

Hybrid Active Power Filter (APF) with Photovoltaic Generation integration for Voltage Profile Improvement

Filtro Activo de Potencia (APF) Híbrido con integración de Generación Fotovoltaica para la Mejora del Perfil de Tensión

 W. Llumitaxi ¹

 W. Pavón ¹

 L. Ortiz ¹

 N. Pozo²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador
E-mail: wllumitaxi@est.ups.edu.ec; wpavon@ups.edu.ec; lortiz@ups.edu.ec

²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador
E-mail: npozo@usfq.edu.ec

Abstract

The paper presents the design and implementation of a hybrid active power filter (APF), which aims to achieve the voltage levels correction, when they are affected by the photovoltaic generation integration within the electrical distribution network. To achieve the proposed objective, the spatial vector modulation control technique is implemented, resulting in the reduction of current and voltage harmonics. The proposed design is tested on the IEEE 13-bus test system, in MATLAB/Simulink. The proposed strategy has excellent results and allows the photovoltaic energy systems integration in distribution stage. Depending on the selection of the high-potential APF, it will determine how significant the correction is on the voltage profile. Finally, the system has load disturbances and harmonics distortion reduction.

Index terms— THD, APF, PV, Power quality, compensation, control, harmonics, IEEE model.

Resumen

El presente paper presenta el diseño y la implementación de un filtro activo de potencia (APF) híbrido, que tiene como objetivo lograr la corrección de los niveles de voltaje cuando estos son afectados por la integración de generación fotovoltaica dentro de la red de distribución eléctrica. Para alcanzar el objetivo propuesto, se hace uso de la técnica de control de modulación por vector espacial, resultando en la reducción de armónicos de corriente y voltaje. El diseño propuesto se lo prueba en el sistema de prueba de la IEEE de 13 barras, implementado en MATLAB/Simulink. La estrategia propuesta tiene excelentes resultados, y permite la inserción de sistemas energéticos fotovoltaicos en la etapa de distribución. Dependiendo la selección del APF de alto potencial se podrá determinar cuan significativa es la corrección sobre el perfil de voltaje, también se reflejará una reducción en las perturbaciones de carga y la compensación de los armónicos se verá mejorada.

Palabras clave— THD, APF, PV, calidad de la energía, compensación, control, armónicos, modelo IEEE.

Recibido: 08-05-2022, Aprobado tras revisión: 08-07-2022

Forma sugerida de citación: Llumitaxi, W.; Pavón, W.; Ortiz, L.; Pozo, N. (2022). “Filtro Activo de Potencia (APF) Híbrido con integración de Generación Fotovoltaica para la Mejora del Perfil de Tensión”. Revista Técnica “energía”. No. 19, Issue I, Pp. 100-109

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.523>

© 2022 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

La integración de nuevas tecnologías de generación es la respuesta al crecimiento de la demanda de energía. En la etapa de distribución eléctrica se integra directamente recursos de generación distribuida, que son herramientas indispensables para incrementar la seguridad y confiabilidad del servicio de energía eléctrica [1].

Sistemas de generación distribuida incluyen centrales de generación eólicas y solares. Estas constituyen una de las principales soluciones para aliviar la carga de las redes de transporte de electricidad, además permiten la inserción de nuevas cargas, y permiten a los sistemas eléctricos una operación técnica y económicamente confiable [2]. Sin embargo, estas tecnologías tienen características propias que generan un impacto negativo en la red, como lo son armónicos, problemas térmicos, fluctuaciones, intermitencias, entre otros. Estos factores pueden afectar la calidad de la energía a ser entregada al usuario final [3]. Sin descartar que, otros elementos constitutivos del sistema aportan sus propias afectaciones, como los efectos de cargas no lineales [4].

Como solución al problema descrito se han desarrollado estudios como [5], [6]. Los que proponen mejorar la calidad energética en sistemas desbalanceados. Las técnicas que se proponen son: equilibrio de carga, análisis de las corrientes del neutro, compensación de la carga de potencia reactiva y mejora en las interferencias en el sistema eléctrico de potencia. Podemos decir que existen diferentes afectaciones en el sistema de distribución eléctrica. Es por eso que, en el presente estudio se propone a analizar los perjuicios causados por los armónicos y su compensación, por medio de dispositivos como el filtro activo de potencia (AFP).

En las investigaciones [7], [8] exponen en su literatura, el uso tradicional de filtros y pasivos para reducir armónicos en serie, pero en combinación con sistemas que se integran a la red, este mecanismo tiene límites en el nivel filtrado, lo que deteriora los elementos pasivos. En [9] se destacan tecnologías de filtrado avanzado como compensadores sincrónicos, APF, inversores de múltiples niveles, acondicionadores de calidad unificados, reguladores dinámicos, y otros. Estas tecnologías podrían ser un camino para la producción de energía limpia y para reducir el impacto en la calidad energética, específicamente los armónicos de corriente y voltaje. En el paper [10], se estudian la implementación de APF para problemas de compensación de potencia, armónicos, niveles de calidad, proponiéndose como solución efectiva, siempre que se diseñe con técnicas de control y monitoreo adecuadas [11].

Las agentes encargados de la distribución deben cumplir con estándares de operación para entregar el suministro de energía eléctrica a la demanda [12], regulada por las normas internacionales de calidad de la

energía IEEE 519 y ISO 61000. Esto se logra con la incorporación de filtros activos de potencia, que permiten cumplir con los estándares antes descritos. Mejorando los parámetros de calidad del voltaje, factor de potencia, disminución de pérdidas, reducción del calentamiento en conductores y transformadores, entre otros beneficios [13], [14].

