

Filtro Activo Paralelo Monofásico Basado en un Convertidor de Celda en U Empaquetada de 5 Niveles

Single-Phase Shunt Active Filter Based on a Five-Level Packed-U Cell Converter

Lara-Cardoso J.¹✉; Hernández-Flores, C.²; Arjona-López, M. A.³

Datos de Adscripción:

¹✉ Lara Cardoso, Jorge
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico Superior de Lerdo.
Departamento de Posgrado. Lerdo, Durango, México.
ROR ID: <https://ror.org/04bjbt12>
jorge_lara_c@yahoo.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2746-7044>

² Hernández Flores, Concepción
TecNM Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado
e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
coni.hernandez@ieee.org
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4757-5309>

³ Arjona López, Marco Antonio
TecNM Instituto Tecnológico de La Laguna. División de Estudios de Posgrado
e Investigación. Torreón, Coahuila, México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
marjona@ieee.org
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1826-4066>

Resumen - Este trabajo presenta un filtro activo paralelo basado en un convertidor modificado de celda en U empaquetada (CMCUE) para mejorar la calidad de la energía eléctrica en una red monofásica de baja tensión. Esta topología tiene la gran ventaja de generar cinco niveles de voltaje y de constar de tan solo seis interruptores de potencia, por lo que resulta muy atractiva para la industria. Sin embargo, este convertidor requiere implementar una técnica para regular el voltaje de sus dos capacitores. Para este fin, se propone una estrategia directa que selecciona, en cada instante de conmutación, una ruta de carga o descarga, tanto en el segundo como en el cuarto nivel. Por otro lado, para compensar los armónicos se propone un controlador proporcional-resonante (PR) capaz de seguir la señal senoidal de la red eléctrica, gracias a su ganancia infinita en la frecuencia de resonancia de 60 Hz. Los resultados de la simulación del filtro activo se han validado en la plataforma de MATLAB-Simulink/Simscape. Se han realizado diversas pruebas bajo distintas condiciones de carga. Es destacable la correcta regulación del voltaje de los capacitores ante variaciones de carga, así como el buen desempeño del controlador PR, lo que permite reducir, en estado estable, la distorsión armónica total (DAT) de la señal de corriente de la red a 2.8%, cumpliendo así con el estándar IEEE 519 y demostrando, en general, la viabilidad de utilizar el convertidor MCUE en aplicaciones de filtrado activo.

Palabras Clave – Controlador PR, Convertidor MCUE, Distorsión Armónica, Filtro Activo, MATLAB-Simulink/Simscape.

Abstract - This work presents a shunt active filter based on a Modified Packed-U Cell (MPUC) converter to improve power quality in a low-voltage single-phase grid. This topology has the advantage of generating five voltage levels while requiring only six power switches, making it attractive for industry. Nevertheless, this converter requires a technique for regulating the voltage of its two capacitors. To this end, a direct strategy is proposed, which selects a charging or discharging path at each switching instant for both the second and fourth levels. Furthermore, for harmonic compensation, a proportional-resonant (PR) controller is proposed, capable of tracking the sinusoidal signal of the power grid, thanks to its infinite gain at the resonant frequency of 60 Hz. The active filter simulation results were validated on the MATLAB-Simulink/Simscape platform. We carried out various tests under different load conditions. It is remarkable that the capacitor voltage is correctly regulated during load variations, as well as the good performance of the PR controller, allowing a reduction in steady-state total harmonic distortion (THD) of the mains current signal to 2.8%, thus complying with the IEEE 519 standard and demonstrating the overall viability of using the MPUC converter in active filtering applications.

Keywords - Active Filter, Harmonic Distortion, MATLAB-Simulink/Simscape, MPUC Converter, PR Controller.

I. INTRODUCCIÓN

Las corrientes armónicas producidas por cargas no lineales como variadores de velocidad, hornos de fundición de hierro por arco eléctrico, cargadores de batería, fuentes conmutadas de computadora, controladores de iluminación LED, entre otras, requieren ser compensadas para evitar baja eficiencia en equipo eléctrico, interferencia en líneas de comunicaciones y de monitoreo, falsos disparos de protecciones, sobrecalentamiento de cableado, de transformadores y de motores, así como contaminación del voltaje en el punto de acoplamiento común afectando a otros usuarios de la red (Dash y Sadhu, 2023). La solución a esta problemática es el filtrado activo, el cual está basado en convertidores electrónicos de potencia, y cuya línea de investigación continúa creciendo debido a su relevante importancia (Omorodion y Saha, 2025).

A diferencia de las topologías binivel, los convertidores multinivel tienen las ventajas de una mejor calidad de energía, e.g., una menor distorsión armónica obtenida con una frecuencia de

conmutación inferior, lo que representa menores pérdidas y una mayor eficiencia (Abarzadeh et. al., 2019).

En la literatura se observa una amplia diversidad de topologías de inversores monofásicos capaces de generar cinco niveles (Dekka et al., 2020).

En la Figura 1, se presentan algunas de ellas: a) la NPC (Neutral-Point Clamped - Enclavado al Punto Neutro) completa, b) la NPC (Active-NPC) simplificada (Oliveira et. al., 2018), c) la ANPC con capacitor (Siwakoti y Long, 2019), d) la CHB (Cascaded H-Bridge - Puente H en cascada) (Athwer y Darwish, 2023), e) la T3 (Vahedi y Al-Haddad, 2016), f) la MPUC (Modified Packed-U Cell) (Vahedi et al., 2018). Esta última es la utilizada en el presente artículo: una topología modificada de la PUC, en la que los dos interruptores de la parte inferior están invertidos y el voltaje del capacitor inferior tiene polaridad invertida. Se puede observar que la topología ANPC con diodos y la MPUC se componen de tan solo seis interruptores de potencia, es decir, dos menos que el resto de las configuraciones.

