DOI: 10.5281/zenodo.21435408

Diseño e Implementación de un Sistema Electrónico de Potencia en la Rehabilitación de un Robot Educativo

Design and Implementation of a Power Electronics System in the Rehabilitation of an Educational Robot

Aldo N. Higuera J.[1], **Alejandro Lizárraga L.**[1], **Ramiro Gutiérrez A.**[2], **Sonia M. López L.**[2], **Samuel Angulo M.**[2]

[1]Maestría en Ciencias Aplicadas, Universidad Politécnica de Sinaloa, México.

Autor de correspondencia email: ahiguera@upsin.edu.mx

[2]Depto. de Electrónica, TecNM, Instituto Tecnológico de Mazatlán, Sinaloa, México.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el proceso de rehabilitación de un eslabón de un robot educativo de seis grados de libertad, utilizado con fines académicos en el programa de Ingeniería Mecánica del Tecnológico Nacional de México, en el Instituto Tecnológico de Mazatlán. La recuperación de este tipo de plataformas abiertas es de especial relevancia, ya que constituyen herramientas fundamentales para la formación práctica de ingenieros en áreas como mecánica, mecatrónica, electrónica y robótica. El desarrollo se centra en el diseño de una etapa de potencia basada en una topología de puente H, cuyo circuito impreso (PCB) fue diseñado, implementado y evaluado funcionalmente. El dimensionamiento del circuito se realizó considerando las especificaciones del servomotor Cleveland Motion Controls MH3515-228D. Asimismo, se presentan los resultados iniciales correspondientes al diseño del PCB y a las pruebas experimentales del sistema de potencia propuesto, los cuales permiten avanzar en la rehabilitación integral del robot. Esta rehabilitación contempla, en etapas posteriores, el desarrollo del sistema de control de velocidad y posición del servomotor; sin embargo, dichos avances no se abordan en el presente trabajo.

Palabras clave: *Robot educativo, Seis grados de libertad, Puente H, Servomotor.*

Abstract

This paper presents the results obtained in the rehabilitation process of one link of a six-degree-of-freedom educational robot, used for academic purposes in the Mechanical Engineering program at Tecnológico Nacional de México, specifically at the Instituto Tecnológico de Mazatlán. The recovery of this type of open-platform system is particularly relevant, as it constitutes a fundamental tool for the practical training of engineers in areas such as mechanics, mechatronics, electronics, and robotics. The work focuses on the design of a power stage based on an H-bridge topology, whose printed circuit board (PCB) was designed, implemented, and functionally evaluated. The circuit was dimensioned considering the specifications of the Cleveland Motion Controls MH3515-228D servomotor. Additionally, initial results related to the PCB design and experimental testing of the proposed power system are presented, which contribute to the overall rehabilitation of the robot. This rehabilitation process includes, in subsequent stages, the development of a speed and position control system for the servomotor; however, these aspects are beyond the scope of the present work.

Keywords: *Educational robot, Six degrees of freedom, H-bridge, Servomotor.*

Recibido: 28/05/2026; Aceptado: 27/06/2026; Publicado 17/07/2026

CC BY-NC-SA 4.0

Introducción

La robótica constituye una de las disciplinas tecnológicas más representativas de la automatización moderna y es el resultado de la convergencia entre la ingeniería mecánica, la electrónica, la informática y la teoría de control. Sus antecedentes se remontan a los primeros autómatas desarrollados en la antigüedad, los cuales empleaban mecanismos hidráulicos y de relojería para reproducir movimientos automáticos. Posteriormente, durante el Renacimiento, Leonardo da Vinci propuso diversos diseños mecánicos que incorporaban principios de transmisión de movimiento y cinemática. Más adelante, Jacques de Vaucanson perfeccionó los autómatas mecánicos del siglo XVIII, mientras que la introducción de las tarjetas perforadas en el telar de Jacquard, en 1801, representó uno de los primeros antecedentes de la programación aplicada a sistemas mecánicos. Sin embargo, el verdadero impulso tecnológico de la robótica ocurrió con el desarrollo de la electrónica, la aparición de los circuitos digitales y, principalmente, de los microprocesadores, que permitieron incorporar capacidades de procesamiento, control y toma de decisiones en los sistemas electromecánicos modernos [1].