Debido a los costos de los APF, en [15] se abordan los filtros activos híbridos, que consisten en filtro pasivo con un filtro activo en paralelo. La Figura 1 detalla la conexión del filtro activo de potencia híbrido al sistema de generación distribuida y su interconexión con la red de distribución. Los filtros híbridos se controlan de la siguiente manera, los armónicos de orden bajo son suprimidos por la operación del filtro activo de potencia en paralelo, mientras que los armónicos de frecuencia más alta son eliminados por el filtro pasivo [16], [17]. Este filtro híbrido es más eficiente, de menor tamaño, económico y fiable en relación con tecnologías más antiguas. En [18] se detalla que, los convertidores de potencia combinados permiten el acoplamiento de fuentes de energía renovable a la red de distribución [19].

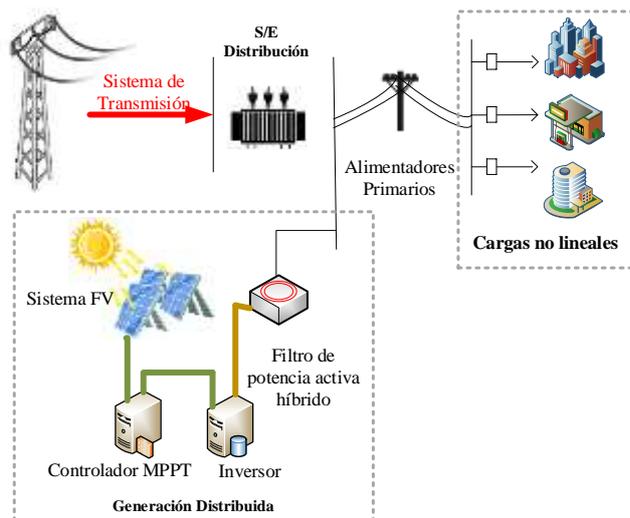


Figura 1: Esquema del sistema de distribución con APF híbrido y generación distribuida

En función a lo descrito, el trabajo propuesto abarca el diseño y la implementación de un filtro activo de potencia híbrido para mejorar el perfil de voltaje cuando se integra generación fotovoltaica. Como esquema de modulación se considera la técnica de modulación por ancho de pulso de vectores espaciales. Esta metodología funciona sobre el inversor como unidad y se basa en que un único vector, que tiene la capacidad de representar las tres fases del sistema de potencia trifásico, este vector se origina a partir de los periodos tiempos de trabajo de las fases de conmutación del inversor [20], [21].

La estructura de este trabajo se divide en diferentes apartados que se describen a continuación: en el apartado 2 se detalla el diseño de la metodología del sistema

propuesto, incluyendo sistema fotovoltaico (FV), convertidor DC-DC, convertidor DC-AC y APF. El apartado 3 establece los resultados y su análisis. Y finalmente en el apartado 4 se presentan las conclusiones del trabajo elaborado.

2. METODOLOGÍA

Los modelos matemáticos y estructuras de cada uno de los componentes del sistema se describen a continuación.

La célula fotovoltaica es representada en la Figura 2, la cual está compuesta por una fuente de corriente I_{FV} conectada en paralelo con un diodo y dos resistencias R_{pl} y R_s , las cuales representan a las pérdidas de corriente y pérdidas en los terminales de la célula fotovoltaica respectivamente [22]–[24].

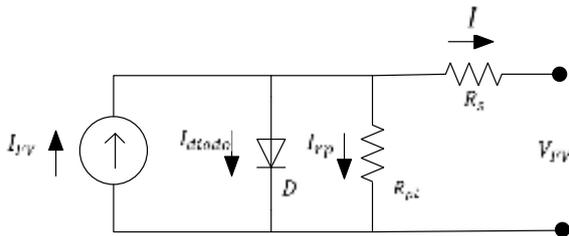


Figura 2: Diagrama unifilar de la célula fotovoltaica

En el circuito equivalente de la célula fotovoltaica obtiene que la ecuación de corriente de salida de la célula fotovoltaica como se indica en la ecuación (1). Considerando un arreglo FV con un número definido de paneles en serie N_{ps} y paneles en paralelo N_{pp} , las ecuaciones de corriente, voltaje y potencia a la salida del arreglo fotovoltaico quedan descritas en las ecuaciones (2), (4) y (5).

$$I = I_{FV} - I_{st} \left[\exp \left(\frac{q * [I * R_s + V_{FV}]}{A * k * Temp} \right) - 1 \right] - \frac{V_{FV} + I * R_s}{R_{pl}} \quad (1)$$

$$I = N_{pp} * I_{FV} - N_{pp} * I_o \left[\exp \left(\frac{q * [I * R_s + V_{FV}]}{A * k * Temp * N_{ps}} \right) - 1 \right] - \frac{V_{FV} + I * R_s}{R_{pl}} \quad (2)$$

En donde I_o se describe en (3):

$$I_o = I_{or} * \left(\frac{Temp}{T_{SCT}} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{q * E_{go}}{A * k} \left[\frac{1}{T_{SCT}} - \frac{1}{Temp} \right] \right) \right] \quad (3)$$

$$V_{FV} = \left[\frac{N_{ps} * A * k * Temp}{q} \right] \ln \left[\frac{N_{pp} * I_{FV} - I + N_{pp} * I_o}{I_o} \right] - I * R_s \quad (4)$$

$$P_{FV} = V_{FV} * N_{pp} * I_{FV} - V_{FV} * N_{pp} * I_o * \left[\exp \left(\frac{q * [I * R_s + V_{FV}]}{A * k * Temp * N_{ps}} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Tabla 1. Significado de variables del modelamiento