Sin embargo, la MPUC no utiliza diodos, a diferencia de la ANPC, y, ventajosamente, solo requiere un capacitor en lugar de dos. Asimismo, la topología MPUC es fácilmente reconfigurable, pues con tan solo añadir más celdas en U es posible generar más niveles sin requerir un cambio en el hardware previo (Ounejjar et. al., 2011). A diferencia de la configuración CHB, no es necesario incrementar los interruptores de cuatro en cuatro, sino de dos en dos. Además, en la CHB, su requerimiento de fuentes aisladas resulta limitante para muchas aplicaciones, mientras que la MPUC genera los 5 niveles a partir de una sola fuente. Así, la topología MPUC ha sido seleccionada para implementar el filtro activo, pues es la de mayor reconfigurabilidad y, a su vez, la más sencilla en cuanto al número de componentes.

Este trabajo presenta un convertidor de celda en U empaquetado de 5 niveles que actúa como filtro activo para compensar los armónicos generados por una carga no lineal en una red monofásica de baja tensión.

Figura 1

Diversas topologías de convertidores monofásicos de cinco niveles: A) NPC completa, B) NPC simplificada, C) ANPC con capacitor, D) CHB, E) T3, F) MPUC.

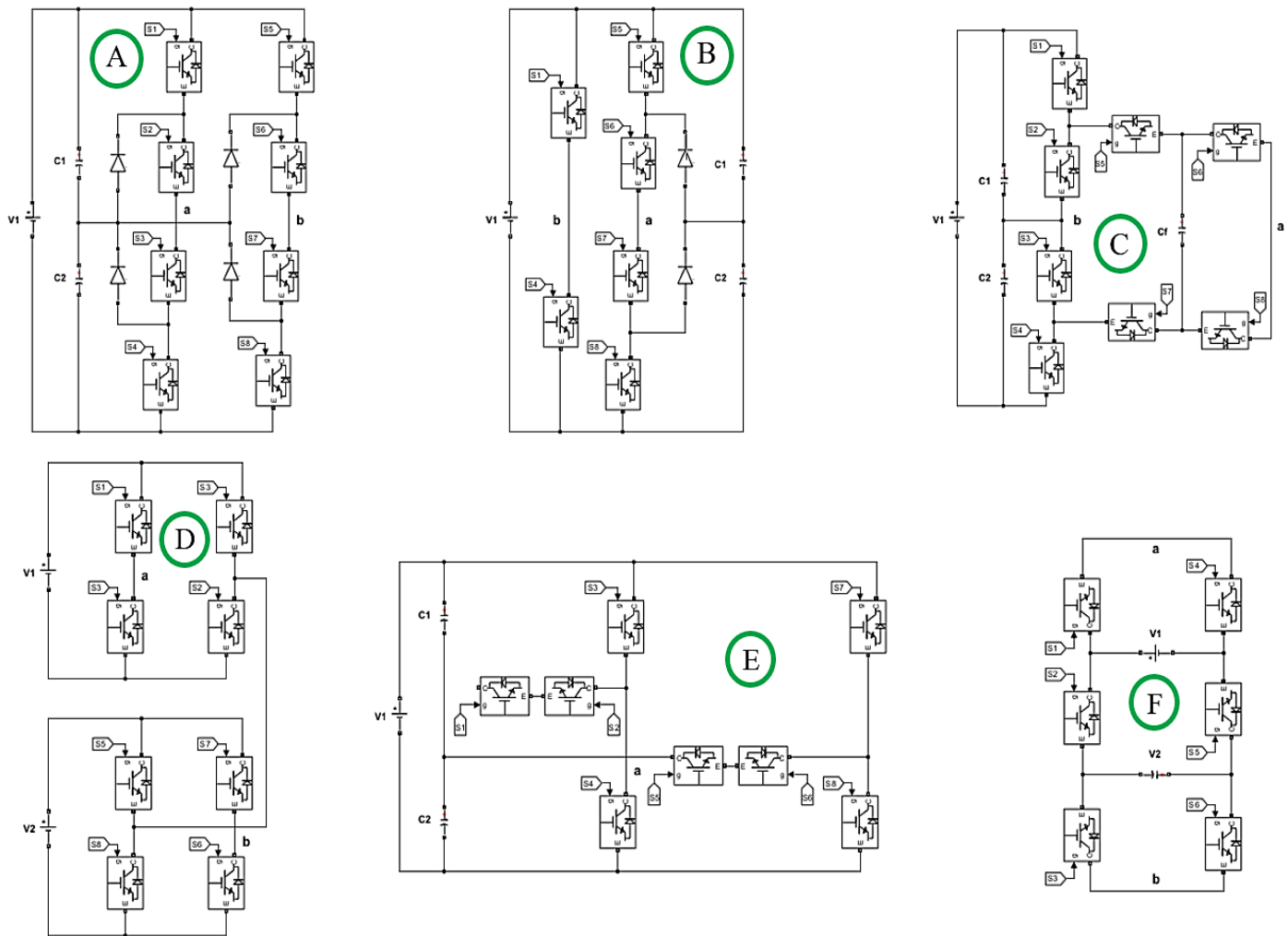
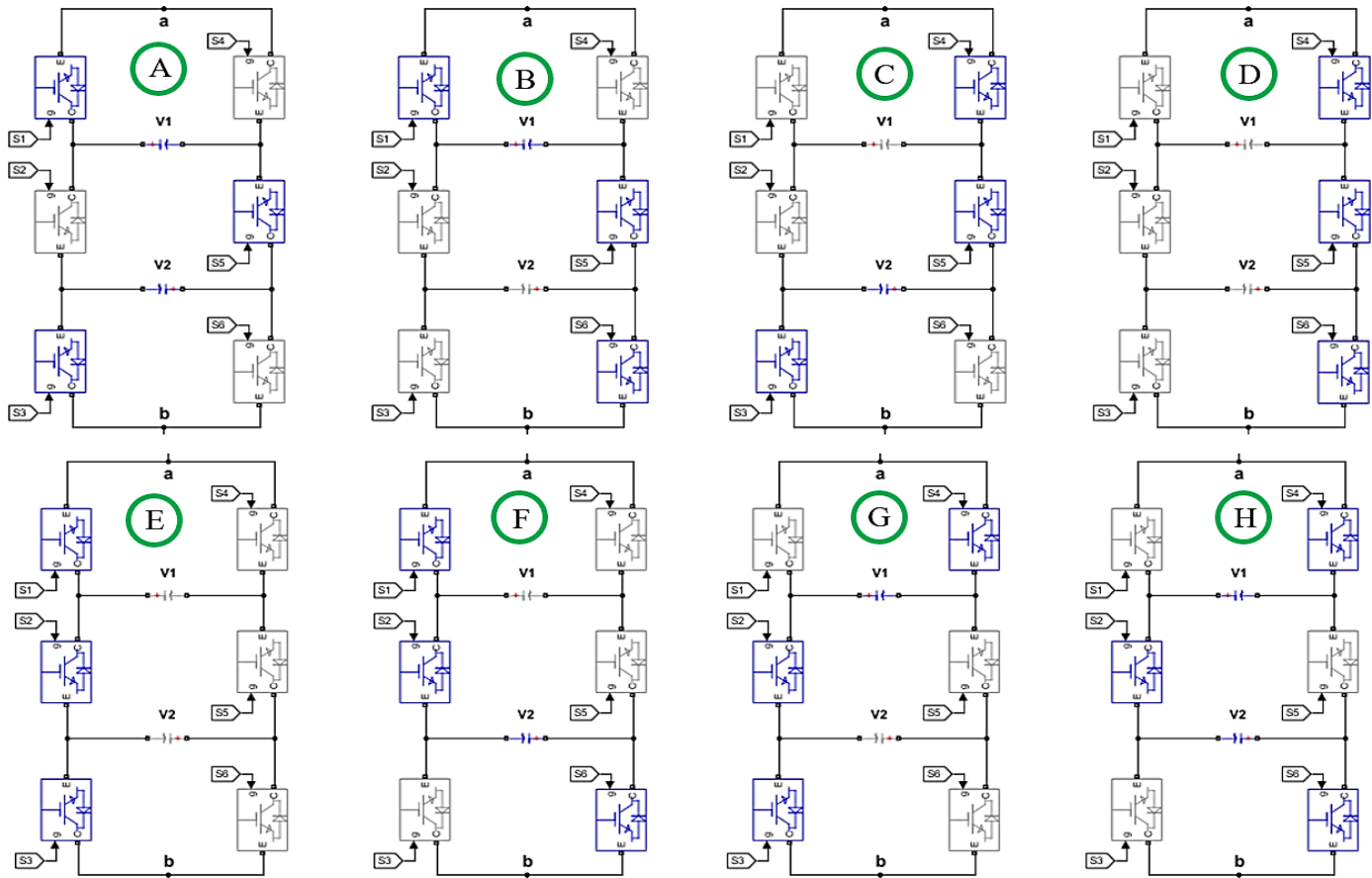