El concepto de robot fue introducido por primera vez en la obra Rossum's Universal Robots (R.U.R.) de Karel Čapek en 1920, dando origen a una nueva visión sobre las máquinas capaces de ejecutar tareas de manera autónoma. No obstante, fue hasta 1961 cuando esta idea se materializó con la instalación del primer robot industrial comercial, el Unimate, diseñado por George Devol y promovido por Joseph Engelberger. Este manipulador fue implementado en una línea de producción de General Motors para realizar operaciones repetitivas y peligrosas, convirtiéndose en el punto de partida de la automatización industrial basada en robots [1].

Durante las décadas de 1960 y 1970 la robótica experimentó un crecimiento acelerado impulsado por el desarrollo de la electrónica analógica, los sistemas digitales y las computadoras industriales. Los

controladores electromecánicos evolucionaron hacia arquitecturas electrónicas cada vez más sofisticadas, incrementando la precisión, velocidad y confiabilidad de los manipuladores industriales. En este periodo surgieron diversos fabricantes especializados, destacando KUKA, que en 1973 desarrolló uno de los primeros robots industriales de seis grados de libertad controlados electrónicamente, ampliando significativamente las capacidades de automatización en procesos de manufactura, soldadura y ensamblaje [2].

La incorporación de microprocesadores, sensores inteligentes y sistemas embebidos durante las décadas posteriores permitió implementar estrategias avanzadas de control, percepción y planificación de trayectorias. En consecuencia, la robótica evolucionó desde manipuladores programables hacia sistemas autónomos capaces de interactuar con entornos dinámicos. Actualmente, los avances en inteligencia artificial, visión artificial, aprendizaje automático y fusión de sensores han permitido el desarrollo de robots colaborativos, vehículos autónomos, robots de servicio, plataformas humanoides y sistemas de exploración espacial como los rovers, consolidando una nueva generación de robots inteligentes orientados a la interacción humano-máquina y la toma autónoma de decisiones [3], [4].

Paralelamente al desarrollo tecnológico, la robótica dejó de ser una disciplina exclusivamente industrial para convertirse en un área estratégica dentro de la formación de ingenieros. En la actualidad, los programas de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica, Electrónica, Automatización, Computación e Inteligencia Artificial incorporan contenidos relacionados con modelado matemático, sensores, actuadores, programación, visión artificial, control automático y robótica inteligente. Esta integración multidisciplinaria responde a las necesidades de la Industria 4.0 y favorece la formación de profesionistas capaces de diseñar sistemas autónomos cada vez más complejos [3], [5], [6].

En este contexto surge la robótica educativa como una herramienta que facilita la integración entre la teoría y la práctica mediante plataformas experimentales donde los estudiantes implementan algoritmos de control, programación, electrónica y diseño mecánico sobre sistemas físicos reales. Diversas investigaciones reportan que el empleo de robots educativos fortalece competencias técnicas y transversales, tales como el pensamiento crítico, la creatividad, el trabajo colaborativo y la resolución de problemas, además de incrementar la motivación de los estudiantes mediante el aprendizaje basado en proyectos. Asimismo, estas plataformas permiten introducir tecnologías emergentes como visión artificial, inteligencia artificial, sistemas autónomos y comunicación entre dispositivos, preparando a los futuros ingenieros para enfrentar los retos de la automatización y la transformación digital [3], [5]–[7].

En consecuencia, la evolución de la robótica ha estado estrechamente ligada al desarrollo de la electrónica, la computación y las técnicas modernas de control. La transición desde mecanismos puramente mecánicos hasta robots inteligentes ha permitido ampliar sus aplicaciones hacia la industria, la medicina, la exploración espacial, la investigación científica y la educación. Actualmente, la robótica educativa constituye una plataforma fundamental para la formación de ingenieros al integrar conocimientos de mecánica, electrónica, programación y control en un mismo sistema, fortaleciendo el desarrollo de competencias requeridas por la industria moderna.

Durante los últimos años, la rehabilitación y modernización de robots educativos ha adquirido una importancia creciente debido a la necesidad de extender la vida útil de plataformas robóticas existentes, reducir costos de adquisición y fortalecer la enseñanza experimental en ingeniería. En lugar de sustituir equipos obsoletos, numerosas investigaciones proponen la actualización de su arquitectura electrónica, sistemas de adquisición de datos y algoritmos de control, permitiendo incorporar tecnologías modernas de hardware y software sin modificar significativamente la estructura mecánica original. Este enfoque no sólo representa una alternativa económicamente viable para instituciones educativas, sino que además facilita la implementación de nuevas estrategias de control y automatización sobre plataformas reales [8].

