

SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO SINUSOIDAL EN DRIVERS TRIFÁSICOS PARA MOTORES SÍNCRONOS

SIMULATION AND EVALUATION OF SINUSOIDAL PULSE WIDTH MODULATION IN THREE-PHASE DRIVERS FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Juan Eduardo Esquivel Cruz

Universidad Politécnica de Tulancingo, México
juan.esquivel2115002@upt.edu.mx

Francisco Beltrán Carbajal

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
Autor de correspondencia: *fbeltran@azc.uam.mx*

Iván de Jesús Rivas Cambero

Universidad Politécnica de Tulancingo, México
ivan.rivas@upt.edu.mx

Alexis Castelán Pérez

Universidad Politécnica de Tulancingo, México
alexis.castelan1294@upt.edu.mx

David Marcos Andrade

Universidad Politécnica de Tulancingo, México
david.marcos2315006@upt.edu.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 26/diciembre/2023

Resumen

Este artículo propone una técnica para mejorar el funcionamiento de motores síncronos en vehículos eléctricos mediante la estrategia de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) con variación de frecuencia en un driver de inversor trifásico de 6 conmutadores. El objetivo principal de esta investigación es mejorar las señales de alimentación y optimizar el rendimiento de los motores síncronos al evaluar las características de salida del driver trifásico en términos de calidad, eficiencia energética y distorsión armónica al variar el número de pulsos emitidos para excitar los conmutadores del driver. Como resultado de la investigación, se observa una reducción significativa de los armónicos en las señales de alimentación

del motor, lo que demuestra que, al seleccionar los pulsos de conmutación adecuados, se mejora la estabilidad del accionamiento de tracción en todo el rango de velocidad. Esto es importante para aplicaciones en vehículos eléctricos y promueve la electromovilidad.

Palabras Clave: Distorsión armónica, Driver, Electromovilidad, Inversor trifásico, SPWM.

Abstract

This article proposes a technique to enhance the operation of synchronous motors in electric vehicles through the strategy of sinusoidal pulse width modulation (SPWM) with frequency variation in a 6-switch three-phase inverter driver. The primary objective of this research is to improve the power signals and optimize the performance of synchronous motors by evaluating the output characteristics of the three-phase driver in terms of quality, energy efficiency, and harmonic distortion while varying the number of pulses emitted to excite the driver's switches. As a result of the investigation, a significant reduction in harmonics in the motor's power signals is observed, demonstrating that by selecting the appropriate switching pulses, the stability of traction drive is enhanced across the entire speed range. This is crucial for applications in electric vehicles and promotes electromobility.

Keywords: *Driver, Electromobility, Harmonic distortion, Three-phase inverter, SPWM.*

1. Introducción

En la búsqueda constante por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y lograr una movilidad más sostenible, la electromovilidad ha emergido como una de las soluciones más prometedoras en el sector del transporte. Los vehículos eléctricos están ganando popularidad debido a su capacidad para funcionar de manera limpia y eficiente, lo que no solo ayuda a preservar el medio ambiente, sino que también reduce la dependencia de combustibles fósiles y mejora la calidad del aire en las ciudades [Li, 2022]. El corazón de esta revolución eléctrica es el motor síncrono de imanes permanentes, que se ha convertido en una opción

preferida para impulsar vehículos eléctricos debido a su eficiencia sobresaliente y su capacidad para ofrecer altas relaciones potencia-peso [Daoudi, 2021]. Sin embargo, para desbloquear todo el potencial de estos motores, es fundamental desarrollar y mejorar los sistemas de control que gobiernan su funcionamiento.

En este sentido, el driver trifásico juega un papel crucial al modular la señal de salida del inversor para alimentar el motor síncrono de imanes permanentes. Aquí es donde entra en juego la estrategia de modulación por ancho de pulso sinusoidal, una técnica de control ampliamente utilizada en sistemas de accionamiento eléctrico [Zhao, 2018]. La implementación adecuada de SPWM puede mejorar significativamente la calidad de la señal de salida, lo que se traduce en una mayor precisión en la entrega de potencia al motor y, por ende, una mayor eficiencia energética en todo el sistema de propulsión [Chao, 2022].

Diversas investigaciones han demostrado que la mejora de la calidad de la señal sinusoidal generada por el inversor tiene un impacto positivo en la reducción de pérdidas adicionales en el motor y, a su vez, previene el riesgo de sobrecalentamiento [Hren, 2017]. Esta optimización resulta en un rendimiento mejorado y una vida útil prolongada del sistema del motor, lo que es especialmente relevante para la industria de la electromovilidad, donde la eficiencia y la confiabilidad son fundamentales para la adopción masiva de vehículos eléctricos [Shchur, 2023].

