

Three-phase D-STATCOM prototype

Mauricio José Triana Figueroa ¹; Jorge Luis Díaz Rodríguez ²; Aldo Pardo García ³

¹ Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, trianatx@hotmail.com

² Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, jdiazcu@unipamplona.edu.co

³ Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, apardo13@unipamplona.edu.co

Abstract— *This work deals with the design and implementation of a D-STATCOM prototype, designed to compensate the power factor to an optimal value. Initially, the design was based on previous research and to improve its performance additional functions were introduced. Control strategies were designed, tested and implemented. The results of the connection to the power line at full load were tested. Finally, the results demonstrate the relationship between increasing the inverter stage of the prototype above the power line, obtaining a variable capacitor that adjusts the power factor.*

Keywords—*D-STATCOM, FACTS, PLL, fuzzy, synchronization.*

Prototipo D-STATCOM Trifásico

Mauricio José Triana Figueroa¹; Jorge Luis Díaz Rodríguez²; Aldo Pardo García³

¹ Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, trianatx@hotmail.com

² Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, jdiazcu@unipamplona.edu.co

³ Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, apardo13@unipamplona.edu.co

Resumen- Este trabajo trata sobre el diseño e implementación de un prototipo D-STATCOM, diseñado para compensar el factor de potencia a un valor óptimo. Inicialmente, el diseño se basó en investigaciones previas y para mejorar su funcionamiento se introdujeron funciones adicionales. Se diseñaron, probaron e implementaron las estrategias de control. Se probaron los resultados de la conexión a la línea eléctrica a plena carga. Finalmente, los resultados demuestran la relación entre el aumento de la etapa inversora del prototipo por encima de la línea eléctrica, obteniendo un capacitor variable que ajusta el factor de potencia.

Palabras claves- D-STATCOM, FACTS, PLL, lógica difusa, sincronización.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos modernos enfrentan una serie de desafíos que afectan su estabilidad, eficiencia y calidad de energía. Entre las problemáticas más comunes se encuentran las fluctuaciones de voltaje, los armónicos, los desbalances de carga y la caída de tensión, los cuales pueden generar interrupciones en el suministro, daños en equipos sensibles y pérdidas económicas significativas [1]. Estas perturbaciones son especialmente críticas en redes con alta penetración de energías renovables, donde la generación intermitente y la variabilidad de la carga exigen un control más dinámico y preciso de los parámetros eléctricos [2][18].

En este contexto, los compensadores estáticos de reactivos (STATCOM) y los compensadores estáticos de distribución (D-STATCOM) han surgido como soluciones tecnológicas avanzadas para mitigar estos problemas. De forma general los STATCOM son dispositivos basados en electrónica de potencia que permiten la inyección o absorción de potencia reactiva de manera rápida y controlada, lo que ayuda a mantener la estabilidad del voltaje y mejorar el factor de potencia en sistemas de transmisión [3][20]. Por su parte, los D-STATCOM están diseñados específicamente para aplicaciones en redes de distribución, donde las cargas desbalanceadas y las variaciones de demanda son más frecuentes [4].

Estos dispositivos no solo contribuyen a la regulación del voltaje, sino que también reducen las pérdidas de energía, mejoran la calidad de la onda de voltaje y minimizan el impacto de los armónicos en la red [5]. Además, su capacidad de respuesta rápida los hace ideales para integrarse en sistemas con generación distribuida, donde la fluctuación de la energía renovable puede causar inestabilidades [6].

En este artículo se presenta un prototipo de D-STATCOM trifásico diseñado a partir de un prototipo monofásico previo, donde las características de sincronización del prototipo monofásico permitieron obtener un prototipo trifásico. Se analiza su funcionamiento, su impacto en la mejora de la calidad de energía y su potencial para integrarse en sistemas eléctricos modernos. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del prototipo en las características básicas de un D-STATCOM.

II. COMPENSADOR AVANZADO DE VAR ESTÁTICO STATCOM

El dispositivo STATCOM (Static Synchronous Compensator), mostrado en la Fig. 1, es un dispositivo de electrónica de potencia utilizado en sistemas eléctricos para mejorar la estabilidad y la calidad de la energía. Su principal función es controlar el flujo de potencia reactiva en la red, ya sea inyectando o absorbiendo corriente reactiva, lo que permite regular el voltaje y mejorar el factor de potencia [7].