Uno de los principales avances en esta línea de investigación corresponde a la modernización de manipuladores robóticos mediante arquitecturas abiertas. Concha Sánchez et al. desarrollaron la rehabilitación de un robot manipulador educativo incorporando nuevos sistemas electrónicos, motores de corriente continua con realimentación mediante encoders y una arquitectura de hardware abierta, demostrando mejoras significativas en precisión, mantenibilidad y flexibilidad para actividades de investigación y docencia [8]. De manera similar, Zhao et al. integraron sistemas de visión artificial y procesamiento de imágenes en plataformas robóticas educativas, ampliando sus capacidades para aplicaciones relacionadas con percepción, navegación y control inteligente [9].

El desempeño de estos sistemas depende en gran medida del modelado matemático del motor de corriente continua, ya que constituye la base para el diseño de controladores capaces de garantizar estabilidad, rapidez y precisión. Diversos trabajos han desarrollado modelos dinámicos que describen el comportamiento eléctrico y mecánico de motores PMDC empleados en plataformas académicas y robots educativos. Kelly-Martínez et al. presentaron un modelo dinámico

para servoaccionamientos analógicos basado en motores PMDC, permitiendo analizar el comportamiento transitorio y permanente del sistema como fundamento para el diseño de estrategias de control [10]. De forma complementaria, Kassem et al. analizaron el modelado dinámico y el diseño de controladores para regulación de velocidad y posición, destacando la importancia de disponer de modelos precisos para mejorar el desempeño de los sistemas electromecánicos [11].

Con base en estos modelos matemáticos, la mayor parte de las investigaciones continúa utilizando controladores lineales tipo PI y PID debido a su simplicidad de implementación, robustez y aceptable desempeño en aplicaciones industriales y educativas. Ovalle Martínez et al. desarrollaron una plataforma para el control de velocidad y posición de motores de corriente continua que facilita la implementación experimental de controladores PID, mientras que Pallejà Cabré et al. propusieron una plataforma didáctica para la enseñanza del control de motores DC, validando el desempeño del controlador mediante experimentación en tiempo real [12], [13]. Asimismo, Hernández Millán et al. demostraron la aplicación de controladores PID para mejorar el seguimiento de trayectoria en robots móviles diferenciales, obteniendo respuestas estables y una reducción significativa del error de seguimiento [14]. De forma similar, diversos desarrollos implementados mediante plataformas Arduino y MATLAB han permitido fortalecer el aprendizaje práctico del control automático, facilitando la validación experimental de algoritmos ampliamente utilizados en la industria [15].

A pesar de la amplia aceptación de los controladores clásicos, investigaciones recientes han incorporado estrategias de control más avanzadas para incrementar la precisión y robustez frente a incertidumbres y perturbaciones. Entre ellas destacan los controladores difusos tipo Fuzzy-PID, los cuales presentan mejoras en el tiempo de establecimiento, sobreimpulso y rechazo de perturbaciones respecto a los controladores PID convencionales [16]. De manera complementaria, Crisóstomo Reyna propuso un esquema de control descentralizado para robots manipuladores de múltiples grados de libertad, demostrando que este enfoque mejora la precisión del posicionamiento y reduce el acoplamiento dinámico entre articulaciones [17].

La evolución de las técnicas de control también ha favorecido el desarrollo de robots destinados a aplicaciones de rehabilitación y asistencia médica. En este ámbito, los sistemas de control deben garantizar alta precisión en velocidad y posición, además de un comportamiento seguro durante la interacción con el usuario. En este sentido, Mobayen et al. presentan una revisión de técnicas modernas de control aplicadas a exoesqueletos robóticos, destacando el uso de control adaptativo, predictivo y robusto para incrementar el desempeño dinámico de estos sistemas [18].

Finalmente, además del desarrollo tecnológico, la robótica educativa ha demostrado ser una herramienta eficaz para fortalecer la formación de estudiantes de ingeniería. Diversos estudios concluyen que la utilización de plataformas robóticas reales favorece la integración de conocimientos de electrónica, programación, mecánica y control automático, promoviendo el aprendizaje basado en proyectos y el desarrollo de competencias relacionadas con la Industria 4.0 y las áreas STEM [19], [20]. En conjunto, estos trabajos evidencian que la rehabilitación de robots educativos mediante la actualización de su electrónica de potencia, sistemas de adquisición de datos y estrategias de control constituye una alternativa viable para incrementar tanto el desempeño técnico de las plataformas como su valor académico, estableciendo las bases para el desarrollo de nuevas propuestas de control aplicadas a manipuladores robóticos educativos.

