

Tecnología Frugal para el Control de Velocidad de un Motor de Inducción Trifásico

Frugal Technology for Velocity Control of a Three-phase Induction Motor

Rodrigo Córdova-Aviña^{1a}, Gadiel A. León-Chávez^{1b}, Nayeli Rangel-Ramírez^{1c}, Felipe J. Torres del Carmen^{1d}

¹ División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Mecánica, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

r.cordovaavina@ugto.mx^a

ga.leonchavez@ugto.mx^b

n.rangelramirez@ugto.mx^c

fdj.torres@ugto.mx^d

Resumen

Los motores de inducción trifásico son dispositivos electromecánicos que ofrecen un alto par de salida y bajo mantenimiento, sin embargo, el control de la velocidad de rotación de estos motores es un tópico de investigación y desarrollo tecnológico en constante actualización. Por otro lado, la tendencia global hacia el uso de tecnología frugal ha permitido realizar aplicaciones de ingeniería de control en equipos industriales como un escalamiento de las múltiples implementaciones realizadas en dispositivos de carácter educativo. Así, en este artículo se presenta el desarrollo de la aplicación de tecnología frugal para el control de velocidad de un motor de inducción trifásico a través de una placa que convierte la variación de la modulación de ancho de pulso de una señal de bajo voltaje a un rango de voltaje análogo entre 0 y 10 V CD, con un comportamiento lineal; esto a partir de la programación en lenguaje Python de un microcontrolador Raspberry Pi Pico W para generar la señal modulada. Además, se ha incluido un encoder incremental de 50 pulsos por revolución, situado en el rotor del motor de inducción trifásico a fin de obtener mediciones de la velocidad de rotación y cerrar el lazo de control. Las pruebas experimentales muestran evidencia del correcto funcionamiento de la tecnología frugal aplicada para el control de un equipo industrial como el motor de inducción trifásico.

Palabras clave: tecnología frugal; motor de inducción; Python, raspberry pi pico w.

Introducción

Los motores de inducción trifásicos con rotor tipo jaula de ardilla (MI) son ampliamente usados en procesos de automatización para actuar a las bandas transportadoras (Xiao *et al.*, 2021), en herramientas de trabajo y del hogar, debido a su simplicidad en su construcción, alto par de salida, requieren poco mantenimiento, además de que son rentables y adecuados en términos de costo, velocidad de rotación, eficiencia y fiabilidad. Más aún, las grandes ventajas de la alta eficiencia de los motores de inducción les permite ser una opción viable para los vehículos eléctricos, como se menciona en Kurt Merve, (2023).

Es importante resaltar que, para hacer funcionar un motor de inducción trifásico, no basta con energizarlo directamente con voltaje de corriente alterna como si se tratara de un motor de corriente directa. Por lo que la puesta en marcha del motor de inducción trifásico se realiza a través de un dispositivo conocido comúnmente como *Driver*, el cual es un variador de frecuencia usado para el control de motores eléctricos con la finalidad de hacer más sencillo el uso de los motores, ya que cuenta con una buena variedad de funciones, además de prestaciones muy solicitadas y utilizadas en el área de automatización y/o control.

Por otro lado, la tecnología frugal es entendida como la tecnología de bajo costo, en donde se busca “hacer más con menos”. En este sentido, para propósitos de control y automatización se han encontrado distintas tarjetas de desarrollo de bajo costo, como el microcontrolador Raspberry Pi Pico W que puede ser programada con lenguaje Python para interactuar con otros componentes a través de sus pines de entrada/salida. Además, la tecnología frugal constantemente se encuentra evolucionando, lo cual se visualiza en la creación de nuevas tarjetas electrónicas que realizan alguna función específica o, algún componente electrónico que permite sensar una variable de interés y que son dispositivos de bajo costo y al alcance de la mayoría.

El desafío actual de investigación relacionado con la tecnología frugal se focaliza en realizar aplicaciones de control en equipos industriales. Es decir, existe aún una brecha entre los equipos industriales como un motor de inducción trifásico y la aplicación de tecnología de bajo costo para su control y automatización. En este sentido la búsqueda en la literatura se ha centrado en mostrar evidencia de trabajos relacionados con el control de motor de inducción a partir de componentes distintos al uso directo de un variador de frecuencia comúnmente usado en la industria.