Variable	Significado
I	Corriente a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
V_{FV}	Voltaje a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
P_{FV}	Potencia a la salida de célula o arreglo fotovoltaico.
I_{FV}	Corriente producida por la característica de la célula fotovoltaica.
I_{diodo}	Corriente que circula a través del diodo en el circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
I_{rpl}	Corriente que circula por la resistencia en paralelo del circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
D	Diodo que integra el circuito equivalente de la célula fotovoltaica.
R_{pl}	Resistencia en paralelo: representa a las pérdidas de corriente de la célula o arreglo fotovoltaico.
R_s	Resistencia en serie: representa a las pérdidas de los terminales de la célula o arreglo fotovoltaico.
I_{st}	Corriente de saturación.
q	Carga del electrón.
A	Factor de dualidad.
k	Constante de Boltzmann.
$Temp$	Temperatura de la célula fotovoltaica en grados Kelvin.
T_{SCT}	Temperatura de referencia.
N_{pp}	Número de paneles en paralelo del arreglo fotovoltaico.
N_{ps}	Número de paneles en serie del arreglo fotovoltaico.
I_o	Corriente de saturación de la célula fotovoltaica.
I_{or}	Corriente de saturación de la célula fotovoltaica a temperatura de referencia.
E_{go}	Margen de banda para el material de la célula fotovoltaica (Silicio).

En la Fig. 3 se ilustra la estructura del APF, el cual está conformado principalmente por un capacitor o banco de capacitores, un convertidor de fuente de voltaje y una inductancia de enlace necesaria para la conexión en paralelo con la red eléctrica [25]. En primer lugar, se determina el valor del voltaje DC sobre el banco de capacitores. En la ecuación (14) se define el cálculo de este.

Luego es necesario calcular el valor de la inductancia de enlace, la cual permitirá la inyección de la corriente de compensación hacia el sistema por parte del APF, haciendo posible un intercambio de energía. Su modelación se describe en la ecuación expresada en la ecuación (15).



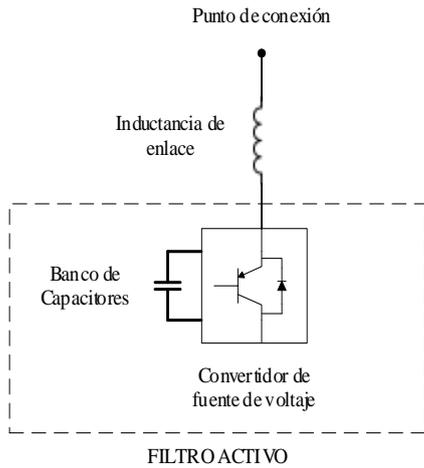


Figura 3: Diagrama unifilar del APF [25].

Finalmente se determina el valor del capacitor del APF. Para este cálculo se considera como factor de diseño el máximo rizado de voltaje DC permitido [26]. El valor del capacitor se calcula mediante la ecuación (16):

$$V_{DC}(APF) = \frac{2}{m\alpha} \widehat{V}_s \quad (14)$$

$$L_f(APF) = \frac{V_s}{6\sqrt{2} f_{SW} i_{rz}} \quad (15)$$

$$C(APF) = \frac{P_{out}}{V_s \cdot \sqrt{6} \cdot f_{SW} \cdot v_{rz}} \quad (16)$$

Una vez dimensionado el filtro activo, se propone realizar el control del APF, basándose en el cálculo de la corriente de referencia de compensación generando un bloque de control, el cual estará encargado de determinar la corriente de referencia que el APF deberá inyectar a la red para compensar los armónicos, mismo que se conforma por dos lazos principales, un lazo principal de corriente y un lazo secundario de control del voltaje DC del convertidor del APF [27].

Para el lazo principal, se utiliza un controlador de Marco de Referencia Síncrono (SRF, por sus siglas en inglés). Con este controlador se dispondrá de un marco de referencia que gira en el plano complejo, y está sincronizado con la tensión de la red en el punto de conexión.

Para analizar los efectos de la implementación del APF en la red eléctrica, se realizará una simulación en MATLAB/SIMULINK. Los parámetros diseñados para cada componente del sistema. El Sistema de Distribución IEEE 13 barras [28] ha sido modificado para incluir cargas monofásicas; y, el nodo 634 es el punto de conexión de la generación fotovoltaica. Dicho sistema se ilustra en la Fig. 4.

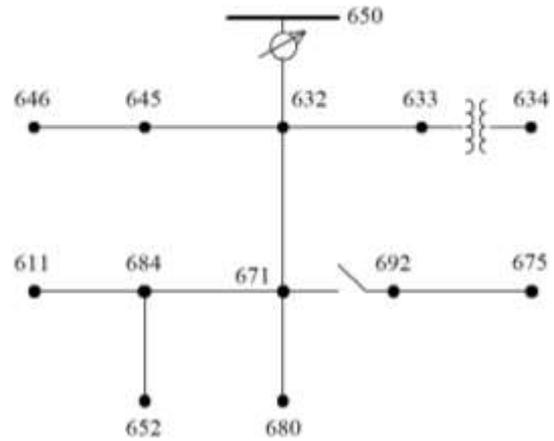


Figura 4: Sistema de distribución modificado IEEE 13 barras.

