



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: ARTÍCULO CIENTÍFICO

Título:

Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad
mención Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Ing. Landeta Guerrero Luis Bolivar

Tutor:

Ing. Quinatoa Caiza Carlos Iván MSc.

LATACUNGA –ECUADOR

2026

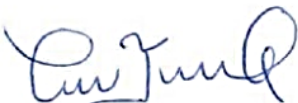
APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación **“Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación”** presentado por el Ing. Landeta Guerrero Luis Bolivar para optar por el título magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, junio 2026



.....

MSc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

CC. 0503287864

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

Latacunga, junio 2026



.....
Ing. Walter Paul Rueda Flores, MSc
CC:0503689896
Presidente del tribunal



.....
Ing. Cruz Loya Edwin Vinicio
CC: 1710814920
Lector 2



.....
Ing. Sixto Fidel Aimacaña Quishpe
CC: 0503425209
Lector 3

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a mis padres, por brindarme la oportunidad de estudiar y apoyarme en cada etapa de mi formación. Gracias por inculcarme valores y virtudes que han sido fundamentales en mi vida personal y profesional.

Su esfuerzo, amor y confianza han sido mi mayor motivación para alcanzar esta meta.

Luis Bolivar Landeta Guerrero

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis padres y hermanos por su apoyo incondicional, esfuerzo y motivación constante durante mi formación académica. Gracias por brindarme la oportunidad de alcanzar esta meta y por inculcarme valores y principios fundamentales en mi vida.

Asimismo, agradezco a mis docentes y a todas las personas que contribuyeron con sus conocimientos y apoyo durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Luis Bolivar Landeta Guerrero

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, junio 2026



.....
Ing. Luis Bolivar Landeta Guerrero

CC: 1004449201

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, junio 2026



.....
Ing. Luis Bolivar Landeta Guerrero

CC: 1004449201

AVAL DEL PRESIDENTE

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, 5 junio 2026



.....
MSc. Walter Paul Rueda Flores, Ing.
CC: 0503689896

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Título: Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación

Autor: Landeta Guerrero Luis Bolivar, Ing.

Tutor: Quinatoa Caiza Carlos Iván, M.Sc.

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y simulación de un filtro activo de potencia monofásico (FAPM) en paralelo, orientado a reducir la distorsión armónica de corriente en el sistema IEEE de 13 barras, específicamente en el nodo 634, fase C. La propuesta sustituye la fuente de enlace DC convencional por un convertidor multicelular en cascada (CMC). El FAPM opera con control por histéresis a una tensión de 800Vac lo que permite un seguimiento preciso de la corriente de referencia y una respuesta dinámica rápida frente a variaciones de carga. Para garantizar continuidad del servicio y confiabilidad, se incorpora un control intercalado descentralizado iterativo, encargado de coordinar las señales portadoras del CMC, supervisar el desfase de las señales portadoras de las celdas.

La validación se realiza mediante simulaciones en MATLAB Simulink, considerando tanto la operación normal como escenarios con pérdida de una celda donde el CMC vuelve a operar a una tensión de 800Vdc en 20ms. Los resultados evidencian que el sistema mantiene, asegura la operación ante el fallo de una celda y ofrece una mitigación efectiva de armónicos pasando de un THD de 44.06% a 0.81%. En conclusión, el esquema propuesto mejora la calidad de la energía, refuerza la robustez operativa y se presenta como una alternativa viable para la compensación armónica en redes de distribución.

PALABRAS CLAVE: filtro activo de potencia, convertidor multicelular, intercalado descentralizado iterativo, control de histéresis.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA

Title: Development of a Single-Phase Active Power Filter with Reconfiguration Capability in the Power Supply.

Author: Landeta Guerrero Luis Bolivar, Ing.

Tutor: Quinatoa Caiza Carlos Iván, M.Sc.

ABSTRACT

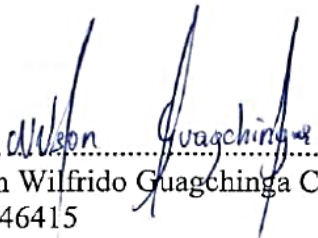
This paper presents the design and simulation of a single-phase shunt active power filter (SPAF) aimed at reducing current harmonic distortion in the IEEE 13-bus test system, specifically at node 634, phase C. The proposed approach replaces the conventional DClink source with a cascaded multicell converter (CMC). The SPAF operates under hysteresis current control at a voltage of 800Vac, allowing accurate reference-current tracking and a fast dynamic response to load variations. To ensure service continuity and reliability, an iterative decentralized iterative control scheme is implemented to coordinate the CMC carrier signals and monitor the phase displacement among cells.

Validation is carried out through MATLAB/Simulink simulations under both normal and fault conditions, including scenarios involving the loss of one converter cell, where the CMC reestablishes operation at 800Vdc within 20ms. The obtained results demonstrate that the system maintains proper operation under cell-fault conditions and provides effective harmonic mitigation, reducing the total harmonic distortion (THD) from 44.06% to 0.81%. In conclusion, the proposed configuration enhances power quality, strengthens operational robustness, and represents a reliable and scalable alternative for harmonic compensation in distribution networks.

KEYWORD: Active power filter; cascaded multicell converter; hysteresis control; decentralized; harmonic compensation.

Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza con cédula de identidad número: 0503246415, magister en la Enseñanza del idioma inglés como lengua extranjera, con número de registro de la SENESCYT: 1010-2019-2041252; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: Desarrollo de un Filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación. Caso de estudio Sector Eléctrico de Landeta Guerrero Luis Bolivar, aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Latacunga, junio, 05, 2026