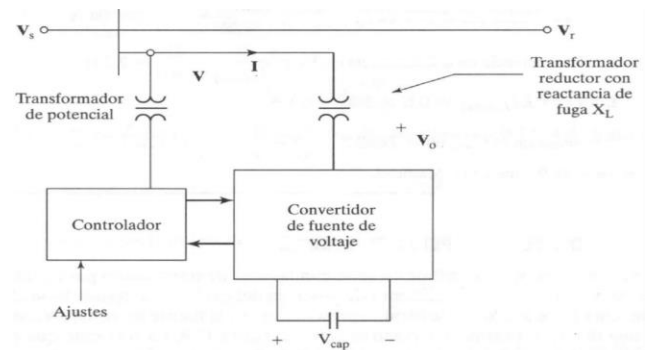


Fig. 1 Diagrama en bloque de un STATCOM

A. Principio de funcionamiento

El dispositivo STATCOM está compuesto por un inversor de voltaje fuente (VSI) que convierte corriente continua (CD) en corriente alterna (CA) sincronizada con la red eléctrica. Este inversor utiliza transistores de potencia, como IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), para generar una señal de voltaje alterno ajustable en magnitud y fase respecto al voltaje de la red [8][19].

- **Inyección de potencia reactiva:** cuando el voltaje de la red es bajo, el STATCOM genera corriente reactiva capacitiva, elevando el voltaje del sistema [9].
- **Absorción de potencia reactiva:** si el voltaje de la red es alto, el STATCOM absorbe corriente reactiva inductiva, reduciendo el voltaje [10].

El control del STATCOM se realiza mediante técnicas avanzadas de modulación por ancho de pulso (PWM) y algoritmos de control en tiempo real, que permiten una respuesta rápida y precisa a las variaciones de la red [11].

B. Aplicaciones del STATCOM

- **Regulación de voltaje:** mantiene el voltaje dentro de límites aceptables en sistemas de transmisión y distribución [12].
- **Estabilización de redes:** reduce las oscilaciones de potencia y mejora la estabilidad transitoria [13].
- **Compensación de cargas no lineales:** mitiga los efectos de los armónicos y mejora la calidad de la energía [14].

C. Ventajas del uso de un STATCOM

- Respuesta rápida (en milisegundos) [15].
- Menor tamaño y peso comparado con compensadores convencionales [16].
- Capacidad para operar en condiciones de voltaje bajo [17].

III. PROTOTIPO D-STATCOM MONOFÁSICO

El prototipo de D-STATCOM monofásico, mostrado en la Fig. 2, está compuesto por dos microcontroladores Arduino Nano basados en la referencia LGT8F328P, los cuales ofrecen una velocidad de procesamiento de hasta 32 MHz, lo que garantiza un desempeño eficiente en aplicaciones de control en tiempo real.

Uno de estos microcontroladores, denominado SPWM, tiene la función principal de generar las señales PWM (Modulación por Ancho de Pulso) necesarias para controlar el puente H, permitiendo así la etapa de inversión de corriente continua a alterna y su posterior sincronización con la red eléctrica.

Por otro lado, el segundo microcontrolador, identificado como MASTER, se encarga de gestionar el control del voltaje, asegurando que el sistema opere de manera estable y eficiente bajo diferentes condiciones de carga. Esta división de tareas entre los dos microcontroladores Arduinos permite una operación coordinada y precisa, esencial para el correcto funcionamiento del D-STATCOM en aplicaciones de compensación de potencia reactiva y mejora de la calidad de energía.