Para seguir avanzando en la mejora de la eficiencia de los motores síncronos de imanes permanentes, también es crucial abordar el problema de la distorsión armónica. Los armónicos de voltaje y corriente pueden generar interferencias perjudiciales y reducir el rendimiento general del sistema de accionamiento. Para superar este desafío, la investigación se centrará en la selección del número de puntos de conmutación adecuados para reducir aún más los armónicos, lo que, a su vez, mejorará la estabilidad del sistema de accionamiento de tracción del motor en todo el rango de velocidad [Sana, 2020].

Es importante destacar que los esfuerzos para mejorar las estrategias de modulación SPWM y el desempeño del driver trifásico no solo benefician a la electromovilidad, sino que también tienen un impacto positivo en otras áreas de

aplicaciones energéticas y electrónicas [Hu, 2022], [Kraiem, 2020]. Por ejemplo, en sistemas de suministro de energía renovable, como los inversores monofásicos, la modulación SPWM se ha utilizado para analizar y reducir la distorsión armónica en la tensión de salida [Hren, 2017]. Además, en otras aplicaciones, como el diseño de sistemas de transmisión SPWM basados en microcontroladores, se han logrado avances en la transmisión de señales eficientes y estables [Jin, 2023], [Chao, 2022]. Este artículo busca contribuir significativamente al campo de la electromovilidad y la eficiencia energética en el transporte, presentando la simulación y evaluación de una estrategia de modulación SPWM para un driver trifásico aplicado en un motor síncrono de imanes permanentes con el objetivo de mejorar su operación. La metodología empleada es mediante la estrategia de variación de número de pulsos para la excitación de los conmutadores en el Driver propuesto, el cual busca ser una herramienta para futuras aplicaciones experimentales [Liu, 2015], [Nagarajan, 2013].

Los resultados obtenidos en esta investigación no solo aportarán conocimientos valiosos para mejorar la calidad de la señal de salida y reducir las pérdidas en el motor, si no que de igual manera se ayuda a la generación de señales sinusoidales eléctricas para alimentación de motores síncronos aplicados en vehículos eléctricos. El artículo pretende sentar las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el diseño y la implementación de sistemas de control avanzados y confiables para el transporte eléctrico del futuro.

2. Métodos

En esta investigación, se llevó a cabo la simulación y evaluación de una estrategia de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) aplicada en un driver trifásico para un motor síncrono de imanes permanentes. El objetivo principal fue mejorar la calidad de la señal de salida y reducir las pérdidas adicionales en el motor para impulsar la eficiencia y la vida útil del motor. La manera general para obtener los pulsos para un inversor trifásico es realizando la comparación entre una o más señales senoidales de frecuencia a la cual quiere uno que se genere la respuesta del inversor, como se representan en la ecuación 1 a la ecuación 3.

$$\text{sen}_1 = \text{sen}(2\pi ft) \quad (1)$$

$$\text{sen}_2 = \text{sen}\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$\text{sen}_3 = \text{sen}\left(2\pi ft + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3)$$

Ddonde t representa el tiempo y f la frecuencia de la señal senoidal. Para esto se utilizó una frecuencia de 2 Hz , contra una señal triangular con una frecuencia mayor, como se expresa por la ecuación 4.

$$\text{trian} = \frac{2A}{\pi} \{\arcsen[\text{sen}(2\pi f_t t)]\} \quad (4)$$

Donde f_t es la frecuencia de la señal diente de sierra. Esto determinará el número de pulsos a generarse por cada ciclo. Otra estrategia es el uso de dos señales triangulares, de menor amplitud, una para la parte positiva y otra para la parte negativa como se muestra en la figura 1.

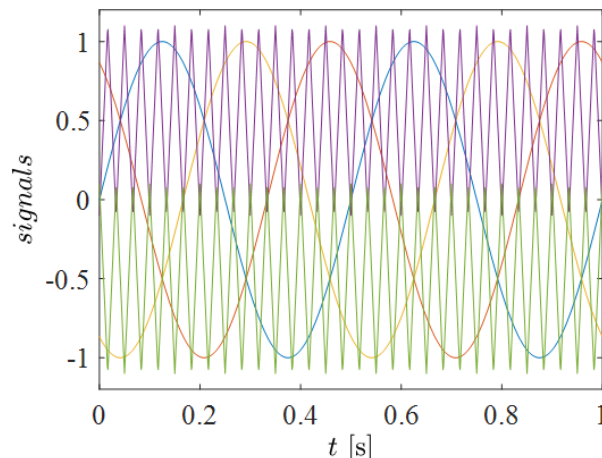


Figura 1 Señales senoidales desfasadas 120 grados y triangulares con mayor frecuencia para generación de pulsos SPWM.

