



Resultados de la implementación de módulo embebido de conversión de tensiones en motores trifásicos

Implementation results of embedded voltage conversion module in three-phase motors

Jortin Vargas Ortega ^a & Carlos Mario Moreno Paniagua ^b

^a Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín-Colombia, jortin.vargas@pascualbravo.edu.co

^b Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín-Colombia, c.moreno1975@pascualbravo.edu.co

Recibido: octubre 18, 2021. Aceptado: diciembre 10, 2021

Resumen

Se presentan los resultados del diseño y la implementación de un módulo electrónico embebido en los motores eléctricos de inducción, que permite la conexión de estos motores en instalaciones monofásicas con la finalidad de incrementar la eficiencia en el uso de fuerza motriz en zonas no industriales. En estos lugares es creciente la proliferación de pequeños negocios, que utilizan potencia eléctrica, alimentada desde acometidas monofásicas, que generalmente presentan una baja eficiencia en comparación con el uso de las trifásicas. La baja eficiencia en dichas instalaciones se debe a la utilización generalizada de motores eléctricos de inducción, monofásicos y trifásicos, alimentados con tensión de una fase.

Palabras clave: Eficiencia energética, acometida monofásica, motor de inducción, control de motores, inversor de voltaje.

Abstract

This work presents the design and implementation results of an electronic module embedded in electric induction motors. This module allows the connection of electric induction motors in single-phase installations to increase the efficiency of motive power devices used in non-industrial areas. Small businesses are growing in many sectors, using electrical power fed from single-phase connections, which have low efficiency compared to triphasic ones. Low efficiency in those installations is due to the single-phase and three-phase induction electric motors fed with one-phase voltage.

Keywords: Energy efficiency, single-phase supply, induction motor, motor control, voltage inverter.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el acceso a la energía eléctrica es uno de los aspectos más críticos a la hora de evaluar el grado de bienestar y desarrollo de las personas [1]. Para el caso particular de Colombia, la población con suministro regular de energía eléctrica a través del sistema interconectado primario se ubica alrededor de los grandes centros urbanos correspondientes al 48% del territorio; esto también significa que más de la mitad del país pertenece a las llamadas zonas no interconectadas (ZNI) [2]. Aunque el gobierno colombiano tiene un programa patrocinado para la distribución de combustible para la operación de plantas de Diesel en la ZNI, los problemas de transporte elevan los costos y disminuyen la efectividad de estas soluciones, y las preocupaciones ambientales también deben tenerse en cuenta [3]. En este contexto, se han propuesto múltiples alternativas para disminuir las consecuencias económicas y ambientales de las fuentes de energía a base de combustibles en el país [4].

Las iniciativas encaminadas al incremento de la eficiencia energética y, a través de ella, a la conservación del medio ambiente sin sacrificar los rendimientos económicos [5], encuentran cada día mayor acogida entre pequeños y grandes empresarios [6]. En esa línea de pensamiento se presenta una propuesta de aplicación de los logros de la electrónica de potencia en pequeños talleres ubicados en zonas no industriales [7], para lo cual se revisan los conceptos fundamentales de la operación de los motores de inducción en las redes monofásicas y la utilización de convertidores electrónicos para la alimentación de dichos motores [8].

A continuación, el escrito describe la implementación del hardware de un convertidor de tensión monofásica en polifásica y el modelado del software de control de dicha implementación, para así pasar a presentar los resultados de dicha tarea, los cuales muestran el incremento de la eficiencia energética al utilizar un módulo

Citar como:

J. Vargas & C. Moreno. "Resultados de la implementación de módulo embebido de conversión de tensiones en motores trifásicos" Revista CINTEX, Vol. 26(2), pp. 22-30. 2021. DOI: <https://doi.org/10.33131/24222208.377>

embebido en la caja de conexiones del motor y proponen un tema de discusión en torno a la utilización de diferentes tipos de convertidores.

Finalmente, se proponen futuros desarrollos en torno a la utilización de técnicas de control vectorial y la identificación de los parámetros de los motores eléctricos. En las conclusiones del trabajo es destacable el incremento de la eficiencia energética en los motores trifásicos y, en menor medida, en los motores monofásicos alimentados con tensión bifásica.