Figura 2

Circuitos de las rutas para los ocho estados de conmutación del convertidor MPUC5. (A) Estado 1 = $+(V_1+V_2)$, (B) Estado 2 = $+(V_1)$, (C) Estado 3 = $+(V_2)$, (D) Estado 4 = $(0V)$, (E) Estado 5 = $(0V)$, (F) Estado 6 = $-(V_2)$, (G) Estado 7 = $-(V_1)$, (H) Estado 8 = $-(V_1+V_2)$.



La organización de este trabajo es la siguiente: la sección 2, correspondiente a la parte técnica del artículo, presenta la descripción de los elementos que conforman el filtro activo, junto con los diagramas de bloques implementados en MATLAB-Simulink/Simscape. También se incluyen la técnica de modulación PWM y la estrategia de control basada en un controlador PR (Biricik y Komurcugil, 2018). Los resultados, así como su discusión técnica, se presentan en la sección III. Finalmente, las conclusiones se presentan en la sección IV.

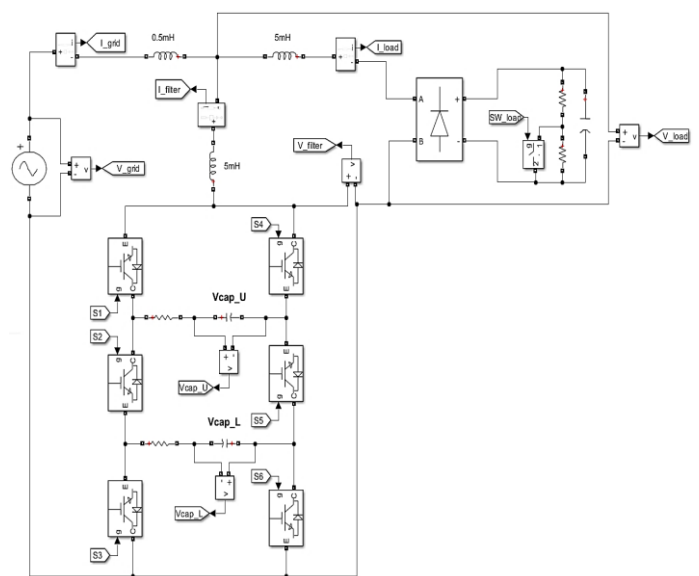
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

La Figura 2 muestra los circuitos de las rutas resultantes para los ocho estados de conmutación del convertidor MPUC5. Observe que los interruptores de potencia de color azul están en modo activado o cerrado, mientras que los de color gris están en modo desactivado o abierto.

La Figura 3 muestra el diagrama eléctrico del filtro activo, simulado en el software Matlab-Simulink/Simscape. Los componentes del sistema son el convertidor de potencia, la red eléctrica monofásica y la carga no lineal, consistente en un rectificador de diodos de puente completo con una carga resistiva-capacitiva RC.