Al realizar la comparación de las señales se obtienen los pulsos para cada uno de los conmutadores del driver como se indica en la figura 2. Sin embargo, para la simulación de estas señales se utilizó una alternativa desde el embebido que en este caso es Arduino. Las librerías TimerOne y TimerThree proporcionan funciones y métodos para la generación de señales PWM en los temporizadores

correspondientes (Timer1 y Timer3). Estas librerías permiten establecer el periodo y el ciclo de trabajo de la señal PWM en los pines de salida especificados.

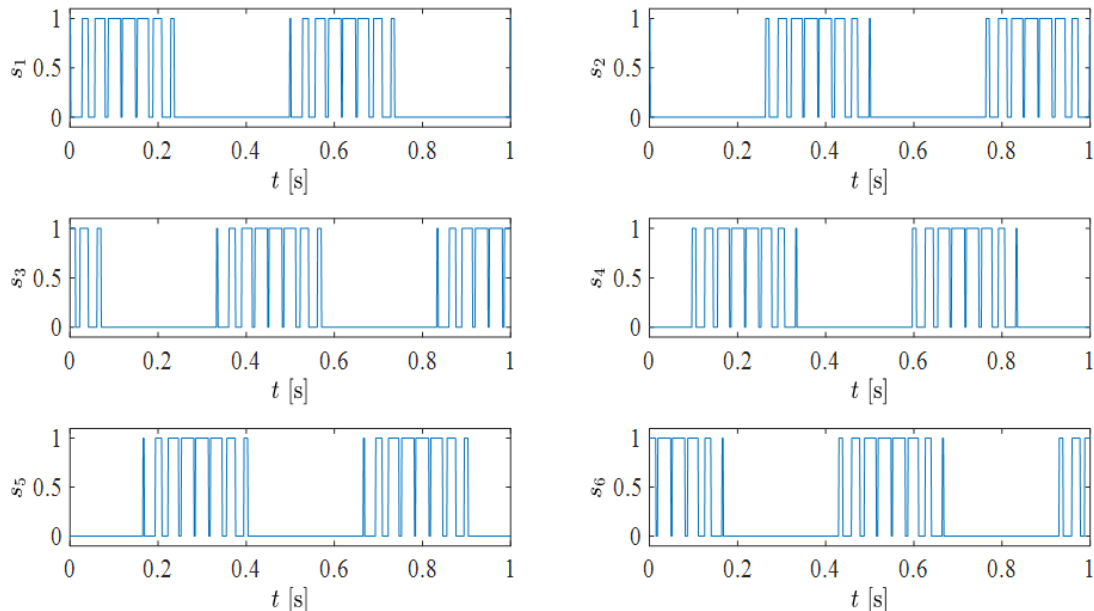


Figura 2 Señal SPWM para excitar el driver de 6 conmutadores.

En resumen, estas librerías son esenciales para el funcionamiento del inversor controlado por modulación SPWM, ya que permiten generar las señales PWM en el hardware de Arduino y controlar los MOSFET del inversor para generar la onda sinusoidal necesaria para la conversión de voltaje.

El corazón del sistema de control es el driver trifásico, que se encarga de modular la señal de salida del inversor mediante la estrategia de modulación SPWM. Se implementó un circuito de control basado en Arduino, que permitió variar el número de pulsos generados por el driver. Esto permitió simular diferentes configuraciones y estudiar el impacto del número de pulsos en el desempeño del motor y la eficiencia energética. Para lograr este objetivo, en la figura 3 se muestra un equivalente de un motor trifásico conectado en configuración delta [Valderrabano, 2017]. Se seleccionó la configuración delta debido a su amplia aplicación en motores trifásicos y su relevancia para el campo de la electromovilidad.

Es importante mencionar que todas las simulaciones se realizaron con un enfoque en la precisión y la consistencia de los resultados. Se tomaron en cuenta los posibles

factores de incertidumbre y se aplicaron medidas de control adecuadas para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos. Además de la variación del número de pulsos, se consideró la comparación de los resultados con diferentes configuraciones de modulación SPWM, como la modulación unipolar y bipolar [Yuditya, 2020]. Esto permitió evaluar la eficacia de la estrategia SPWM propuesta en comparación con otras técnicas de modulación existentes.

