

# **MODELADO Y CONTROL DE UN RECTIFICADOR DE FRENTE ACTIVO CON VALIDACIÓN HARDWARE IN THE LOOP**

*MODELING AND CONTROL OF AN ACTIVE FRONT-END  
RECTIFIER VALIDATED WITH HARDWARE IN THE LOOP*

***Héctor Bonilla Barranco***

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México  
*hector.bonilla@upaep.edu.mx*

***Edgar Peralta Sánchez***

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México  
*edgar.peralta@upaep.mx*

***Sergio Alejandro Cardeña Moreno***

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México  
*sergioalejandro.cardena@upaep.edu.mx*

***Félix Quirino Morales***

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México  
*felix.quirino@upaep.mx*

***Daniel Alberto Flores Alonso***

Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México  
*danielalberto.flores@upaep.mx*

**Recepción:** 1/noviembre/2021

**Aceptación:** 24/febrero/2022

## **Resumen**

En la actualidad la operación de los convertidores de potencia conectados a la red eléctrica representa un incremento de cargas no lineales conectadas a los sistemas eléctricos. Estos convertidores han impactado positivamente con un uso más eficientes de la energía eléctrica, incrementando la productividad de los procesos industriales, pero, por otra parte, han generado una problemática debido a los armónicos que generan, distorsionando las ondas de tensión y corriente, propagándose por todo el sistema eléctrico causando perturbaciones en el funcionamiento de los equipos instalados.

El desafío del control para los convertidores de frente activo es grande, puesto que deben ser suficientemente robustos para asegurar la estabilidad del sistema, sobre

todo cuando las condiciones de trabajo no son ideales. El objetivo de control en rectificadores activos de potencia trifásicos se basa en generar corrientes de entrada sinusoidales y regular el voltaje de salida DC.

Este trabajo presenta el modelado dinámico y el control de un rectificador de frente activo en el sistema de referencia síncrono en condiciones de tensiones equilibradas. El control es validado con "Hardware In the Loop", el valor deseado del voltaje de salida se logra mediante modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM). El rectificador permite mantener las corrientes y tensiones de CA en fase. Se propone el uso de la técnica del control por voltaje orientado y para la etapa de sincronización de las transformaciones  $d - q$  se utiliza la técnica de marco de referencia síncrono SRF-PLL, posteriormente se analiza el comportamiento del rectificador ante perturbaciones generadas en la red eléctrica. La propuesta de este trabajo aprovecha la simulación en tiempo real de sistemas eléctricos de potencia para validar de manera confiable la eficiencia de una de las técnicas de control y sincronización aplicadas a rectificadores de frente activo.

**Palabras Clave:** Rectificador de frente activo PWM, SPWM, VCO, V-FOC.

## **Abstract**

*Currently, the operation of power converters connected to the grid has increased non-linear loads in electrical systems. These power converters have a positive impact on energy efficiency resulting in more productive industrial processes. On the other hand, power converters have generated a problem due to the harmonics that distort the sinusoidal voltage and current waveforms, spreading throughout the electrical system causing disturbances in the operation of the installed equipment. The control for active front converters is a major challenge since it must be robust enough to ensure system stability, especially when working conditions are not ideal. The control objective in three-phase power rectifiers is based on generating sinusoidal input currents and regulating the DC output voltage.*

*This work presents the dynamic modeling and control of an active front rectifier in the synchronous reference system under balanced voltage conditions validated with "Hardware In the Loop". The desired value of the output voltage is achieved by using*

*sinusoidal pulse width modulation (SPWM). The rectifier allows the AC currents to be kept in phase with the AC input voltage. The use of the oriented voltage control technique is proposed, and for the synchronization stage for the dq transformations, the SRF-PLL synchronous reference frame technique is used. Subsequently, the behavior of the rectifier under disturbances generated in the electrical network is analyzed. The proposal of this work takes advantage of the real-time simulation of electrical power systems to reliably validate the efficiency of one of the control and synchronization techniques applied to active front rectifiers.*

**Keywords:** *Active front end rectifier, SPWM, VCO, V-FOC.*

## **1. Introducción**

En el mundo de la industria es muy común encontrar convertidores CA-CD para la alimentación de un gran número de quipos eléctricos de potencia. Estos convertidores se caracterizan por generar corrientes con distorsión armónica elevada, la cual es inyectada al sistema de potencia, degradando la calidad del servicio de este [Bajaj, 2020]. Los convertidores conmutados sencillos utilizan diodos para transformar la energía eléctrica de corriente alterna a corriente directa. El uso de tiristores permite el control del flujo de energía, la principal desventaja de estos convertidores conmutados, es la generación de armónicos y la potencia reactiva [He, 2019]. Los armónicos tienen un efecto negativo en el funcionamiento del sistema eléctrico, por lo tanto, se presta cada vez más atención a su generación y control [Kou, 2020]. En particular, varias normas han introducido límites importantes y estrictos sobre los armónicos que pueden ser inyectados en la fuente de alimentación. Varias topologías para la Corrección del Factor de Potencia (PFC) como el convertidor elevador y Viena, son utilizados para aplicaciones en las que la energía sólo se transmite desde la fuente de corriente alterna a la carga de corriente continua [Tlili, 2020]. En los últimos años para compensar la creciente demanda de electricidad, los rectificadores con control por ancho de pulso (PWM), han sido introducidos con la finalidad de realizar los procesos de conversión de energía CA-CD. Estos rectificadores no solo permiten reducir la inyección de armónicos al sistema, sino también, el control del factor de potencia en el lado de la alimentación