El presente trabajo aborda la rehabilitación de un brazo robótico A465 de uso educativo, empleado en la formación de estudiantes de Ingeniería Mecánica en el Tecnológico Nacional de México. En particular, se trabaja sobre uno de sus grados de libertad, con el objetivo de recuperar su funcionalidad y sentar las bases para futuras estrategias de control.

El documento se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se describen las especificaciones técnicas del servomotor asociado al grado de libertad en proceso de rehabilitación. En la Sección 3 se presenta el diseño del circuito de la etapa de potencia basado en una topología de puente H, así como el desarrollo del circuito impreso (PCB) utilizando la herramienta KiCad. Finalmente, se exponen las pruebas experimentales realizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones del estudio

Metodología

El servomotor de Cleveland Motion Controls (CMC) modelo MH3515-228D pertenece a la serie 3500 de servomotores de imanes permanentes (PM) y se emplea en este trabajo para la rehabilitación de un grado de libertad del Brazo Robótico Articulado Modelo A465, figura 1. Este dispositivo ha sido diseñado para ofrecer soluciones de control de movimiento precisas y confiables en una amplia gama de aplicaciones, tales como automatización industrial, robótica, instrumentación médica y maquinaria especializada.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros eléctricos y mecánicos del modelo MH3515-228D. A partir de las especificaciones proporcionadas por el fabricante, se han definido los requerimientos de potencia de la etapa de potencia propuesta en este trabajo.

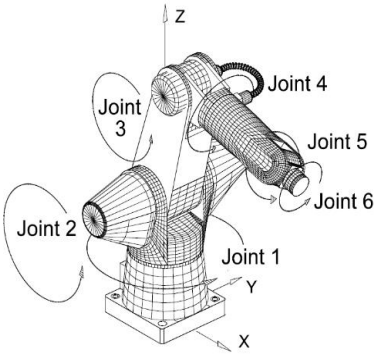

Figura 1. *Estructura de Brazo Robótico Articulado Modelo A465.*

Tabla 1. *Parámetros del servomotor MH3515-228D.*

Símbolo	Significado
Va = 48 V	Voltaje nominal (V)
Ia = 3.2 A	Corriente nominal (A)
Ra = 1.85 Ω	Resistencia de armadura (Ω)
La = 0.0012 H	Inductancia de armadura (H)
J = 1.55e-4	Inercia del rotor (kg·m^2)
B = 1.355 e-4	Coeficiente de fricción viscosa (N·m·s/rad)
Kt = 0.115 N·m/A	Constante de torque (N·m/A)
Kb = 0.115 V·s/rad	Constante de fuerza contraelectromotriz (V·s/rad)
ω = 300 rpm	Velocidad (rpm)

El servomotor MH3515-228D es el elemento actuador principal, por lo que la etapa de potencia debe garantizar un desempeño dinámico preciso, confiable y eficiente. En este sentido, el puente H propuesto permite el control bidireccional del motor, posibilitando la regulación de velocidad, el posicionamiento y la inversión del sentido de giro, aspectos fundamentales para reproducir trayectorias controladas. La implementación de la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) facilita el ajuste del voltaje promedio aplicado al motor, permitiendo un control fino del par y la velocidad, lo cual es esencial en aplicaciones de rehabilitación donde se requiere suavidad y precisión en el movimiento.

Para el diseño de la etapa de potencia se llevó a cabo mediante un enfoque tradicional basado en las especificaciones eléctricas del servomotor, tales como voltaje nominal, corriente, constante de arranque. A partir de esta información, se establecieron los requerimientos de operación y se dimensionaron los dispositivos de conmutación adecuados. En particular, se seleccionaron transistores MOSFET de potencia modelo IPP027N15 debido a su baja resistencia en conducción y alta capacidad de manejo de corriente, así como el driver de compuerta UCC27301, el cual garantiza tiempos de conmutación adecuados y una correcta adaptación entre la etapa de control y la de potencia.

En el diseño original del fabricante del robot emplea un puente H basado en MOSFETs complementarios IRF540 e IRF9540 cuya distribución es la siguiente: Q_1 = superior izquierdo (IRF9540), Q_2 = superior derecho (IRF9540), Q_3 = inferior izquierdo (IRF540), Q_4 = inferior derecho (IRF540) como se muestra en la figura 2.