Por ejemplo, en Palpankar *et al.*, (2015) se presenta el control de velocidad de un motor de inducción monofásico a través de una Raspberry Pi, en este trabajo se menciona que la programación del control se realiza mediante Simulink®, una extensión del software Matlab. En Hosek & Diblik, (2011) se desarrolla el control de un motor de inducción con el software LabVIEW mediante el protocolo USS de Siemens®, en el cual especifica cada uno de los componentes del protocolo, su función y lo que representa para el control del motor. Además, menciona la creación de una librería de comandos en LabVIEW para llevar a cabo el control del motor.

En los trabajos revisados se destaca que han utilizado software bajo licencia como Simulink y LabView, por lo que no se relacionan con el uso de tecnología frugal. Por tanto, en este proyecto se considera hacer uso de programación en lenguaje Python que es de código abierto, el cual se ejecuta directamente en la placa Raspberry Pi Pico W.

Por tanto, el objetivo de este trabajo consiste en usar la tarjeta de bajo costo Raspberry Pi Pico W para controlar al motor de inducción trifásico a través de la manipulación del *Driver*, el cual es posible realizarlo configurando al variador de frecuencia en modo de operación de control de velocidad por variación de voltaje análogo entre 0 y 10 V CD que será generado mediante la señal PWM producido por programación de la Raspberry Pi Pico W.

Descripción de componentes

Motor de inducción trifásico

El motor de inducción trifásico usado en este trabajo, se encuentra ubicado en el laboratorio de manufactura de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, el cual se muestra en la Figura 1. Este motor es de la marca Oriental-Motor, modelo BHI62S-15 y tiene las características técnicas dadas en la Tabla 1.



Figura 1. Motor de inducción trifásico BHI62S-15 usado en este trabajo.

Tabla 1. Características técnicas del motor de inducción trifásico BHI62S-15.

Parámetro	Valor
Tamaño de marco	104 mm
Potencia de salida	200 W (1/4 Hp)
Voltaje	3 fases 220/230 V CA
Frecuencia	60 Hz
Corriente	0.95 A
Velocidad nominal	1550 rpm

Variador de frecuencia

En la Figura 2 se muestra el variador de frecuencia o *Driver* usado, el cual es de la marca Siemens, modelo Micromaster 440 (MM440). Se trata de un inversor de frecuencia para motores de hasta 250 W (0.33 Hp), 230 V CA, en modo de control vectorial y Vx ω hasta 1.7 A. Este dispositivo contiene un modo de control de velocidad a través de la variación de voltaje análogo de 0 a 10 V CD, comúnmente realizado a través de un potenciómetro como en Bracamontes *et al.*, (2019) y Ccallo & Chamorro (2021).



Figura 2. Variador de frecuencia Micromaster 440 para operar al motor de inducción trifásico.

Panel de operador avanzado

En una puesta en marcha común de un motor de inducción trifásico, además de hacer las conexiones físicas entre el variador de frecuencia y el motor de inducción, se debe de "programar" al variador de frecuencia. Es decir, es necesario introducir una serie de códigos necesarios para que el MM440 tenga configurado las características técnicas del motor de inducción que estará haciendo funcionar. Además, es necesario establecer la modalidad de operación del motor de inducción, en este caso, se trata de controlar la velocidad del motor a través de la manipulación de una señal de voltaje análogo. Para realizar estas acciones de "programar" al MM440, se requiere de un panel de operador avanzado (AOP, por sus siglas en inglés) como el mostrado en la Figura 3, el cual es una interfaz con pantalla multilínea que permite acceder a los parámetros de accionamiento del MM440 en varios idiomas a través de un montaje directo en el inversor.



Figura 3. Panel de operador avanzado (AOP) para configurar al MM440.