.....
Nelson Wilfrido Guagchinga Chicaiza
0503246415

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|-----------|
| 1. INFORMACIÓN GENERAL ----- | 1 |
| 2. INTRODUCCIÓN ----- | 1 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS ----- | 3 |
| 3.1. Descripción del sistema ----- | 4 |
| 3.2. Convertidor multicelular ----- | 5 |
| 3.3 Método de control descentralizado ----- | 7 |
| 3.4. Ley de comunicación para señales portadoras ----- | 7 |
| 3.5. Sistema Bypass ----- | 8 |
| 4. SIMULACIÓN ----- | 9 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ----- | 11 |
| 5.1 Estudio con Carga Lineal ----- | 15 |
| 5.2 Estudio con Carga Lineal y No Lineal ----- | 16 |
| 5.3 Estudio de SAG ----- | 16 |
| 6.CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA ----- | 17 |
| 6. REFERENCIAS ----- | 19 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----------|
| FIGURA 1. DIAGRAMA DEFLUJO PARA EL DISEÑO DE FAPM CON CONEXIÓN EN PARALELO SIN FUENTE DE ENLACE DC-DC. | 3 |
| FIGURA 2. FILTRO ACTIVO DE POTENCIA MONOFÁSICO PROPUESTO..... | 4 |
| FIGURA 3. TOPOLOGÍA CLÁSICA DEL INVERSOR MONOFÁSICO. | 5 |
| FIGURA 4. TOPOLOGÍA CONVERTIDOR MULTICELULAR ELEVADOR DE MEDIO PUENTE H DE CUATRO CELDAS. | 6 |
| FIGURA 5. SISTEMA BYPASS. | 8 |
| FIGURA 6. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA IEEE DE 13 BARRAS MODIFICADO EN LA BARRA 634.... | 9 |
| FIGURA 7. A) ONDA SENOIDAL DE LA CORRIENTE DE LA LÍNEA C. (B) ESPECTRO DE ARMÓNICOS DE LA CORRIENTE. | 11 |
| FIGURA 8. (A) CONVERGENCIA DEL CONTROL PARA EL CMC. (B) FALLO EN DE LA CELDA TRES. | 12 |
| FIGURA 9. (A) VOLTAJES DEL CONVERTIDOR MULTICELULAR. (B) VOLTAJE DE INVERSOR | 12 |
| FIGURA 10. CORRIENTE DE REFERENCIA..... | 13 |
| FIGURA 11. (A) ONDA FUNDAMENTAL DE CORRIENTE FILTRADA. (B) THD TOTAL. | 14 |
| FIGURA 12. (A) SAG CON CARGA LINEAL Y NO LINEAL. (B) SAG SOLO CON CARGA LINEAL | 16 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LA BARRA 639 DEL SISTEMA DE PRUEBA IEEE 13 NODOS | 9 |
| TABLA 2. PARÁMETROS DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA MONOFÁSICO..... | 10 |
| TABLA 3. PARÁMETROS DE LA BARRA 634. | 10 |
| TABLA 4. RESUMEN DE PARÁMETROS MEDIDOS DURANTE OPERACIÓN NORMAL Y FALLA DE LA CELDA 3..... | 13 |
| TABLA 5. MUESTRAS MÉTRICAS DEL FAP | 14 |
| TABLA 6. RESULTADOS DE THD PARA EL CASO DE CARGA MIXTA..... | 15 |
| TABLA 7. RESULTADOS DE THD PARA EL CASO DE CARGA MIXTA..... | 16 |
| TABLA 8. RESULTADOS DE SAG..... | 17 |

1. INFORMACIÓN GENERAL

| | |
|--|--|
| Título del Proyecto: | Desarrollo de un filtro activo monofásico para compensar armónicos con capacidad de reconfiguración en la fuente de alimentación |
| Línea de investigación: | Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental. |
| Proyecto de investigación asociado: | Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional. |
| Grupo de Investigación: | Sistemas Eléctricos de Potencia |
| Red nacional o internacional: | Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) |

2. INTRODUCCIÓN

El incremento de la demanda eléctrica, promovido por la expansión industrial, comercial y residencial, ha generado cambios significativos en la operación de los sistemas eléctricos de media y baja tensión. Una de las principales consecuencias es el aumento de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de media y baja tensión [1], [2] Este fenómeno se asocia principalmente con la proliferación de cargas no lineales, como variadores de frecuencia, fuentes de alimentación conmutadas, equipos informáticos, cargadores de vehículos eléctricos, etc. A diferencia de las cargas lineales, estas inyectan corrientes armónicas las cuales distorsionan a la onda sinusoidal fundamental lo que ocasiona diferentes problemas técnicos: pérdidas en las líneas de transmisión, sobrecalentamiento de motore, disminución de la bita útil de equipos conectados y disminución de la eficiencia del sistema ecuatoriano [3]

Para garantizar la calidad de la energía, existen normas internacionales como la IEEE 519 e IEC 61000 las cuales establecen límites de distorsión armónica, los cuales también se han adoptado en la normativa ecuatoriana [3] Antes, se hacía uso

de filtros pasivos de potencia basados en elementos RLC sintonizados para mitigar componentes armónicos específicos [4]. Sin embargo, estas soluciones presentan limitaciones debido a su relación con la frecuencia, su falta de adaptabilidad a las variaciones dinámicas de carga y los riesgos de resonancia. Por el contrario, los filtros activos de potencia monofásicos (FAPM) ofrecen una solución más eficiente al compensar dinámicamente los armónicos mediante inyección de corriente, mejorando así la calidad de la energía [5], [6]

Se han descrito diferentes topologías FAPM, incluyendo configuraciones en serie, en derivación e híbridas. Su rendimiento depende en la estrategia de control adoptada, con enfoques como la teoría de potencia instantánea, la teoría de potencia instantánea, el control del marco síncrono, el control adaptativo y técnicas basadas en el entrenamiento neuronal con el uso de inteligencia artificial. A pesar de su efectividad, la mayoría de las implementaciones de FAPM se basan en un condensador de enlace de DC, lo que presenta limitaciones críticas como variaciones de voltaje, vida útil limitada y respuesta deficiente a perturbaciones, lo que afecta directamente la confiabilidad del sistema.

Recientemente, los convertidores multinivel en cascada (CMC) han surgido como una alternativa para superar estas desventajas. Los CMC ofrecen modularidad, alta calidad de forma de onda, eficiencia y estrategias de control que permiten una tolerancia a fallos para el balanceo y la reconfiguración de voltaje [6], [7]. Estudios previos [8], [9] destacan su capacidad para mantener la operación incluso bajo fallas en la celda, asegurando la continuidad en el suministro de voltaje. En este contexto, la presente investigación plantea como objetivo el diseño de un filtro activo de potencia monofásico con conexión en paralelo para la mitigación de armónicos de corriente, que prescindiera de la fuente de enlace DC convencional y que, en su lugar, incorpore una fuente DC-DC basada en convertidores multicelulares. La propuesta integra mecanismos de control para la reconfiguración ante fallas. Con ello, se busca garantizar la continuidad de operación, incrementar la confiabilidad y robustez del sistema, y cumplir con los estándares de calidad de energía requeridos en las redes de distribución modernas. El resto de este artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección 3 presenta los métodos y materiales; la Sección 4 describe la configuración de simulación del

sistema propuesto; la Sección 5 analiza los resultados; la Sección 6 destaca la contribución científica; y la Sección 7 concluye el artículo con las conclusiones.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon métodos de modelación matemática con el fin de establecer las ecuaciones necesarias para la construcción del FAPM. De igual manera, se recurrió a la investigación documental, tomando como referencia trabajos previos de autores en [10], quienes describen el comportamiento de la electrónica de potencia empleada en la sustitución de la fuente de enlace DC por un CMC con tolerancia a fallos.