2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTOS RELACIONADOS

La utilización de motores eléctricos de inducción, en el sector productivo, constituye uno de los factores claves para la obtención de beneficios económicos, en virtud de su relativo bajo costo, confiabilidad y vida útil [9]. Dichas máquinas son utilizadas en zonas que disponen de una instalación trifásica y en otras que, por ordenamiento territorial, no la pueden tener [10]. En este último caso se hace una explotación ineficiente de la energía eléctrica para producir fuerza motriz, que es un factor fundamental en el desarrollo de las actividades económicas [11]–[13].

2.1 Operación de motores de inducción con diferentes tipos de tensión eléctrica

Los motores de inducción pueden ser energizados desde instalaciones monofásicas, como se observa en la figura 1, o trifásicas, desde el punto de vista de la eficiencia energética; las primeras representan la simplicidad de la conexión y los bajos costos del equipamiento requerido, pero con baja eficiencia en la producción de fuerza motriz, fundamentalmente porque los campos magnéticos giratorios producidos, en este caso, son de forma elíptica y no circular, lo que conduce al desaprovechamiento de la energía eléctrica que se transforma en mecánica y el surgimiento de pérdidas de energía, conllevando a la disminución del efecto económico.

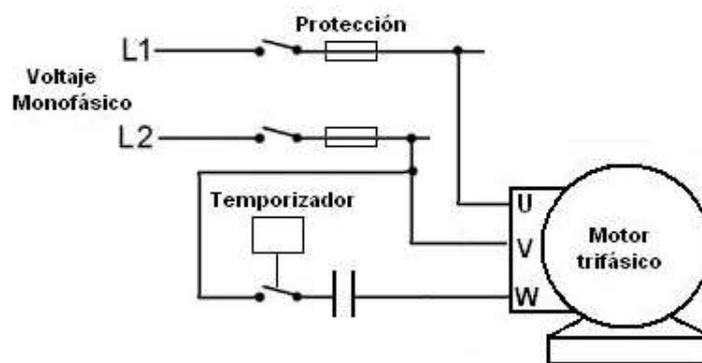


Fig. 1. Conexión de motores trifásicos a instalaciones eléctricas monofásicas.

En los motores de inducción, el campo magnético giratorio en forma circular es más eficiente, pues el motor mismo tiene esa forma, ya que ella permite una disposición equidistante de los elementos que intervienen en la interacción electromagnética que genera la tracción mecánica, excluyendo de esta evaluación a los motores lineales que se utilizan para fines muy especiales [14].

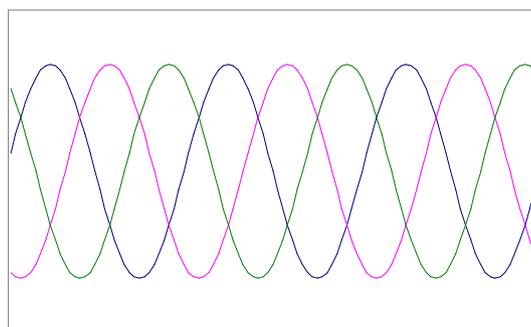


Fig. 2. Oscilograma de la tensión trifásica con distribución uniforme de los picos de tensión.

Para generar movimiento en un motor de inducción, es necesario que exista más de un fasor (vector eléctrico) de voltaje. Al revisar la sucesión de picos de voltaje en un sistema eléctrico compuesto por varias fases, como en el de la figura 2, se nota como se forma una repetición periódica de ondas que conforman un campo magnético giratorio con forma circular o semicircular, teniendo en cuenta que la repetición de ondas sinusoidales representa un sistema circular [15].

2.2 Alternativas para la alimentación eficiente de los motores de inducción en redes monofásicas

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, lo más deseable es utilizar motores trifásicos alimentados con voltajes trifásicos y monofásicos alimentados con voltajes bifásicos. En caso de no estar disponible la alimentación trifásica, los motores deben estar acompañados de dispositivos que generen voltajes polifásicos, a partir de voltajes monofásicos.