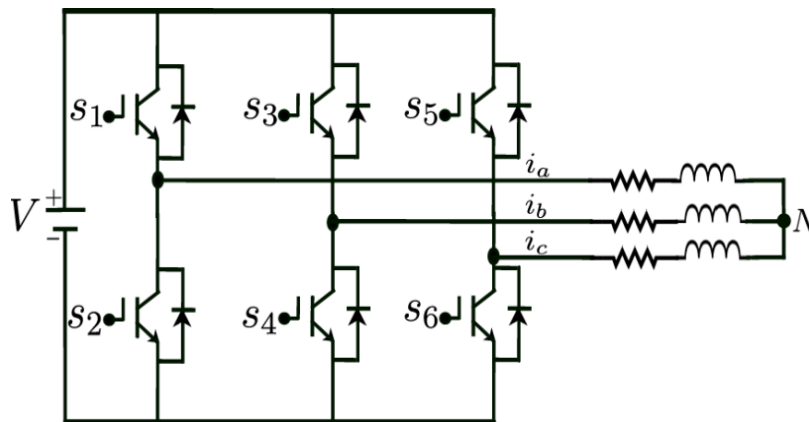


Figura 3 Driver de seis conmutadores con salida a circuito equivalente de motor síncrono usado en vehículos eléctricos.

Los datos recopilados durante las simulaciones se procesaron y analizaron estadísticamente para obtener conclusiones significativas. Los hallazgos obtenidos en esta fase de la investigación proporcionaron una visión profunda sobre el impacto del número de pulsos y la estrategia de modulación SPWM en el rendimiento del motor síncrono de imanes permanentes conectado en configuración delta.

La metodología de esta investigación se basó en la simulación sistemática de un motor trifásico conectado en configuración delta, donde se varió el número de pulsos mediante un driver trifásico controlado por Arduino, utilizando la estrategia de modulación SPWM propuesta. Los resultados de estas simulaciones fueron analizados y comparados para evaluar el desempeño del motor en términos de calidad de la señal de salida y eficiencia energética. Estos hallazgos proporcionaron información valiosa para el diseño y la implementación de sistemas de control más eficientes y precisos en el campo de la electromovilidad y la eficiencia energética en el transporte.

3. Resultados

Los resultados obtenidos de las simulaciones con diferentes números de pulsos para la estrategia de modulación SPWM en el motor trifásico proporcionan información valiosa sobre el desempeño y la eficiencia del sistema. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada imagen que muestra las señales de corriente eléctrica para cada configuración: i_a , i_b , i_c .

En la figura 4 se observa la forma de señal sinusoidal de las corrientes i_a , i_b e i_c generadas utilizando la estrategia de modulación SPWM con 5 pulsos. La cantidad limitada de pulsos resulta en señales de corriente distorsionadas considerablemente, con respecto a la forma de onda sinusoidal que se desea generar para aplicaciones de control eficiente de motores en vehículos eléctricos. Esto contribuye a una alta distorsión armónica de las señales eléctricas, lo que podría afectar la eficiencia del motor y generar posiblemente pérdidas adicionales.

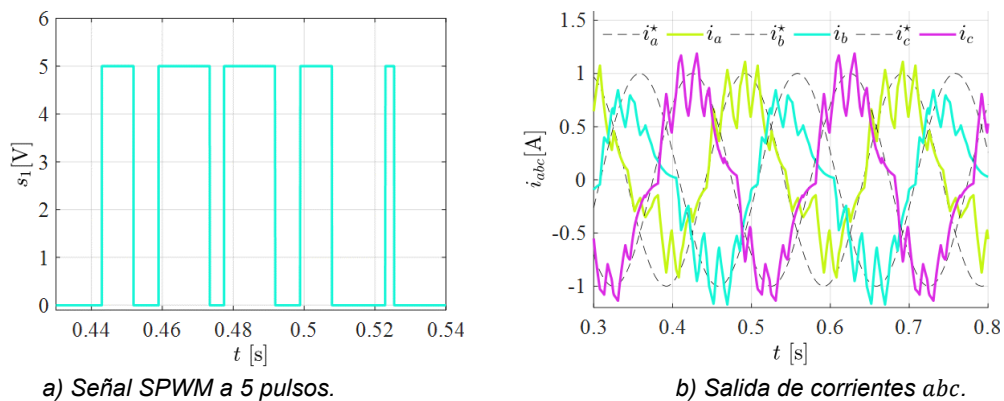


Figura 4 Prueba 1 aplicando señal SPWM con 5 pulsos y tomando lectura de la salida de corriente de las corrientes en las fases a , b , c .

Por otro lado, en la figura 5 se puede notar una mejora significativa en la señal sinusoidal de las corrientes i_a , i_b e i_c generadas utilizando la estrategia de modulación SPWM con 15 pulsos en la estrategia SPWM. Las señales eléctricas presentan una mejor aproximación a la forma de onda sinusoidal que se desea. De esta manera, las señales generadas se vuelven más precisas, con menor distorsión armónica en comparación con la configuración de 5 pulsos. Esto indica una entrega de potencia más eficiente al motor y una disminución de las pérdidas adicionales.