del rectificador [Lei, 2018]. El esquema de control de los rectificadores de frente activo permite adicionalmente, regular la magnitud de la tensión en el bus de corriente continua. Sin embargo, su estrategia de control ha atraído la atención de los investigadores ya que tiene un THD que cumple con los estándares IEEE Std 519™ - 2014 [Selarka, 2016]. En la literatura son citados varios enfoques para el control del rectificador de frente activo como lo son; Control de Voltaje Orientado (VOC), Control de Voltaje Orientado basado en Flujo Virtual (V-FOC), Control Directo de Potencia basado en Voltaje (V-DPC) y Control Directo de Potencia basado en flujo virtual (VF-DPC) [Lei, 2018].

## 2. Métodos

El convertidor requiere inyectar la energía de la red de CA al lado de carga de CD. El esquema de Control del Voltaje Orientado se muestra en la figura 1.

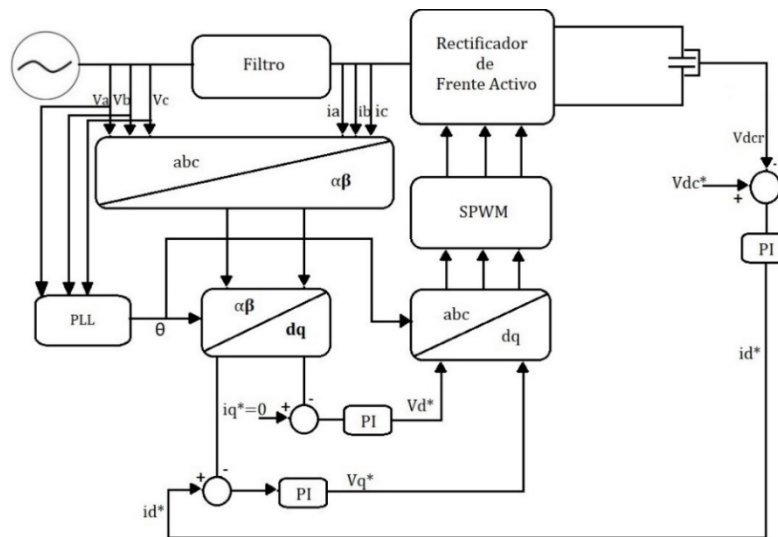


Figura 1 Diagrama a bloques del control del convertidor trifásico.

A partir de los voltajes de línea  $V_{abc}$ , el PLL (Phase Locked Loop) calcula el ángulo del voltaje que es requerido para la transformación de coordenadas trifásicas a coordenadas  $d - q$  tanto de corrientes como de voltajes de línea. Los voltajes de referencia generados por el controlador son enviados al bloque PWM (Pulse Width Modulation) para crear los patrones de conmutación  $S_{abc}$  ( $S = 1$  significa interruptor

superior encendido, interruptor inferior apagado;  $S = 0$  significa interruptor superior apagado, interruptor inferior encendido) [Trinh, 2019].

El modo de operación de un rectificador de frente activo se establece con un valor de voltaje CD de referencia que se compara con el voltaje del bus de CD, usando un lazo de control realimentado para cumplir con esta tarea. El voltaje de CD es medido y comparado con la referencia  $V_{ref}$  generando una señal de error, la cual servirá como una nueva referencia al lazo de control interno encargado de modificar el comportamiento del encendido o apagado de los transistores IGBT [Ma, 2018]. Esta condición se obtiene cuando aumenta el voltaje de la fuente de CA de la red. Hoy en día, se utilizan varios controladores diferentes en la industria y en muchos otros campos [Premkumar, 2020]. De manera general, esos controladores se pueden dividir en dos grupos principales:

- Los controladores convencionales (P, PI, PID) necesitan modelos matemáticos.
- Los controladores no convencionales (difusos y neuronales) no requieren modelar la planta.

Un controlador PI se utiliza para controlar la corriente de entrada y la tensión de salida. Un controlador proporcional (P) reduce las respuestas de error a las perturbaciones (transitorios), pero aún permite un error de estado estable. Cuando el controlador incluye un término proporcional a la integral del error (I), entonces también se elimina el error de estado estable a una entrada constante, aunque típicamente a costa del deterioro de la respuesta dinámica. La respuesta dinámica se define como el sobre impulso de salida que ocurre cuando la carga de salida del convertidor se enciende/apaga o cambia abruptamente [Tlili, 2020].