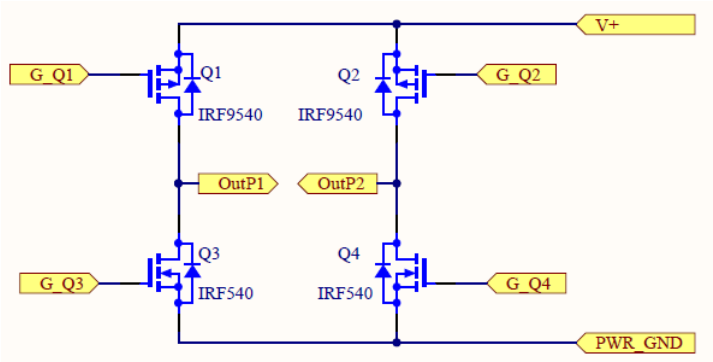

Figura 2. *Puente H del diseño original del fabricante del robot.*

Por lo tanto, se propuso la etapa de potencia mostrada en la Figura 3, correspondiente a una topología de puente H diseñada para su implementación física mediante una tarjeta de circuito impreso (Printed Circuit Board, PCB). El diseño esquemático y el ruteo de la tarjeta se realizaron utilizando KiCad, una herramienta de código abierto ampliamente empleada en el desarrollo de sistemas electrónicos debido a su flexibilidad y a la posibilidad de integrar, en un mismo entorno, el diseño del circuito esquemático, la asignación de encapsulados, la gestión de bibliotecas de componentes, el diseño de tarjetas multicapa y la visualización tridimensional del prototipo. Estas características facilitan la validación previa a la fabricación, permiten identificar posibles errores de distribución o interferencias mecánicas y contribuyen a reducir riesgos durante la implementación física del sistema. La etapa de potencia propuesta consiste en un puente H basado en MOSFET de canal N, dimensionado de acuerdo con las condiciones máximas de operación de la carga, correspondiente a un servomotor de corriente directa con escobillas de 240 W y una tensión nominal de 48 V. Para los interruptores de potencia se seleccionaron MOSFET IPP057N15NM6 de la familia OptiMOS™ 6 de Infineon, los cuales presentan una tensión máxima drenaje-fuente (V_{DS}) de 150 V y una resistencia de conducción típica $R_{DS(on)}$ de 5.7 mΩ. Estas características permiten reducir las pérdidas por conducción, mejorar la eficiencia energética del convertidor y proporcionar un margen adecuado de tensión ante los transitorios generados durante la conmutación y el frenado del sistema electromecánico.

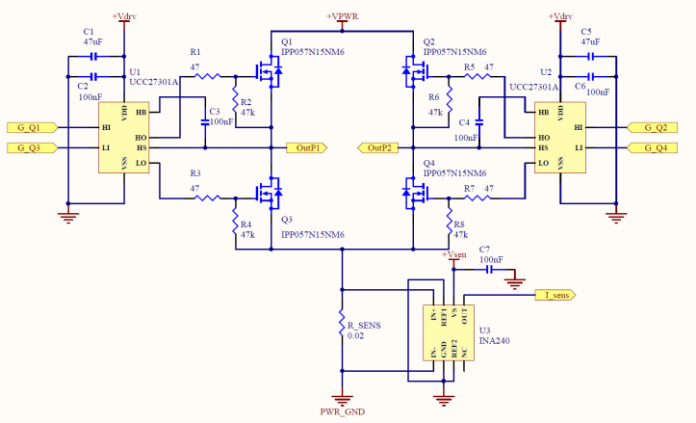

Figura 3. *Diagrama eléctrico del puente H propuesto para un grado de libertad del robot.*

En cuanto a las consideraciones de protección, los semiconductores de potencia fueron seleccionados con un margen amplio respecto a la tensión nominal de alimentación del servomotor. En particular, los MOSFET IPP057N15NM6 presentan una tensión máxima drenaje-fuente de (V_{DS}=150 V), valor aproximadamente tres veces superior a la tensión nominal de operación del motor, correspondiente a 48V. Este sobredimensionamiento permite mantener los dispositivos dentro de una región segura de operación ante picos de tensión generados por la naturaleza inductiva del motor, las transiciones de conmutación y los procesos de frenado. De manera complementaria, el ruteo de la PCB fue diseñado para reducir la inductancia parásita en las trayectorias de alta corriente, mediante la minimización de los lazos de conmutación y la ubicación cercana de los elementos críticos de potencia (figura 4). Estas consideraciones disminuyen los sobrevoltajes transitorios en los interruptores y permitieron prescindir de redes snubber y de elementos adicionales de protección que se encontraban presentes en la etapa de potencia original del robot.

