✓ Transformadores: V_p 208[V] V_{sec} 208-120[V] 250[VA] a 1.2[A].

La medición de las señales eléctricas se hace digitalmente mediante un módulo de instrumentación y control (Model9063-B). En la operación del SVC identifica que el voltaje de alimentación es de 136[V], siendo una condición no ideal de la red eléctrica. Dentro de la prueba realizada se toma el registro de las señales de corriente, voltaje y potencia reactiva para las fases A, B y C, respectivamente.

La susceptancia que proviene de los capacitores del TSC presentan una variación en la magnitud, pues idealmente su valor debería ser de $BTSC = -0.0016[s]$. No obstante, los elementos operan correctamente con un valor de susceptancia $BTSC = -0.00182[s]$. Por su parte, la susceptancia inductiva se modela a partir de la Ec. (3), correspondiendo el límite establecido.

$$0.00439 \geq B_{svc} \geq -0.00182 \quad (3)$$

$BT_{CR} = B_{svc} + (0.00182)(TSC1) + (0.00182)(TSC2)$
Donde las variables TSC1 y TSC2 están activadas si y sólo se cumplen las condiciones de Ec. (4) y Ec. (5).

$$TSC1 = 1 \text{ si } 0.00439 > BTSC1 \geq -0.00182 \quad (4)$$

$$TSC2 = 1 \text{ si } -0.00182 > BTSC2 \geq -0.00364 \quad (5)$$

De esta manera, para la implementación de la prueba se considera en el SVC una modificación de la susceptancia B_{svc} en incrementos de 0.0001[s] desde el límite superior al inferior cada 10 segundos. Consecuentemente, se obtienen como resultado las figuras Fig. 12, Fig. 13 y Fig. 14, para los

casos TCR, TCR + TSC, y TCR + TSC1 + TSC2, respectivamente.

Adicionalmente, se presentan los resultados de susceptancia para todo el rango operativo, partiendo desde el valor máximo de la susceptancia llegando al valor mínimo, presentando las señales de voltaje, corriente y potencia reactiva de cada una de las fases. En las Figs. 15 y 16, se ilustran las señales de voltaje y corriente, respectivamente.

En las Figs. 17 y 18, se presentan las señales trifásicas de la susceptancia y potencia reactiva que el SVC puede proporcionar al sistema.

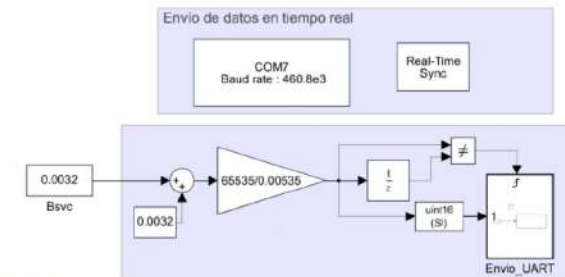


Fig. 9. Algoritmo de envío de dato desde la PC.

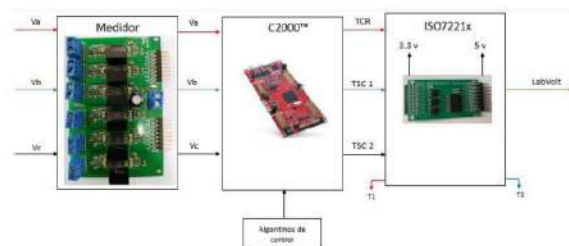


Fig. 10. Esquema particular de envío de señales.

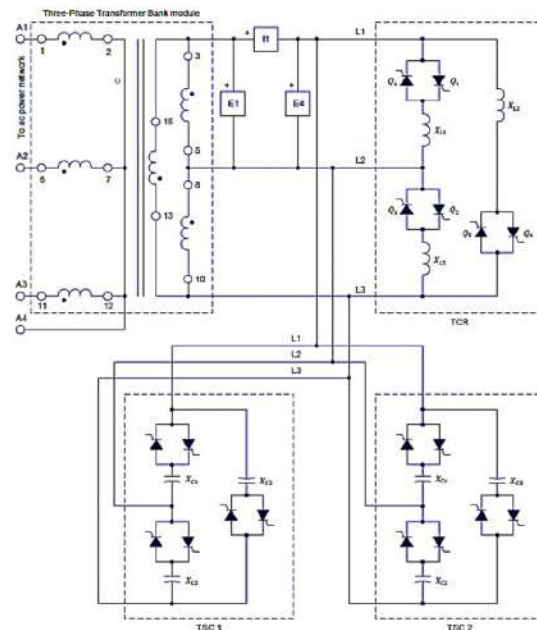


Fig. 11. Esquema del SVC del Laboratorio de Electrónica de Potencia.