El control de voltaje orientado garantiza un alto rendimiento dinámico y estático a través del circuito de control de corriente interno. El control de voltaje orientado se basa en una serie de transformaciones desde un sistema de referencia estacionario trifásico llamado “ $abc$ ” a un sistema de referencia giratorio sincrónico  $d - q$  a través del sistema estacionario de dos fases  $\alpha - \beta$ . A lo largo de estas transformaciones, los voltajes de control permanecen constantes y se convierten en CD, lo que hace

que todo el proceso de control sea más sencillo, [Premkumar, 2020]. El bloque de controlador desacoplado consta de un controlador de corriente, el controlador integral proporcional (PI) y del bus de voltaje de CD. La salida del controlador desacoplado es  $V_d$  y  $V_q$ . La figura 2 muestra el nuevo diseño del controlador desacoplado donde el controlador PI se utiliza para reducir errores. La acción integral elimina el error solo si el valor de referencia es constante en condición de estado estable.

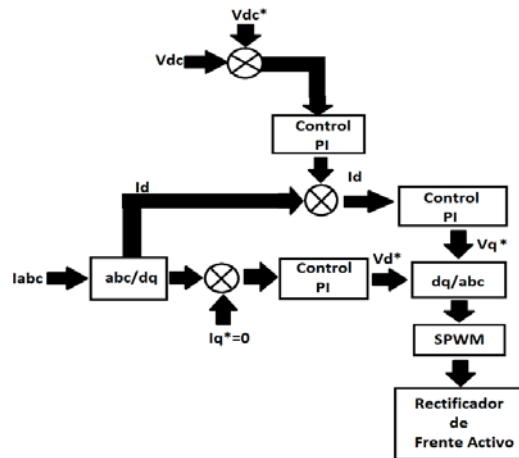


Figura 2 Esquema del control de voltaje.

Al utilizar el método de transformaciones de Clarke y Park, las corrientes medidas se transforman en cantidades de CD y utilizando controlador PI pueden obtener buenos resultados; basado en la diferencia entre la señal de referencia y la salida medida del sistema, el bloque controlador PI genera una señal de salida [Zhang, 2019]. El error de magnitud en la tensión de CD se utiliza para regular la tensión de CD a un valor fijo. Considerando el circuito RC en el lado de salida, el diagrama equivalente del lazo de regulación de voltaje de CD se muestra en la figura 2. La corriente de salida, se expresará como se muestra en la ecuación 1.

$$i = k_1 \Delta V_{cd} + \int k_2 \Delta V_{cd} dt \quad (1)$$

Donde  $k_1$  y  $k_2$  son las ganancias proporcionales e integrales del lazo de control respectivamente. La función de transferencia de lazo cerrado está dada por ecuación 2.

$$\frac{V_{cd}(s)}{V_{cd}^*} = \frac{k_1 R \left( s + \frac{k_2}{k_1} \right)}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

Donde,  $k_1$  y  $k_2$ , están dadas por las ecuaciones 3 y 4.

$$k_1 = 2\delta\omega_n C - 1/R \quad (3)$$

$$k_2 = \omega_n^2 C \quad (4)$$

Una vez que se establece un control del voltaje de bus de CD, se calcula la corriente de referencia, que se utiliza para controlar el voltaje de CD. Además, debido al funcionamiento del factor de potencia unitario del sistema, la corriente  $I_q^*$  de referencia del eje “q” se establece en cero. Para obtener estas corrientes de referencia en el sistema, se realiza un control de corriente, dando como resultado una tensión de referencia que se calcula en el sistema del eje  $d - q$ . La implementación del controlador se realiza en dos lazos de control PI, uno para cada componente de la corriente,  $I_d^*$  y  $I_q^*$ . Las salidas de los dos controles PI son  $V_d^*$  y  $V_q^*$  respectivamente, como se observa en la figura 3 [Premkumar, 2020].

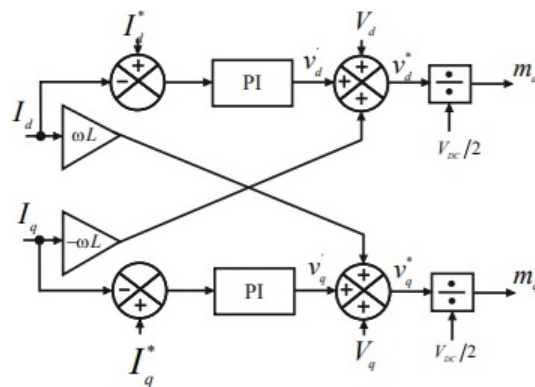


Figura 3 Esquema del control de corriente.

