

Control of intelligent reactive power compensators for low-cost single-phase applications

María Paula Ramírez Vásquez¹; Luis David Pabón Fernández²; Jorge Luis Díaz Rodríguez³

¹Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, maria.ramirezmar1@unipamplona.edu.co

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

³Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, jdiazcu@unipamplona.edu.co, jdiazcu@gmail.com

Abstract– This paper proposes a reactive power compensation system aimed at reducing losses and improving the power factor in low-cost residential single-phase networks. The control strategy is based on the application of Park and Clarke transformations, which enable a convenient representation of electrical variables for controller design. The system's performance is validated through simulations carried out in the Matlab/Simulink environment, demonstrating its effectiveness for low-cost applications in residential single-phase grids.

Keywords-- power factor, reactive power, compensation, residential single-phase networks, simulation.

Control de compensadores inteligentes de energía reactiva para aplicaciones monofásicas de bajo presupuesto

María Paula Ramírez Vásquez¹; Luis David Pabón Fernández²; Jorge Luis Díaz Rodríguez³

¹Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, maria.ramirezmar1@unipamplona.edu.co

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

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

Resumen— El presente trabajo propone un sistema de compensación de potencia reactiva orientado a la reducción de pérdidas y la mejorar del factor de potencia en redes monofásicas residenciales de bajo costo. Se plantea un control que se basa en la aplicación de las transformadas Park y Clarke, las cuales permiten una representación conveniente de las variables eléctricas para el diseño del controlador. El desempeño del sistema se valida mediante simulaciones en el entorno Matlab/Simulink, evidenciando su efectividad para aplicaciones de bajo costo en redes residenciales monofásicas.

Palabras clave—factor de potencia, Potencia reactiva, compensación, redes residenciales monofásicas, simulación.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales desafíos en los sistemas eléctricos de potencia es la necesidad de controlar la potencia reactiva para garantizar una operación eficiente y estable. En condiciones de alta demanda de potencia reactiva, los generadores deben disminuir su factor de potencia para suministrar la energía requerida, evitando caídas de tensión y una disminución en la capacidad del sistema [1].

En entornos industriales, donde la mayoría de las cargas son de naturaleza inductiva, el bajo factor de potencia (<0.9) genera un consumo innecesario de energía reactiva, aumentando los costos eléctricos. En el ámbito residencial, la implementación de medidores inteligentes con medición en cuatro cuadrantes ha abierto la posibilidad de cobrar reactivos y por ende la necesidad de compensar energía reactiva, ya que esto podría incrementar la facturación eléctrica [2].

Para mitigar estos efectos, a nivel comercial e industrial, se han desarrollado diversas técnicas de compensación de potencia reactiva. Entre ellas, el uso de bancos de capacitores, solución viable por su bajo costo y facilidad de implementación, también dispositivos más avanzados, como el compensador estático síncrono o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) y D-STATCOM (*Distribution Static Compensator*), que permiten una regulación dinámica y eficiente de la potencia reactiva, sin embargo, utilizados para altos niveles de potencia [3].

Este trabajo presenta una propuesta de un prototipo de control de un compensador monofásico de energía reactiva, como elemento de inyección de la corriente se considerará una fuente ideal, pero que en trabajos posteriores se remplazará

por un inversor multinivel para emular el funcionamiento de un D- STATCOM a muy bajas potencias.

El control propuesto se fundamenta en el uso de la teoría de fasores espaciales usando las transformadas de Clarke y Park para optimizar la inyección de corriente reactiva. A través de simulaciones en Matlab, se evaluarán distintos escenarios operativos utilizando cargas capacitivas como inductivas para validar la efectividad del sistema en la corrección del factor de potencia contribuyendo a una operación más eficiente y económica [1], [2].

II. METODOLOGÍA

A. Técnicas de compensación

Hoy en día, los condensadores en derivación, o en paralelo, han sido ampliamente utilizados debido a su gran capacidad. Los capacitores siguen destacándose como una solución ideal para suministrar potencia reactiva, además de ser una opción económica [4]. Sin embargo, su principal inconveniente es que su salida de potencia reactiva varía con el cuadrado de la tensión, lo que significa que a voltajes bajos su capacidad de compensación se reduce precisamente cuando más se necesita [5], [6].

Por otro lado, el sistema de compensación estática sincrónica, conocido como STATCOM, es un dispositivo de electrónica de potencia que emplea componentes conmutados para regular el flujo de potencia reactiva en una red eléctrica, mejorando así su estabilidad [7]. Se trata de un dispositivo en paralelo, lo que significa que se conecta en derivación a la línea y puede tanto absorber como generar potencia reactiva según la demanda, contribuyendo a mantener el voltaje de la red eléctrica estable.

El STATCOM es un tipo particular de sistema FACTS (Sistema de Transmisión de Corriente Alterna Flexible) creado para ofrecer una respuesta rápida y exacta a las variaciones de voltaje y corriente en la red eléctrica [8]. Es conocido también como condensador síncrono estático, debido a su función similar a la de un condensador síncrono [7], pero con una mayor precisión y rapidez de respuesta. A diferencia de los métodos tradicionales de compensación de potencia reactiva, el STATCOM emplea electrónica de potencia para introducir o absorber corriente reactiva en la red eléctrica de forma controlada y dinámica. La siguiente figura muestra el esquema de un STATCOM [9].

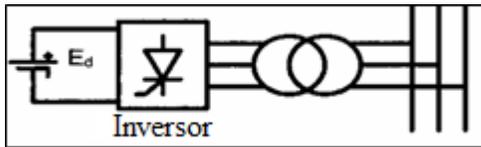


Fig. 1 Configuración esquemática del STATCOM [7].

Como se observa en la Fig. 1 un STATCOM está compuesto por una fuente de voltaje, un inversor y un sistema de filtrado. Este dispositivo regula la potencia reactiva inyectando o absorbiendo corriente, mejorando la estabilidad del sistema eléctrico.

Entre sus configuraciones, el convertidor multietapa en cascada es la configuración más popular del STATCOM, es relativamente simple, y la síntesis del voltaje está menos restringida. El convertidor en cascada es especialmente atractivo para la implementación de controladores FACTS que no involucran el intercambio de potencia activa [8].