Raspberry Pi Pico W

Como se menciona en Mäenpää, (2025), la Raspberry Pi Pico W es un microcontrolador en placa de la familia Raspberry Pi 1 que consiste en una serie de placas donde se usa el microcontrolador RP2040. El RP2040 es un microcontrolador de alto desempeño con un procesador ARM Cortex-M0+ de doble núcleo a 133 MHz, 264 kB de memoria SRAM y 2 MB de memoria flash. La placa Raspberry Pi Pico W de la Figura 4 tiene un total de 26 pines digitales de entrada/salida de propósito general (GPIO, por sus siglas en inglés). Además de 4 pines análogos de entrada/salida, un convertidor analógico/digital con 3 canales y 12 bits de resolución, así como 16 canales de controlables de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés).

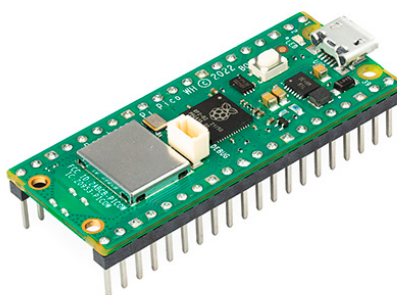


Figura 4. Placa Raspberry Pi Pico W que contiene el microcontrolador RP2040.

Módulo convertidor de PWM a voltaje

El módulo electrónico GP8101S de la Figura 5 convierte la señal PWM generada por la Raspberry Pi Pico W a una señal analógica de voltaje entre 0 y 10 V CD, en una relación directamente proporcional con el ciclo de trabajo de la señal PWM, manejando un rango de frecuencia entre 50 Hz y 50 KHz.

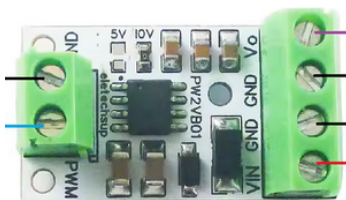


Figura 5. Módulo convertidor de señal PWM de la Raspberry Pi Pico W a voltaje entre 0 y 10 V CD.

Encoder incremental

El encoder incremental es un dispositivo rotatorio que genera una serie de pulsos a partir de la rotación causada en su eje. Los pulsos generados pueden tener un voltaje de 5 a 24 V CD de acuerdo con la fuente de alimentación a la que esté conectado. Este encoder mostrado en la Figura 6 tiene una resolución de 100 pulsos por revolución, el cual es dado en 2 fases para determinar el sentido de giro.



Figura 6. Encoder incremental de 100 pulsos por revolución.

Desarrollo

Configuración del MM440

Como primera etapa se configuró el MM440 de acuerdo con la hoja de datos del fabricante que permite seguir una serie de pasos a través de códigos y selección de opciones introducidas al MM440 por medio del AOP para establecer los datos técnicos del motor de inducción como se muestra en la Figura 7.