Las componentes de la tensión de referencia están dadas por ecuaciones 5 y 6.

$$V_d^* = E_d - k_p \varepsilon_d - k_i \frac{\varepsilon_d}{s} + \omega L I_q \quad \text{donde } \varepsilon_d = I_d^* - I_d \quad (5)$$

$$V_q^* = E_q - k_p \varepsilon_q - k_i \frac{\varepsilon_q}{s} - \omega L I_d \quad \text{donde } \varepsilon_q = I_q^* - I_q \quad (6)$$

Los parámetros de control PI se calculan usando las ecuaciones 7 y 8.

$$k_{pi} = \alpha_i L \quad (7)$$

$$k_{ii} = \alpha_i R \quad (8)$$

Se elige  $\alpha_i$  diez veces más pequeña que la frecuencia de conmutación como se muestra en la ecuación 9.

$$\alpha_i = \frac{2\pi f_{sw}}{10} \quad (9)$$

La sincronización es uno de los aspectos más importantes en el control de convertidores de potencia. El ángulo de fase de la componente fundamental de la red debe medirse en tiempo real para establecer la operación adecuada del rectificador. El esquema básico de un PLL trifásico en un marco de referencia síncrono (SRF-PLL) se presenta en la figura 4. En primer lugar, se miden las tres tensiones fase-neutro de la red. Luego se realiza el cambio de coordenadas a un marco de referencia giratorio  $d - q$ . Observe que en este modelo el ángulo para realizar dicha transformación  $\theta$  se estima para lograr que la componente en "q" sea cero. Para esto se utiliza un sistema re-alimentado con un controlador PI que calcula la velocidad necesaria (actuación) para lograr dicha consigna. En ocasiones y como se muestra en figura 4 se suma a la actuación la velocidad angular de la red, que en la práctica es conocida, mejorando la respuesta dinámica del sistema [Juárez, 2018].

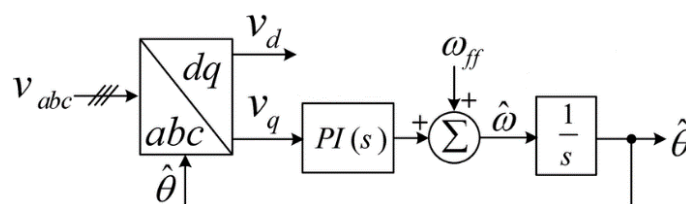


Figura 4 Esquema de seguimiento de fase orientado en marco de referencia síncrono.

Un controlador de corriente tipo PI puede ser utilizado, sin embargo, el controlador de corriente PI no tiene un rendimiento satisfactorio de seguimiento, especialmente para un sistema acoplado. Por lo tanto, para una aplicación de alto rendimiento de



seguimiento y precisión de la corriente en un estado dinámico se debe aplicar un controlador desacoplado para el rectificador de frente activo.

Entonces, suponiendo una correcta sintonización de los parámetros del controlador PI, se espera que, en estado estacionario,  $V_q$  sea cero y, por lo tanto, que la amplitud de la secuencia positiva de la componente fundamental del vector de red quede representada en su totalidad por  $V_d$ . En tal situación, la diferencia angular entre el fasor medido y el estimado por el PLL es cero, por lo tanto, el sistema rastrea la secuencia positiva fundamental en cada instante. Si sólo se considera la secuencia positiva en la entrada, el esquema del SRF-PLL puede trabajar con un ancho de banda muy alto, que es una de las características más atractivas de este algoritmo [Juárez, 2018]. Sin embargo, cuando se consideran condiciones distorsionadas, particularmente, desequilibrio en las entradas, se recomienda un filtrado de baja ganancia para lograr variaciones acotadas en la señal de actuación. El PLL de la figura 4 es alimentado con un voltaje trifásico de 220 V ( $V_a, V_b, V_c$ ), su objetivo es el ángulo de tensión del sistema trifásico, este ángulo se utiliza en todas las transformaciones  $d - q$  del control del rectificador. Para encontrar los valores de la constante proporcional e integral del control PI se utilizaron las ecuaciones 10, 11 y 12 [Lechat, 2010].

$$K_i = \frac{\rho^2}{E_{red}} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2\rho}{E_{red}} \quad (11)$$

$$E_{red} = \sqrt{E_d^2 + E_q^2} \quad (12)$$

Donde  $\rho$  es el ancho de banda del PLL (rad/s), y  $E_{red}$  es el valor estimado del módulo de tensión de la red.

Antes del uso del PWM, la única manera de ajustar el voltaje o la corriente con fines de atenuación era el uso de reóstatos o potenciómetros. Además, es más fácil controlar componentes más grandes como motores, válvulas y bombas, entre otros componentes hidráulicos y mecánicos, con el PWM. Normalmente, el voltaje de CD se mantiene constante en un valor por encima o por debajo de cero. El PWM

convierte una señal digital en una señal analógica cambiando la cantidad de tiempo que se mantiene encendida o apagada.