El STATCOM híbrido, que combina el STATCOM con otros dispositivos FACTS como el Capacitor Conmutado Mecánicamente (MSC), el Capacitor Conmutado por Tiristor (TSC), y el compensador sincrónica serie estático (SSSC), será ampliamente utilizado. Se espera un mejor rendimiento y menor costo si el STATCOM opera adecuadamente junto con otros dispositivos [9].

El convertidor de fuente de voltaje (VSC), que se utiliza para convertir la tensión de entrada de corriente continua (DC) en una tensión de salida de corriente alterna (AC). Los dos tipos comunes de VSC son [8]:

- a) Inversores de Onda Cuadrada utilizando Tiristores con Desconexión de Puerta (GTO)

En esta clase de VSC, la tensión de salida en corriente alterna (AC) se ajusta modificando la tensión de entrada del capacitor de corriente continua (DC), dado que el componente principal de la tensión de salida del convertidor es directamente proporcional a la tensión en corriente continua [8].

- b) Inversores PWM utilizando Transistores Bipolares de Puerta Aislada (IGBT)

Emplea la técnica de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) para generar una onda sinusoidal a partir de una fuente de tensión de corriente continua (DC), operando con una frecuencia de conmutación típica de unos pocos kHz. A diferencia del tipo que usa GTO, el VSC que utiliza IGBT trabaja con una tensión DC constante y ajusta su tensión de salida en corriente alterna (AC) modificando el índice de modulación del modulador PWM [8].

Por otro lado, el funcionamiento de un STATCOM se fundamenta en su habilidad para producir o absorber corriente reactiva de manera controlada para regular el voltaje en un sistema eléctrico. Emplea principalmente convertidores de fuente de voltaje (VSC), para generar una tensión interna controlada que se inyecta en la red eléctrica sincronizándose con el voltaje presente en el punto de conexión [10].

Este manejo de la tensión interna posibilita que el STATCOM entregue corriente reactiva capacitiva o inductiva según lo requiera la situación para mantener el voltaje de la red dentro de los rangos aceptables. El STATCOM funciona de manera similar a un generador o consumidor de corriente reactiva, pero con la habilidad de

ajustar su salida de manera dinámica y precisa en respuesta a las variaciones de la red eléctrica [10].

El funcionamiento del STATCOM se basa en su habilidad para modificar rápidamente y con precisión la fase y amplitud de su tensión interna. Esto le permite reaccionar eficazmente ante las variaciones del voltaje en la red y mantenerlo dentro de los límites operativos establecidos. Este ajuste se realiza a través de algoritmos de control avanzados que supervisan continuamente las condiciones de la red y ajustan la salida del STATCOM en respuesta a dichas condiciones [7].

Por otro lado, cuando un STATCOM se emplea a nivel de distribución o en el extremo de carga para mejorar el factor de potencia y la regulación de voltaje solamente, se le llama D-STATCOM. El Compensador Estático de Distribución o D-STATCOM se puede clasificar en base a diferentes topologías, número de dispositivos de conmutación y en base a la compensación de corriente neutra [11].

Un convertidor D-STATCOM se controla mediante técnicas como la modulación por ancho de pulso (PWM) u otros métodos de modelado de voltaje y corriente. Estos dispositivos son más utilizados que los controladores STATCOM en aplicaciones de distribución [12].

En comparación con los STATCOM, los D-STATCOM tienen una capacidad de potencia nominal significativamente menor, lo que permite el uso de conmutadores electrónicos de potencia más rápidos. Además, la frecuencia portadora empleada en la modulación PWM de un controlador de distribución suele ser mucho mayor que la utilizada en un controlador FACTS [13], [14].

B. Sincronización de red

Como primera fase de cualquier sistema conectado a la red se debe mantener la sincronización, esto se logra a través del seguimiento fase (*Phase Locked Loop* o PLL), implican una combinación de técnicas analógicas y digitales, operan con comportamientos tanto lineales como no lineales y son aptas para análisis continuo, muestreado o incluso caótico. Los PLL son circuitos en los que la fase de un oscilador local se mantiene cercana (o bloqueada) a la fase de una señal externa. Su función es sincronizar un sistema virtual trifásico con el sistema eléctrico, mediante la obtención de la frecuencia y el ángulo de la onda de voltaje del sistema [15].

El funcionamiento básico de un PLL es simple, sin embargo, el diseño detallado de un circuito PLL para una aplicación específica a menudo requiere una gran comprensión de los principios fundamentales de operación. Es muy fácil diseñar un PLL de manera deficiente si se ignoran las consideraciones básicas del lazo de control o si se intentan atajos [16]. Un PLL consta de cuatro componentes fundamentales. Estos son un detector de fase, un filtro del lazo, un oscilador controlado por voltaje (*Voltage Controlled Oscillator* o VCO por sus siglas en inglés) y un divisor de frecuencia. Estos componentes están conectados en un arreglo de retroalimentación simple en el que el detector de fase compara la fase de una señal de entrada con la fase de la señal del VCO retroalimentada. La salida del detector de fase depende de la diferencia de fase de las dos entradas aplicadas y se utiliza para ajustar el VCO hasta que esta diferencia de fase sea muy pequeña [17].

Idealmente, las respuestas del detector de fase y del VCO son lineales, pero en la práctica, la respuesta del detector de fase es cíclica y la del VCO no es perfectamente lineal. El lazo se encuentra entonces en un equilibrio estable de manera que la fase del VCO está bloqueada a la fase de la señal de entrada. Así, el circuito actúa como un multiplicador de fase y también, dado que la frecuencia es la derivada temporal de la fase, como un multiplicador de frecuencia [17].

Variando la relación de división, la frecuencia de salida puede ajustarse en múltiplos de la frecuencia de entrada, lo que constituye un sintetizador de frecuencia básico. Alternativamente, al introducir señales en el lazo, se puede lograr modulación de fase o frecuencia alrededor de una frecuencia portadora estable.

C. Transformadas de Clarke y Park

Las transformaciones de Clarke y Park, facilitan la transformación de un sistema de tres fases en uno de dos fases, estáticos o en movimiento, reduciendo así el número de variables a controlar, siendo el principio básico del control vectorial en máquinas eléctricas y se utilizan para representar con un vector espacial el sistema trifásico [18].