Para el diseño del arreglo fotovoltaico, se consideró, una potencia pico de 100 kW de acuerdo a las cargas, determinándose el panel a simular y el número de módulos fotovoltaicos serie y paralelo necesarios para poder proporcionar dicha potencia. La implementación de un convertidor DC-DC, y su diseño fue con base a la modelación matemática descrita. En la Tabla 2, se detallan los parámetros diseñados del convertidor DC-DC. La implementación y simulación del convertidor está en la Fig. 5.

Tabla 2. Parámetros de diseño del convertidor elevador

Parámetros	Valor
V_{in} (V)	300
V_{out} (V)	600
P_{out} (kW)	100
f_{SW} (Hz)	5000
ΔV	1%
ΔI	5%
L (H)	1.8e-3
C (F)	2777e-6

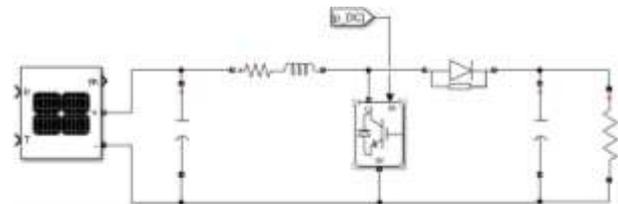


Figura 5: Diseño para implementación del convertidor DC-DC

Luego se diseñó una estrategia de control basada en el algoritmo seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT), con el propósito de generar un tren de pulsos del

ciclo de trabajo, con el que se pueda controlar la conmutación del convertidor DC-DC [29].

Para integrar la generación fotovoltaica con la red eléctrica se implementó un inversor. Para el caso, se estableció conectar la generación fotovoltaica en el nodo 634 del sistema IEEE, el cual tiene un nivel de voltaje de 480V, mediante un filtro RL. En la Tabla 3, se exponen los parámetros diseñados del Inversor. El diseño del APF consiste básicamente en calcular el valor de la inductancia L_f APF y el valor del capacitor CAPF. En la Tabla 4, se observan los parámetros diseñados del APF.

Tabla 3. Parámetros de diseño del inversor

Parámetros	Valor
V_{in} (V)	600
V_{out} (V)	480
f_{sw} (HZ)	5000
f (HZ)	60
R_L (Ω)	3.5e-3
L (H)	1430e-6

Tabla 4. Parámetros de diseño del APF

Parámetros	Valor
V_s (V) – LL RMS	480
V_{DC} (V)	400
f_{sw} (HZ)	5000
P_{out} (KW)	100
v_{rz} (V)	2
i_{rz} (A)	1
L_f APF (H)	11.3e-3
C APF (F)	1500e-6

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El caso de estudio contempla dos escenarios, los cuales se describen a continuación:

Escenario 1: Estructura de componentes Arreglo Fotovoltaico – Convertidor Elevador (DC-DC) – Inversor (DC-AC) – Conexión a Sistema de Distribución IEEE 13 barras.

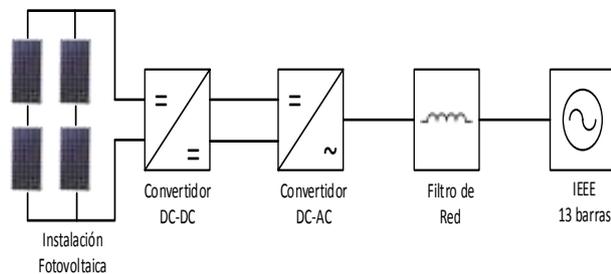


Figura 6: Esc 1–Conexión de generación FV a sistema de distribución sin APF

Escenario 2: Estructura de componentes Arreglo Fotovoltaico – Convertidor Elevador (DC-DC) – Inversor (DC-AC) – Conexión a Sistema de Distribución IEEE 13 barras incluyendo Filtro Activo de Potencia

(APF). De manera inicial, se presenta un análisis del comportamiento de cada uno de los componentes del sistema, luego se expone una comparativa entre la simulación del Escenario 1 y el Escenario 2.

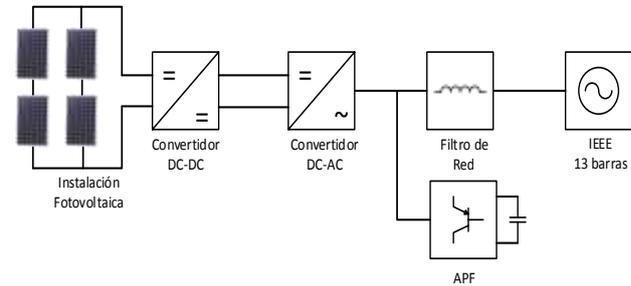


Figura 7: Esc 2–Conexión de generación FV a sistema de distribución con APF

El arreglo fotovoltaico diseñado considera 55 ramales en paralelo de 6 módulos fotovoltaicos conectados en serie. En la Fig. 8, se muestra la curva I-V característica de los paneles fotovoltaicos. Esta curva está marcada por dos puntos relevantes, el voltaje de circuito abierto que es aproximadamente 385.20 V y la corriente de cortocircuito que es aproximadamente 327.8 A. También se marca el punto de voltaje y corriente en donde se tiene la máxima potencia PMP.