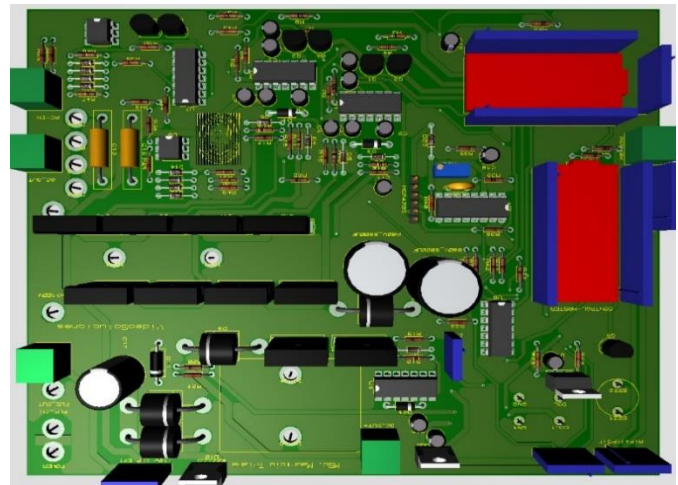
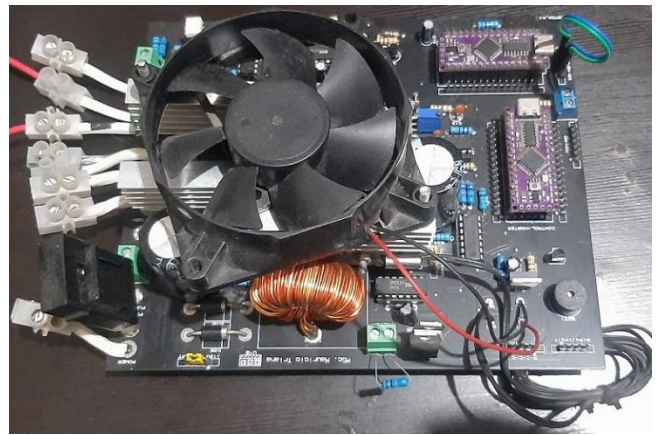


Fig. 2 Prototipo D-STATCOM

La tarjeta incluye un circuito detector de secuencia de fase, representado en la Fig. 3, el cual está compuesto por un optoacoplador 4N25 y dos resistencias de 20 k Ω que actúan como limitadores de corriente en la entrada. Este circuito tiene un funcionamiento sencillo pero efectivo: en la conexión AC-IN se ingresa la señal de la red eléctrica de referencia, la cual sirve como base para la sincronización. De manera similar, en las entradas TRA3 y TRA4 se conecta el lado de alta tensión del transformador. Gracias a la configuración del optoacoplador, la corriente solo fluye en secuencia positiva, lo que permite aislar y detectar correctamente la fase de la señal de referencia. Esta señal se procesa posteriormente a través de una compuerta lógica 74LS08, que la convierte en pulsos cuadrados, facilitando su interpretación y manipulación.

Estos pulsos cuadrados, generados tanto por la señal de referencia de la red (AC-IN) como por la señal del inversor, se envían a una segunda compuerta multiplicadora 74LS08. Esta compuerta actúa como un comparador, permitiendo evaluar el grado de sincronización entre las dos señales. De esta manera, se puede determinar si el inversor está operando en fase con la red eléctrica o si es necesario realizar ajustes para lograr una sincronización óptima.

En la Fig. 3.a se pueden observar las entradas AC-IN y TRA3-TRA4, que corresponden a la conexión de la red eléctrica y el transformador, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 3.b se muestran los pulsos generados por la secuencia AC-IN. Estas señales son enviadas a las entradas digitales D2 de un microcontrolador Arduino Nano integrado en la tarjeta, el cual utiliza esta información para garantizar la sincronización precisa entre el inversor y la red eléctrica. Este proceso es fundamental para asegurar un funcionamiento estable y eficiente del sistema en su conjunto.

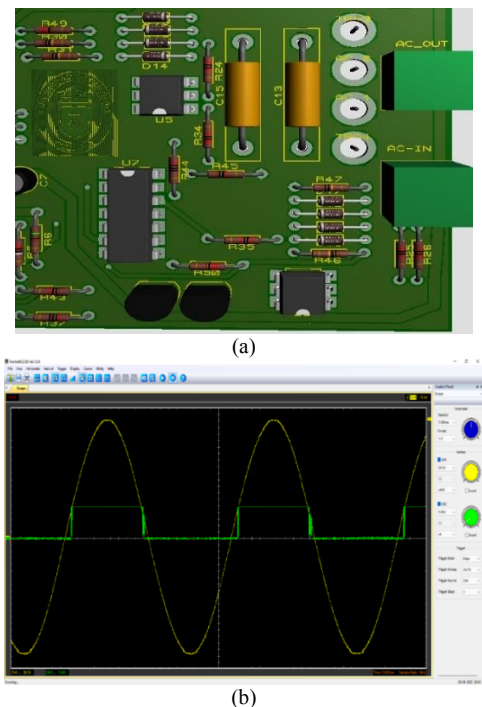


Fig. 3 Detector de secuencia de fase

La tarjeta incluye una entrada específica, mostrada en la Figura 4, diseñada para conectar el sensor comercial PZEM-004T, el cual se observa en la Fig. 4.b. Este sensor es una herramienta fundamental para el sistema, ya que permite monitorear en tiempo real una variedad de parámetros eléctricos clave, como el voltaje, la corriente, la potencia activa, la frecuencia y el factor de potencia. Estos datos son esenciales para evaluar el desempeño del sistema y tomar decisiones de control en función de las condiciones de la red.