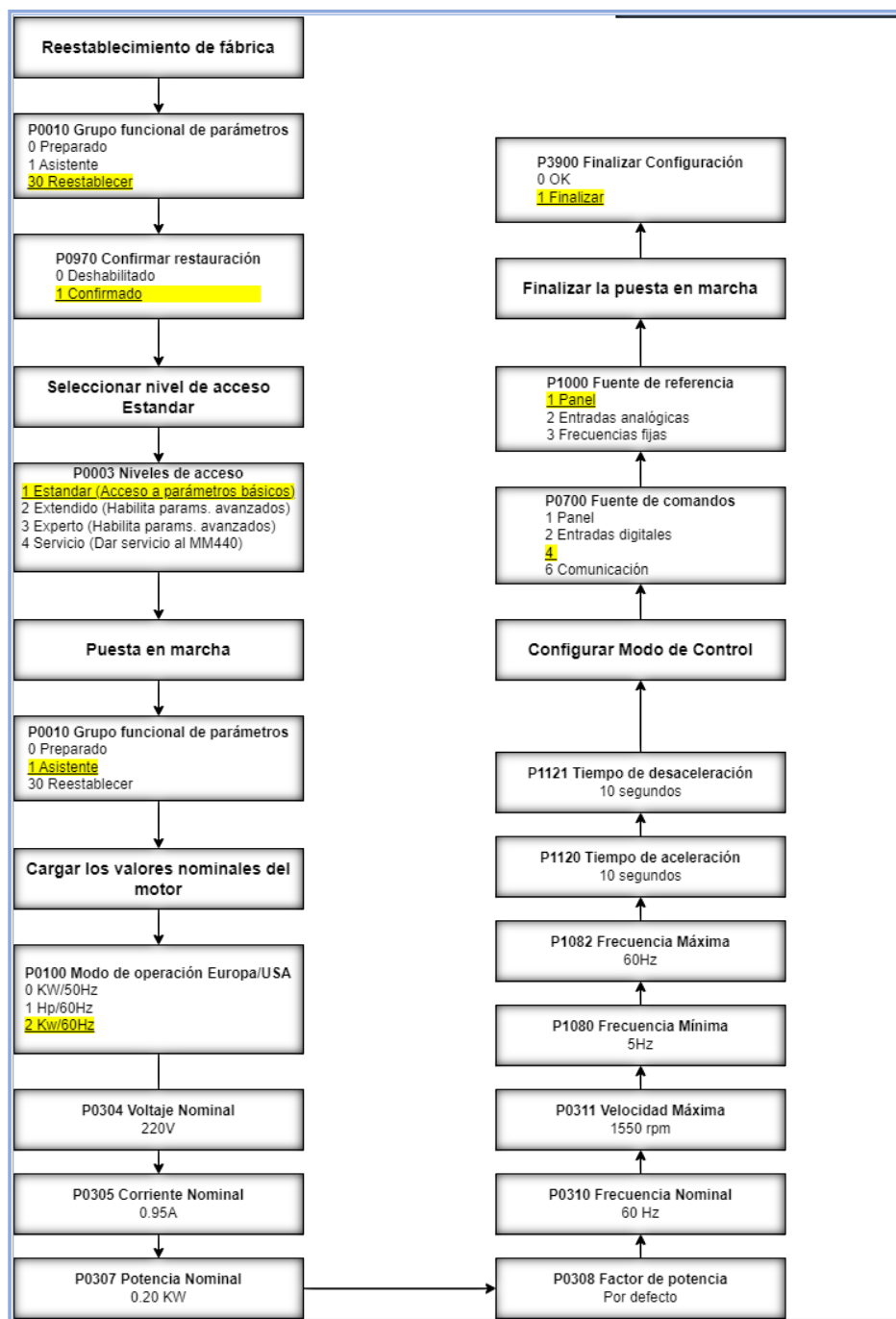


Figura 7. Códigos introducidos al MM440 para su configuración de acuerdo con las características del motor de inducción.

Caracterización del módulo convertidor de PWM a voltaje

La Raspberry Pi Pico W se programó con lenguaje Python para generar una señal PWM con la posibilidad de manipular el porcentaje del ciclo de trabajo (duty cycle) y medir con un multímetro la salida del módulo convertidor con la finalidad de identificar el comportamiento de la generación de voltaje entre 0 y 10 V de CD. Es importante notar que el módulo convertidor de PWM a voltaje requiere de una alimentación de voltaje superior a 10 V CD, por lo que se utilizó una fuente de voltaje externo de 24 V CD. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos y en la Figura 8 se presenta la gráfica generada.

Tabla 2. Datos de caracterización del módulo convertidor de PWM a voltaje.

Porcentaje del ciclo de trabajo	Voltaje de salida (V)	Porcentaje del ciclo de trabajo	Voltaje de salida (V)
0	0.00	55	5.51
5	0.36	60	6.01
10	0.89	65	6.53
15	1.41	70	7.04
20	1.92	75	7.55
25	2.43	80	8.06
30	2.95	85	8.58
35	3.46	90	9.11
40	3.97	95	9.62
45	4.48	100	9.85
50	5.00		