El tipo de modulación empleada en el rectificador es PWM sinusoidal. La señal de onda de salida PWM depende del tipo de onda de portadora. La figura 5 ilustra las señales de salida PWM obtenidas usando una señal portadora triangular. La modulación PWM supone que la señal portadora (triangular), se compara con la señal moduladora,  $n_x$  ( $n_a, n_b, n_c$ ), para cada fase del convertidor  $x = a, b, c$ . Si se cumple que  $n_x >$  señal portadora, el transistor superior de la rama “x” se enciende, mientras que en una situación cuando  $n_x \leq$  señal portadora el interruptor inferior de la rama “x” es el que se enciende. Los interruptores en la misma fase de la pila son conmutados en forma complementaria. Para la simulación, se ajusta una frecuencia fija de 5 kHz para la señal portadora triangular y una señal moduladora sinusoidal de 60 Hz, [Juárez, 2018].

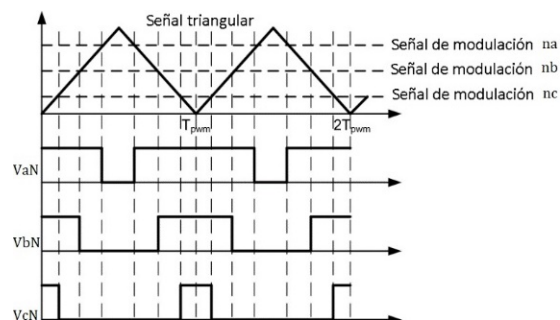


Figura 5 Señal SPWM del rectificador de frente activo.

El sistema HIL 402 que se utiliza cuenta con un osciloscopio interno permitiendo que los resultados puedan monitorearse directamente desde el software. Ocupando la herramienta GUI (Guide Use Interface) que proporciona el software control center de Typhoon, se implementó un esquema que permitiera monitorear los valores de las salidas y entradas del sistema como el nivel de voltaje del bus de CD, las corriente RMS a la entrada de cada fase del convertidor, la distorsión armónica total de voltaje y corriente, así como una gráfica en tiempo real para monitorear el valor de potencia activa y reactiva generada [Typhoon, 2020].

Utilizando las diferentes herramientas que nos proporciona Schematic editor de Typhoon Hil, se implementó el circuito del rectificador de frente activo. El circuito nos ayudará a simular la planta y en el Procesador de Señales Digitales (DSP TMS320F28335), se programa el control para observar si este tiene una respuesta convincente de acuerdo a lo planteado anteriormente.

La figura 6 muestra el circuito de un Rectificador de Frente Activo trifásico con una resistencia R de carga en la salida. El Rectificador es alimentado a través de una fuente de voltaje de CA a 220 V como se observa en la zona marcada de color rojo, también en la zona marcada con color verde se ve que el rectificador cuenta con un filtro RL en el lado del voltaje CA. La salida de este convertidor es un voltaje de CD y debe mantenerse constante ya que el voltaje de CD se utiliza para varias aplicaciones desde cargadores de baterías y control de motores. El voltaje de CD variable se obtiene utilizando un capacitor con retroalimentación de control. El concepto operativo de este tipo de rectificador es mantener un voltaje de CD constante a través del capacitor conectado en paralelo con la carga y esto se logra a través del circuito de retroalimentación del voltaje de salida.  $V_{dcr}$  es el voltaje de referencia proporcionado al circuito de retroalimentación de control y condicionará la conducción del diodo, por lo que el rectificador funciona casi con un factor de potencia unitario, de lo contrario, funciona como un puente rectificador trifásico.

La comparación se realiza con la tensión de CD de salida y la tensión de referencia fija, si se cumple el requisito. Los patrones de conmutación del convertidor se regeneran mediante el control de voltaje orientado. Este método generará pulsos basados en el error de la señal producida por el comparador. Por lo tanto, la corriente volverá a la entrada a través del acoplamiento de voltaje de CD. El comparador comparará el valor de voltaje medido con el valor de voltaje de referencia establecido, cuando la señal de error del comparador sea positiva, el condensador que se acopló a la salida de CD se descarga, por lo tanto, el convertidor funcionará como rectificador.

La unidad de control producirá 6 pulsos por cada dispositivo de energía conectado bajo esta condición. También proporciona una diferencia de fase adecuada, la

potencia pasa de cambiar la entrada de CA a la constante de salida de CD y se recupera el voltaje a través del condensador.

Por otro lado, si la corriente continua de salida resulta ser negativa, el capacitor obtiene un excedente cargado y esto se contrasta con el valor de referencia establecido de voltaje. Luego, la unidad de control gestiona la descarga del condensador y controla la corriente alterna. El voltaje de salida deseado en los rectificadores se controla administrando el ancho de pulso de conmutación.