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo que representa la secuencia metodológica seguida para el desarrollo del FAPM sin fuente de enlace DC.

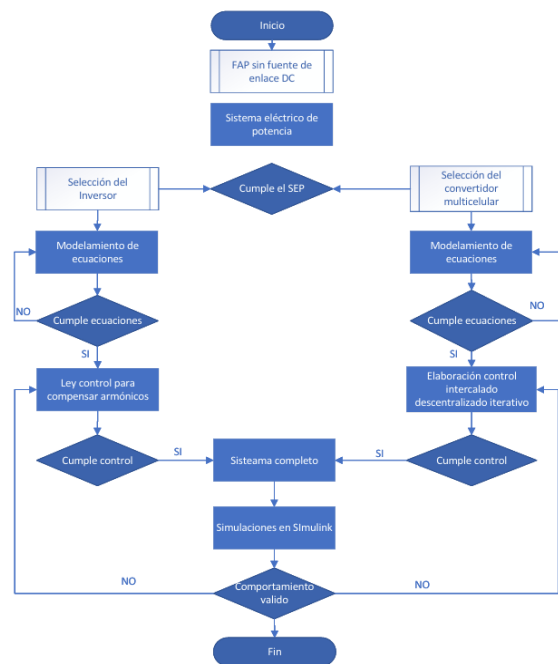


Figura 1.Diagrama deflujo para el diseño de FAPM con conexión en paralelo sin fuente de enlace DC-DC.

Como se aprecia en la Figura 1, el diagrama de flujo representa un proceso secuencial. El primer paso consiste en disponer del sistema de 13 barras de la IEEE, adaptado a un sistema monofásico de bajo voltaje, que sirve como entorno de prueba para la mitigación de armónicos de corriente. En segundo lugar, se realiza la selección del inversor DC-AC del FAPM propuesto; para este caso de estudio se optó por un inversor de puente completo, debido a su simplicidad y adecuada

capacidad de conversión. Una vez definido el inversor, el siguiente paso corresponde al diseño de la ley de control, la cual debe garantizar la corrección de los armónicos de corriente.

El tercer paso, contando ya con el SEP y el inversor, consiste en la selección del convertidor multicelular, que sustituye la fuente de enlace DC tradicional. A continuación, se procede a la obtención de las ecuaciones características y, posteriormente, al diseño de la estrategia de control intercalado descentralizado iterativo, necesaria para coordinar el funcionamiento de las celdas del convertidor. Finalmente, una vez culminadas todas estas etapas, se llevan a cabo las simulaciones en MATLAB/Simulink, con el propósito de validar el comportamiento del sistema y comprobar la eficacia del FAPM en la mitigación de armónicos de corriente.

3.1. Descripción del sistema

La Figura 2 corresponde al FAPM propuesto donde se evidencia una topología tradicional la funciona inyectando corrientes de compensación para mitigar los armónicos de corriente generadas por las cargas no lineales [11]

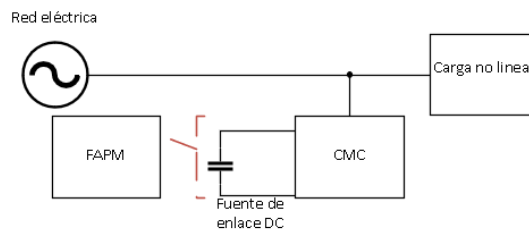


Figura 2. Filtro activo de potencia monofásico propuesto.

Para el caso de estudio se propone sustituir la fuente de enlace DC por un convertidor multicelular conectado en cascada el cual debe estar conectado a un inversor monofásico, esto se presencia en la Figura 2. dicho inversor debe tener la capacidad de transformar el voltaje DC en voltaje AC, para ello la Figura 3 muestra la topología clásica de un inversor.

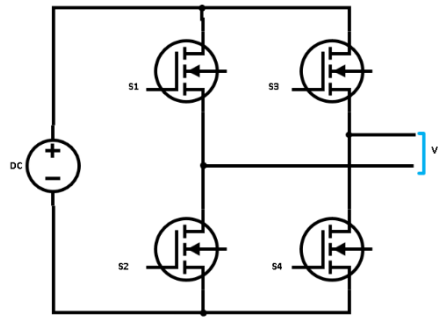


Figura 3. Topología clásica del inversor monofásico.

El funcionamiento del inversor monofásico de puente completo consta de dos ciclos demostrado por autores, el primer ciclo se da cuando conmutan los transistores S_1 y S_4 entregando el voltaje AC positivo; el segundo ciclo se da cuando los transistores S_2 y S_3 conmutan arrojando el voltaje AC negativo, teniendo la onda senoidal del voltaje. Además, se debe aplicar una ley de control por histéresis, el cual tiene la capacidad de censar la corriente en tiempo real, donde el objetivo es mantener la corriente del inversor, esto dentro de una corriente de referencia donde el FAPM mitiga las componentes armónicas de corriente. La ecuación (1) describe el control por histéresis.

$$u(t) = \begin{cases} +1 & \text{si } I_c(t) < I_{c\text{ref}} - HB, \text{ aumenta corriente} \\ -1 & \text{si } I_c(t) > I_{c\text{ref}} + HB, \text{ disminuye corriente} \\ u(t^-) & \text{si } |I_c(t) - I_{c\text{ref}}| \leq HB, \text{ mantiene la corriente} \end{cases} \quad (1)$$

Como se aprecia en la ecuación (1) la señal de control el cual decide el estado de conmutación del inversor es $u(t)$, mientras que la banda de tolerancia HB es la que define la referencia de corriente.

3.2. Convertidor multicelular

La Figura 3 muestra una topología de FAP sin fuente de enlace DC, el sustituir dicha fuente con un convertidor multicelular se puede aplicar métodos de balanceo y reconfiguración los cuales permiten tener un sistema con mayor robustez. La topología que mejor se acopla al sistema es la del convertidor multicelular elevador de medio puente H conectado en cascada, esta topología permite que el voltaje de

fase resultante se sintetice en la suma de voltajes generados por cada celda[13], dicha topología de muestra en la Figura 4.