Figura 3

Circuito eléctrico del filtro activo implementado en Matlab-Simulink/Simscape.



La Tabla 1 muestra los estados de conmutación del inversor MPUC5, el efecto que tienen en los capacitores C_1 y C_2 , así como el voltaje de salida correspondiente. Esta información se complementa con la proporcionada en la Figura 2. Observe que el estado de conmutación de los interruptores S_4 , S_5 y S_6 es complementario al de S_1 , S_2 y S_3 , respectivamente, lo cual se denota mediante el símbolo '.

Tabla 1

Estados de conmutación del inversor MPUC5.

Estado	Interruptor de potencia			Efecto en capacitor *		Voltage de salida
	S1, S4'	S2, S5'	S3, S6'	C1	C2	
1	1	0	1	-	-	$+(V_1+V_2)$
2A	1	0	0	+	-	$+V_1$
2B	0	0	1	-	+	$+V_2$
3A	0	0	0			0
3B	1	1	1			0
4A	1	1	0	-	+	$-V_2$
4B	0	1	1	+	-	$-V_1$
5	0	1	0	-	-	$-(V_1+V_2)$

* Donde + significa carga y - descarga.

Observe que para generar los 5 niveles en el voltaje de salida del inversor MPUC, se tienen 8 posibles combinaciones, i.e., 1, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 4B y 5, donde en los estados "2" y "4" es posible cargar o descargar de manera complementaria los capacitores C_1 y C_2 , lo que permite se puede aprovechar para regular su balanceo y obtener niveles simétricos de voltaje a la salida.

La Tabla 2 muestra los parámetros principales del filtro activo basado en el inversor MPUC5, sus valores y la notación utilizada para cada uno.

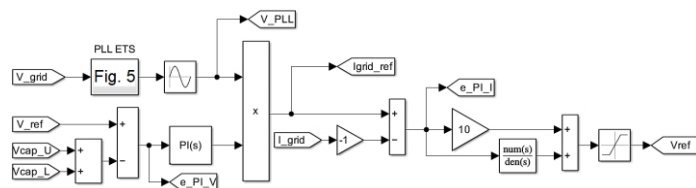
Tabla 2

Parámetros del filtro activo basado en el inversor MPUC5.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Voltaje RMS de la red	V_{rms}	120	V
Frecuencia de la red	f_{red}	60	Hz
Voltaje CC de referencia	V_{ref}	200	V
Capacitores	C_1, C_2	4	mF
Voltaje capacitores	V_{C1}, V_{C2}	100	V
Inductor lado carga	L_{carga}	5	mH
Inductor lado filtro	L_{filtro}	5	mH
Frecuencia del inversor PUC5	f_{puc}	10	kHz
Capacitor de carga	C_{carga}	1	mF
Resistor de carga	R_{carga}	80	Ω

Figura 4

Diagrama de bloques de la estrategia de control aplicada al inversor MPUC5.

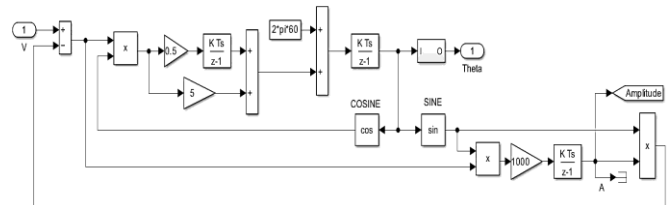


La estrategia de control aplicada al inversor MPUC de cinco niveles se muestra en la Figura 4 (Vahedi et. al., 2016). Ésta consiste de un PLL (Phase-Locked-Loop) o Lazo de Amarre en Fase, con el cual se obtiene la fase del voltaje de la red eléctrica para generar una señal senoidal unitaria sincronizada U_s . El voltaje de los dos capacitores C_1 y C_2 del inversor MPUC5 se suman y el resultado se resta de la referencia fijada a 200V. Posteriormente, la diferencia de estas magnitudes se envía a un controlador PI (proporcional-integral), cuya salida V_{PI} se multiplica por U_s^* para así generar una señal de referencia de corriente de la red I_{red}^* cuya amplitud la va ajustando el PI hasta alcanzar en estado permanente un error alrededor de cero a su entrada. La medición de la corriente de la red se resta de la referencia I_{red}^* y este error es la entrada al controlador PR (proporcional-resonante) (Biricik y Komurcugil, 2018). A diferencia del PI anterior que trabaja con señales directas o constantes, el PR sintonizado a la frecuencia de la red trabaja con señales de alterna, por lo que su desempeño es muy superior (Lara et. al., 2021). Finalmente, la salida de este controlador es la señal modulante o el voltaje de referencia, que se envía al diagrama de estados de conmutación de la Figura 6.

En la Figura 5 se muestra el diagrama del PLL necesario para sincronizar el voltaje generado por el inversor con el de la red eléctrica. Observe que este PLL es un subsistema que forma parte del esquema de la Figura 4.

Figura 5

Diagrama del PLL utilizado para determinar la fase de la señal de voltaje de la red eléctrica.



En la Figura 6 se muestra el esquema para asignar el voltaje de la señal modulante o de referencia proveniente de la salida del diagrama de la Figura 4 en uno de los cinco posibles niveles de voltaje a la salida del inversor MPUC (Vahedi et. al., 2018). Los cuatro bloques a la entrada son bloques de saturación, comenzando de abajo hacia arriba, tienen los siguientes rangos inferior y superior: $-1 \rightarrow -0.5$, $-0.5 \rightarrow 0$, $0 \rightarrow +0.5$ y $+0.5 \rightarrow +1$, donde posteriormente se les suman 1, 0.5, 0 y -0.5, respectivamente, y se dobla la magnitud de su salida. Este procedimiento permite ajustar las cuatro porciones de amplitud de la señal de entrada al rango de $0 \rightarrow 1$ y poder ser comparadas con una sola señal triangular portadora de amplitud unitaria. La lógica combinatorial de la etapa final permite tener una sola porción de entrada activa en cada instante y así generar el nivel correspondiente del 1 al 5.