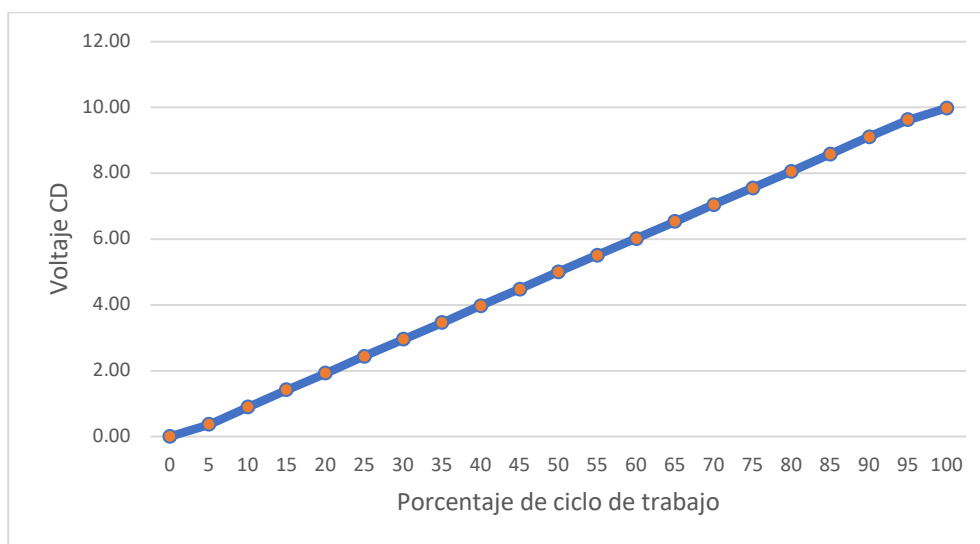


Figura 8. Gráfica de resultados del módulo convertidor de PWM a voltaje.

Resultados

Se llevó a cabo la conexión entre los componentes bajo las siguientes consideraciones:

- En la Figura 9 se observa que la placa Raspberry Pi Pico W es conectada a una computadora donde se programó en lenguaje Python el código necesario para generar la señal PWM y la medición de los pulsos emitidos por el encoder incremental.
 - La placa Raspberry Pi Pico W es conectada al módulo convertidor de PWM a voltaje.
 - El módulo convertidor de PWM a voltaje es alimentado por una fuente de 10 V CD que es obtenida del propio MM440.

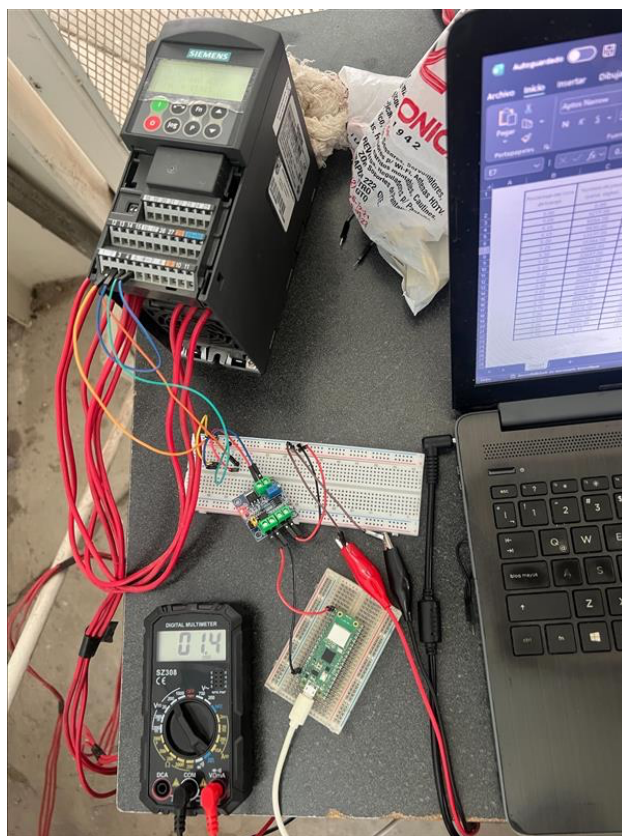


Figura 9. Conexión de la Raspberry Pi Pico W con el módulo convertidor de PWM a voltaje y MM440.

- En la Figura 10 se aprecia el detalle que el MM440 es conectado en sus entradas al voltaje trifásico de 220 V CA.
 - El MM440 es conectado en sus salidas al motor de inducción trifásico BHI62S-15.
 - El encoder incremental se acopla al eje de rotación del motor de inducción trifásico.
- En la Figura 11 se observa que los conductores del encoder incremental que contiene los pulsos generados por la rotación del encoder, se conectan a la placa Raspberry Pi Pico W para que por medio de código en Python se obtenga la medición de la velocidad de rotación.