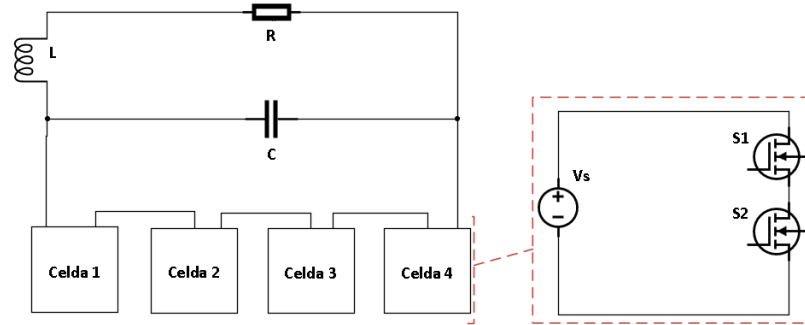


Figura 4. topología convertidor multicelular elevador de medio puente H de cuatro celdas.

Haciendo uso de la literatura clásica de convertidores tradicionales [14] se tiene las ecuaciones generales para el dimensionamiento del CMC. La ecuación (2) formula la función del voltaje de salida. La ecuación (3) impone el ciclo de trabajo, mientras que la ecuación (4) describe el dimensionamiento del inductor. La ecuación (5) impone el rizado del capacitor.

$$V_o = NV_s d \quad (2)$$

$$d = \frac{V_o}{NV_s} \quad (3)$$

$$L = \frac{V_s(1-d)}{\Delta i N f} \quad (4)$$

$$\Delta Q_c = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta I_i}{2} \right) \quad (5)$$

Nótese: que en las ecuaciones descritas V_o es el voltaje de salida, mientras que V_s es el voltaje de entrada, mientras que d es el ciclo de trabajo y N es el número de

celdas, además Δi es el rizado de corriente ΔQ_c asegura que el voltaje de salida del convertidor se mantenga constante, minimizando el rizado.

Con las ecuaciones descritas se puede modelar el CMC con diferentes parámetros eléctricos para manejar diferentes salidas de tensión.

3.3 Método de control descentralizado

Este método de control utiliza controladores locales que se comunican con sus vecinos más cercanos (celdas) para intercalar las señales PWM, la cual permite la toma de decisiones para la reconfiguración local.

En específico, la estrategia PS-PWM para convertidores de n celdas consiste en tener una señal de referencia y varias señales portadoras que se determinan por medio de los niveles del convertidor con la expresión $k - 1$, donde k es el número niveles [15]; las señales portadoras deben tener la misma frecuencia y amplitud, pero deben estar desplazadas con un retardo la cual se usa para obtener la señal modulada, para obtener el desfase entre celdas se usa la formula descrita en la ecuación (6).

$$\text{desfase} = \frac{2\pi}{N}(K - 1) \quad (6)$$

Donde: N corresponde al número de celdas del CM. El resultado de dicha ecuación es el correcto intercalado de las señales portadoras el cual optimiza la salida de tensión.

3.4. Ley de comunicación para señales portadoras

Con el fin de dar al CMC, capacidad de reconfiguración ante fallas, se plantea una ley de control basada en la comunicación local de las señales portadoras de cada celda. Donde cada controlador regula la señal portadora considerando a sus señales vecinas más cercanas, evitando la referencia centralizada. La ecuación (7) describe la ley de control propuesta.

$$\varphi_{on} = K_n \varphi_{en} + K_{n+1} \varphi_{en+1} + \dots + K_{n+j} \varphi_{en+p} \quad (7)$$

Donde φ_{on} representa la señal portadora de cada celda mientras que φ_{en} , φ_{en+1} son las señales de las celdas vecinas, el coeficiente K corresponde a la ganancia del control el cual determina el nivel de acoplamiento entre señales.

Este planteamiento asegura que la sincronización se alcance de forma distribuida, permitiendo la adaptación dinámica del convertidor en caso de que una celda quede fuera de servicio.

3.5. Sistema Bypass

Para el equilibrio de comunicación para cada celda del convertidor multicelular debe estar conectado por un Bypass el cual tenga la capacidad de gestionar al número de celdas activas durante el funcionamiento para la reconfiguración de las celdas en el caso de existir un fallo. La Figura 5 describe el Diagrama de bloques del bypass.

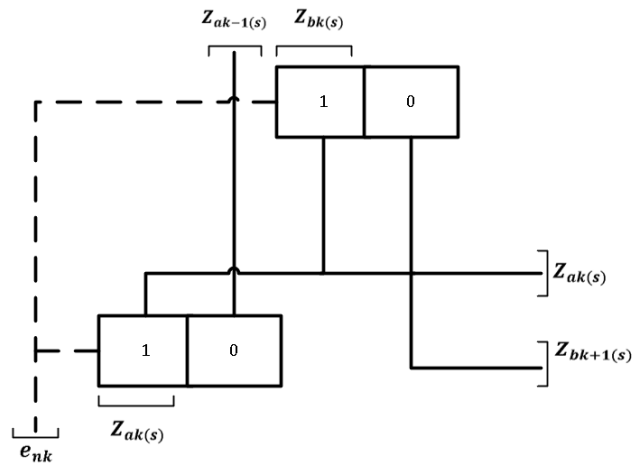


Figura 5. Sistema Bypass.

De acuerdo con la Figura 5 el sistema bypass de k celdas depende de una señal de habilitación e_{nk} , donde: si $nk = 1$, la celda esta activa por lo cual el bypass envía a las celdas aledañas el valor propio de la celda $Z_{k(s)}$. Si $nk = 0$, la celda no está activa y el sistema bypass envía la celda $k + 1$ el valor recibido por la celda $k - 1$. para la celda 1 y la celda k el controlador cierra el lazo enviando $Z_{k(s)}$ a la celda 1 y $Z_{1k(s)}$ a la celda k. la ecuación (8) describe los estados de comportamiento del Bypass.

$$\begin{pmatrix} Z_{ak} \\ Z_{bk} \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} Z_k \\ Z_k \end{pmatrix}; e_{nk} = 1 \\ \begin{pmatrix} Z_{ak+1} \\ Z_{ak-1} \end{pmatrix}; e_{nk} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Como se aprecia en la ecuación (8) el sistema bypass tiene dos estados, donde en el primer estado cuando no existe el fallo en una celda del CMC el bypass envía el propio valor de desfase de la señal portadora; mientras que cuando existe una falla en una celda el sistema bypass envía el valor de desfase de la señal portadora del vecino como salida.