Figura 6

Esquema de asignación del voltaje de modulación de entrada a uno de los cinco niveles posibles del inversor MPUC5.

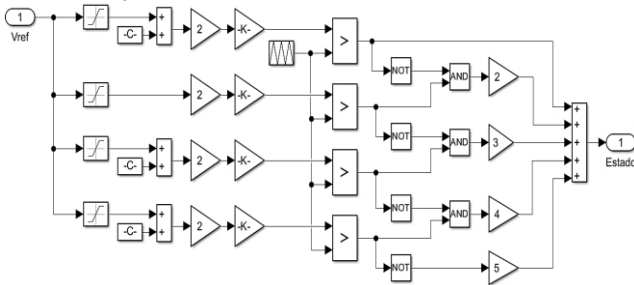
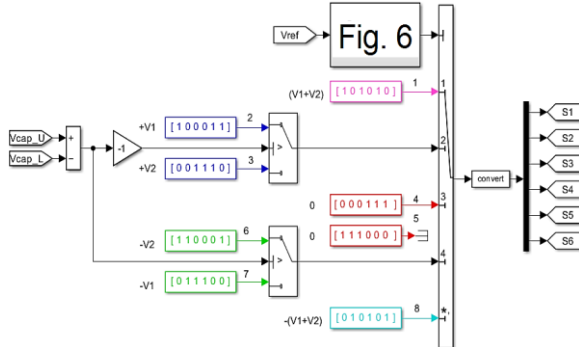


Figura 7

Estados de conmutación para los cinco niveles posibles del inversor MPUC5 y balanceo de voltaje de sus capacitores.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de simulación se han obtenido con el software MATLAB/Simulink/Simscape.

La Figura 8 muestra, en la parte superior, los voltajes y, en la parte inferior, las corrientes correspondientes a los tres componentes del sistema: la red eléctrica, la carga no lineal y el filtro activo. Observe la forma de onda típica de la corriente consumida por un rectificador de diodos de puente completo con una carga RC. Asimismo, se observan correctamente los cinco niveles de voltaje del filtro generados por el convertidor MPUC. Por otro lado, el voltaje y la corriente están en fase, lo que significa que la potencia reactiva está alrededor de cero y el factor de potencia está muy cercano a la unidad; esto se corrobora con los resultados de las Figuras 9 y 11.

La Figura 9 muestra las potencias activa y reactiva de la red eléctrica, de la carga no lineal y del filtro activo. Observe cómo la potencia reactiva de la red eléctrica es nula, ya que la requerida por la carga de 110 VARs la provee el filtro. Asimismo, la potencia activa de 289 W consumida por la carga es suministrada por la red eléctrica, mientras que la consumida por el filtro activo es de tan solo 0.6 W, necesaria únicamente para mantener el voltaje en los capacitores del convertidor MPUC5.

En la primera gráfica de la Figura 10 se observa el voltaje de referencia de 200 V, junto con la suma de los voltajes de ambos capacitores del convertidor MPUC, por lo que cada capacitor está en torno a 100 V. La segunda gráfica muestra la diferencia de voltaje entre ambos capacitores, la cual permanece en el intervalo de $\pm 1V$. La tercera gráfica muestra el error de entrada del controlador PI de voltaje, mientras que la quinta muestra el error de entrada del controlador PR de corriente que,

teóricamente, es cero en estado estable. Observe en la cuarta gráfica cómo el valor de la corriente medida sigue correctamente la señal sinusoidal de la corriente de referencia de la red eléctrica, gracias a la alta ganancia del controlador PR en la frecuencia de resonancia (Lara et al., 2022).

Figura 8

Voltajes y corrientes de la red, de la carga y del filtro.

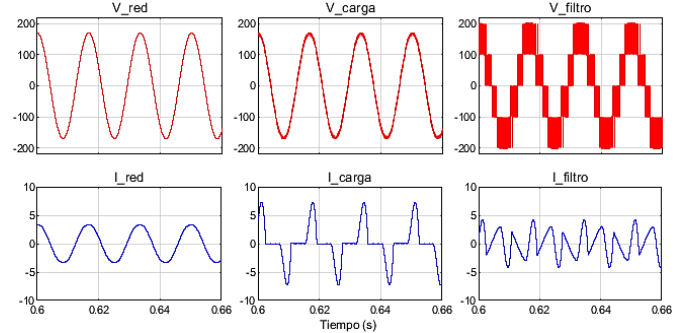
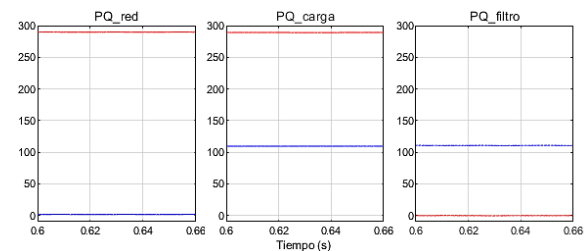


Figura 9

Potencias activa y reactiva tanto de la red como de la carga y del filtro.



La Figura 11 muestra la distorsión armónica total (THD - Total Harmonic Distortion) de la corriente de la red eléctrica y de la corriente de la carga, así como el factor de potencia de la red medidos durante el mismo intervalo de tiempo que en las Figuras 8, 9 y 10. Observe que, gracias a la compensación realizada con el filtro activo basado en el controlador PR, se ha alcanzado un factor de potencia de 1 y, al mismo tiempo, se ha logrado disminuir el THD de aproximadamente 78% a alrededor de 2.9%, cumpliendo así con el estándar IEEE 519 al ubicarse por debajo del 5% de distorsión. Los espectros correspondientes a estas corrientes se muestran en la Figura 12. Asimismo, pueden corroborarse los porcentajes de distorsión de la corriente de carga y de la corriente de red previamente mencionados. Observe cómo las componentes correspondientes a la 3ra. y 5ta. armónicas, son reducidas por el filtro activo MPUC5 de 70% y 30%, a alrededor de 2.6% y 1.1%, respectivamente.