El sensor PZEM-004T queda conectado directamente al microcontrolador Arduino Nano denominado Master, el cual se encarga de procesar la información recibida. Esta conexión directa garantiza una comunicación rápida y eficiente, permitiendo que el sistema responda de manera inmediata a cualquier variación en los parámetros eléctricos medidos. De esta manera, el sensor no solo facilita la supervisión del sistema, sino que también contribuye a la optimización del funcionamiento del D-STATCOM, asegurando una operación estable y eficiente.

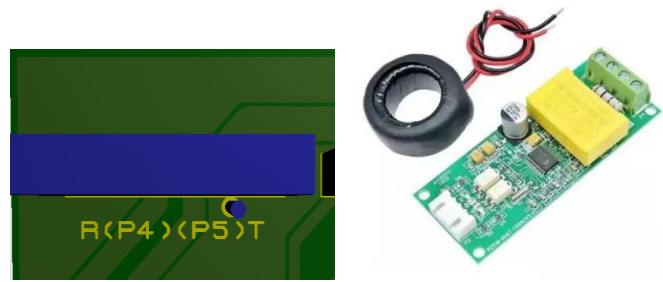


Fig. 4 Conexión del dispositivo PZEM-004T

IV. RESULTADOS DEL PROTOTIPO D-STATCOM MONOFÁSICO

El funcionamiento del D-STATCOM se basa en un convertidor de voltaje, específicamente un inversor, que debe estar sincronizado con la red eléctrica para operar correctamente. Para lograr esto, se diseñó una etapa inversora compuesta por un puente H, como se muestra en la Fig. 5. Esta etapa es la responsable de generar una onda senoidal a partir de una fuente de corriente continua (DC), lo que permite la conversión de energía DC a AC.

El control de los pulsos de tipo SPWM (Modulación por Ancho de Pulso Senoidal) se realiza mediante un microcontrolador Arduino Nano denominado Control-SPWM, representado en la Fig. 4. Este Arduino tiene la capacidad de generar los pulsos necesarios para activar los transistores del puente H. Sin embargo, debido a que las señales de salida del Arduino tienen un nivel de voltaje máximo de 5 V en DC, no son suficientes para activar directamente los IGBT, los cuales requieren un voltaje de al menos 12 V en DC.

Para resolver este problema, se utilizan dos controladores IR2110, que actúan como intermediarios entre el Arduino y los IGBT. Estos controladores tienen la función de amplificar las señales de 5 V a 12 V, lo que permite activar correctamente los IGBT y, por ende, generar la señal alterna (AC) en el lado de baja tensión del transformador de acople. Este proceso es esencial para garantizar que el inversor opere de manera eficiente y sincronizada con la red eléctrica, cumpliendo así con su función de compensación de potencia reactiva y mejora de la calidad de energía.

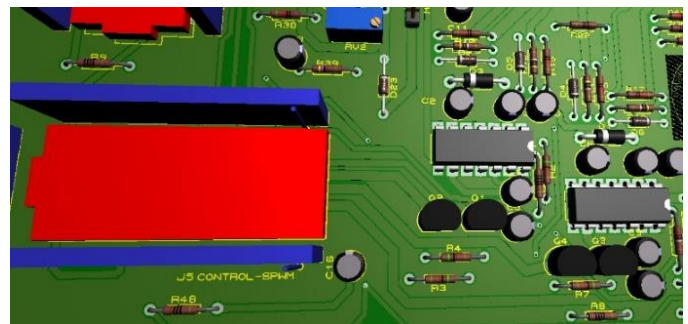


Fig. 5 PCB del Circuito Arduino controlador SPWM

El diseño esquemático, representado en la Fig. 6.a, está dedicado a la generación de los pulsos SPWM (Modulación por Ancho de Pulso Senoidal). Este circuito se compone de dos controladores IR2110, cuya función principal es convertir las señales de 5 V en DC, generadas por el Arduino, en pulsos de 12 V en DC, que son necesarios para activar correctamente los IGBT.