Asimismo, la protección frente a conducción cruzada en cada rama del puente H se implementó mediante el controlador de compuerta UCC27301. Este dispositivo incorpora una función de enclavamiento de entradas (interlock) o protección contra conducción cruzada (cross-conduction protection), cuya finalidad es evitar el encendido simultáneo de los MOSFET superior e inferior de una misma rama. Cuando ambas entradas del controlador se encuentran en nivel lógico alto, la lógica interna desactiva ambas salidas, evitando un posible cortocircuito directo entre la fuente de alimentación y tierra. Cuando una de las entradas regresa a nivel lógico bajo, las salidas recuperan su funcionamiento normal de acuerdo con la lógica de control aplicada. Esta función constituye una capa adicional de seguridad ante errores de programación, transitorios en las señales PWM o condiciones no deseadas durante las transiciones de conmutación. Finalmente, la etapa de potencia incorpora un sistema de medición y acondicionamiento de corriente basado en una resistencia shunt de (20 Ω) y el amplificador de sensado INA240. La señal acondicionada, denominada ($I_{max}(sen)$), es enviada al microcontrolador para supervisar la corriente suministrada al motor. Esta medición permite implementar una estrategia de arranque suave mediante modulación por ancho de pulso (PWM), limitando la corriente de irrupción durante el inicio del movimiento. Además, la señal puede emplearse para detectar condiciones de sobrecorriente y deshabilitar oportunamente la etapa de potencia, protegiendo tanto al puente H como al motor y a la fuente de alimentación ante fallas eléctricas o mecánicas.

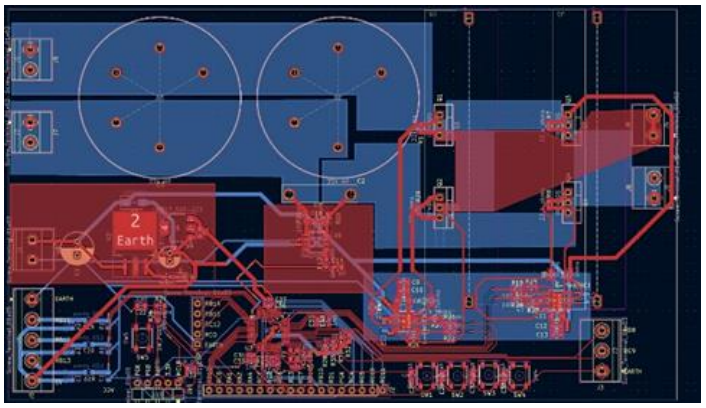

Figura 4. *Diagrama PCB, ruteado para reducir inductancias parasitas en la trayectoria de corriente, como medio de protección.*

Por último, la tarjeta de control integra un microcontrolador de la familia dsPIC33CK64MC105, el cual constituye el núcleo de procesamiento del sistema y una pieza fundamental en la arquitectura de control propuesta. Este dispositivo, basado en una arquitectura de controlador digital de señales (DSC), combina capacidades de procesamiento en tiempo real con periféricos especializados para aplicaciones de control de motores, tales como módulos PWM de alta resolución, temporizadores avanzados y módulos de captura/compare orientados a la lectura de señales de encoders. Estas características lo convierten en una plataforma idónea para implementar estrategias de control embebido en sistemas electromecánicos de precisión. Asimismo, mediante la adecuada conmutación de las señales de disparo, el microcontrolador posibilita la inversión del sentido de giro del servomotor. Por otro lado, el sistema integra la adquisición y el procesamiento de las señales provenientes del encoder óptico incorporado en el servomotor, lo que permite estimar en tiempo real tanto la velocidad como la posición angular del eje. Para ello, el microcontrolador dsPIC33CK64MC105 hace uso del módulo Quadrature Encoder Interface (QEI), el cual está diseñado para procesar señales de encoders incrementales. La incorporación del módulo QEI posibilita una adquisición precisa y eficiente de las

variables cinemáticas, al delegar estas tareas a hardware especializado y reducir la carga de procesamiento del microcontrolador. Esto se traduce en una mayor confiabilidad en la medición, lo cual resulta fundamental tanto para la caracterización del sistema en lazo abierto como para el desarrollo futuro de estrategias de control en lazo cerrado.