La Figura 13 muestra las mismas gráficas de la Figura 10, pero ahora estos resultados son obtenidos durante una variación súbita en la referencia del voltaje de DC V_{ref} . En $t = 0.8s$, V_{ref} se decrementó en 10%, i.e., de 200V a 180V, y posteriormente en $t = 1.2s$, V_{ref} se incrementó en 11%, i.e., de 180V a 200V. Observe cómo durante el primer evento se produce un mínimo desbalance de voltaje en los capacitores, el cual no supera los 3V. El controlador PI correctamente regula el voltaje total, siguiendo la referencia y logrando alcanzar después el transitorio un error alrededor de cero en estado estable. Lo mismo sucede con el controlador PR, el cual logra compensar los armónicos de

corriente una vez pasado el transitorio, obteniendo así una corriente de calidad en la red eléctrica.

La Figura 14 muestra las mismas gráficas que las Figuras 10 y 13, pero ahora estos resultados se obtienen durante una variación súbita en la resistencia de carga R_{load} a la salida del puente de diodos. En $t=0.8s$, R_{load} se decrementó en 50%, i.e., de 80Ω a 40Ω , y posteriormente en $t=1.2s$, R_{load} se incrementó en 100%, i.e., de 40Ω a 80Ω . Observe cómo a pesar de las variaciones de carga, el voltaje de los capacitores se regula correctamente, mientras que su desbalance permanece en el rango de $\pm 3V$. Asimismo, el controlador PR es capaz de compensar la distorsión de la corriente de red durante las perturbaciones.

La Figura 15 muestra los voltajes y las corrientes de la red, de la carga y del filtro durante el cambio súbito de carga descrito en el párrafo anterior. Se puede observar primero el incremento y, posteriormente, el decremento del valor pico de la corriente de la carga y, en consecuencia, en la corriente del filtro y en la corriente de la red eléctrica. Es importante destacar que, a pesar de estas perturbaciones, los cinco niveles de voltaje del convertidor MPUC se mantienen correctamente.

Figura 10

Voltaje de los capacitores del convertidor MPUC, así como las referencias y los errores de los controladores del filtro activo.

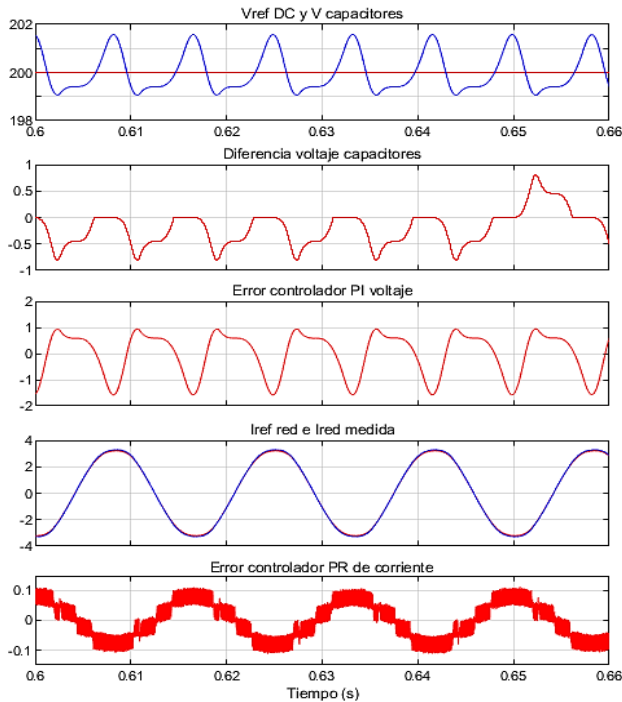


Figura 11

THD de la corriente de la red, THD de la corriente de la carga y factor de potencia de la red.

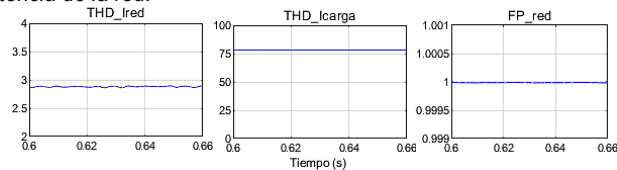


Figura 12

Espectros de la corriente de carga y de la corriente de la red eléctrica.