4. SIMULACIÓN

Para validar el FAPM propuesto y evaluar el desempeño en condiciones de operación realistas, se desarrolló la simulación en el software Matlab Simulink. La red de prueba corresponde al sistema de 13 barras de la IEEE modificada en la barra 634. Para esta configuración se retiró la carga trifásica y se conectó una carga no lineal en la línea C. además se acoplo amperímetros en la red, la carga y el FAPM, para la medición de corrientes necesarias para el control de histéresis. La disposición completa se indica en la Figura 6.

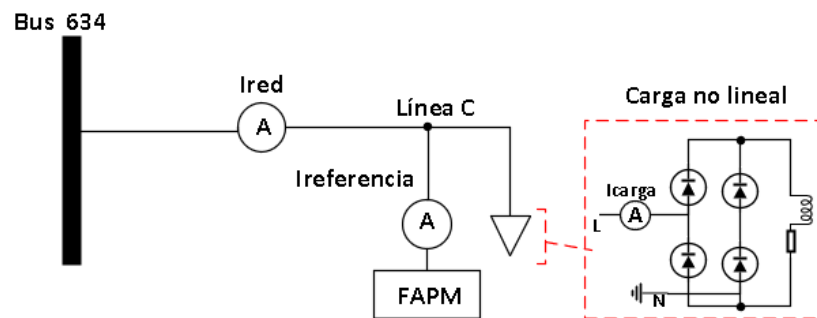


Figura 6. Configuración del sistema IEEE de 13 barras modificado en la barra 634

La elección de esta barra en el sistema permite estudiar el comportamiento del FAPM en los dos escenarios de funcionamiento, donde se analiza el comportamiento normal y el comportamiento al perder una celda en la fuente de alimentación del FAPM. La Tabla 1 muestra los componentes de armónicos del SEP.

Tabla 1. Características de la barra 639 del sistema de prueba IEEE 13 nodos

| Barra 634 | | |
|-------------------------|-------|--------|
| Parámetro | valor | unidad |
| voltaje lado secundario | 480 | V |
| THD | 44.06 | % |
| Factor de potencia | 0.8 | - |

| | | |
|-------------------|----|----|
| Frecuencia | 60 | Hz |
|-------------------|----|----|

La Tabla 1 indica los parámetros eléctricos de la barra 634 del sistema de la IEEE de 13 nodos, donde se emplea como punto de conexión para el FAPM. En este nodo se evidencia un nivel de distorsión armónica total del 44.06%, lo que evidencia la presencia de cargas lineales. La tensión nominal es de 480V en el lado secundario con un factor de potencia del 0.8 a una frecuencia de 60Hz. Estos valores constituyen los valores iniciales para la simulación, la Tabla 2 muestra los parámetros del FAPM propuesto.

Tabla 2. Parámetros del filtro activo de potencia monofásico.

| Inversor | | |
|------------------------------|-------|----------|
| Parámetro | valor | unidad |
| Voltaje entrada | 800 | V DC |
| Voltaje de salida | 800 | VAC |
| Frecuencia conmutación | 50 | KHz |
| Inductor de enlace | 0.5 | H |
| convertidor multicelular | | |
| Voltaje de entrada por celda | 200 | V DC |
| Voltaje de salida | 800 | V DC |
| Rizado de corriente | 5 | % |
| Rizado de voltaje | 5 | % |
| Inductor | 1.225 | Hz |
| Corriente de salida | 20 | A |
| Capacitor | 0.88 | mF |
| Resistencia | 24 | Ω |
| Frecuencia conmutación | 50 | Khz |

La tabla 2 corresponde a los parámetros del FAPM donde la frecuencia del inversor es de 50Khz, esto tener compensar armónicos con buena calidad, además se seleccionó la misma frecuencia de conmutación para el CMC para tener los rizados de corriente y voltaje, de la misma manera el CMC entrega los 480V en DC al inversor que los convierte en tensión alterna para el funcionamiento del FAPM, los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de la barra 634.

| Barra 634 | | |
|------------------|-------|--------|
| Parámetro | valor | unidad |

| | | |
|-------------------------|------|----|
| voltaje lado secundario | 480 | V |
| THD | 0.81 | % |
| Frecuencia | 60 | Hz |

Como se aprecia en la Tabla 3, tras la aplicación del FAPM en la barra 634, el sistema indica una distorsión armónica total del 0.81%, un valor por debajo del límite recomendado por la normativa ecuatoriana (debe ser menor del 5%), evidenciando que el filtro no solo compensa corrientes armónicas, sino también el componente reactivo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 7a representa la forma de onda de corriente vista en la barra 634 cuando están conectadas cargas no lineales. Donde se evidencia que la onda no es senoidal, pues se tiene deformaciones características que implica la presencia de armónicos de corriente superpuestos en la onda fundamental de 60Hz. Lo antes descrito se corrobora con la Figura 9b, donde se observa el espectro armónico de la corriente, donde se puede apreciar armónicos de orden superior con respecto a la onda fundamental, la coexistencia de estas componentes da como resultado un THD del 44.06%.

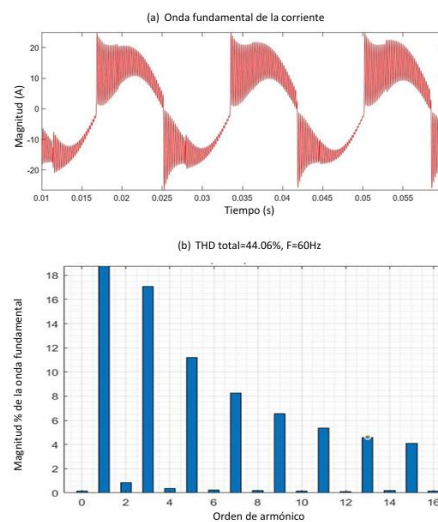


Figura 7. a) Onda senoidal de la corriente de la línea C. (b) Espectro de armónicos de la corriente.

Para el análisis de resultados se verifica el funcionamiento del FAPM cuando en la fuente de alimentación se opera de manera normal y con la falla, esto para comprobar el funcionamiento de la fuente de alimentación del PWM. La Figura 8a indica la caída de la señal portadora en la celda tres del CMC, mientras que la figura 8a muestra el accionar de la ley de control intercalada descentralizada iterativa.