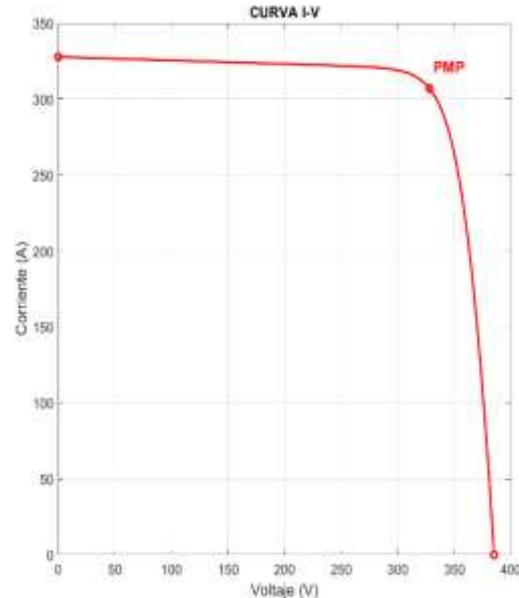


Figura 8: Curva I-V del arreglo fotovoltaico

En las Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11 se muestra el voltaje, la corriente y la potencia proporcionada por los paneles fotovoltaicos respectivamente, las cuales son variables a la entrada del convertidor elevador. Se puede observar claramente la efectividad del algoritmo MPPT implementado, ya que cada una de estas variables alcanza rápidamente los valores deseados, correspondientes al punto de máxima potencia PMP.



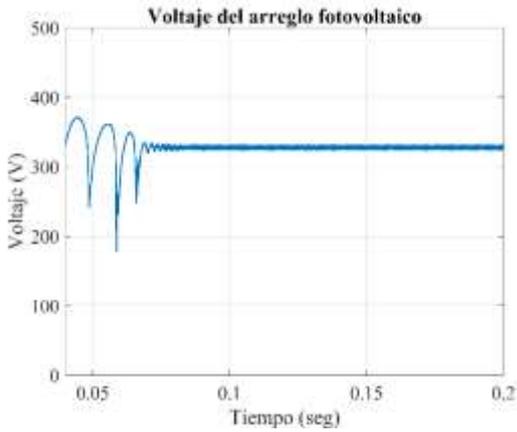


Figura 9: Voltaje a la salida del arreglo fotovoltaico

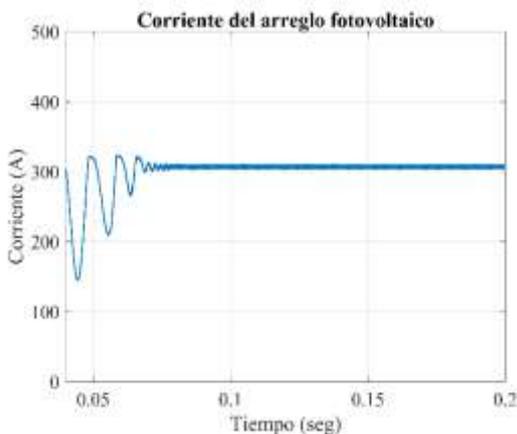


Figura 10: Corriente a la salida del arreglo fotovoltaico

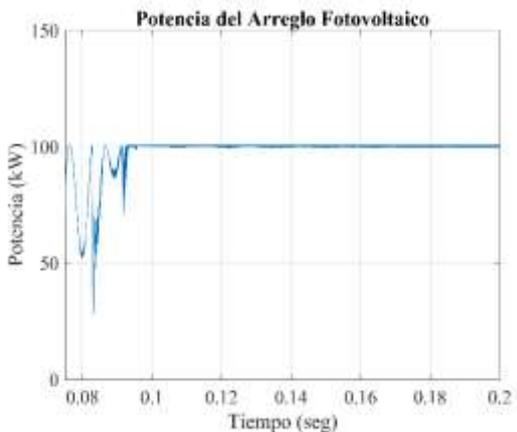


Figura 11: Potencia a la salida del arreglo fotovoltaico.

En la Fig. 12 se ilustra el voltaje que se tiene a la salida del convertidor, el cual fue diseñado en 600 V. El voltaje a la salida del convertidor, como se puede observar presenta una buena respuesta transitoria, y rápida estabilización.

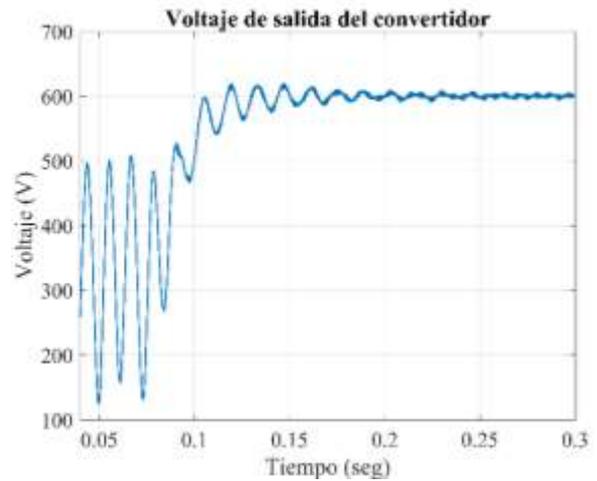


Figura 12: Voltaje a la salida del convertidor elevador

La etapa de conversión de corriente continua a corriente alterna, mediante la implementación del inversor, conlleva a un voltaje deseado a la salida del inversor, que fue diseñado para tener un valor de 480 V L-L RMS. En la Fig. 13 se ilustra el voltaje en el nodo 634 del sistema IEEE de 13 barras en el que se observa que las distorsiones armónicas son imperceptibles (rizado) las cuales han sido provocadas por las conmutaciones de los elementos de la generación fotovoltaica.