De los diferentes recursos que existen para tal fin se destaca el uso de circuitos electrónicos, como el presentado en la figura 3, por la versatilidad y eficiencia que estos ofrecen. Estos circuitos pueden ser variadores de velocidad o módulos integrados, de alguna forma, al motor. Para este caso son los aspectos de seguridad, usabilidad y costo los que determinan el camino a seguir [16]

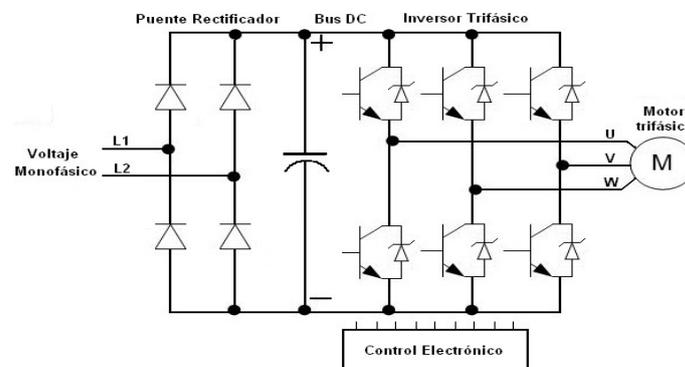


Fig. 3. Esquema electrónico de los convertidores de voltaje monofásico a polifásico.

Los convertidores electrónicos se caracterizan por tener alta eficiencia y por aprovechar el máximo rendimiento del motor. Adicionalmente permiten controlar la velocidad del motor, lo que en algunas circunstancias genera ahorros adicionales, mejoras en el proceso productivo y aumento de la vida útil del activo. Es importante considerar que para cambiar la velocidad del motor de inducción es necesario variar la frecuencia y con ella el voltaje, pues si se sube la frecuencia sin variar el voltaje, se calienta el acero del motor por efectos inductivos. Si se baja la frecuencia sin bajar el voltaje, se calienta el cobre por cambios en la reactancia inductiva [17].

3 METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para completar el trabajo investigativo se realiza una evaluación de la generación de la tercera fase eléctrica por medio de condensador y tecnologías derivadas de su utilización, con respecto a la operación del motor desde redes trifásicas. Esta actividad se realiza con la finalidad de establecer el punto de referencia para estimar el efecto en el incremento de la eficiencia energética de la solución. Posteriormente, se adelanta un desarrollo que consiste en agregar dispositivos electrónicos de relativo bajo costo, a motores eléctricos trifásicos y monofásicos para que operen desde la red monofásica sin perder eficiencia, ni generar armónicos a la red eléctrica.

El dispositivo diseñado debe proteger al motor contra dificultades tales como subidas de temperatura, sobrecorrientes, inversiones de giro súbitas y protección contra malas instalaciones, evitando que los técnicos cometan errores durante las actividades de instalación y mantenimiento. El sistema propuesto implica el montaje de tarjetas con componentes electrónicos en la caja de bornes del motor de inducción. Finalmente, se debe realizar la validación técnica del prototipo experimental implementado, con miras a establecer la viabilidad de su posterior desarrollo hacia prototipo industrial.

3.1 Implementación del hardware del módulo embebido en los motores de inducción

El sistema en cuestión consta de las siguientes partes: Conectores de potencia para el voltaje monofásico, puente rectificador para convertir el voltaje de alterno a continuo, capacitor filtro de alta capacitancia, alto voltaje y bajo ESR, puente trifásico de IGBT con interfaz para procesador, tarjeta de control con funciones de modulación trifásica y bifásica, conexión de la tarjeta al motor trifásico, sensor de temperatura y módulo de comunicación Bluetooth. El prototipo se diseña a partir de pruebas realizadas con un módulo de demostración "DemoBoard" de marca ST Electronics con referencia STEVAL-IHM023V3 presentado en la figura 4, el cual permite implementar de forma rápida soluciones de inversión de voltaje y evaluar diferentes algoritmos de modulación y control, para agilizar el diseño del prototipo experimental.



Fig. 4. Módulo de prototipado y desarrollo de inversores de voltaje polifásico.

El diseño se realiza a partir del diagrama de bloques presentado en la figura 5 y la revisión de las formas de onda deseadas en cada etapa. Para el diseño se ha seleccionado un bloque de 6 transistores IGBT de 600V a 20 A con controlador interno y detección de corrientes y fallas [18]. El bloque se ha conectado al mismo microcontrolador MK10DX128 con el sistema operativo colaborativo y una aplicación de firmware, utilizando el módulo de 6 salidas de frecuencia con modulación de ancho de pulso a 7200 Hertz con generación de tiempo muerto entre las conmutaciones de transistores de la misma rama, para evitar pérdidas en la etapa electrónica del prototipo.