Figura 10. Conexión del MM440 con el motor de inducción trifásico BHI62S-15.

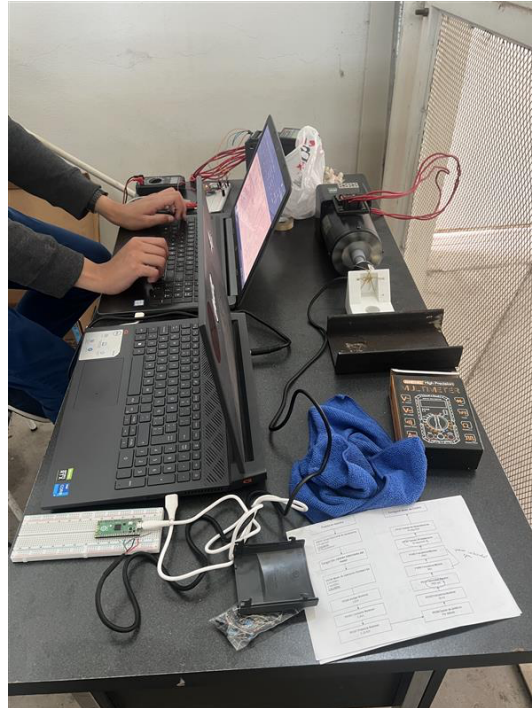


Figura 11. Conexión del encoder con la Raspberry Pi Pico W y computadora para medición de la velocidad de rotación.

Como se mencionó anteriormente, el módulo convertidor de PWM a voltaje es alimentado por 10 V CD obtenida del propio MM440 y los resultados corresponden a los mostrados en la Tabla 3. Mientras que los resultados de las pruebas realizadas con la manipulación del ciclo de trabajo y la medición de la velocidad del motor de inducción trifásico a través del encoder incremental, se presentan en la gráfica de la Figura 12.

Tabla 3. Salida de voltaje del convertidor de PWM a voltaje usando una fuente de 10 V CD del propio MM440.

Porcentaje del ciclo de trabajo	Voltaje de salida (V)	Porcentaje del ciclo de trabajo	Voltaje de salida (V)
0	0.00	55	4.50
5	0.60	60	4.80
10	1.00	65	5.20
15	1.40	70	5.60
20	1.8	75	5.90
25	2.20	80	6.30
30	2.60	85	6.60
35	3.00	90	7.00
40	3.3	95	7.10
45	3.70	100	7.10
50	4.10		