En la Fig. 14 se ilustra la corriente inyectada por el inversor en el sistema de distribución en el nodo 634. Se puede indicar que no existe un grado elevado distorsión armónica, ya que el filtro, a través de la inductancia de inyección a red, ha minimizado el impacto.

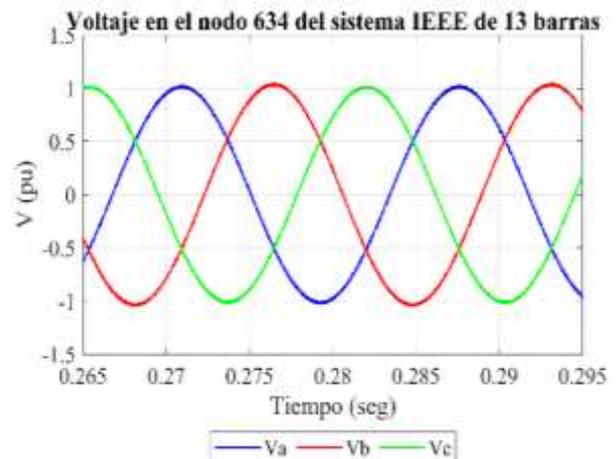


Figura 13: Voltaje en el nodo 634 del sistema de 13 barras IEEE con generación FV



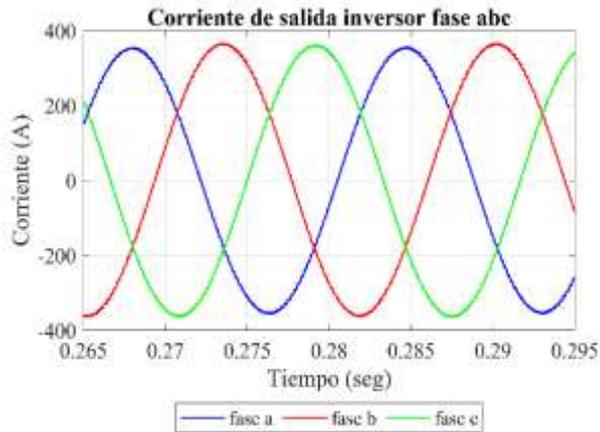


Figura 14: Corriente a inyectada por el inversor abc.

En la Fig. 15, se ilustra el voltaje en los capacitores del APF, señalándose una respuesta rápida, lo cual implica que el bloque de control del APF tiene un comportamiento adecuado. En la Fig.16 se ilustra la corriente de compensación inyectada por el APF, para eliminar la componente armónica en la corriente inyectada hacia el sistema de distribución.

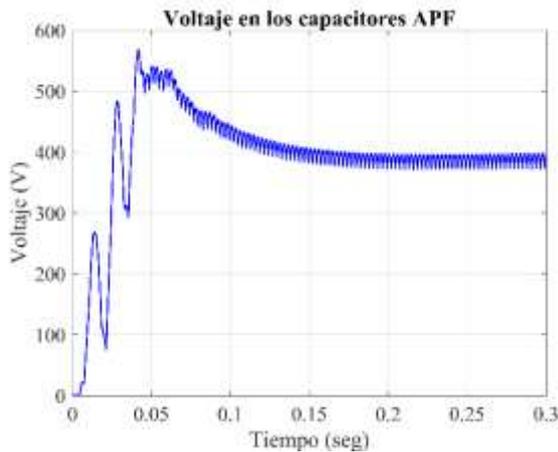


Figura 15: Voltaje medido en los capacitores del APF

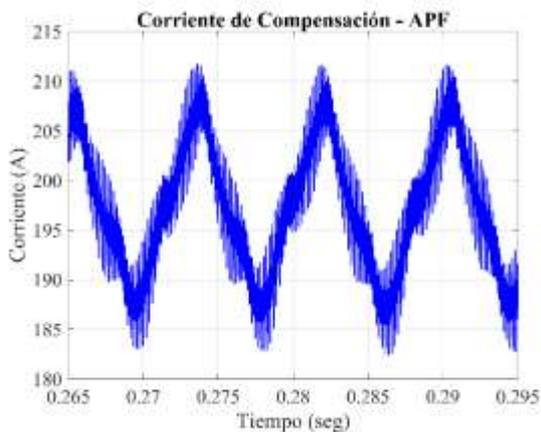


Figura 16: Corriente de compensación inyectada por al APF hacia el sistema

Mediante la comparativa de los resultados obtenidos en los Escenarios 1 y 2, se pretende determinar los beneficios de la implementación del APF, referente a la atenuación o eliminación de armónicos. La reducción del contenido armónico con la implementación del filtro puede ser observada en el cálculo del contenido armónico THD, tal cual como se ilustra en la Tabla 5 y en la Fig. 17 y Fig. 18. Tomado de la onda de voltaje del nodo 634 del sistema de distribución de 13 barras de la IEEE, cumpliendo la norma regulada por las normas internacionales de calidad de la energía IEEE 519 y ISO 61000. La implementación del APF conlleva a que la distorsión armónica se atenúe significativamente, sin embargo, durante un período leve de tiempo de aproximadamente 0.2 segundos, se muestran oscilaciones de armónicos que son resultado del estado no estabilizado de operación del sistema, el cual es más significativo que el presentado en la Fig. 17. Este efecto se genera dado que, el sistema tiene más componentes, lo que causa más armónicos y tarda un delta de tiempo adicional en estabilizarse, lo citado se muestra en la Fig. 18.