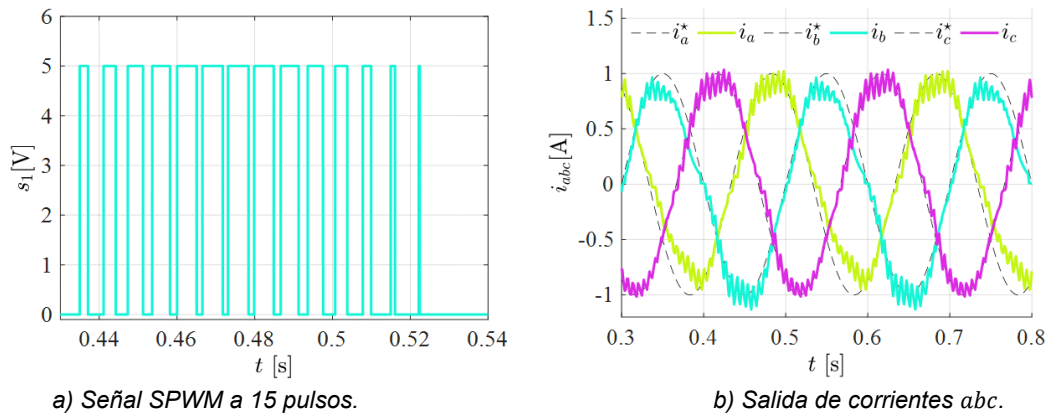


Figura 5 Prueba 2 aplicando señal SPWM con 15 pulsos y tomando lectura de la salida de corriente de las corrientes en las fases a, b, c .

En la figura 6 se evidencia una mayor refinación en la forma de señal sinusoidal de las corrientes i_a, i_b, i_c generadas utilizando la estrategia de modulación SPWM con 30 pulsos en la estrategia SPWM. Las señales de control de corriente eléctrica exhiben una mejor representación a la forma sinusoidal ideal, lo que se traduce en una entrega de potencia más precisa y una menor distorsión armónica. Este resultado sugiere una mejora adicional en la eficiencia del motor y una reducción significativa de pérdidas adicionales.

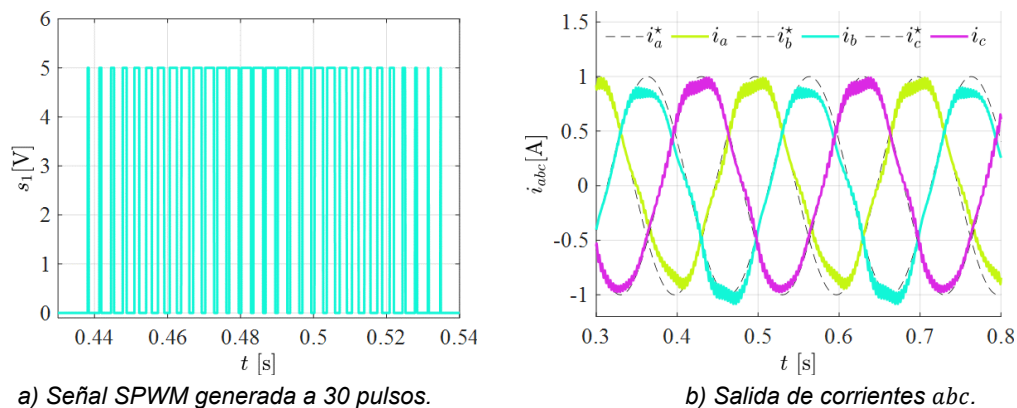


Figura 6 Prueba 3 aplicando señal SPWM con 30 pulsos y tomando lectura de la salida de corriente de las corrientes en las fases a, b, c .

En la figura 7 se destaca un alto grado de precisión en la señal sinusoidal de las corrientes i_a, i_b, i_c al utilizar 180 pulsos en la estrategia SPWM. Las corrientes eléctricas se acercan considerablemente a la forma sinusoidal ideal, lo que implica

una entrega de potencia altamente precisa y una reducción significativa de distorsión armónica, con respecto a los casos anteriores. Este resultado sugiere que el sistema alcanza un alto nivel de eficiencia y una minimización excepcional de las pérdidas adicionales.