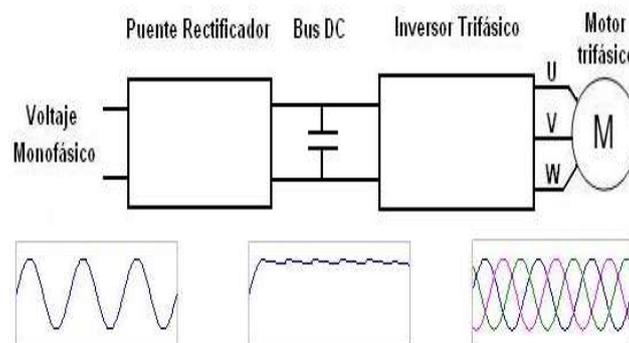


Fig. 5. Diagrama de bloques del hardware del módulo embebido.

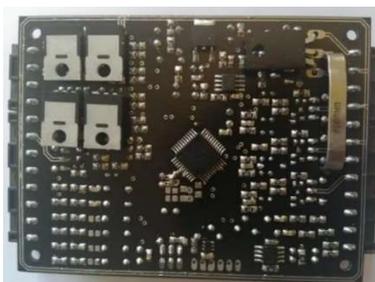


Fig. 6. Módulo embebido en versión TRL4 para bajos voltajes

El prototipo experimental, presentado en la figura 6, se implementa en la caja de bornes de un motor, con la finalidad de revisar aspectos de usabilidad e influencia de las vibraciones del motor sobre el ensamble electrónico. En el diseño del circuito impreso se observaron recomendaciones de la norma IPC-A-610 con respecto a la operación en condiciones mecánicas extremas, como las que se dan en el equipamiento automotriz y en la maquinaria amarilla [19].

3.2 Implementación del programa de control del módulo embebido

El módulo embebido ha sido dotado de un sistema operativo colaborativo, el cual permite implementar aplicaciones de control de tiempo real a partir de modelos estáticos, que cumplen con la norma IEC 61131-3 para la programación de autómatas programables. De dicha norma se utilizan los diagramas de bloques funcionales (FBD), los diagramas secuenciales (SFC) y el texto estructurado (ST). La figura 7 muestra el diagrama de bloques funcionales del programa de control del módulo embebido, el cual es programado desde el entorno IDE - Mgdmod, basado en el modelado de aplicaciones de control, su conversión en lenguajes informáticos y no-informáticos, así como la programación en línea del módulo.

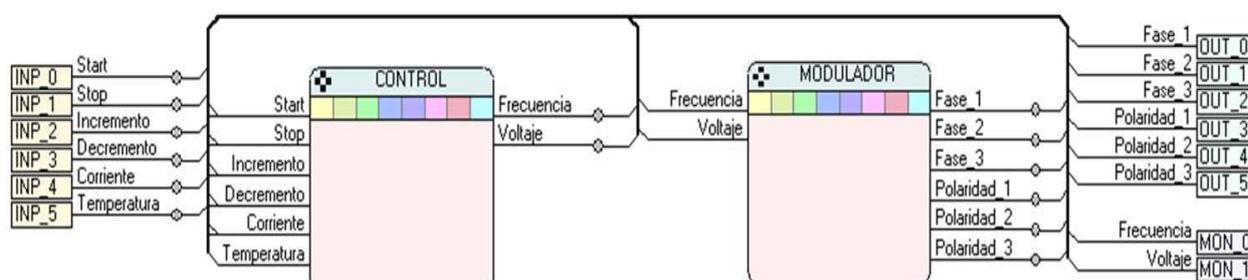


Fig. 7. Diagrama de bloques funcionales del modelo de control

Se han creado secuencias monofásicas y bifásicas para la energización de los motores, siguiendo el modelo (SFC) de la norma IEC 61131-3. La figura 8 muestra la máquina de estados que modela la secuencia de generación de la tensión alterna a partir de directa, en una de las fases de salida del módulo embebido. La variable "Counter_i" lleva el sincronismo de la generación de pulsos en los transistores del inversor con una portadora de 7200 Hz, que es la frecuencia de operación del bloque funcional "Modulador". Cuando "Counter_i" llega a 180, se reinicia y cambia la polaridad de la fase en la salida de potencia. Para generar tensión trifásica, los contadores "Counter_i" se desfasan en 120 unidades y para generar tensión bifásica se desfasan en 90 y 270 unidades, respectivamente.