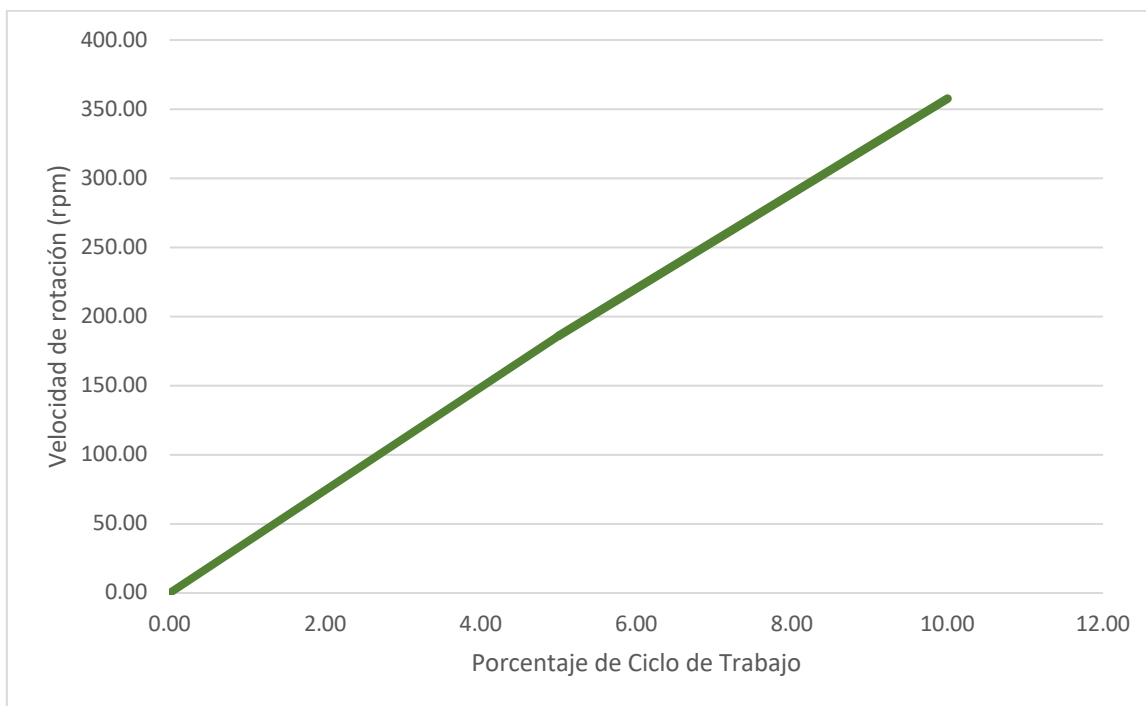


Figura 12. Resultados de variación de velocidad del motor de inducción a partir de manipular el PWM.

Conclusiones

La placa de bajo costo Raspberry Pi Pico W que contiene un microcontrolador RP2040 ha sido usada para el control de un motor de inducción trifásico de tipo industrial, en donde se ha programado en lenguaje Python el funcionamiento de un módulo convertidor de señal PWM a voltaje analógico, así como la medición de los pulsos generados por un encoder incremental para sensar la velocidad de rotación del motor. El conjunto de elementos empleados es considerado como parte de la tecnología frugal de bajo costo donde se pondera el hacer más con menos y que sea asequible para muchos.

La linealidad del comportamiento del módulo convertidor de PWM usando fuente de voltaje de 24 V CD hace viable el correcto funcionamiento de las acciones de control de velocidad de un motor de inducción trifásico a través de la programación de la Raspberry Pi Pico W, sin embargo, cuando se usa como fuente de voltaje los 10 V CD generados por el propio MM440, el rango de voltaje de salida del convertidor se reduce a un valor máximo de 7.1 V, lo cual haría que no alcanzaría a controlar el rango total de velocidad nominal de rotación del motor de inducción que es de 1550 rpm. Por su parte, el encoder incremental presentó buenos resultados a velocidades de rotación bajas, hasta los 300 rpm, a velocidades mayores la medición no fue la deseada. Por tanto, en trabajos futuros se considera atender estas restricciones que han presentado los resultados experimentales para cerrar el lazo de control de velocidad del motor de inducción trifásico.

Referencias

- Bracamontes, R. C., Salvatierra, J. R. V., & del Toro, H. B. (2019). Prototipo Didáctico De Control De Motores De Inducción Trifásicos (Didactic Prototype For 3-Ph Induction Motor Control). *Pistas Educativas*, 41(134).
- Ccallo, N. Y. H., & Chamorro-Atalaya, O. (2021). Analysis of the Asynchronous Motor Controlled by Frequency Inverter Applied to Fatigue Test System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(10).
- Hosek, P., & Diblík, M. (2011). Implementation of Siemens USS Protocol into LabVIEW. *JALA: Journal of the Association for Laboratory Automation*, 16(5), 347-354.
- Kurt Merve, Ş. (2023). The Use of Induction Motors in Electric Vehicles. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.1000865
- Mäenpää, E. (2025). *Raspberry Pi Pico W characterization* (Bachelor's thesis, E. Mäenpää).
- Palpankar, P. M., Waghmare, S., & Shikkewal, B. (2015). Speed control of an Induction Motor using Raspberry Pi. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 4(8).
- Xiao, H., Chuang, H. C., Yang, Z. H., & Lee, C. T. (2021). The efficiency improvement of induction motor with constant speed for belt drive mechanism. *Energy Efficiency*, 14(8), 87.