El primer controlador, IR2110 1, se encarga de manejar la activación de los transistores IGBT M1 y M2, como se muestra en la Fig. 6.b. Por su parte, el segundo controlador, IR2110 2, gestiona la activación de los IGBT M3 y M4. Esta división de tareas entre los dos controladores permite una gestión eficiente y sincronizada de los IGBT, asegurando que el puente H opere de manera correcta y genere la señal de corriente alterna (CA) requerida para el funcionamiento del D-STATCOM.

La implementación de estos controladores es fundamental, ya que no solo amplifican el voltaje de las señales, sino que también garantizan un aislamiento y un timing preciso entre los pulsos, lo que resulta esencial para mantener la estabilidad y la eficiencia del sistema en su conjunto.

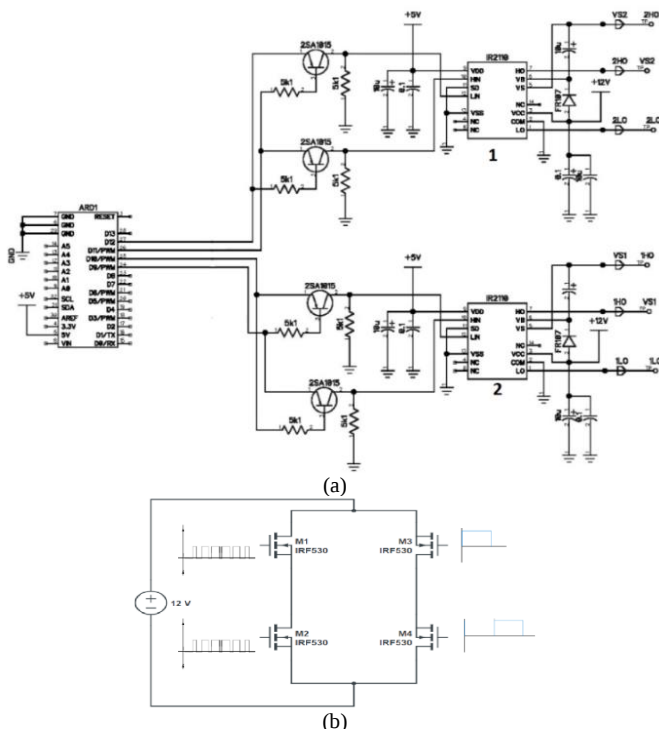


Fig. 6 Circuito (a) y detalle (b) del puente inversor SPWM

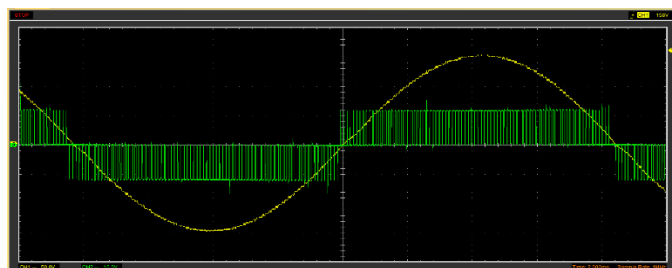


Fig. 7 Señales del lado de baja y alta en el transformador

En la Fig. 7, los pulsos representados en color verde corresponden a la señal generada por el Arduino, la cual presenta un voltaje pico de 12 V DC. Como se puede apreciar, estos pulsos poseen un ciclo de trabajo variable, lo que significa que, al medir su voltaje RMS (valor eficaz), obtenemos aproximadamente 7.5 Vrms. Este es el voltaje presente en el lado de baja tensión del circuito.

Por otro lado, la señal mostrada en color amarillo representa la medición en el lado de alta tensión. Se puede observar que la forma de onda en este lado adquiere una apariencia sinusoidal, similar a la de la red eléctrica. Esta transformación es posible gracias a la presencia de un capacitor en la etapa de alta tensión, el cual permite una carga controlada derivada de los pulsos provenientes del lado de baja tensión, contribuyendo así a la suavización de la señal y su conversión a una onda más estable.

Cada pulso de color verde, como se observa en la Fig. 7, se genera al recorrer una lista de valores predefinida, denominada *lookUp1* y mostrada en la Fig. 8. Estos valores tienen magnitudes variables, lo que permite recrear de manera progresiva una onda senoidal a medida que el capacitor se va cargando.