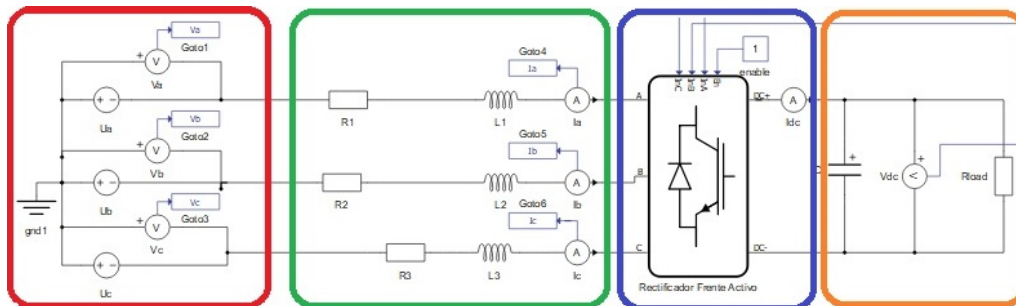


Figura 6 Simulación de un rectificador frente activo trifásico unidireccional.

Se realizó la interfaz con la cual variamos los parámetros de entrada del rectificador como se observa en la figura 7, para eso se utilizan las herramientas que proporciona Typhoon Hil, se puede ver cómo se registran los valores de las corrientes, voltajes del lado de AC y del lado de CD, también se utilizó el osciloscopio que nos proporciona el programa [Typhoon, 2020]. En la tabla 1, se muestran los valores de estos dispositivos.

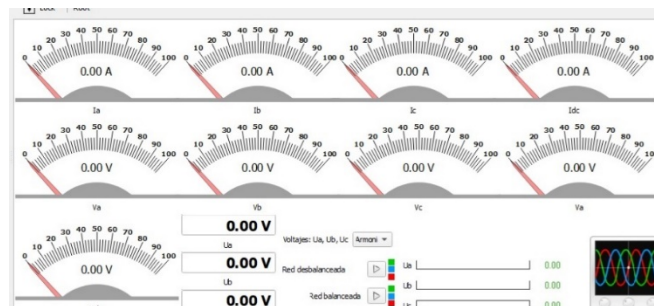


Figura 7 Interfaz de monitoreo del rectificador.

Tabla 1 Valores y unidades de los componentes.

Componentes	Valor	Unidades
Ra, Rb, Rc	0.9	$\Omega$
La, Lb, Lc	3	mH
Rcd	30	$\Omega$
C	1100	$\mu\text{F}$

### 3. Resultados

En esta parte del documento se muestran los resultados en la simulación “Hardware in the loop”, la figura 8 muestra el sistema del rectificador, el cual consiste en una tarjeta de control DSP, un módulo Typhoon Hil y una computadora donde se simula el rectificador.

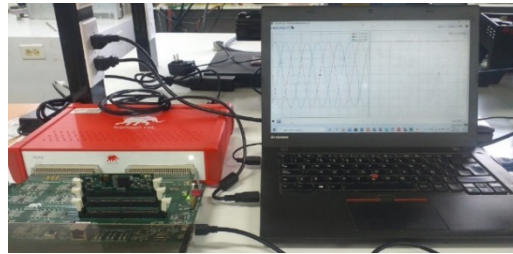


Figura 8 Conexión Typhoon Hil y DSP.

En primer lugar se corren las simulaciones del sistema de control en el programa PSim, obteniendo los resultados mostrados para el voltaje y la corriente como se muestra en las figuras 9 y 10.

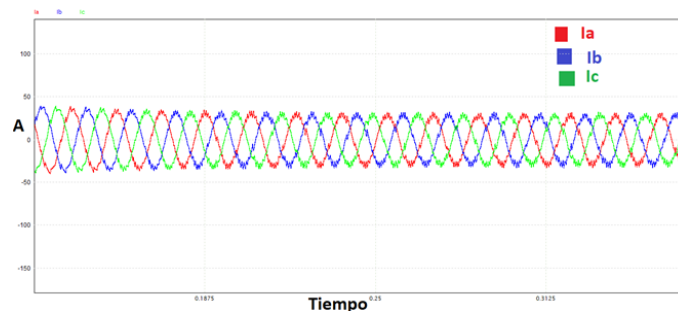


Figura 9 Corrientes de lado CA del rectificador.

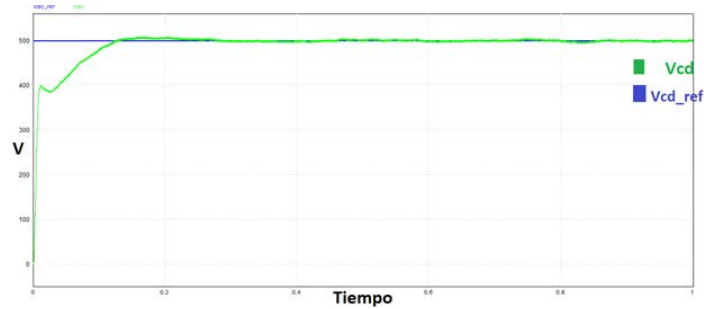


Figura 10 Voltaje de lado CD del rectificador.