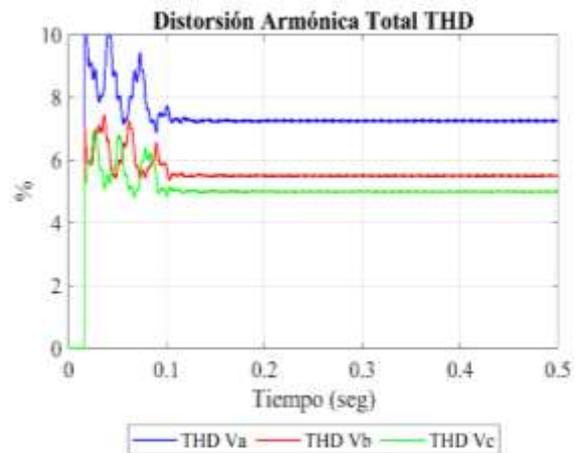


Figura 17: Índice de Distorsión Amónica Total – Voltaje en nodo 634 sin APF

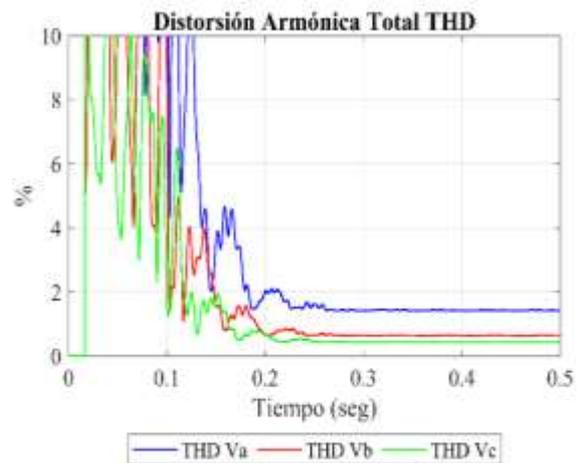


Figura 18: Índice de Distorsión Amónica Total – Voltaje en nodo 634 con APF



Tabla 5: Comparativa del THD para el Esc. 1 y el Escenario 2

FASE	%THD SIN APF	%THD CON APF
A	7.23%	1.42%
B	5.62%	0.65%
C	4.85%	0.44%

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La implementación del filtro activo de potencia (AFP), reduce efectivamente los armónicos provocados por la conmutación de los dispositivos semiconductores componentes de la generación fotovoltaica. Concretamente se obtuvo una reducción del índice de distorsión armónica (THD), el cual para la fase a paso de 7.23% a 1.42%, para la fase b de 5.62% a 0.65% y finalmente para la fase c de 4.85% a 0.44%, cumpliendo la norma regulada por las normas internacionales de calidad de la energía IEEE 519 y ISO 61000.

La estrategia de seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT) implementado demuestra un trabajo excelente en la extracción de la máxima potencia, el cual hace posible que el arreglo fotovoltaico opere siempre en el punto de máxima potencia, aportando una potencia de aproximadamente 100 kW.

Las variables de entrada y salida del convertidor DC-DC, alcanzaron los valores establecidos en el diseño, los cuales son: voltaje del arreglo fotovoltaico – 328V, corriente del arreglo fotovoltaico – 307A, potencia del arreglo fotovoltaico – 100kW, voltaje DC a la salida del convertidor – 600V.

El control del inversor es adecuado, ya que las variables de este alcanzaron los niveles establecidos de una manera rápida. Se obtuvo a la salida el voltaje en corriente alterna diseñado, el cual fue de 480V (L-L RMS).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Álvarez, L. Neves, J. López, and S. Zambrano, "Impacto de la generación distribuida en la red de distribución," *J. Electr. Comput. Eng.*, pp. 259–271, 2017.
- [2] S. Vargas and W. Pavón, "Optimal sizing and allocation of photovoltaic generation in a georeferenced micro grid using column generation.," *Rev. Técnica Energía*, vol. 17, pp. 71–79, 2020.
- [3] S. Echalih, A. Abouloifa, I. Lachkar, J. M. Guerrero, Z. Hekss, and F. Giri, "Hybrid automaton-fuzzy control of single phase dual buck half bridge shunt active power filter for shoot through elimination and power quality improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, p. 106986, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.106986.
- [4] F. G. Montoya, A. García-Cruz, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Power quality techniques research worldwide: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 846–856, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.091.
- [5] S. Lineykin, M. Averbukh, and A. Kuperman, "An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 282–289, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2013.10.015.
- [6] A. Bouhouta, S. Moulahoum, N. Kabache, and A. Benyamina, "Design and Real Time Implementation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using Indirect Current Control Technique," 2019, doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015096.
- [7] X. Shen et al., "Improvement of power quality in EAST power supply system based on hybrid active filter," *Fusion Eng. Des.*, vol. 161, p. 112076, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.FUSENGDES.2020.112076.
- [8] Hang Yu and Songyan Niu, "A scalable and reconfigurable hybrid AC/DC microgrid clustering architecture with decentralized control for coordinated operation - ScienceDirect," 2021. .
- [9] K. Ishaque and Z. Salam, "A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 475–488, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2012.11.032.
- [10] F. D. Bianchi, J. L. Domínguez-García, and O. Gomis-Bellmunt, "Control of multi-terminal HVDC networks towards power integration: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1055–1068, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.11.024.
- [11] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, no. 5, pp. 691–703, 2013.
- [12] R. Ortega, E. Figueres, G. Garcerá, C. L. Trujillo, and D. Velasco, "Control techniques for reduction of the total harmonic distortion in voltage applied to a single-phase inverter with nonlinear loads: Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 1754–1761, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.027.
- [13] M. Büyük, A. Tan, and M. Tümay, "Resonance suppression of LCL filter for shunt active power filter via active damper," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 134, no. July 2021, p. 107389, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107389.