Por un lado, la transformación de Clarke convierte el sistema trifásico estacionario, definido por las coordenadas abc, en un sistema bifásico estacionario con coordenadas $\alpha\beta$, que es imaginario pero útil. Este nuevo sistema de coordenadas, arraigado en el estator de la máquina o en las variables trifásicas de un sistema, adopta una disposición rectangular y fija. El eje de las abscisas se corresponde con el componente real alpha (α), alineado con la primera inductancia de la máquina (fase a), mientras que el eje de las ordenadas representa el componente imaginario beta (β). Así, el sistema de coordenadas $\alpha\beta$ se presenta como un marco cartesiano de números complejos, donde tanto α como β son valores reales [18].

En la Fig. 2, se muestra la conversión de un sistema trifásico de corrientes (i_a, i_b, i_c), a un sistema de coordenadas ortogonales (α, β). Se observan los ejes correspondientes, con los vectores de corriente proyectados en el nuevo sistema de referencia.

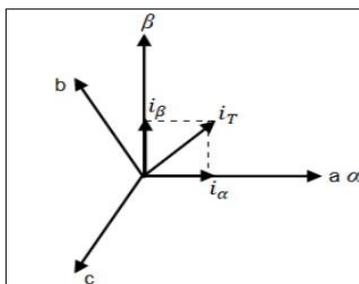


Fig. 2 Transformada de Clarke de las corrientes. [18]

La transformada de Park es similar y se extiende a la transformada de Clarke ($\alpha\beta$), al proporcionar una conversión del sistema de referencia de coordenadas $\alpha\beta$ ficticio estacionario bifásico a un sistema de referencia de coordenadas dq rotativo, cómo se detalla en la Fig. 3, donde se muestra un diagrama de la transformada de Park, en ella se observan los ejes y vectores de corriente proyectados en la referencia dq que gira a una velocidad angular ω_e .

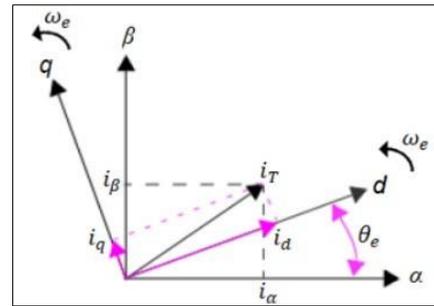


Fig. 3 Transformada de Park de dos corrientes. [18]

D. Algoritmo de control

Para el control de energía reactiva se parte de la medición del voltaje y la corriente del punto común de acoplamiento, con estas ondas de voltaje y corriente se establecen mediante la transformada de Park y la transformada de Clarke la proyección de los fasores espaciales de voltaje y corriente en el eje d y el eje q .

El eje de referencia d va a estar moviéndose en sincronía con el fasor espacial del voltaje, de esta manera, el fasor espacial de la corriente tendrá dos componentes: una i_d sobre el fasor espacial del voltaje y una i_q a 90° del fasor espacial del voltaje.

La componente i_d junto con el fasor espacial del voltaje determinarán la potencia activa del sistema y la componente i_q junto con el fasor espacial del voltaje determinarán la potencia reactiva del sistema, de esta forma, para compensar la energía reactiva se tendrá como variable de control la i , pues esta magnitud será proporcional con el consumo de la energía reactiva de la carga.

La corriente i_q se utilizará para construir una onda de corriente que será inyectada por el compensador anulando la i_q que proviene de la fuente, de esta manera el compensador inyectará la energía reactiva necesaria por la carga y anulará cualquier energía reactiva que proviene de la fuente.

Las relaciones de los vectores espaciales con los ejes de referencias $\alpha\beta$ y dq , utilizados en el algoritmo de control se muestra en la siguiente figura.

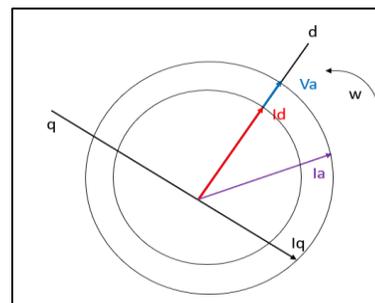


Fig. 4 Relación entre el fasor espaciales y el algoritmo de control.

Como el prototipo se está ejecutando para un sistema monofásico y las transformadas de Park y Clarke utilizan un sistema trifásico de entrada, como primera instancia del algoritmo se crean de manera ficticia las otras fases del voltaje y de la corriente, teniendo un sistema trifásico equilibrado en magnitud y ángulos.

Realizando estas transformaciones basadas en ese sistema trifásico ficticio los factores espaciales del voltaje y la corriente permiten simplificar los cálculos al eje d y q. De esta manera, las potencias activas y reactivas se podrán calcular con las siguientes ecuaciones, siempre y cuando se utilice la constante de potencia constante para las transformaciones de Clarke:

$$P = V * I_d \quad (1)$$

$$Q = V * I_q \quad (2)$$

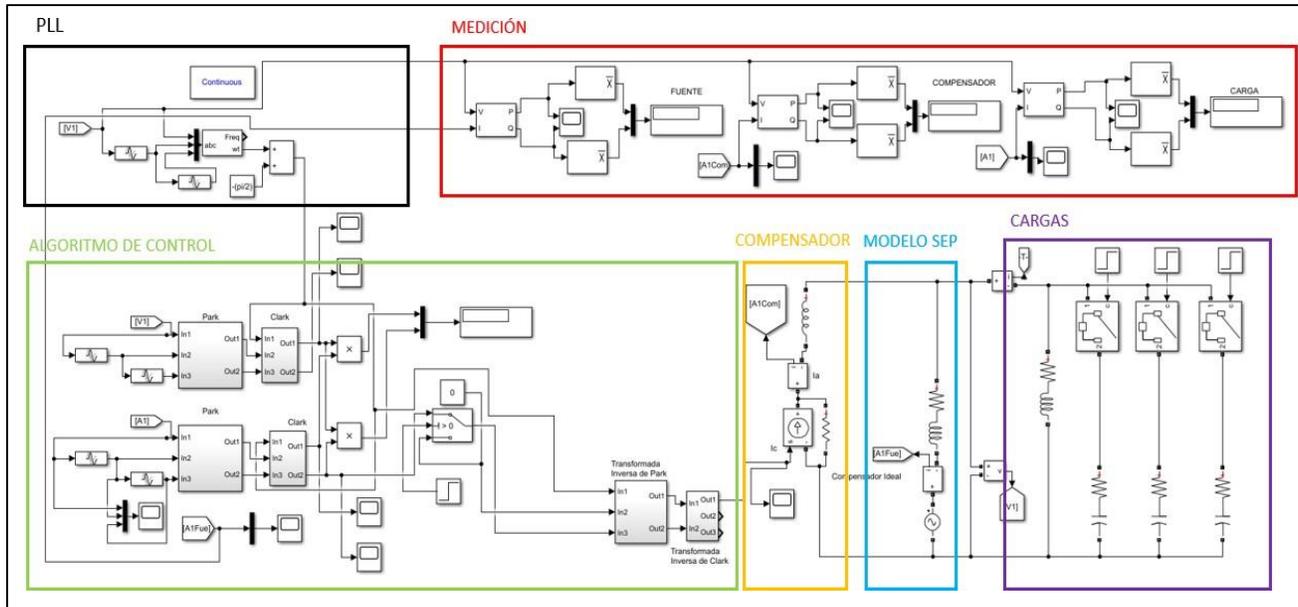


Fig. 5 Esquema de la simulación del compensador de energía reactiva para cargas inductivas y capacitivas

E. Esquema de simulación

La Fig. 5 presenta el esquema de la simulación del compensador de energía reactiva para cargas inductivas y capacitivas, en el cual se resaltan en recuadros los bloques funcionales de cada una de las etapas.

Como primera etapa de la simulación se establece el bloque PLL donde se crea un sistema trifásico virtual, cuya función es sincronizar las señales del sistema de frecuencia y fase de la red eléctrica, facilitando la correcta transformación de coordenadas mediante las transformadas mencionadas. Seguido por el bloque de medición de energía reactiva de la fuente, del compensador y de la carga, representados en color rojo. Estos bloques se encargan de monitorear la energía reactiva y activa de cada etapa del sistema.

El algoritmo de control se resalta en un recuadro verde, en él se incluye el uso de las transformadas de Park y Clarke, mediante las cuales se realiza el procesamiento de las señales de referencia para el funcionamiento del compensador. La sincronización del PLL es esencial para que el compensador, identificado en un recuadro naranja, genera con precisión la corriente correctiva requerida.

Al inicio del algoritmo de control se observa el bloque de la transformada de Clarke y Park. En la implementación de la transformada de Clarke se usan los coeficientes y operadores de las señales de entrada para obtener las componentes α y β utilizando bloques de ganancia, escaladas por $\sqrt{2/3}$ conocida como constante de potencia constante y mediante sumadores que realizan la operación lineal. Por

último, los bloques multiplicadores ajustan la escala para conservar la potencia del sistema.

La transformada de Park convierte las señales a coordenadas dq rotatorias, utilizando las funciones seno y coseno. Los bloques de multiplicación ajustan las señales y luego se suman para obtener las componentes d y q. Continuando con el algoritmo de control, en las Fig. 6 y Fig. 7 se observan los subsistemas existentes de la transformada inversa de Clarke y Park, respectivamente.

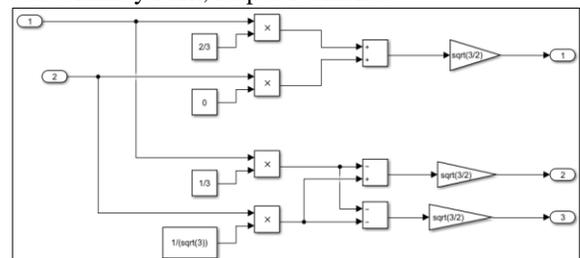


Fig. 6 Transformada inversa de Clarke.

La Fig. 6 representa la transformada inversa de Clarke, la cual convierte las señales $\alpha\beta$ de dos ejes en un sistema trifásico abc. En ella se pueden observar bloques de multiplicación, los cuales ajustan las componentes α y β mediante factores como $2/3$, $1/3$ y $1/\sqrt{3}$. Luego, las sumas y restas presentes en el bloque combinan estos valores para obtener las señales trifásicas. Por último, los bloques normalizan las salidas para obtener las corrientes o voltajes en los ejes a, b y c. Cabe resaltar que al ser el sistema monofásico solo se tendrá en cuenta la fase a generada por el sistema virtual.

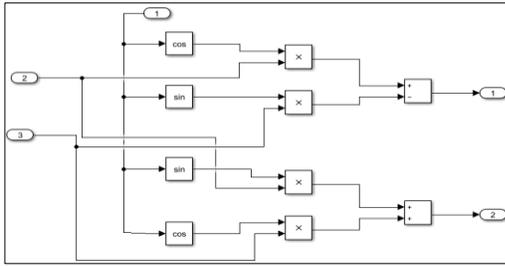


Fig. 7. Transformada inversa de Park.

Seguidamente, se puede observar la transformada inversa de Park en la Fig. 7, esta es utilizada para convertir señales en el sistema dq a coordenadas $\alpha\beta$. Se muestran bloques de coseno y seno que generan los coeficientes de transformación a partir del ángulo del sistema, ángulo dado por el bloque del PLL. Seguidamente, los bloques multiplicadores combinan estas funciones con las señales pq presentes para generar dos componentes transformadas.

Se evidencia el compensador ideal, que es una fuente de corriente, implementado en la simulación junto con el reactor de acople, el cual estabiliza la conexión y filtra la forma de onda de la corriente inyectada. El modelo de la red eléctrica que suministra energía al predio se muestra encerrado por un recuadro en color morado, este modelo se basó en el equivalente de Thévenin de la red, con acometida AWG#8 convencional.

Por último, el modelo de la carga residencial conectada al sistema eléctrico de potencia (SEP), es resaltado en color morado. Se realizaron dos simulaciones, la primera de ellas corresponde a cargas con una impedancia de $z = 30 + 19.85 \Omega$ cada una se activará en momentos diferentes, las cuales simulan distintos consumos para evaluar el desempeño del compensador. Posteriormente, se cambian tres de estas cargas por $z = 30 + 1989.44 \Omega$.

III. RESULTADOS

El escenario de simulación consistió en la activación de cuatro cargas tanto inductivas como capacitivas que se encienden paulatinamente en los instantes 0s, 0.3s, 0.6s y 0.9s. A continuación, se muestran los resultados:

A. Comportamiento de corrientes en el sistema: fuente, carga y compensador para carga inductiva.

Como primer paso se muestra la forma de onda de la corriente de la fuente en la Fig. 8.