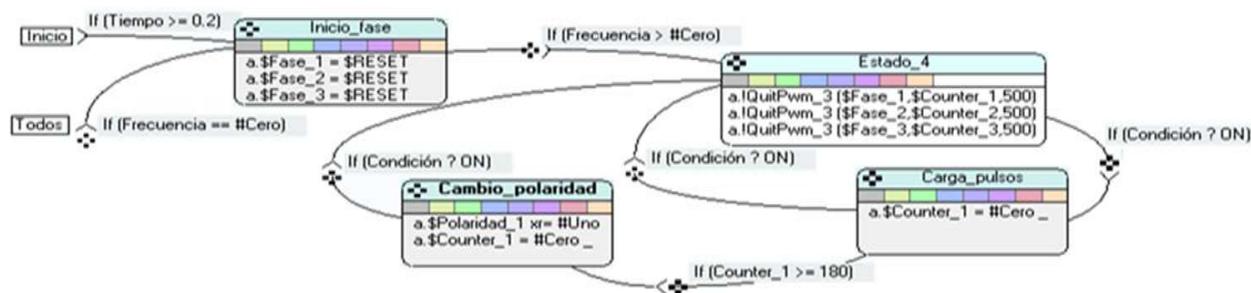


Fig. 8. Secuencia de control para la generación de una fase de la tensión

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha construido el prototipo de un módulo embebido en un motor trifásico, para la prueba y cuantificación del nivel de ahorro de energía eléctrica en diferentes regímenes de trabajo, con respecto a otras técnicas de alimentación [17] [20] [21]. El módulo también varía la velocidad y protege el motor contra subidas de temperatura, sobrecorrientes e inversiones de giro súbitas. Por tratarse de un dispositivo montado directamente sobre el motor, este queda protegido contra conexiones indebidas.

Se han realizado pruebas con un prototipo experimental basado en la tarjeta de demostración a una tensión de 110 voltios de corriente alterna, energizando un motor de 300 W y con el prototipo experimental del módulo embebido construido, a una tensión de 24 voltios, energizando un motor especialmente embobinado para las pruebas. En ambos casos se obtuvieron niveles similares en la mejora de la eficiencia energética.

4.1 Mejora de la eficiencia en los motores con módulo embebido

Las figuras 9 y 10 presentan las curvas de corriente (verde), de voltaje (azul) y torque (rojo), con respecto a la velocidad del motor, para la alimentación del motor trifásico de 300 W, desde la red monofásica y trifásica respectivamente.