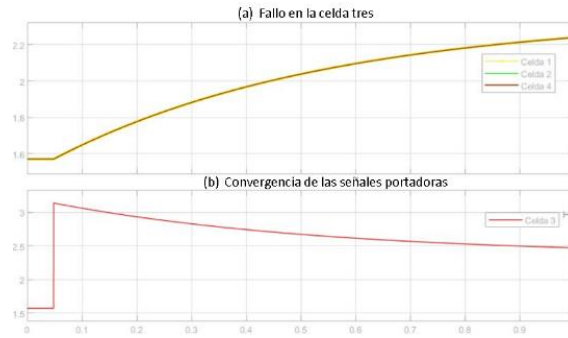


Figura 8.(a) Convergencia del control para el CMC. (b) Fallo en de la celda tres.

La figura demuestra que la estrategia de control mantiene la sincronización entre las señales portadoras y permite la detección y aislamiento rápido de la celda defectuosa. Esta rápida capacidad de reconfiguración es esencial para garantizar la operación continua en estructuras multinivel modulares.

Cuando ocurre la falla, el sistema de control aísla la celda defectuosa y reconfigura el desfase entre las celdas restantes, manteniendo la sincronización. El CMC preserva la estabilidad de voltaje en ambas condiciones, como se muestra en la Fig. 9.

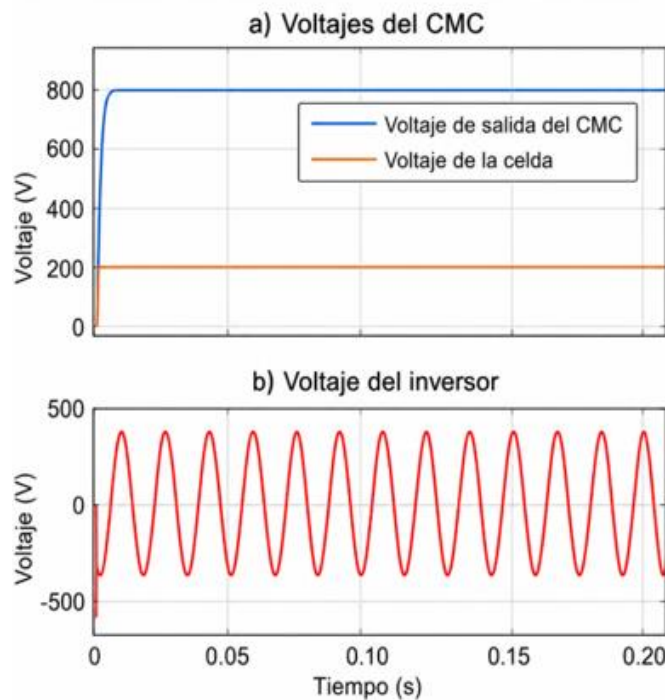


Figura 9.(a) Voltajes del convertidor multicelular. (b) Voltaje de inversor

Como se identifica en la Figura 9a el voltaje que aporta cada celda es de 120V, mientras que el voltaje de salida se sintetiza por el aporte de voltaje de entrada de cada celda hasta tener un voltaje de salida de 480V La Figura 9b corresponde al

voltaje de salida del inversor el cual convierte el voltaje de salida DC del en voltaje AC manteniendo el voltaje de salida establecido por el CMC, con esto se corrobora el funcionamiento del sistema cuando opera en condiciones normales y con el fallo de una celda.

Tabla 4.Resumen de parámetros medidos durante operación normal y falla de la celda 3

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|-----------------|
| Error transitorio | ≈ 0.5 A |
| Tiempo de recuperación | 20 ms |
| Desviación del voltaje DC | <1 % (800 V) |
| THD (operación normal) | 0.81 % |
| THD (con falla) | 0.81 % |

Estos resultados demuestran que la estrategia de control propuesta garantiza una respuesta dinámica rápida y una degradación mínima del rendimiento bajo condiciones de falla. El corto tiempo de recuperación confirma la efectividad del lazo descentralizado para restablecer la operación en estado estable.

El control por histéresis trabaja con una corriente de referencia dada por el voltaje de la red, que define la forma y fase de la corriente; y la corriente de la carga no lineal la cual de donde se extrae los armónicos para su compensación, en la Figura 10 se aprecia la corriente de referencia para el FAPM.

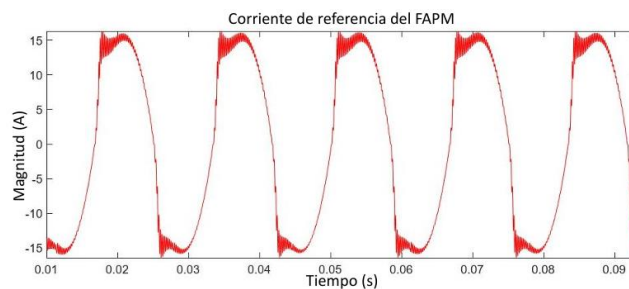


Figura 10. Corriente de referencia.

Con la corriente de referencia el FAPM puede inyectar los armónicos a la red para su mitigación y por ende la reducción del THD de la red. Finalmente, la última simulación corresponde al funcionamiento del FAP en sus condiciones de operación, esto para corroborar la mitigación de armónicos de corriente en la barra 634, la Figura 11a indica la onda senoidal de la línea C; la Figura 11b muestra un THD total del 0.81%, con lo cual se evidencia la mitigación de armónicos.

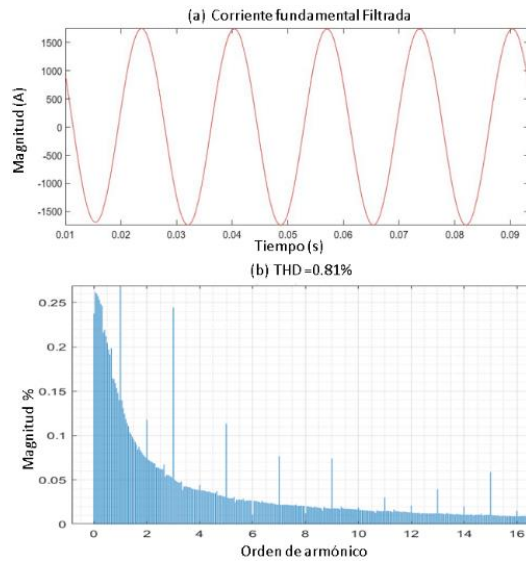


Figura 11.(a) Onda fundamental de corriente filtrada. (b) THD total.