Este proceso de modulación asegura que la señal generada se aproxime a la forma de una onda senoidal pura, lo cual es esencial para el correcto funcionamiento del sistema y la calidad de la energía entregada.

```
int lookUp1[] = {
  0, 30, 60, 90, 120, 150, 179, 208, 237, 266, 294, 322, 349, 376, 402, 428, 453, 478, 501, 524,
  547, 568, 589, 609, 628, 646, 664, 680, 695, 710, 723, 735, 747, 757, 766, 774, 781, 787, 792, 796,
  798, 800, 800, 799, 797, 794, 790, 784, 778, 770, 762, 752, 741, 729, 717, 703, 688, 672, 655, 637,
  619, 599, 579, 558, 536, 513, 489, 465, 441, 415, 389, 363, 335, 308, 280, 252, 223, 194, 164, 135,
  105, 75, 45, 15
};
```

Fig. 8 Lista de pulsos PWM

Utilizando la señal de secuencia positiva, mostrada en la Fig. 3, que llega al circuito del Arduino denominado CONTROL-SPWM a través del pin 2, se activa una función específica llamada *verificar* de la Fig. 9. Esta función está diseñada para operar exclusivamente en los pines 2 y 3 del Arduino Nano, los cuales tienen la capacidad de detectar cambios en la señal de entrada. En este caso, la función se activa cuando se identifica un flanco de subida, conocido como *RISING*, lo que indica un cambio en el estado de la señal. Este mecanismo permite que el sistema responda de manera precisa a las variaciones en la secuencia positiva, asegurando una sincronización adecuada con la red eléctrica.

```
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), verificar, RISING);
```

Fig. 9 Código para la activación de la función *verificar*

Cuando se detecta un flanco de subida, representado en color verde en la Fig. 10, en el pin 2 del Arduino, se activa automáticamente la función *verificar*. Esta función tiene como objetivo principal evaluar el estado actual de una variable llamada *num*, la cual almacena la posición del recorrido dentro de una lista de valores predefinidos en la tabla *lookUp1[num]*.

Al conocer el valor de *num*, es posible determinar en qué punto del ciclo se encuentra la generación de la señal SPWM. Esto, a su vez, permite identificar el grado de desfase entre la etapa inversora y la señal de la red eléctrica, facilitando la corrección y sincronización necesarias para un funcionamiento óptimo.

Como se puede observar en la Fig. 10, el pulso de color verde representa el inicio de la secuencia positiva de la red eléctrica. Si tomamos como referencia los valores numéricos mostrados en la Fig. 8, destacados en color amarillo, podemos concluir que el inversor se encuentra adelantado respecto a la red eléctrica. Para corregir este desfase, se resta el valor actual de la variable *num* (es decir, $num = num - v_{actual}$), lo que permite ajustar el inicio de la señal del inversor para que coincida con el inicio de la secuencia positiva de la red eléctrica.

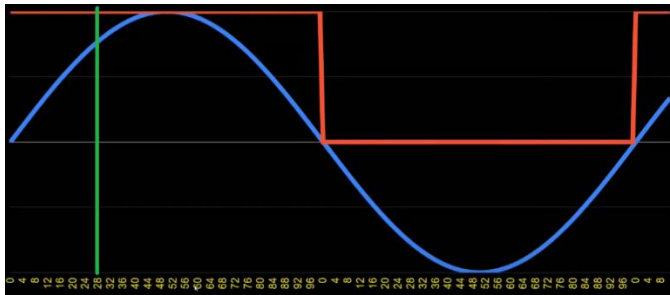
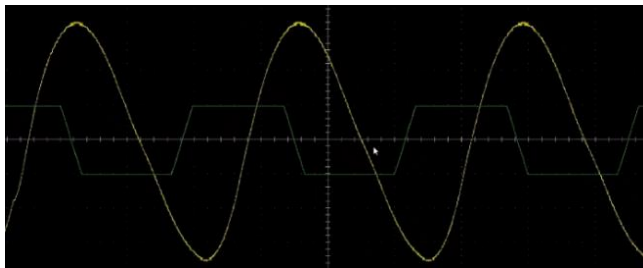
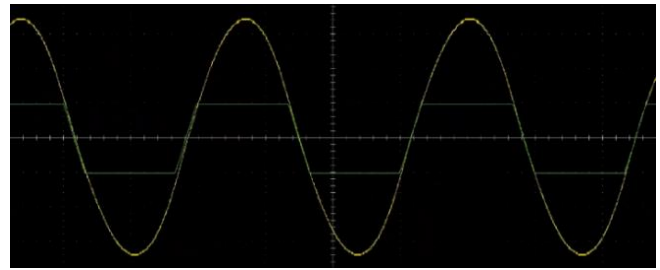