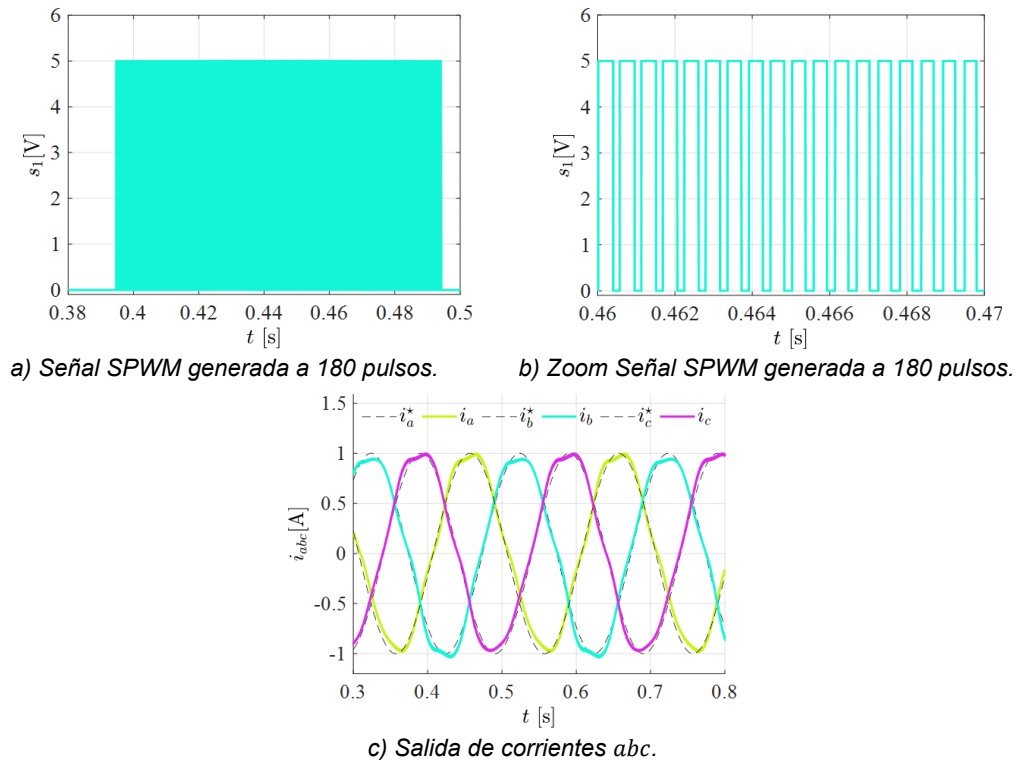


Figura 7 Prueba 4 aplicando señal SPWM con 180 pulsos y tomando lectura de la salida de corriente de las corrientes en las fases a, b, c .

En general, los resultados de las simulaciones demuestran que el aumento del número de pulsos en la estrategia SPWM mejora significativamente la calidad de las corrientes de fase para tareas de control eficiente del movimiento del motor en vehículos eléctricos. A medida que se incrementa el número de pulsos, se mejora substancialmente la reconstrucción de las señales de referencia de control a formas de onda sinusoidales, lo que conlleva a un rendimiento más eficiente y una menor distorsión armónica. Estos hallazgos respaldan la importancia de seleccionar adecuadamente el número de pulsos para optimizar la eficiencia y el rendimiento del sistema de accionamiento electrónico para el control del movimiento en vehículos eléctricos.

En la figura 8 se utiliza las señales de alimentación de corriente con 5 pulsos aplicadas en el motor síncrono para comprobar la eficiencia del método, iniciando con las señales trifásicas con mayor número de armónicos presentes, como resultado se observa una señal con bajo rendimiento en la velocidad del motor y armónicos presentes en la respuesta.

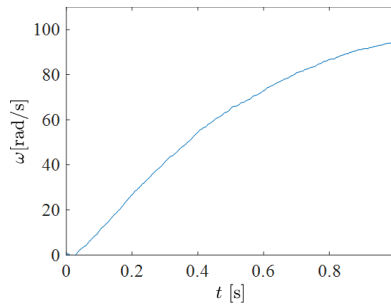


Figura 8 Respuesta de velocidad del motor con señales trifásicas usando 5 pulsos.

La configuración con 180 pulsos muestra los resultados más prometedores en términos de precisión en la entrega de potencia y reducción de pérdidas adicionales como se puede observar en la figura 9, lo que sugiere que es una opción óptima para mejorar el rendimiento del motor trifásico. Sin embargo, es fundamental considerar las restricciones de recursos y aplicaciones específicas para determinar la mejor configuración de pulsos en la implementación práctica del sistema.