El microcontrolador desempeña múltiples funciones críticas. Por un lado, se encarga de la generación de señales de modulación por ancho de pulso (PWM), las cuales regulan el voltaje promedio suministrado al servomotor MH3515-228D a través del puente H diseñado, permitiendo así el control de la velocidad, esto a través de un encoder rotatorio incremental de la serie LDA-051-1000 de SUMTAK, con una resolución nominal de 1000 pulsos por revolución. Considerando la decodificación en cuadratura de las señales A y B, mediante la detección de sus cuatro flancos, se obtiene una resolución teórica de 4000 cuentas por revolución, equivalente a una resolución angular de 0.09° mecánicos por cuenta. Debido a que la hoja de datos disponible no especifica parámetros metrológicos tales como exactitud angular, error de división, repetibilidad o error de fase entre canales.

Durante el proceso de sensado de posición y velocidad pueden presentarse errores asociados tanto al encoder como a su integración mecánica y electrónica. Desde el punto de vista funcional, el encoder genera señales digitales en forma de trenes de pulsos, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de rotación del eje, mientras que el número acumulado de pulsos permite determinar la posición angular relativa. Este tipo de dispositivos puede configurarse con resoluciones típicas de hasta 2500 pulsos por revolución (PPR) y presenta respuestas en frecuencia de hasta 200 kHz, características que los hacen adecuados para sistemas dinámicos de respuesta rápida. No obstante, la medición puede verse afectada por la cuantización inherente a la resolución del encoder, la excentricidad o el desalineamiento entre el eje del motor y el encoder, las vibraciones mecánicas, el juego presente en el sistema de transmisión y las perturbaciones electromagnéticas generadas por la conmutación PWM de la etapa de potencia.

Asimismo, la estimación de velocidad obtenida a partir de la variación de posición puede presentar rizado debido al conteo discreto de pulsos, particularmente durante la operación a bajas velocidades, donde el número de cuentas registradas dentro de cada intervalo de muestreo es reducido. Para mitigar estos efectos, normalmente es conveniente implementar filtros digitales, sincronizar adecuadamente la lectura de las señales del encoder y aplicar técnicas de rechazo de ruido en las entradas del microcontrolador, con el propósito de reducir la pérdida de pulsos, conteos en falso y las variaciones no deseadas en la velocidad estimada. Sin embargo, para las pruebas presentadas en la siguiente sección no se incorporó un filtro digital adicional.

Tabla 2. *Especificaciones del enconder LDA-051-1000 de SUMTAK.*

Pin	Nombre	Tipo de señal	Descripción funcional
1	Vcc	Alimentación	Entrada de voltaje de alimentación.
2	GND	Referencia	Referencia común del sistema.
3	Canal A	Salida digital (TTL o diferencial)	Señal cuadrada principal utilizada para el conteo de pulsos.
4	Canal B	Salida digital (TTL o diferencial)	Señal cuadrada desfasada 90° respecto al canal A.
5	Canal Z (Index)	Salida digital	Pulso de referencia generado una vez por revolución.
6	$\overline{A}$ (A complementaria)	Salida diferencial	Señal inversa del canal A, utilizada en transmisión diferencial.
7	$\overline{B}$ (B complementaria)	Salida diferencial	Señal inversa del canal B. Mejora la integridad de la señal.
8	$\overline{Z}$ (Index complementario)	Salida diferencial	Señal inversa del canal Z.
9	Shield (malla)	Protección	Blindaje del cable para reducir interferencias electromagnéticas.

Esta decisión se fundamentó en que el periodo de muestreo seleccionado para el cálculo de la velocidad permitió realizar un promedio temporal implícito sobre las cuentas registradas, atenuando de forma natural las variaciones rápidas asociadas al ruido de conmutación y a la cuantización. Bajo las condiciones de operación evaluadas, la señal de velocidad obtenida presentó un nivel de rizado compatible con los requerimientos de la prueba, por lo que no fue necesario incorporar una etapa adicional de filtrado digital. Además, evitar un filtrado adicional permitió conservar una respuesta más rápida de la medición de velocidad y reducir el retardo de fase que podría afectar el desempeño del sistema de control.