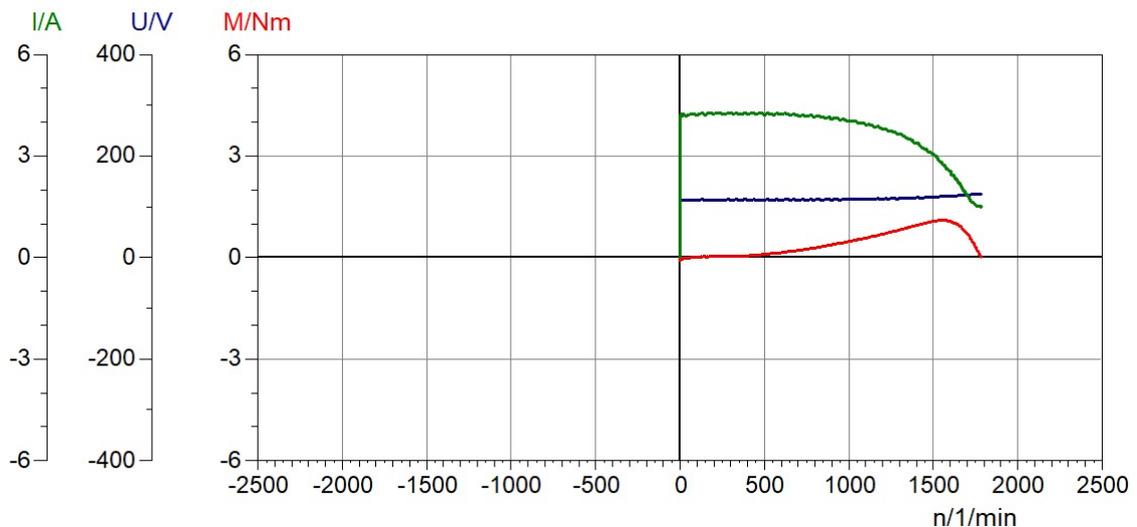


Fig. 9. Resultado de las pruebas del motor alimentado desde red monofásica. La curva verde es la corriente del motor con respecto a la velocidad angular ($I=[A]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$); la curva azul es la tensión aplicada con respecto a la velocidad angular ($U=[V]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$); la curva roja es el torque del motor con respecto a la velocidad angular ($T=[\text{Nm}]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$).

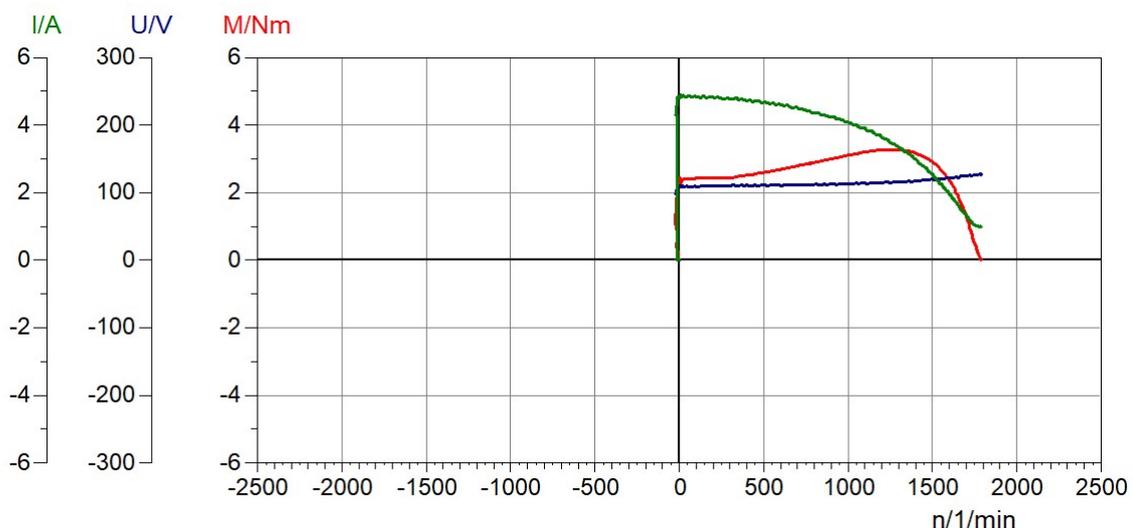


Fig. 10. Resultado de las pruebas del motor alimentado a través del módulo embebido. La curva verde es la corriente del motor con respecto a la velocidad angular ($I=[A]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$); la curva azul es la tensión aplicada con respecto a la velocidad angular ($U=[V]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$); la curva roja es el torque del motor con respecto a la velocidad angular ($T=[\text{Nm}]$ vs $\omega=[\text{rad} / \text{s}]$).

Cuando el motor se alimenta desde la red monofásica, se observa en la figura 9, que la corriente sube a 4 A y el torque no llega a 1 Nm, lo que representa pérdidas, evidenciadas en que el producto del voltaje por la corriente es considerablemente mayor que el de la velocidad por el torque (al considerar el factor de potencia sigue siendo considerable la diferencia).

Cuando el motor se alimenta desde la red monofásica a través del módulo embebido, se observa en la figura 10, que la corriente sube a 4 A cuando el torque llega a 3 Nm, lo que representa menores pérdidas con respecto al caso anterior. El producto del voltaje por la corriente es más cercano al de la velocidad por el torque.

4.2 Ventajas del módulo embebido frente a otros métodos eficientes.

Para resolver la problemática, se aplican diferentes técnicas, que van desde las poco técnicas, hasta las que tienen un alto componente tecnológico. El factor diferenciador con respecto a las primeras, como el uso de capacitores y roto-generadores, está en el incremento de la eficiencia [22].

El diferenciador con las soluciones de alto componente tecnológico, como son los variadores de velocidad, está en la disminución del costo y en el factor de usabilidad que evita daños en estos últimos, debido a la mala manipulación por parte de operarios con competencias deficientes, que por lo general son los trabajadores de los pequeños talleres. Lo que se reporta en estos casos involucra la realización de cortocircuitos a la salida del variador por manipulación del cableado entre el variador y el motor.