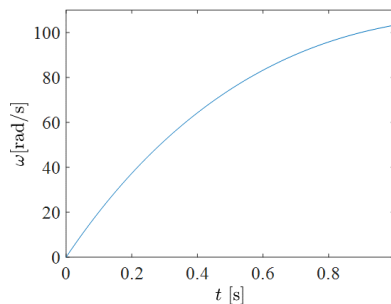


Figura 9 Respuesta de velocidad del motor con señales trifásicas usando 180 pulsos.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en las simulaciones demostraron que el aumento del número de pulsos generados por el driver trifásico utilizando la estrategia de

modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) tiene un impacto significativo en el desempeño del motor síncrono de imanes permanentes conectado en configuración delta. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas donde se ha destacado que una mayor cantidad de pulsos mejora la precisión y reduce los armónicos en sistemas de accionamiento eléctrico [Hren, 2017].

En particular, al incrementar el número de pulsos, se observó una mejora notable en la calidad de la señal de salida, resultando en una onda sinusoidal más precisa y con menos distorsión armónica. Esto tiene implicaciones importantes en el rendimiento del motor, ya que una señal sinusoidal más limpia y precisa permite una entrega de potencia más eficiente al motor, reduciendo así las pérdidas adicionales y mejorando la eficiencia energética. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que han resaltado la importancia de la modulación SPWM en la reducción de pérdidas y en el mejoramiento de la eficiencia en sistemas de accionamiento eléctrico [Chao, 2022].

La eficiencia energética es un factor crítico en la adopción masiva de vehículos eléctricos, y el motor síncrono de imanes permanentes es una opción popular debido a su alta eficiencia [Daoudi, 2021]. La estrategia de modulación SPWM con mayor número de pulsos ofrece una mejora sustancial en la eficiencia del motor, lo que implica una mayor autonomía y menor consumo de energía en los vehículos eléctricos, otras técnicas utilizadas pueden ser los sistemas multinivel como el que se presenta en [Sanjay, 2018], el cual puede ser un punto de comparativa en trabajos futuros.

Es importante mencionar que, aunque el incremento en el número de pulsos demostró beneficios en términos de calidad de la señal y eficiencia, la elección adecuada del número óptimo de pulsos debe ser considerada con prudencia. Un número excesivo de pulsos podría implicar un mayor consumo computacional y de recursos, lo cual podría afectar la viabilidad de su implementación en sistemas en tiempo real. Por lo tanto, se recomienda un análisis cuidadoso y una optimización según los requisitos específicos de cada aplicación. Además, al comparar la estrategia de modulación SPWM propuesta con otras técnicas de modulación, como la modulación unipolar y bipolar [Yuditya, 2020], se observó que la SPWM con

variación en el número de pulsos ofrece un mayor grado de control y precisión en la generación de la onda sinusoidal, lo que se traduce en una reducción más efectiva de armónicos y en un mejor rendimiento del motor, en trabajo futuro se puede realizar la comparativa con técnica diferentes como la presentada en [Liu, 2018].

5. Conclusiones

Esta investigación evaluó la estrategia de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) con variación en el número de pulsos para un driver trifásico de seis conmutadores aplicado en un motor síncrono de imanes permanentes conectado en configuración delta. Los resultados obtenidos a través de simulaciones numéricas demostraron que el aumento del número de pulsos generados por el driver tiene un impacto significativo en el desempeño del motor, con una mejora notable en la calidad de la señal de salida y una reducción de pérdidas adicionales en el motor. Estos resultados respaldan la relevancia de la estrategia SPWM con variación en el número de pulsos como una solución eficiente y efectiva para mejorar el rendimiento y la eficiencia de sistemas de accionamiento eléctrico, especialmente en el campo de la electromovilidad y sistemas de propulsión eléctrica.

La modulación SPWM con mayor número de pulsos ofrece una mejora sustancial en la precisión de la entrega de potencia al motor, lo que resulta en una mayor eficiencia energética y una menor distorsión armónica. Estos resultados son fundamentales para el avance de la electromovilidad, donde la eficiencia y autonomía de los vehículos eléctricos son factores críticos para su adopción masiva. Además, la comparación con otras técnicas de modulación reafirmó la superioridad de la estrategia SPWM propuesta en términos de precisión y control de armónicos. La modulación SPWM con variación en el número de pulsos ofrece un mayor grado de control sobre la forma de onda y una reducción más efectiva de armónicos en comparación con las técnicas unipolar y bipolar.

En cuanto a futuras investigaciones, se realizarán estudios de investigación experimentales para validar los resultados de simulación y evaluar el desempeño de la estrategia de modulación SPWM en el control de motores síncronos en

vehículos eléctricos. Además, se realizará un análisis sobre la optimización del número de pulsos, considerando las limitaciones de recursos y las aplicaciones específicas. Por otro lado, como trabajo futuro, se contempla el uso de drivers más sofisticados como el empleado en [Beltran, 2021] el cual presenta un incremento en el número de conmutadores, o una configuración diferente en cascada como la presentada en [Gonzales, 2014].