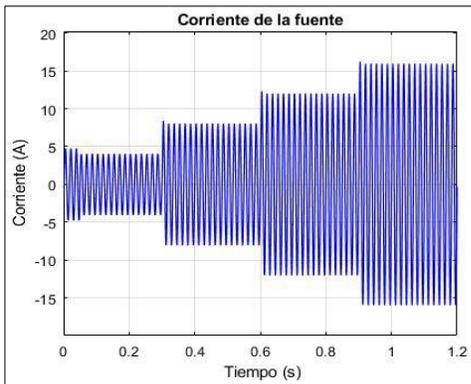


Fig. 8. Corriente de la fuente para carga inductiva.

Se aprecia un comportamiento que sigue la evolución de la carga, a medida que esta aumenta su demanda de potencia activa y reactiva, la corriente de la fuente también incrementa. Sin embargo, como se mostrará más adelante ese tan solo corresponde a la potencia activa.

La Fig. 9 muestra la forma de onda de la corriente generada por el compensador la cual permite suministrar la energía reactiva que la carga necesita.

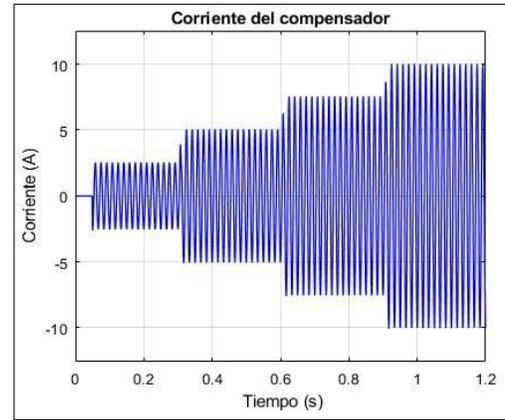


Fig. 9. Corriente del compensador

A continuación, en la Fig. 10 se presenta la forma de onda de la corriente de la carga, cuyos valores son superiores a los de la fuente, esto se debe a la presencia del dispositivo de compensación de energía reactiva.

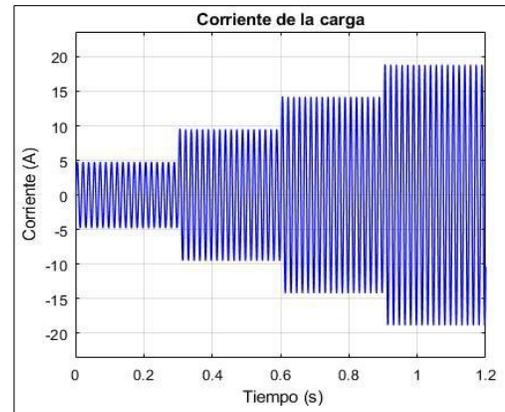


Fig. 10. Corriente de la carga.

B. Componentes de corriente en el marco de referencia dq para carga inductiva.

La Fig. 11 ilustra el comportamiento de la corriente en el eje de cuadratura, la cual disminuye de forma escalonada de acuerdo con la activación de cada nueva carga en el sistema, esto indica que la demanda de potencia reactiva en este eje es modificada por la conexión progresiva de las cargas.

Asimismo, la Fig. 12 muestra la corriente en el eje directo de la carga.

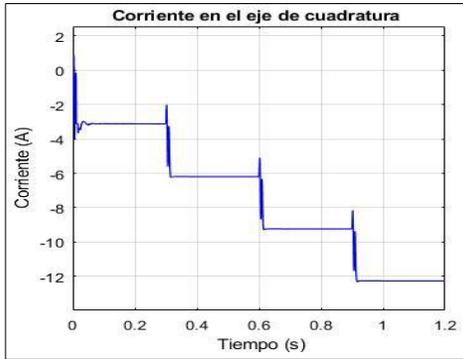


Fig. 11. Corriente en el eje de cuadratura para carga inductiva.

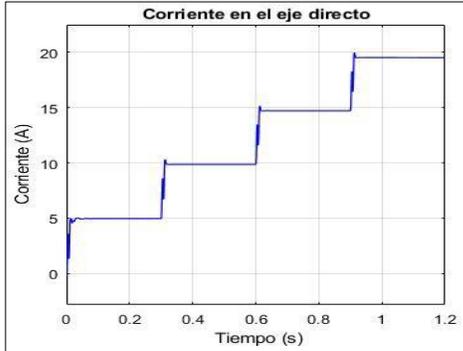


Fig. 12. Corriente en el eje directo para carga inductiva.

C. Componentes de corriente en el marco de referencia dq para carga inductiva y capacitiva.

Como se puede observar la corriente en el eje directo aumenta progresivamente al realizar la conexión de cada carga, con valores que escalan en función de la reducción impedancia del sistema y por ende del aumento de la carga.

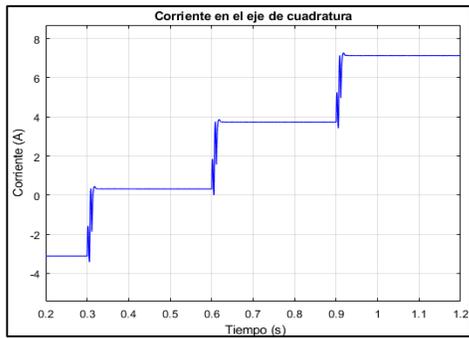


Fig. 13. Corriente en el eje de cuadratura para carga capacitiva.

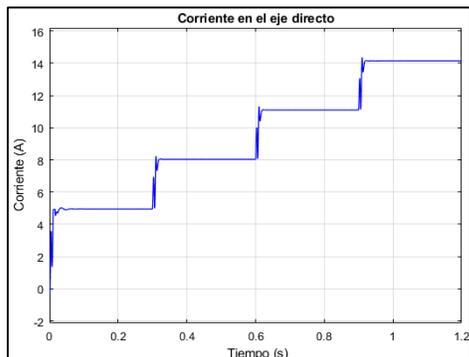


Fig. 14. Corriente en el eje directo para carga capacitiva.