La figura 11 muestra el tamaño del prototipo experimental del módulo embebido con respecto a un motor de 1/8 Hp, lo cual muestra que el módulo puede ser empotrado en una caja de bornes ampliada del motor. El prototipo experimental del módulo embebido posee el doble de componentes con el fin de instalar transistores en paralelo para hacer pruebas futuras. Para el diseño del prototipo industrial se puede obtener una reducción de tamaño a la mitad, lo que permite empotrarlo con mayor facilidad, en las cajas de bornes ampliadas, directamente sobre los motores de inducción.



Fig. 11. Módulo embebido comparado con motor de 1/8 Hp de potencia

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La utilización de módulos electrónicos embebidos en los motores eléctricos es una alternativa de intervención tecnológica viable en el uso racional de la energía y, a través de ello, en el cumplimiento de los objetivos de mejoramiento productivo en comunidades vulnerables. Los motores de inducción trifásicos se utilizan ampliamente como sistemas de accionamiento eléctrico industrial. Aunque son muy robustos, flexibles y fáciles de mantener, estos motores a menudo sufren la pérdida repentina de una de sus fases, es decir, el llamado funcionamiento monofásico. Este régimen generalmente conduce al sobrecalentamiento de los devanados y, si se prolonga, al desgaste del motor y otros problemas mecánicos. Los motores eléctricos de inducción alimentados desde circuitos monofásicos tienen eficiencias más bajas que aquellos que, en las mismas condiciones, son gobernados a través de módulos electrónicos de modulación de la frecuencia, sean variadores de velocidad o módulos embebidos en el motor.

En este trabajo se describió la implementación del hardware de un convertidor de tensión monofásica en polifásica y el modelado del software de control de dicha implementación. El prototipo experimental diseñado muestra la viabilidad de desarrollo de prototipos industriales y muestras de producción para ofrecer alternativas de uso racional de la energía para la comunidad de emprendedores que demandan oportunidades de

desarrollo. Se debe utilizar un banco de pruebas de motores eléctricos con unidad pendular, para establecer medidas más directas de la eficiencia de los motores de inducción, frente a diferentes tipos de conexión y diferentes cargas.

Las fases siguientes en el desarrollo del proyecto involucran el diseño del prototipo industrial del y la utilización de técnicas de control vectorial y la identificación de los parámetros de los motores eléctricos, por parte del módulo embebido. Un aspecto que se debe mejorar en el diseño está en el tamaño de los capacitores para el filtrado de la corriente rectificadora. Se proyecta que el uso de este sistema en barrajes de corriente directa alimentados con paneles solares fotovoltaicos encontrará los mayores niveles de eficiencia.