Typhoon cuenta con osciloscopio interno, por lo cual no es necesario conectar un osciloscopio externo para poder observar las señales de voltaje CD de salida y voltaje y corrientes de entrada CA del rectificador. Posteriormente se utiliza el software Code Composer Studio de Texas instruments para configurar las entradas/salidas digitales y analógicas del controlador con el emulador Typhoon para su correcto funcionamiento

Para determinar si el sistema de control es capaz de operar en condiciones de alto contenido armónico en la red eléctrica, estas distorsiones son generadas obteniendo como resultado el patrón observado en la figura 11. En la figura 12, se aprecian las formas de onda de las corrientes de CA cuando los voltajes de entrada son distorsionados debido a la distorsión armónica en los voltajes de entrada.

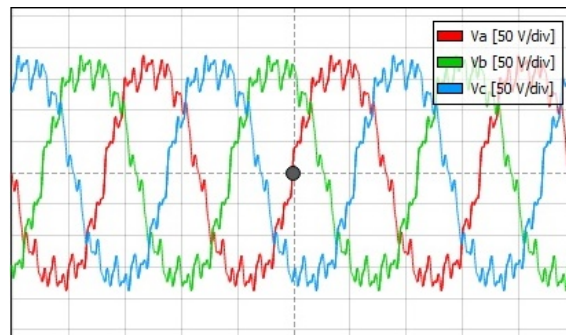


Figura 11 Armónicos generados en los voltajes de entrada del convertidor.

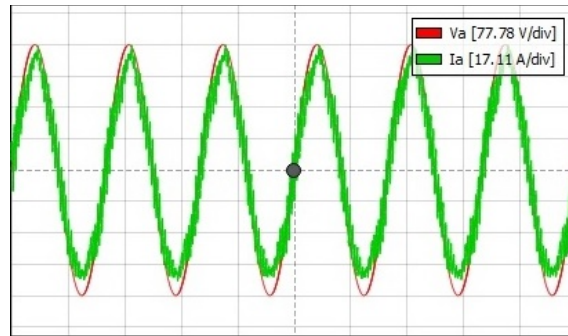


Figura 12 Voltaje y corriente de lado CA del rectificador.

De igual manera, son generadas perturbaciones que provocan el desbalanceo de los voltajes en la red eléctrica, tal y como se muestra en la figura 13.

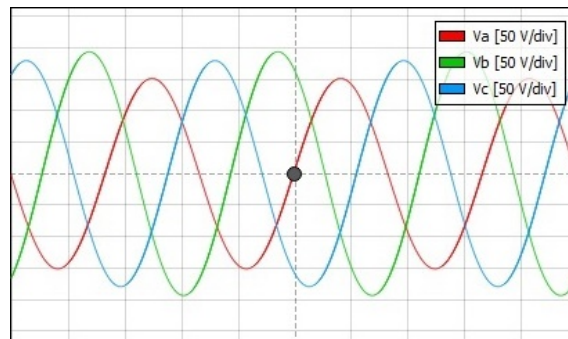


Figura 13 Voltaje CA del rectificador desbalanceado.

En la figura 14, podemos observar las formas de onda de las corrientes de CA cuando se le aplican en el rectificador voltajes de alimentación desbalanceados.

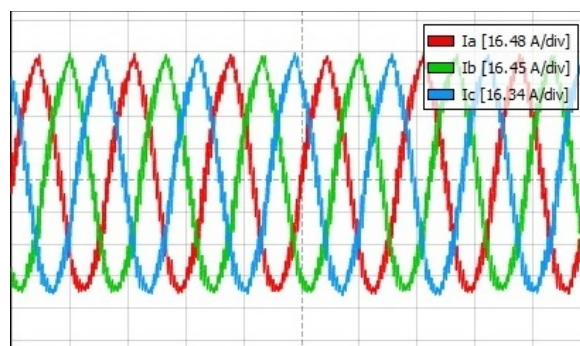


Figura 14 Corrientes de CA del rectificador.

La figura 15 muestra el voltaje de salida en el bus de CD cuando el voltaje de alimentación del rectificador está desbalanceado y como se mantiene en el valor de referencia que es de 500 V.

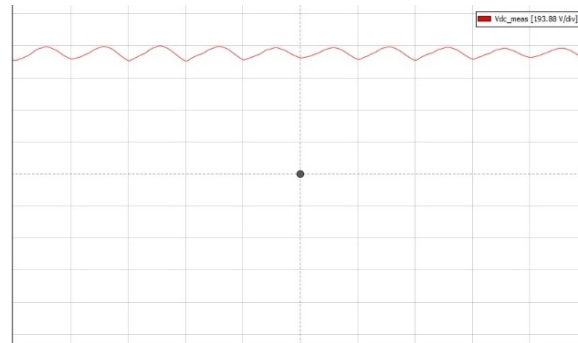


Figura 15 Voltajes en el bus de CD del rectificador.