Fig. 10 Activación de la función verificar

Por otro lado, en la Fig. 11.a se aprecia que la señal de la red eléctrica, representada en color amarillo, está ligeramente atrasada en comparación con la señal del inversor, mostrada en color verde. Sin embargo, tan pronto como se detecta el flanco de subida de color verde en la Fig. 10, el valor de la variable *num* se restablece a cero ($num = 0$). Esto reinicia el recorrido de la lista *lookUp1[num]*, asegurando que el inicio de la señal del inversor coincida con el inicio de la secuencia positiva de la red eléctrica. Dado que la frecuencia de la red es de 60 Hz, este ajuste se realiza cada 16 milisegundos, lo que garantiza una sincronización rápida y precisa, como se ilustra en la Fig. 11.b.



(a)



(b)

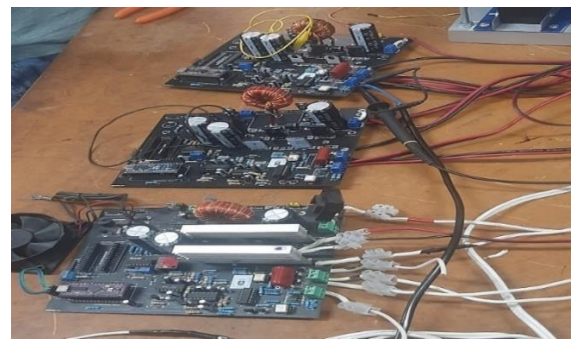
Fig. 11 Representación del control proporcional

V. PROTOTIPO D-STATCOM TRIFÁSICO

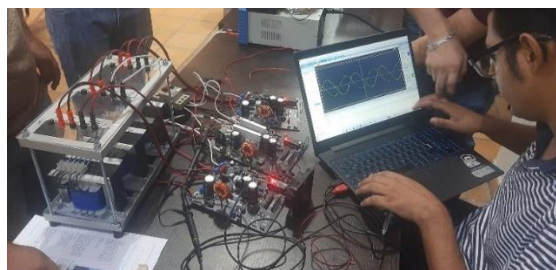
El prototipo de D-STATCOM monofásico fue diseñado incorporando un detector de secuencia de fase, como se ilustra en la Fig. 3, con el objetivo de garantizar la sincronización entre la etapa inversora y la red eléctrica. Este diseño quedó validado en un trabajo anterior, donde se realizó la conexión del prototipo monofásico a la red eléctrica junto con una carga de control. Durante las pruebas, se verificó el correcto funcionamiento de la sincronización física entre la etapa inversora del D-STATCOM y la red eléctrica, además de observarse cómo el sistema modificaba el factor de potencia de la carga conectada.

Una vez confirmado el buen desempeño de la sincronización con la red eléctrica, se procedió a construir dos tarjetas adicionales, como se muestra en la figura del prototipo. Gracias al diseño del detector de secuencia de fase, fue posible obtener un inversor trifásico perfectamente desfasado en 120° por fase, sin necesidad de implementar complicaciones adicionales en el hardware o en el código.

En la Fig. 12a se observan las tres tarjetas y dos de las tres fases, ya que las mediciones se realizaron con un osciloscopio de dos canales. A través del monitoreo en la computadora, se pudo comprobar que las señales estaban correctamente desfasadas, demostrando la eficacia del diseño (Fig. 12b).



(a)



(b)
Fig. 12 Pruebas del prototipo D-STATCOM trifásico.

Para facilitar las conexiones entre las tarjetas y la carga, se diseñó una caja especial, como se muestra en la Fig. 13, que integra las tarjetas y permite una configuración modular del sistema.

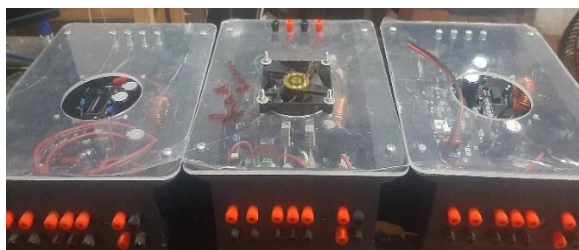


Fig. 13 Prototipo trifásico.

Esta caja, con su tarjeta incorporada, no sólo simplifica el montaje y las pruebas, sino que también convierte al prototipo en un laboratorio versátil, capaz de funcionar tanto en sistemas monofásicos como trifásicos.