En la Fig. 13 y la Fig. 14 se evidencian la corriente en el eje de cuadratura y en el eje directo, respectivamente, para la carga inductiva y capacitiva. Este resultado fue obtenido al tomar la medición de la fuente y luego pasado por las transformadas de Park y Clarke, se observa como a corriente crece porque se está absorbiendo más energía reactiva y aumenta la potencia activa.

Componentes de tensión en el marco de referencia dq para carga inductiva.

Por otro lado, es importante analizar el voltaje en el eje de cuadratura mostrado en la Fig. 15.

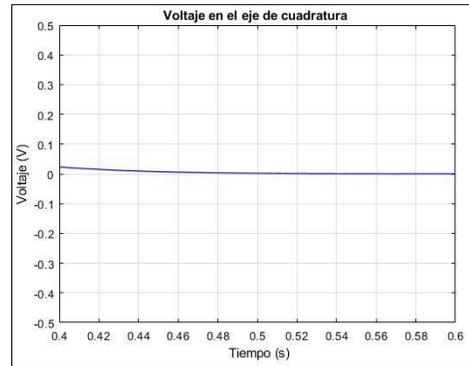


Fig. 15. Voltaje en el eje de cuadratura para carga inductiva.

La Fig. 15 muestra el voltaje en el eje de cuadratura obtenido en la simulación realizada en Simulink al integrar progresivamente cuatro cargas. En dicha figura se observa un comportamiento prácticamente nulo y continuo, lo que indica la ausencia de una componente significativa de voltaje en el eje de cuadratura. Esto contrasta con el voltaje en el eje directo, presentado en la Fig. 16.

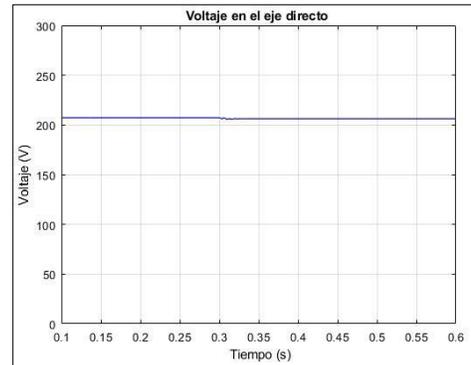


Fig. 16. Voltaje en el eje directo para carga inductiva.

En la Fig. 16 se muestra el voltaje en el eje directo, donde no se evidencian oscilaciones ni variaciones significativas, lo que sugiere que el compensador mantiene el voltaje en este eje estable a pesar de la adición progresiva de cargas.

D. Componentes de tensión en el marco de referencia dq para carga inductiva y capacitiva.

En la Fig. 17 y la Fig. 18 se evidencian el voltaje en el eje de cuadratura y en el eje directo para la carga inductiva capacitiva, respectivamente.

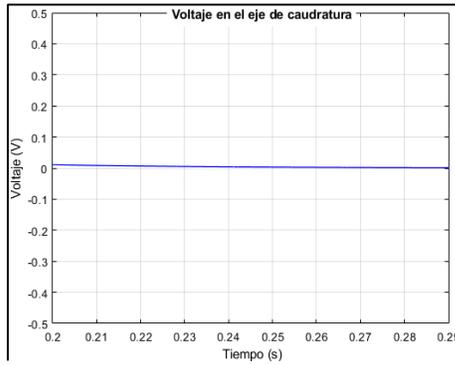


Fig. 17 Voltaje en el eje de cuadratura para carga capacitiva.

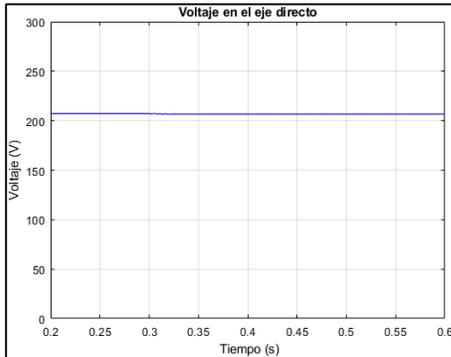


Fig. 18. Voltaje en el eje directo para carga capacitiva.

En el eje de cuadratura no existe voltaje, siendo este igual a cero ya que el marco referencial de q está sobre el fasor espacial del voltaje, por lo que, solo existe componente en el eje directo.

E. Perfiles de potencia activa y reactiva en un sistema con compensación para carga inductiva.

A continuación, se evalúa el impacto del compensador en la operación del sistema en cuanto a los aportes de potencia activa y reactiva. Para ello en la Fig. 19 se presenta la evolución de las potencias suministradas por la fuente.

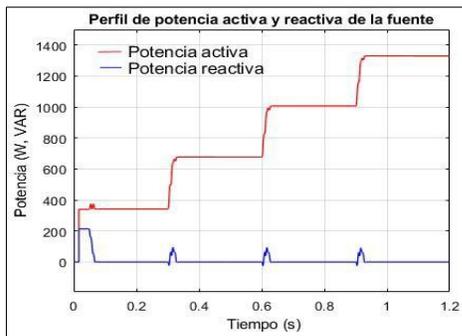


Fig. 19. Perfil de potencia activa y reactiva de la fuente para carga inductiva.

Como se observa en la evolución temporal de la potencia activa y reactiva suministrada por la fuente, la potencia activa presenta un aumento escalonado, mientras que la potencia reactiva se mantiene cercana a cero debido a la compensación realizada, existen pequeños transitorios cuando las cargas se conmutan. La Fig. 20 muestra la evolución temporal de las potencias suministradas por el compensador.

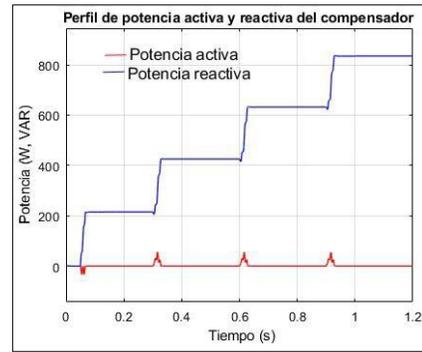


Fig. 20. Perfil de potencia activa y reactiva del compensador para carga inductiva.

La evolución de la potencia activa y reactiva entregada por el compensador. Muestra cómo se inyecta solo potencia reactiva en la red, mientras se mantiene un perfil de potencia activa prácticamente nulo.