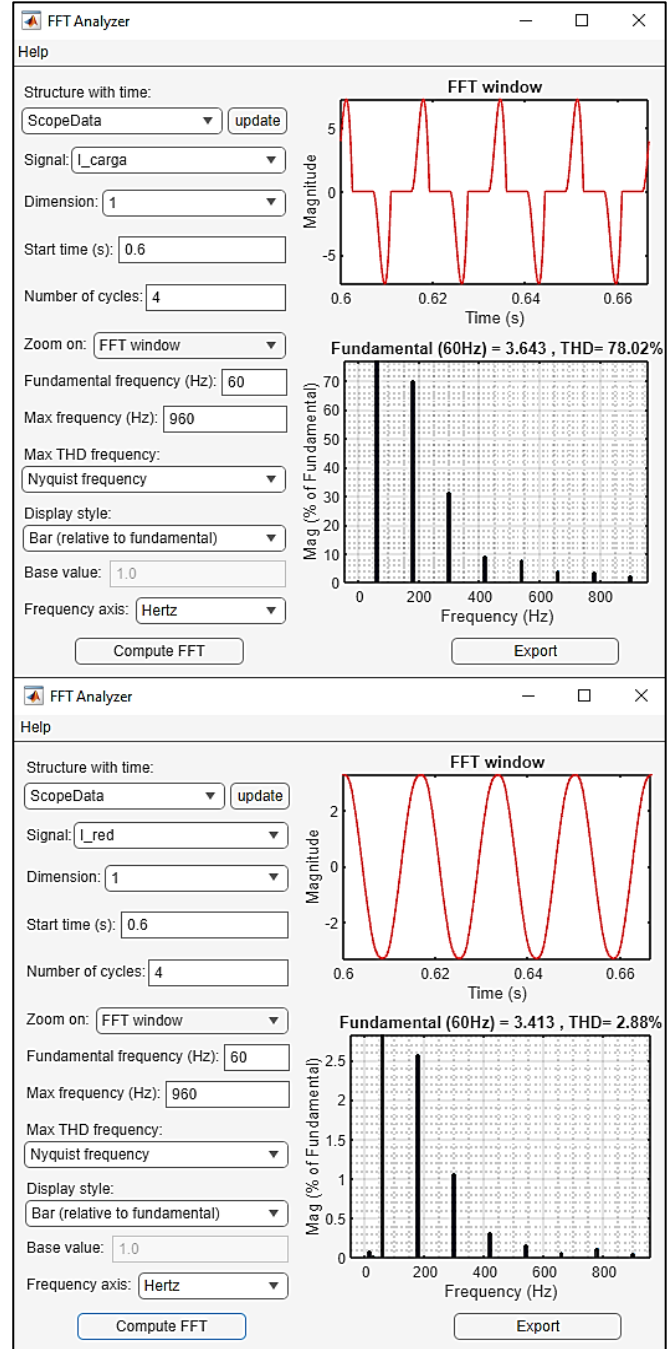


Figura 13

Voltaje de los capacitores del convertidor MPUC, así como las referencias y los errores de los controladores del filtro activo durante un cambio súbito en la referencia de voltaje de DC.

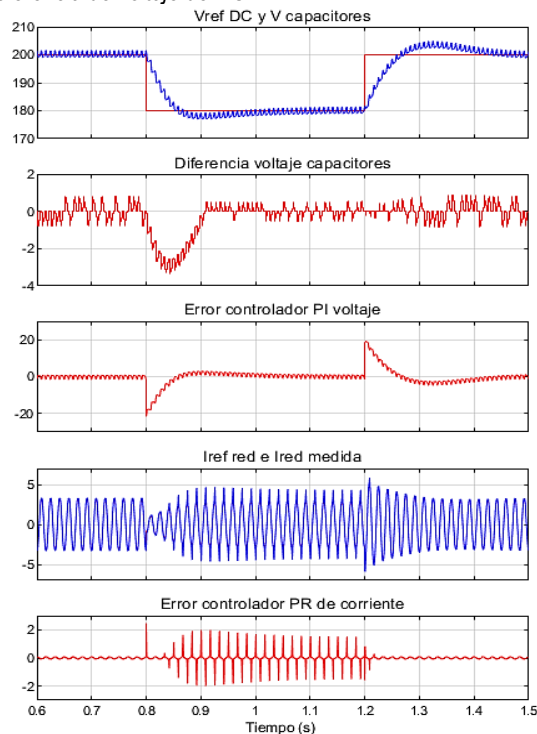


Figura 14

Voltaje de los capacitores del convertidor MPUC, así como las referencias y los errores de los controladores del filtro activo durante un cambio súbito en la carga no lineal.

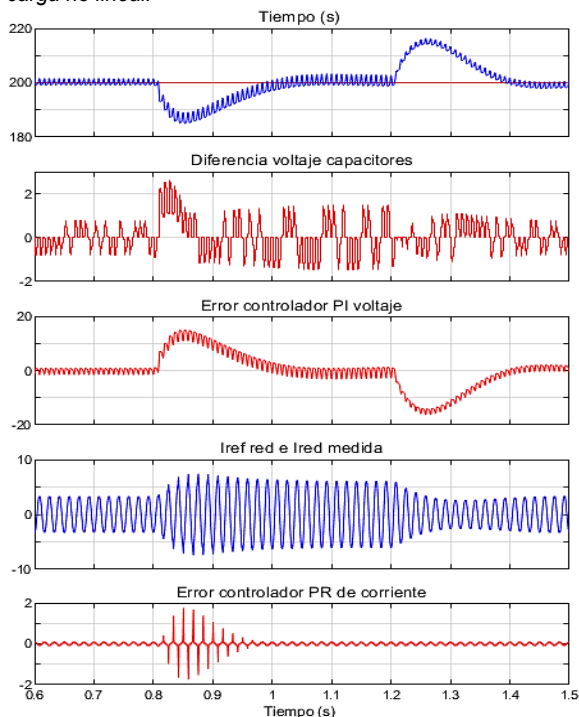
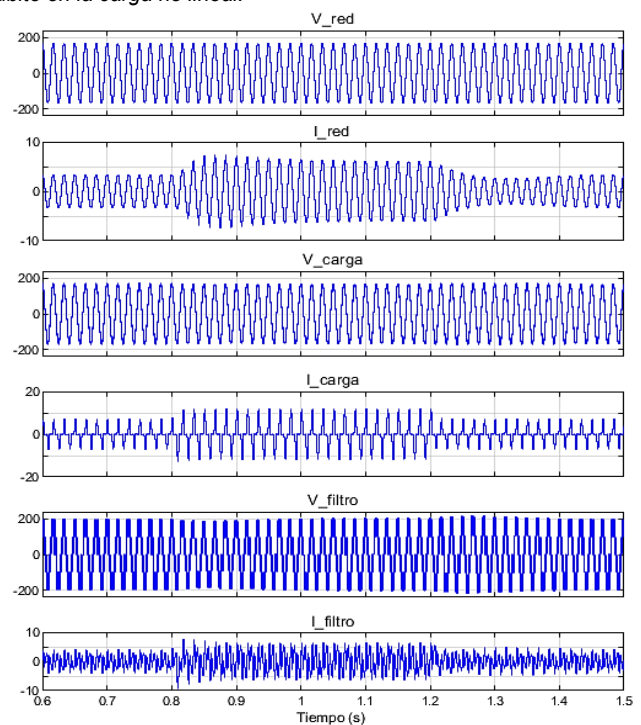


Figura 15

Voltajes y corrientes de la red, de la carga y del filtro durante un cambio súbito en la carga no lineal.