Al combinar varias unidades, es posible escalar el sistema a un esquema trifásico, lo que brinda flexibilidad para experimentar y analizar diferentes configuraciones de control y potencia.

IV. CONCLUSIONES

El sistema de control del factor de potencia demostró un funcionamiento adecuado en condiciones de prueba. Sin embargo, para aproximarse al rendimiento de un D-STATCOM industrial, se recomienda emplear un transformador de mayor potencia. Esto permitiría reducir la corriente de operación sin comprometer los resultados, optimizando así la eficiencia energética y minimizando pérdidas térmicas en componentes críticos.

La simplicidad y efectividad en el control de frecuencia se atribuyen al diseño integrado del detector de secuencia de fase y a la generación de señales SPWM. La combinación del hardware especializado (como el optoacoplador 4N25 y las compuertas lógicas 74LS08) con algoritmos de sincronización en el Arduino garantizó una respuesta rápida y estable, esencial para mantener la coherencia temporal con la red eléctrica incluso bajo variaciones de carga.

Si bien el control basado en lógica difusa mostró precisión en la regulación de voltaje, se identificó una latencia de aproximadamente 500 ms en cada ciclo de corrección. Esta demora contrasta con la alta velocidad de procesamiento del

Arduino (32 MHz), lo que sugiere oportunidades para optimizar el algoritmo o implementar técnicas de control predictivo que aprovechen mejor las capacidades del hardware.

La arquitectura modular del prototipo, respaldada por la integración de múltiples tarjetas y una caja de conexiones especializada (Fig. 13), facilita su escalabilidad de un sistema monofásico a uno trifásico con desfases precisos de 120°. Este enfoque no solo simplificó las pruebas en laboratorio, sino que también abre la puerta a aplicaciones en redes de distribución más complejas, donde la adaptabilidad y la interoperabilidad son críticas. La inclusión del sensor PZEM-004T para monitoreo en tiempo real refuerza su potencial en escenarios de generación distribuida con alta penetración de renovables.

REFERENCIAS

- [1] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2017.
- [2] F. Blaabjerg et al., "Renewable Energy Systems: Technology Overview and Perspectives", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 18-29, 2019.
- [3] J. Dixon et al., "Reactive Power Compensation Technologies", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 706-718, 2005.
- [4] S. Bhattacharya et al., "Design and Implementation of a D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1350-1356, 2005.
- [5] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, 1996.
- [6] R. Teodorescu et al., *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Wiley, 2011.
- [7] C. Schauder et al., "Development of a ± 100 MVar STATCOM for Network Voltage Control", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 4, pp. 1805-1811, 1997.
- [8] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, 2002.
- [9] A. Nabae et al., "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518-523, 1981.
- [10] D. Soto-Sanchez et al., "Control Strategies for STATCOMs: A Comparative Analysis", *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 2, pp. 228-237, 2009.
- [11] V. Blasko et al., "Control of a STATCOM with Supercapacitor Energy Storage", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 2, pp. 643-650, 2003.
- [12] L. Xu et al., "Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage Space Vector PWM Control", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 6, pp. 1855-1863, 2001.
- [13] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [14] M. Aredes et al., "An Universal Active Power Line Conditioner", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 545-551, 1998.
- [15] G. F. Reed et al., "STATCOM Application for Voltage Stability in Power Systems", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 1311-1316, 2000.
- [16] Y. H. Song et al., *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. IET, 1999.
- [17] S. Mori et al., "Development of a High Efficiency STATCOM Using Gate Turn-Off Thyristors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 696-703, 1993.
- [18] A. Montes, C. Lenis, y C. Ramos, "Laboratorio flexible para probar dispositivos eléctricos y emular microrredes", *RCTA*, vol. 1, n.º 45, pp. 216-224, ene. 2025, doi: 10.24054/rcta.v1i45.3477
- [19] J. Thorrens y O. Ardila, "Modelización y simulación de un compensador estático síncrono para sistemas de distribución de energía eléctrica", *RCTA*, vol. 1, n.º 43, pp. 57-63, mar. 2024, doi: 10.24054/rcta.v1i43.2804
- [20] N. S. Sandoval Carrero, N. M. Acevedo Quintana, y L. M. Santos Jaimes, "Lineamientos desde la industria 4.0 a la educación 4.0: caso tecnología IoT", *RCTA*, vol. 1, n.º 39, pp. 81-92, feb. 2022, doi: 10.24054/rcta.v1i39.1379