REFERENCIAS

- [1] J. Patiño, J. D. López, y J. Espinosa, «Sensitivity Analysis of Frequency Regulation Parameters in Power Systems with Wind Generation», en *Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Energy Systems*, R.-E. Precup, T. Kamal, y S. Zulqadar Hassan, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2019, pp. 67-87. doi: 10.1007/978-981-13-5995-8_3.
- [2] S. Ruiz, J. Patiño, A. Marquez-Ruiz, J. Espinosa, E. Duque, y P. Ortiz, «Optimal Design of a Diesel-PV-Wind-Battery-Hydro Pumped POWER system with the Integration of ELECTRIC vehicles in a Colombian Community», *Energies*, vol. 12, n.o 23, p. 4542, nov. 2019, doi: 10.3390/en12234542.
- [3] S. Ruiz, J. Patino, A. Marquez, y J. Espinosa, «Optimal design for an electrical hybrid microgrid in Colombia under fuel price variation», *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 7, n.o 24, pp. 1535-1545, 2017.
- [4] E. Duque, J. Patiño, y L. Vélez, «Implementation of the ACM0002 methodology in small hydropower plants in Colombia under the Clean Development Mechanism», *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 6, n.o 1, pp. 21-33, 2016.
- [5] D. Rúa-Usme, A. Ospina, C. Ramírez, P. Ortiz, y J. A. Patiño-Murillo, «Escenario para el desarrollo de línea de productos financieros verdes en la economía colombiana», *Rev. CINTEX*, vol. 24, n.o 2, pp. 64-90, dic. 2019, doi: 10.33131/24222208.352.
- [6] D. A. Bonilla-Vargas y E. A. Duque Grisales, «Estudio sobre opciones de financiación para las pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Medellín», *Rev. CINTEX*, vol. 25, n.o 1, pp. 54-67, dic. 2020, doi: 10.33131/24222208.359.
- [7] O. D. Montoya Giraldo, A. Grajales, L. F. Grisales, y C. A. Castro, «Ubicación y operación eficiente de almacenadores de energía en micro-redes en presencia de generación distribuida», *Rev. CINTEX*, vol. 22, n.o 1, pp. 97-117, oct. 2017, doi: 10.33131/24222208.290.
- [8] L. Gutiérrez, J. Patiño, y E. Duque-Grisales, «A Comparison of the Performance of Supervised Learning Algorithms for Solar Power Prediction», *Energies*, vol. 14, n.o 15, p. 4424, jul. 2021, doi: 10.3390/en14154424.
- [9] A. E. Florian-Villa y J. A. Patiño-Murillo, «Control design using state observation and model reference adaptive systems for a dc motor», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1418, p. 012017, dic. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1418/1/012017.
- [10] S. Ruiz Álvarez y J. J. Espinosa, «Control de potencia y velocidad de rotación de un aerogenerador usando controladores predictivos», *Rev. CINTEX*, vol. 23, n.o 1, pp. 60-76, oct. 2018, doi: 10.33131/24222208.311.
- [11] CONPES, «Documento CONPES 3850: Fondo Colombia en Paz». Departamento Nacional de Planeación, 2015. Consultado: 17 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3850.pdf>
- [12] CONPES, «Documento CONPES 3867: Estrategia de preparación institucional para la paz y el postconflicto». Departamento Nacional de Planeación, 2016. Consultado: 18 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3867.pdf>
- [13] ENERSINC, «Energy demand situation in Colombia», Departamento Nacional de Planeación, 2017. Consultado: 15 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV%20-%20Energy%20Demand%20Situation%20VF.pdf>
- [14] B. Tekgun, Y. Sozer, y I. Tsukerman, «Modeling and parameter estimation of split-single phase induction motors», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 1-1, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2504417.
- [15] S. Chattopadhyay, A. Chattopadhyaya, y S. Sengupta, «Analysis of stator current of induction motor used in transport system at single phasing by measuring phase angle, symmetrical components, Skewness, Kurtosis and harmonic distortion in Park plane», *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 4, n.o 1, pp. 1-8, mar. 2014, doi: 10.1049/iet-est.2012.0048.
- [16] A. K. Adapa y V. John, «Active-Phase Converter for Operation of Three-Phase Induction Motors on Single-Phase Grid», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, n.o 6, pp. 5668-5675, nov. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2737398.

- [17] A. Hareesh, B. Manisankar, y B. Jayanand, «A novel three phase infinite level inverter (TILI) topology for induction motor drive application», en 2017 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Singapore, oct. 2017, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACEPT.2017.8168619.
- [18] T. E. Dias Vieira, F. L. Tofoli, y A. S. de Moraes, «Evaluation of IGBT modules in ASDs submitted to overvoltage», en 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Florianopolis, abr. 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/PEDG.2017.7972497.
- [19] CIPC, «IPC-A-610E SP - Aceptabilidad de Ensamblajes Electrónicos». Blackfox Training Institute. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipc.org/TOC/IPC-A-610E-Spanish.pdf>
- [20] D. Sobczynski y J. Bartman, «High-speed three phase motor supplied from a single to three phase converter», en 2018 XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Lviv, abr. 2018, pp. 100-103. doi: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365711.
- [22] C. Hernandez, D. Velez, y J. A. Isaza, «Diseño de una plataforma de prueba de sensores virtuales para el sistema glucosa-insulina de pacientes UCI usando la técnica HIL», Rev. CINTEX, vol. 23, n.o 2, pp. 61-75, dic. 2018, doi: 10.33131/24222208.318.
- [22] K. A. Chinmaya y G. K. Singh, «Experimental analysis of various space vector pulse width modulation (SVPWM) techniques for dual three-phase induction motor drive», Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 29, n.o 1, p. e2678, ene. 2019, doi: 10.1002/etep.2678.