#### **4. Discusión**

Como se pudo observar en la introducción y desarrollo de este trabajo, existen diferentes técnicas de control para los rectificadores de frente activo con los cuales podemos controlar el voltaje en el bus de CD y mantener en fase las corrientes de entrada con respecto al voltaje de la red eléctrica para mantener un factor de potencia unitario. El control de voltaje orientado que se utilizó en el rectificador y los resultados obtenidos en PSIM y Typhoon comprueban el correcto funcionamiento del convertidor en tiempo real, por lo tanto, con estos resultados podemos asegurar que dicho control propuesto funciona en la implementación física.

#### **5. Conclusiones**

La simulación del modelo dinámico del rectificador de frente activo proporciona una comprensión amplia de su funcionamiento y permite apreciar la importancia de los elementos de potencia que lo conforman. Se hace una descripción de cada etapa del sistema de control implementado en un sistema digital basado en un DSP, demostrando mediante simulaciones y resultados experimentales las mejoras en el factor de potencia unitario. También se demuestra que el control propuesto reacciona de manera adecuada ante las posibles perturbaciones presentes en el



voltaje de entrada de CA por lo que es posible tener un control óptimo sobre el voltaje de CD sin que sea necesario el uso de un convertidor CD-CD.

Se hicieron pruebas del control del rectificador con Typhoon HIL, en las simulaciones que se realizaron se puede observar una respuesta rápida a las diferentes perturbaciones generadas en el sistema. Los métodos de control desarrollados para esta aplicación permiten un control efectivo en las corrientes y voltajes, de entrada y salida, minimizando el tamaño de los elementos de almacenamiento de energía.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Bajaj, M., & Singh, A. K., (2020). An Analytic Hierarchy Process-Based Novel Approach For Benchmarking The Power Quality Performance Of Grid-Integrated Renewable Energy Systems. *Electrical Engineering*, 1-21.
- [2] He, H., Li, Z., Si, T., & Sun, L., (2019). Research On Digital Phase Locked Method In PWM Rectifier. In 2019 IEEE 8th Joint International Information Technology And Artificial Intelligence Conference (ITAIC) (pp. 1866-1870). IEEE.
- [3] Juárez, M. T., Sánchez, E. P., Dávila, J. M. R., Moreno, S. A. C., & Morales, F. Q., (2018). Simulación "Hardware In The Loop" De Un Inversor Trifásico Conectado A La Red Eléctrica. *Pistas Educativas*, 39(128).
- [4] Kou, L., Liu, C., Cai, G. W., Zhang, Z., Zhou, J. N., & Wang, X. M., (2020). Fault Diagnosis For Three-Phase PWM Rectifier Based On Deep Feedforward Network With Transient Synthetic Features. *ISA Transactions*, 101, 399-407.
- [5] Lei, T., Tan, W., Chen, G., & Kong, D., (2018). A Novel Robust Model Predictive Controller For Aerospace Three-Phase PWM Rectifiers. *Energies*, 11(9), 2490.
- [6] Lechat, S. S., (2010). Voltage Oriented Control Of Three-Phase Boost PWM Converters.

- [7] Lei, T., Tan, W., Chen, G., & Kong, D., (2018). A Novel Robust Model Predictive Controller For Aerospace Three-Phase PWM Rectifiers. *Energies*, 11(9), 2490.
- [8] Ma, H., Zhao, J., Yang, M., & Lu, Y., (2018). Predictive Direct Power Control For Three-Phase Vienna Rectifier With Simplified SVM. In 2018 IEEE International Power Electronics And Application Conference And Exposition (PEAC) (pp. 1-5). IEEE.
- [9] Premkumar, K., Kandasamy, P., Priya, M. V., Thamizhselvan, T., & Carter, S. R., (2020). Three-Phase Rectifier Control Techniques: A Comprehensive Literature Survey. *International Journal Of Scientific & Technology Research*, 9(01), 3183-3188.
- [10] Selarka, V., Shah, P., Vaghela, D. J., & Shah, M. T., (2016). Close Loop Control Of Three Phase Active Front End Converter Using SVPWM Technique. In 2016 International Conference On Electrical Power And Energy Systems (ICEPES) (Pp. 339-344). IEEE.
- [11] Tlili, F., Kadri, A., & Bacha, F., (2020). Advanced Control Strategy For Bidirectional Three-Phase AC/DC Converter. *Electric Power Systems Research*, 179, 106078.
- [12] Trinh, Q. N., Choo, F. H., Tang, Y., & Wang, P., (2019). Control Strategy To Compensate For Current And Voltage Measurement Errors In Three-Phase PWM Rectifiers. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 55(3), 2879-2889.
- [13] Typhoon HIL Schematic Editor Library: <https://Subscription.Typhoon-Hil.Com/Download/>, Abril 2020.