El control del FAPM compensa los armónicos que están presentes en la red, para suprimir dichos armónicos se inyecta armónicos en contrafase; en la Figura 9b se evidencia que la onda senoidal de la corriente es pura.

LA Tabla 5 muestra métricas de mediciones del RMS (root mean squared error), MAE (mean absolute error) y MSE (Mean Squared Error); entre la corriente de referencia y la corriente del FAP para verificar el desempeño del control, de la misma manera se compara la corriente de la red con la corriente de la carga para comprobar la efectividad de compensación y se compara la corriente de carga con la corriente del FAPM para apreciar la capacidad de compensación y así validar el desempeño del sistema propuesto.

| Tabla 5. Muestras métricas del FAP | | |
|---|------------|------------------------|
| 1.comparación I_ref vs I_fap | | |
| RMS | MAE | MSE |
| 0.00213 | 0.00156 | 4.541×10^{-6} |
| 2.comparación I_carga vs I_red | | |
| RMS | MAE | MSE |
| 0.00153 | 0.00153 | 4.32×10^{-6} |
| 3.comparación I_carga vs I_fap | | |
| RMS | MAE | MSE |
| 0.00213 | 0.00213 | 4.55×10^{-6} |

De la Tabla 5 se observa que, en la primera comparación, los valores reducidos de RMS (0. y MAE demuestran la capacidad de seguimiento del lazo de control del FAPM. El bajo valor del MSE confirma que la corriente inyectada por el filtro replica con alta precisión la forma de onda de la corriente de referencia, garantizando una adecuada compensación de los componentes armónicos.

En la segunda comparación los valores mínimos de RMS y MAE demuestran que, tras la conexión del FAPM, la corriente suministrada por la red adquiere una forma prácticamente senoidal. Esto valida la efectividad del filtro en la mitigación de las distorsiones armónicas de corriente generadas por la carga no lineal.

Por último, la tercera comparación presenta un RMS y MAE igual y un MSE muy bajo, lo que indica una alta correlación inversa entre ambas señales. Este comportamiento confirma que el FAPM inyecta una corriente de igual magnitud y fase opuesta a la de los armónicos de la carga, cumpliendo de manera efectiva el principio de compensación activa y contribuyendo a la reducción de la distorsión armónica total en el sistema. Validando de esta manera el funcionamiento del sistema propuesto.

5.1 Estudio con Carga Lineal

Bajo condiciones de carga lineal, el voltaje y la corriente permanecen sinusoidales; por lo tanto, la corriente de referencia es cero y no se requiere compensación. Esto confirma que el APF opera de manera selectiva, evitando pérdidas innecesarias por conmutación y mejorando la eficiencia general del sistema.

Tabla 6. Resultados de THD para el caso de carga mixta

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| THD de corriente de red | 26.41 % |
| THD de corriente del FAPM | 14.77 % |
| THD de corriente de red con FAPM | 5.08 % |

El APF reduce la distorsión armónica a valores cercanos a los límites establecidos por las normas, demostrando un funcionamiento efectivo bajo condiciones de carga mixta. Este resultado confirma la adaptabilidad del filtro cuando múltiples fuentes de distorsión están presentes simultáneamente.

5.2 Estudio con Carga Lineal y No Lineal

La Tabla 7 muestra los resultados de THD bajo condiciones de carga mixta.

Tabla 7. Resultados de THD para el caso de carga mixta

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------------|---------|
| THD de corriente de la red | 26.41 % |
| THD de corriente del FAPM | 14.77 % |
| THD de corriente de la red con FAPM | 5.08 % |

El APF reduce la distorsión armónica a valores cercanos a los límites establecidos por las normas, demostrando un funcionamiento eficaz bajo condiciones de carga mixta. Este resultado confirma la adaptabilidad del filtro cuando múltiples fuentes de distorsión están presentes simultáneamente.

5.3 Estudio de SAG

La Figura 12 muestra la respuesta del sistema bajo un hundimiento de voltaje, mientras que la Tabla correspondiente resume los resultados de THD.

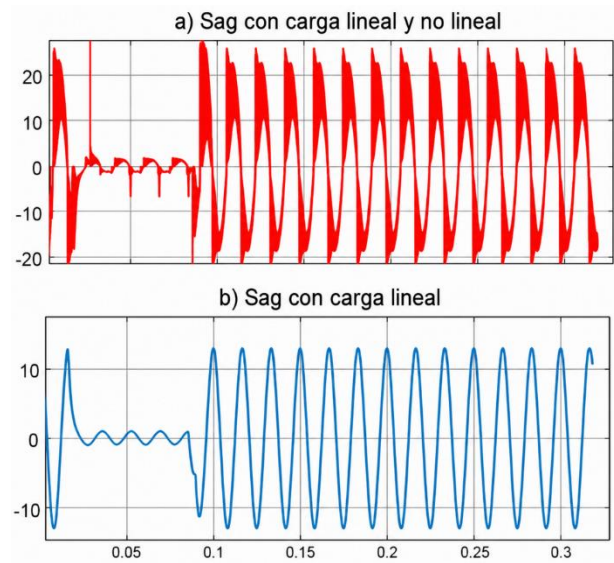


Figura 12.(a) Sag con carga lineal y no lineal. (b) Sag solo con carga lineal

El sistema mantiene una operación estable durante el sag, aunque la distorsión armónica aumenta debido a la perturbación. Este comportamiento es esperado, ya que los sag de voltaje introducen desequilibrios transitorios en el sistema.

La Tabla 8 presenta los resultados de THD obtenidos bajo condiciones de sag.

Tabla 8.Resultados de Sag.

| Caso | THD sin FAPM (%) | THD con FAPM (%) |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Carga no lineal | 72.93 | 30.69 |
| Carga lineal | 29.61 | 30.56 |
| Carga lineal + no lineal | 49.46 | 30.72 |

A pesar de la severa perturbación, el APF reduce significativamente el THD bajo condiciones de alta distorsión y mantiene un desempeño aceptable durante los sag de voltaje. Esto demuestra su robustez y su idoneidad para sistemas de distribución reales sujetos a perturbaciones dinámicas.

6.CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

La principal contribución científica de este trabajo consiste en el desarrollo de un filtro activo de potencia monofásico basado en un convertidor multicelular en cascada (CMC) con capacidad de reconfiguración y tolerancia a fallas. A diferencia de las arquitecturas convencionales que utilizan una fuente DC-link tradicional, la propuesta presentada sustituye esta estructura por un convertidor multicelular capaz de mantener la operación del sistema incluso ante la falla de una de sus celdas, garantizando así la continuidad de la compensación armónica.