Así, se puede concluir que la estrategia de modulación SPWM con variación en el número de pulsos representa una solución prometedora para mejorar el desempeño eficiente de sistemas de control electrónico en aplicaciones relevantes de la electromovilidad. Esta investigación contribuye al avance de tecnologías más eficientes y sostenibles en el campo del transporte eléctrico y sienta las bases para futuros desarrollos y mejoras en el control de motores trifásicos y la electromovilidad en general.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores designados en este trabajo, por su revisión exhaustiva, comentarios constructivos y recomendaciones para mejorar la calidad del artículo. De igual forma agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo proporcionado para el desarrollo de este trabajo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Beltran-Carbajal, F., Tapia-Olvera, R., Valderrabano-Gonzalez, A., & Lopez-Garcia, I. Adaptive neuronal induction motor control with an 84-pulse voltage source converter. *Asian Journal of Control*, 1603-1616, 2021.
- [2] Daoudi, S., & Lazrak, L. Comparison between PI-DTC-SPWM and fuzzy logic for a sensorless asynchronous motor drive. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6, 1-13, 2021.
- [3] Hren, A., & Mihalic, F. A Straightforward Analytical Way of Evaluating the Single-Phase Inverter SPWM Frequency Spectrum. *Journal of Energy Technology*, 11-27, 2017.

- [4] Gonzalez-Hernandez, J. G., Martinez-Bernal, J. E., Valderrabano-Gonzalez, A., Rosas-Caro, J. C., Beltran-Carbajal, F., Ramirez-Arredondo, J. M., & Gonzalez-Lopez, J. M. Bootstrap cascaded multilevel converter. *IEICE Electronics Express*, 2014.
- [5] Hu, X. Q., Chen, C., Hu, C. Q., & Ji, J. Driver Power Design of Piezoelectric Vibrator Based on Single Phase Bridge Monopole SPWM Technology. In *2022 16th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*. IEEE, 219-223. October, 2022.
- [6] Jin, X., Li, S., Sun, W., Chen, W., Gu, X., & Zhang, G. Optimized Synchronous SPWM Modulation Strategy for Traction Inverters Based on Non-Equally Spaced Carriers. *World Electric Vehicle Journal*, 157. 2023.
- [7] Kraiem, S., Hamouda, M., & Slama, J. B. H. EMI Reduction in Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter via Chaotic SPWM Control. In *2020 6th IEEE International Energy Conference*. IEEE, 210-215 September, 2020.
- [8] Li, C., Zhang, G. G., & Jiang, C. H. Design and implementation of SPWM output based on STMF407. *International Conference on Electrical Engineering and Control Science*. IEEE, 796-800, December, 2022.
- [9] Liu, Z., Fei, G., & Chen, Z. Simulation study of double closed-loop spwm inverter based on fuzzy neural network. *Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. IEEE, 241-245, October, 2018.
- [10] Liu, Z., Zheng, Z., Sudhoff, S. D., Gu, C., & Li, Y. Reduction of common-mode voltage in multiphase two-level inverters using SPWM with phase-shifted carriers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 6631-6645. 2015.
- [11] Nagarajan, R., & Saravanan, M. Staircase multicarrier SPWM technique for nine level cascaded inverter. *International Conference on Power, Energy and Control*. IEEE, 668-675, February, 2013.
- [12] Sanjay, P. S., Tanaji, P. R., & Patil, S. K. Symmetrical multilevel cascaded H-bridge inverter using multicarrier SPWM technique. *International Conference for Convergence in Technology*. IEEE, 1-4, April, 2018.

- [13] Shchur, I., & Turkovskyi, V. H–H Configuration of Modular EV Powertrain System Based on the Dual Three-Phase BLDC Motor and Battery-Supercapacitor Power Supply System, 2023.
- [14] Valderrabano-Gonzalez, A., Rosas-Caro, J. C., Beltran-Carbajal, F., Tapia-Olvera, R., Gabbar, H. A., & Sharaf, A. M. An easy guide for inverter design for residential smart building applications. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). IEEE. November, 2017.
- [15] Yuditya, B. H., Hasanah, R. N., Ardhenta, L., & Taufik, T. Performance Comparison of Single-Phase Multilevel Inverter with SPWM Unipolar and Bipolar Switching Techniques. In 2020 FORTEI-International Conference on Electrical Engineering, IEEE, 102-107, September, 2020.
- [16] Zhao, T., Shen, W. J., Ji, N. Y., & Liu, H. H. Study and implementation of SPWM microstepping controller for stepper motor. Conference on Industrial Electronics and Applications, IEEE. 2298-2302, May, 2018.