- [14] M. Montufar, W. Pavón, M. Jaramillo, and S. Simani, "Control Strategy Applied to Smart Photovoltaic Inverters for Reactive Power Exchange Through Volt-Var Control to Improve Voltage Quality in Electrical Distribution Networks BT - Communication, Smart Technologies and Innovation for Society," 2022, pp. 357–366.
- [15] Z. Hekss et al., "Hybrid Automaton Control of Three Phase Reduced Switch Shunt Active Power Filter Connected Photovoltaic System," IFAC-PapersOnLine, vol. 53, no. 2, pp. 12847–12852, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.IFACOL.2020.12.1986.
- [16] K. Ravinder and H. O. Bansal, "Investigations on shunt active power filter in a PV-wind-FC based hybrid renewable energy system to improve power quality using hardware-in-the-loop testing platform," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 177, p. 105957, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.EPSR.2019.105957.
- [17] X. Song, Y. Wang, Z. Zhang, C. Shen, and F. Peñamora, "Economic-environmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems," *Appl. Energy*, vol. 281, no. October 2020, p. 116142, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116142.
- [18] J. Yu, S. Ding, Y. Wang, W. Wu, and M. Dong, "The engineering design and optimization of main circuit for hybrid active power filter," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 46, no. 1, pp. 40–48, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.IJEPES.2012.10.037.
- [19] A. Tamer, L. Zellouma, and M. Toufik, "Adaptive linear neuron control of three-phase shunt active power filter with anti-windup PI controller optimized by particle swarm optimization," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 96, no. PA, p. 107471, 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107471.
- [20] B. Sahoo, S. Keshari, and P. Kumar, "Repetitive control and cascaded multilevel inverter with integrated hybrid active filter capability for wind energy conversion system," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 811–826, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.001.
- [21] A. Seguel, "Diseño e Implementación de un Filtro Híbrido para la Atenuación de Sub e Inter Armónicas en Cicloconvertidores," Tesis, p. 108, 2018.
- [22] A. Zielińska, M. Skowron, and A. Bieñ, "Modelling of photovoltaic cells in variable conditions of temperature and intensity of solar insolation as a method of mapping the operation of the installation in real conditions," in 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, IIPhDW 2018, Jun. 2018, pp. 200–204, doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388357.
- [23] R. Godina, E. M. G. Rodrigues, E. Pouresmaeil, and J. P. S. Catalão, "Simulation study of a photovoltaic cell with increasing levels of model complexity," Jul. 2017, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977768.
- [24] M. Montufar, W. Pavón, M. Jaramillo, and S. Simani, "Solar Cell Mathematical Modelling Comparing Single and Double Diode Under Three Parameter Approach," in 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543074.
- [25] M. Marcu, F. G. Popescu, T. Niculescu, L. Pana, and A. D. Handra, "Simulation of power active filter using instantaneous reactive power theory," in Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2014, pp. 581–585, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842783.
- [26] H. Yuan and X. Jiang, "A simple active damping method for Active Power Filters," in Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, May 2016, vol. 2016-May, pp. 907–912, doi: 10.1109/APEC.2016.7467979.
- [27] B. Kedra, "Comparison of an active and hybrid power filter devices," in Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, 2014, pp. 556–560, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842771.
- [28] B. Vaagensmith, J. Ulrich, J. Welch, T. McJunkin, and C. Rieger, "IEEE 13 Bus Benchmark Model for Real-Time Cyber-Physical Control and Power Systems Studies," in 2019 Resilience Week (RWS), 2019, vol. 1, pp. 112–120, doi: 10.1109/RWS47064.2019.8971978.
- [29] W. Pavon, E. Inga, S. Simani, and M. Nonato, "A Review on Optimal Control for the Smart Grid Electrical Substation Enhancing Transition Stability," *Energies*, vol. 14, no. 24. 2021, doi: 10.3390/en14248451.



William Llunitaxi.- (Y'1989-M'10). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Instituto Tecnológico Superior Guaranda. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo está basado en el diseño e

implementación de un acondicionador llamado filtro activo híbrido para mejorar la calidad de la energía, este permite corregir armónicos generados por la integración de generación fotovoltaica en el sistema de distribución eléctrico.





Wilson Pavón Vallejos.- (Y'1989-M'10). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. Doctor por la Universidad de Ferrara – Italia.



Nataly Pozo Viera.- (Y'1991-M'02). Ingeniera en Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional -Quito, Ecuador. Obtuvo su título de M.Sc. Electrical Power en Newcastle University, Reino Unido. Actualmente, se desempeña como docente en la Universidad San Francisco de Quito, donde es Mentora del Capítulo de Afinidad Women in Engineering-IEE.



Leony Ortiz.- (Y'1982-M'02). Recibió el título de MSc. e Ingeniería en Automática por el Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella (ISPJAM) de la Universidad de Oriente, Cuba. Actualmente se encuentra estudiando para obtener su título de Doctor en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana-Colombia-Medellín, es miembro del Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI). Forma parte del equipo académico de la carrera de Ingeniería Eléctrica de Universidad Politécnica Salesiana Quito-Ecuador. Sus principales intereses de investigación Automatización y Control, Control robusto y Control Tolerante a Fallos, Micro-redes Eléctricas Inteligentes híbrida, CA/CC. lortiz@ups.edu.ec