En la literatura especializada existen investigaciones relacionadas con filtros activos de potencia sin capacitores y con convertidores multicelular reconfigurables; sin embargo, dichos enfoques han sido desarrollados de manera independiente. Hasta donde se conoce, no se han reportado aplicaciones orientadas específicamente a la compensación armónica mediante filtros shunt que integren simultáneamente mecanismos internos de tolerancia a fallas y estrategias de reconfiguración automática. En este sentido, el presente estudio propone una integración novedosa de ambas tecnologías, permitiendo mantener la estabilidad de voltaje y la mitigación de armónicos aún bajo condiciones de falla.

Otro aporte relevante corresponde a la implementación de un control iterativo descentralizado de tipo iterativo, diseñado para coordinar la sincronización de

portadoras entre las distintas celdas del convertidor. Esta estrategia elimina la necesidad de un controlador centralizado y permite la autorreconfiguración automática del sistema, incrementando la confiabilidad y flexibilidad operativa del APF. Los resultados obtenidos en la red de distribución IEEE de 13 barras, específicamente en el nodo 634, demuestran que el sistema es capaz de mantener una compensación armónica continua y una regulación de voltaje estable incluso durante escenarios de perturbación y fallas internas.

Adicionalmente, el trabajo reconoce ciertas limitaciones técnicas y económicas asociadas con la propuesta desarrollada. La incorporación de un convertidor multicelular reconfigurable implica un incremento en los costos de implementación debido al mayor número de dispositivos semiconductores y circuitos de detección requeridos. Asimismo, el esquema de control descentralizado introduce una mayor complejidad en el proceso de ajuste y diseño de los lazos de control en comparación con filtros activos convencionales. Finalmente, aunque el sistema mantiene la operación durante fallas de celdas, la redistribución del voltaje y del esfuerzo de conmutación sobre las celdas restantes puede ocasionar una ligera reducción en la eficiencia global del convertidor. Estas consideraciones evidencian la importancia de realizar futuros análisis orientados a optimizar la relación entre costo, desempeño y confiabilidad para aplicaciones reales en sistemas eléctricos de distribución.

7. CONCLUSIONES

- Este artículo presentó un filtro activo de potencia monofásico basado en un convertidor multicelular en cascada (CMC) tolerante a fallas para la mitigación de armónicos en sistemas de distribución. El sistema propuesto redujo la distorsión armónica total (THD) de corriente de 44.06% a 0.81% tanto en condiciones normales como bajo falla, demostrando una alta efectividad.
- La estrategia de control descentralizado iterativo permitió una rápida reconfiguración durante la falla de una celda, preservando la estabilidad del voltaje y el desempeño de compensación. El sistema

también mostró una operación confiable bajo condiciones de carga mixta y perturbaciones por hundimientos de voltaje (voltaje sag), confirmando su robustez y escalabilidad para mejorar la calidad de energía en redes modernas de distribución.

6. REFERENCIAS

- [1] S. Vélez, “Reducción de armónicos a través de filtros activos basados en convertidores multinivel en sistemas de distribución,” Tesis de Maestría, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/>
- [2] S. Biricik, S. Redif, S. K. Khadem y M. Basu, “Control of the single phase parallel active filter under weak grid voltages,” en Proc. IEEE 5th Int. Symp. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2014, pp. 1–5, doi: 10.1109/PEDG.2014.6878675.
- [3] ARCONEL, “Regulación ARCONEL 001/21: Código de Conexión,” Ecuador, nov. 2024. [En línea]. Disponible: <https://arconel.gob.ec/regulaciones-sector-electrico-ecuadoriano/>
- [4] O. P. Mahela y A. G. Shaik, “Topological aspects of power quality improvement techniques: A comprehensive overview,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1129–1142, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.251.
- [5] W. G. Yugcha, D. F. Pichoasamin y V. P. Astudillo, “Comparación y optimización del uso de filtro pasivo y activo de potencia para mitigar armónicos en redes de distribución,” Revista Técnica Energía, vol. 21, no. 1, pp. 1–11, 2024.
- [6] K. Herrera, Á. Hidalgo y C. Quinatoa, “Development of a PID control for a supercapacitor-based energy storage system using a dual active bridge (DAB)

converter,” en Proc. Int. Conf. Power Energy Systems and Applications (ICoPESA), 2023, pp. 792–796, doi: 10.1109/ICoPESA56898.2023.10140630.

[7] F. Mekri, M. Machmoum, N. Aït-Ahmed y B. Mazari, “A comparative study of voltage controllers for series active power filter,” *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 6, pp. 615–626, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.025.

[8] B. H. Alajrash et al., “A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems,” *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5350–5371, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.05.011.

[9] P. C. Nguyen, Q. D. Phan y D. T. Nguyen, “Decentralized control for modular multilevel interlinking converter in standalone microgrid operation,” *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 13, art. no. 101036, 2025, doi: 10.1016/j.prime.2025.101036.

[10] M. M. Hillesheim et al., “Eigendecomposition of a digital iterative decentralised interleaving for multicellular converters,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 184, pp. 82–105, 2021, doi: 10.1016/j.matcom.2020.07.014.

[11] B. Rouabah, H. Toubakh y M. Sayed-Mouchaweh, “Fault-tolerant control of multicellular converter used in shunt active power filter,” *Electric Power Systems Research*, vol. 188, art. no. 106533, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106533.

[12] H. Toubakh et al., “Self-adaptive learning scheme for early diagnosis of simple and multiple switch faults in multicellular power converters,” *ISA Transactions*, vol. 113, pp. 222–231, 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2020.03.025.

[13] E. De La Cruz Vaca, Á. Hidalgo y C. Quinatoa, “Fuzzy control for a supercapacitor-based energy storage system using a dual active bridge converter,”

en Proc. 13th Int. Conf. Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE), 2023, pp. 78–82, doi: 10.1109/CPEEE56777.2023.10217760.

[14] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009, ISBN: 978-0-07-352263-4.

[15] L. Landeta, “Implementación de un convertidor multicelular con capacidad de reestructuración ante la falla de una celda,” Tesis de Grado, Universidad Técnica del Norte, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.utn.edu.ec/>

[16] S. Echalih et al., “Advanced nonlinear control of single phase shunt active power filter based on full bridge dual buck converter,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, pp. 659–664, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.07.387.