IV. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó el análisis de un filtro activo paralelo basado en un convertidor de celda en U empaquetada para mejorar la calidad de la energía eléctrica en una red monofásica de baja tensión. La alta reconfigurabilidad de la topología de este convertidor y su mínimo requerimiento de componentes lo hacen altamente atractivo para la industria, ya que es capaz de generar 5 niveles de voltaje con tan solo seis interruptores de potencia y dos capacitores. La estrategia de control basada en un controlador PI para regular el voltaje de los capacitores del convertidor MPUC, así como en un controlador PR sintonizado a 60Hz para la compensación de la distorsión armónica de la corriente de la red y la corrección del factor de potencia ha mostrado un buen desempeño. Durante la prueba del decremento súbito de la referencia de voltaje de 200V a 180V, y posteriormente el incremento súbito de regreso a 200V, el desbalance de los capacitores cargados a 100V cada uno, se mantuvo inferior a 3V, mientras que en la prueba de reducción de carga de 80Ω a 40Ω y posteriormente el incremento súbito de regreso a 80Ω, el desbalance permaneció en un intervalo de $\pm 3V$. Asimismo, el THD se logró reducir de 78% a tan solo 2.9%, mientras que el factor de potencia se mantuvo estable en 1. Estos resultados de simulación obtenidos en la plataforma de MATLAB-Simulink/Simscape demuestran la viabilidad de utilizar el convertidor con topología MPUC5 en aplicaciones no solo académicas sino también industriales de filtrado activo de alto desempeño.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo (ITSL) el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

Abarzadeh, M., Vahedi, H. y Al-Haddad, K. (2019). Fast Sensor-Less Voltage Balancing and Capacitor Size Reduction in PUC5 Converter Using Novel Modulation Method. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 8, pp. 4394-4406. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2893739>.

Athwer, A., y Darwish, A. (2023). A Review on Modular Converter Topologies Based on WBG Semiconductor Devices in Wind Energy Conversion Systems. *Energies*, 16(14), 5324. <https://doi.org/10.3390/en16145324>

Biricik, S. y Komurcugil, H. (2018). Proportional-Integral and Proportional-Resonant Based Control Strategy for PUC Inverters. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, USA, pp. 3369-3373. <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591371>.

Dash, D. K., & Sadhu, P. K. (2023). A Review on the Use of Active Power Filter for Grid-Connected Renewable Energy Conversion Systems. *Processes*, 11(5), 1467. <https://doi.org/10.3390/pr11051467>.

Dekka, A., Ramezani, A., Ouni, S. y Narimani, M. (2020). A New Five-Level Voltage Source Inverter: Modulation and Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5553-5564. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3000712>.

Lara, J., Masisi, L., Hernández, C., Arjona, M. A., y Chandra, A. (2021). Novel Five-Level ANPC Bidirectional Converter for Power Quality Enhancement during G2V/V2G Operation of Cascaded EV Charger. *Energies*, 14(9), 2650. <https://doi.org/10.3390/en14092650>.

Lara, J., Hernandez, C., Arjona, M. A., Lesedi, M., y Ambrish, C. (2022). Performance Evaluation of an Active Neutral-Point-Clamped Multilevel Converter for Active Filtering in G2V-V2G and V2H Applications. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 41607-41621. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3167694>.

Oliveira Pinto, J. G., Macedo, R., Monteiro, V., Barros, L., Sousa, T., y Afonso, J. L. (2018). Single-Phase Shunt Active Power Filter Based on a 5-Level Converter Topology. *Energies*, 11(4), 1019. <https://doi.org/10.3390/en11041019>.

Omorodion Uwagboe, J. y Saha, A. K. (2025). A Comprehensive Review of Multilevel Inverter Topologies and Control Strategies for Grid-Connected Photovoltaic Battery Energy Storage Systems Integrating Active Power Filter. *IEEE Access*, vol. 13, pp. 169989-170016. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3615104>.

Ounejjar, Y., Al-Haddad, K. y Gregoire, L.-A. (2011). Packed U Cells Multilevel Converter Topology: Theoretical Study and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1294-1306. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2050412>.

Siwakoti, Y. P., Long, T., Barzegarkhoo, R., y Blaabjerg, F. (2019). A Dual Mode 5-Level Inverter with Wide Input Voltage Range. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, MD, USA, pp. 3609-3615. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912556>.

Vahedi, H. y Al-Haddad, K. (2016). PUC5 inverter - a promising topology for single-phase and three-phase applications. *IECON - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 6522-6527. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793810>.

Vahedi, H., Labbé, P.-A. y Al-Haddad, K. (2016). Sensor-Less Five-Level Packed U-Cell (PUC5) Inverter Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Modes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 361-370. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2491260>.

Vahedi, H., Shojaei, A. A., Dessaint, L.-A. y Al-Haddad, K. (2018). Reduced DC-Link Voltage Active Power Filter Using Modified PUC5 Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 943-947. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2727325>.

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Jorge Lara Cardoso
2	Curación de datos [Data curation]	Concepción Hernández Flores
3	Análisis formal [Formal analysis]	Marco Antonio Arjona López
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
5	Investigación [Investigation]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
6	Metodología [Methodology]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
7	Administración del proyecto [Project administration]	Jorge Lara Cardoso
8	Recursos [Resources]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
9	Software [Software]	Concepción Hernández Flores
10	Supervisión [Supervision]	Jorge Lara Cardoso
11	Validación [Validation]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
12	Visualización [Visualization]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Jorge Lara Cardoso Concepción Hernández Flores Marco Antonio Arjona López