Por último, en la Fig. 21 se muestra el comportamiento de la potencia activa y reactiva de la carga inductiva, donde ambas presentan un crecimiento escalonado lo que indica la conexión de las cargas a lo largo de la simulación.

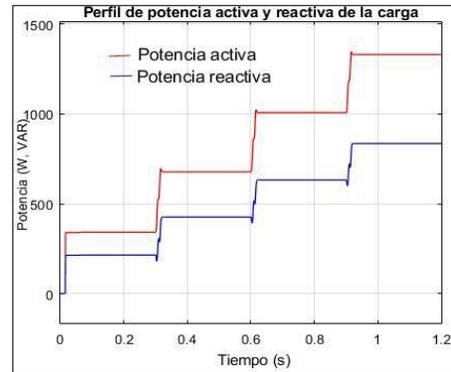


Fig. 21 Perfil de potencia activa y reactiva de la carga inductiva.

F. Perfiles de potencia activa y reactiva en un sistema con compensación para carga inductiva y capacitiva.

En los perfiles de compensación que se presentan a continuación en la Fig. 22, Fig. 23 y la Fig. 24 se observa en color rojo la potencia activa (P) y de color azul la potencia reactiva (Q).

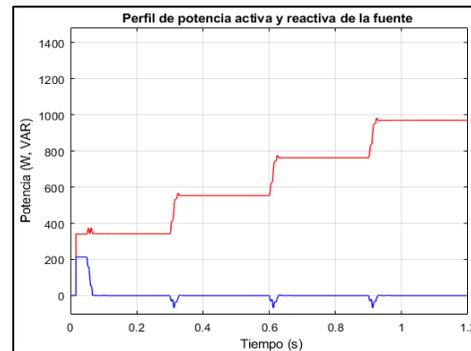


Fig. 22. Perfil de potencia activa y reactiva de la fuente para carga capacitiva.

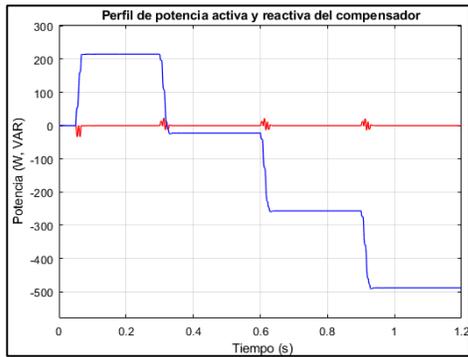


Fig. 23. Perfil de potencia activa y reactiva del compensador para carga capacitiva.

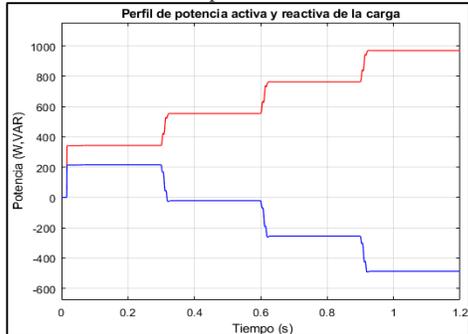


Fig. 24. Perfil de potencia activa y reactiva de la carga capacitiva.

En ella se verifica que la fuente no aporta energía reactiva y el compensador no aporta energía activa. Asimismo, se observa la generación de transitorios, una de las soluciones será incluir un controlador PID a la hora de generar la onda de referencia para mitigar los transitorios.

IV. DISCUSIÓN

A. Relevancia del control de potencia reactiva en redes monofásicas residenciales.

La compensación de potencia reactiva en redes monofásicas ha adquirido una importancia creciente debido al aumento en el uso de cargas no lineales y dispositivos electrónicos en entornos residenciales [19]. Estos elementos, además de reducir el factor de potencia, introducen perturbaciones que afectan la eficiencia energética del sistema y comprometen la calidad del servicio eléctrico. Tradicionalmente, los sistemas de compensación se han implementado principalmente en redes trifásicas industriales; sin embargo, existe una necesidad evidente de soluciones adaptadas al contexto residencial [20]. En este sentido, el desarrollo de estrategias de control avanzadas aplicables a topologías de bajo costo representa un avance significativo en la democratización del acceso a tecnologías de calidad de energía [20].

B. Utilidad de transformaciones espaciales para el control en sistemas monofásicos.

La aplicación de las transformaciones de Clarke y Park en sistemas monofásicos permite una reinterpretación del sistema como una estructura vectorial en un marco de referencia giratorio [21], lo cual facilita el diseño de controladores con mayor precisión y robustez frente a variaciones dinámicas [21].

Esta técnica, comúnmente empleada en máquinas eléctricas y sistemas trifásicos, ha mostrado un potencial para ser adaptada a esquemas monofásicos mediante una representación artificial de ejes ortogonales. La ventaja radica en la capacidad de aislar y controlar directamente las componentes activa y reactiva de la corriente, lo que habilita un control selectivo de potencia reactiva con tiempos de respuesta competitivos [22].

C. Aplicaciones prácticas y proyección de impacto.

El sistema propuesto se perfila como una solución viable para mejorar la eficiencia energética en instalaciones domésticas, especialmente en regiones donde el acceso a equipos de compensación convencionales es limitado por razones económicas. Su implementación puede ser particularmente útil en programas de electrificación rural, redes inteligentes (*smart grids*) y microrredes [23], donde la integración de recursos distribuidos requiere una gestión eficiente del flujo de potencia. Además, el modularidad del sistema permite su escalabilidad e integración con tecnologías como energías renovables y almacenamiento en baterías, ampliando así su campo de aplicación [24].

D. Consideraciones para su implementación y futuras mejoras.

Si bien el desempeño del sistema ha sido validado satisfactoriamente mediante simulaciones en *Matlab/Simulink*, su implementación en hardware requerirá la selección de plataformas de control con capacidad de cómputo suficiente para ejecutar transformaciones y algoritmos en tiempo real. Asimismo, será necesario optimizar la detección de corriente reactiva y mejorar la respuesta transitoria del sistema [25], especialmente ante conmutaciones bruscas de carga. Futuros desarrollos podrían incluir la incorporación de controladores adaptativos, técnicas predictivas, e incluso algoritmos basados en inteligencia artificial para la identificación anticipada de perfiles de carga. Estas mejoras permitirán aumentar la precisión, robustez y adaptabilidad del sistema frente a escenarios de operación complejos [26] [27].

V. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que un sistema monofásico puede ser representado como un sistema trifásico ficticio con el propósito de aplicar técnicas y herramientas de análisis desarrolladas para sistemas eléctricos en coordenadas ABC. Esta transformación permite aprovechar metodologías avanzadas de control vectorial, aunque implica una carga computacional adicional debido a la necesidad de realizar transformaciones directas e inversas al inicio y al final del proceso, respectivamente. Estas conversiones, basadas en las transformaciones de Clarke y Park, permiten una manipulación más estructurada de las variables eléctricas.

El algoritmo de control propuesto ha demostrado ser eficaz en la compensación de potencia reactiva. Este genera como señal de referencia la componente reactiva de la corriente demandada por la carga, permitiendo que el compensador inyecte dicha corriente de manera sincronizada. Como resultado, se logra una cancelación efectiva del flujo de potencia reactiva desde la red, mejorando el factor de potencia y reduciendo las pérdidas asociadas al transporte de corriente que no útil.

Durante conmutación de cargas, se observa la presencia de transitorios de corta duración en la inyección de potencia reactiva. Estos transitorios son consecuencia de ligeras imprecisiones en la generación de la señal de corriente de referencia, inherentes a la dinámica del proceso de adaptación del sistema de control. No obstante, el sistema recupera su estado estacionario en un tiempo aproximado de dos ciclos eléctricos, lo cual es aceptable para aplicaciones residenciales. Este comportamiento transitorio permite mejorar en futuras versiones del sistema, especialmente en la implementación de técnicas de control adaptativo o predictivo que pueden anticipar los cambios de carga.

REFERENCIAS

- [1] E. Li, W. Sheng, X. Wang, and B. Wang, "Combined compensation strategies based on instantaneous reactive power theory for reactive power compensation and load balancing," in 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011, pp. 5788–5791. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057765.
- [2] E. M. Gómez, "Compensación de potencia reactiva" México, Oct. 2009.
- [3] F. Unibio, L. D. Pabon Fernandez, E. A. Caicedo, J. L. Diaz Rodriguez, and A. Pardo Garcia, "Design of a Self-adjusting Reactive Power Compensation Prototype for Residential Application," in Communications in Computer and Information Science, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022, pp. 437–449. doi: 10.1007/978-3-031-20611-5_36.
- [4] S. X. Chen, Y. S. E. Foo, H. B. Gooi, M. Q. Wang, and S. F. Lu, "A centralized reactive power compensation system for LV distribution networks," in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015, p. 1. doi: 10.1109/PESGM.2015.7285675.
- [5] Z., Q. S., H. Z., Y. Z. Jianguo, "Load balancing and reactive power compensation based on capacitor banks shunt compensation in low voltage distribution networks," Chinese, 2012.
- [6] Sandoval Carrero, N. S., Acevedo Quintana, N. M., & Santos Jaimes, L. M. (2022). Guidelines from Industry4.0 to Education 4.0: Case of IoT Technology. Colombian Journal of Advanced Technologies, 1(39), 81–92. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i39.1379>
- [7] Q. Yu, P. Li, W. Liu, and X. Xie, "Overview of STATCOM Technologies," 2004.
- [8] P. Kumar, N. Kumar, and A. K. Akella, "Review of D-STATCOM for Stability Analysis." [Online]. Available: www.iosrjournals.org
- [9] Y. Ma, A. Huang, and X. Zhou, "A review of STATCOM on the electric power system," in 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2015, pp. 162–167. doi: 10.1109/ICMA.2015.7237475.
- [10] P. Garcia-Gonzalez and A. Garcia-Cerrada, "Control system for a PWM-based STATCOM," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1252–1257, 2000, doi: 10.1109/61.891511.
- [11] A. Banerji, S. K. Biswas, and B. Singh, "DSTATCOM control algorithms: A review," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 2, no. 3, pp. 285–296, Sep. 2012, doi: 10.11591/ijpeds.v2i3.515.
- [12] N., B. O. Kumar, "A review on reactive power compensation of distributed energy system", 7th International Conference on Smart Structure System, pp. 16–21, 2020.
- [13] K. Z. Ye, "Compensación de potencia reactiva trifásica usando un convertidor CA/CA monofásico", Actas de APEC 97- Conferencia sobre electrónica de potencia aplicada, vol. 1, pp. 213–219, 1997.
- [14] J. M. Arengas Acosta, M. Lopez Ramirez, & R. Guzman Cabrera. (2024). Impact of preprocessing on the automatic classification of texts using supervised learning and Reuters 21578. Colombian Journal of Advanced Technologies, 1(43), 110–118. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i43.2506>
- [15] R. Shan, Z. Yin, and X. Xiao, "A novel low harmonic dynamic static var compensator research," in 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009, pp. 1395–1398. doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138431.
- [16] T. Braun, J. von Jan, L. Wahnschaffe, and M. Herling, "Advances and Perspectives in the Treatment of T-PLL," Apr. 01, 2020, Springer. doi: 10.1007/s11899-020-00566-5.
- [17] M. Van Paemel, "Analysis of a charge-pump PLL: a new model," IEEE Transactions on Communications, vol. 42, no. 7, pp. 2490–2498, 1994, doi: 10.1109/26.297861.
- [18] J. Rigor, "Transformadas de Clarke e Park," Apr. 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340809565>
- [19] IEEE Standard 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE, 2010.
- [20] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, 1st ed., Hoboken, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
- [21] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in Power Electronics: Selected Problems, 1st ed., Academic Press, 2002.
- [22] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, Nov./Dec. 1996.
- [23] R. H. Lasseter, "Microgrids," in Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, vol. 1, pp. 305–308, Jan. 2002.
- [24] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 52–62, Mar.– Apr. 2009.
- [25] P. Rodríguez, A. Luna, R. S. Muñoz-Aguilar, I. Candela, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 127–138, Jan. 2011.
- [26] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.
- [27] Medina-Barahona, C. J., Mora, G. A., Calvache- Pabón, C., Salazar-Castro, J. A., Mora-Paz, H. A., & Mayorca-Torres, D. (2022). Proposal for an IoT architecture aimed at the creation of prototypes for its application in educational and research platforms. Colombian Journal of Advanced Technologies, 1(39), 118–125. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i39.1405>