La tarjeta de control integra un microcontrolador dsPIC33CK64MC105, perteneciente a la familia dsPIC33CK de Microchip Technology. Este dispositivo dispone de capacidad de procesamiento en tiempo real y periféricos especializados para aplicaciones de control de motores, entre los que se incluyen módulos de modulación por ancho de pulso (PWM), temporizadores internos y una interfaz para encoder en cuadratura (Quadrature Encoder Interface, QEI). Estas características permiten implementar estrategias de control embebido en sistemas electromecánicos que requieren sincronización, medición de posición y respuesta dinámica.

En este trabajo, el microcontrolador genera las señales PWM requeridas por la etapa de potencia y ejecuta la rutina de adquisición del encoder incremental. La medición de posición se realiza mediante los canales A y B, cuyas señales en cuadratura permiten al módulo QEI efectuar el conteo incremental o decremental de pulsos de acuerdo con el desfase entre ambas, obteniendo así la posición angular relativa y el

sentido de giro del eje. Adicionalmente, el canal Z o señal de índice se emplea como referencia para sincronizar o reinicializar el contador de posición en una ubicación angular conocida, estableciendo una condición inicial confiable para las tareas de posicionamiento.

La velocidad angular se estima a partir del procesamiento temporal de los pulsos generados por los canales A y B. Para ello, puede emplearse el conteo de pulsos dentro de una ventana de tiempo definida o la medición del periodo entre flancos consecutivos mediante los temporizadores internos del microcontrolador. De este modo, mientras la posición se determina mediante la acumulación de pulsos, la velocidad se obtiene a partir de la variación del conteo respecto al tiempo. La integración de estas rutinas en el dsPIC33CK64MC105 permite adquirir en tiempo real las variables cinemáticas del servomotor y consolidar al microcontrolador como el elemento central para la implementación de estrategias de control de velocidad y posición.

Resultados

En este trabajo se llevó a cabo de manera integral la rehabilitación de un grado de libertad del Brazo Robótico Articulado Modelo A465, abarcando desde el análisis de las especificaciones técnicas del servomotor MH3515-228D hasta la implementación física y la validación experimental del sistema de accionamiento. A partir de los parámetros eléctricos del servomotor, se establecieron los requerimientos de diseño de la etapa de potencia y se propuso una topología de puente H para permitir el control bidireccional y la regulación de velocidad mediante técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM). El diseño de la tarjeta de circuito impreso correspondiente a esta etapa se desarrolló mediante KiCad, una plataforma de código abierto que integra el diseño esquemático, la asignación de encapsulados, el ruteo de pistas, la administración de bibliotecas de componentes y la visualización tridimensional del prototipo. Estas características permitieron validar la distribución física de los dispositivos, identificar posibles interferencias mecánicas y verificar el diseño antes de su fabricación. La figura 5 presenta la representación virtual tridimensional del PCB final del puente H, en la cual se observa la disposición de los MOSFET de potencia, el controlador de compuerta y los conectores.

El sistema fue desarrollado mediante el diseño esquemático y de la tarjeta de circuito impreso en KiCad, lo que permitió integrar adecuadamente los componentes electrónicos y optimizar su distribución física para reducir pérdidas e interferencias. Posteriormente, se fabricó la PCB y se realizó el ensamblaje y la soldadura de los componentes.

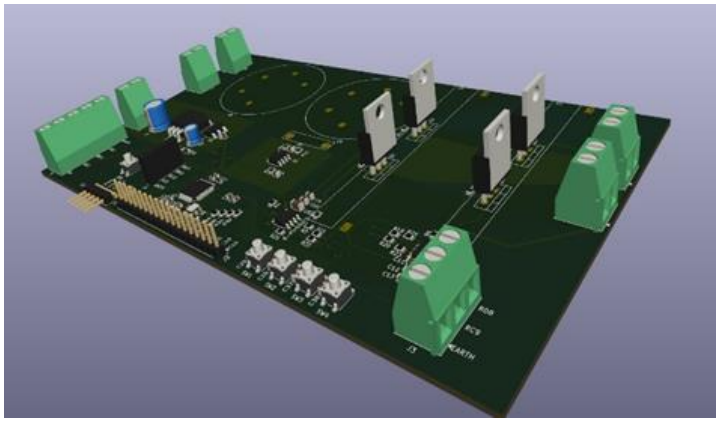

Figura 5. *Imagen virtual del diseño PCB (puente H).*

La Figura 6 muestra la tarjeta fabricada y ensamblada, correspondiente a la plataforma de control basada en el microcontrolador dsPIC33CK64MC105, el cual genera las señales PWM, adquiere las señales del encoder óptico y ejecuta las tareas de control del servomotor.

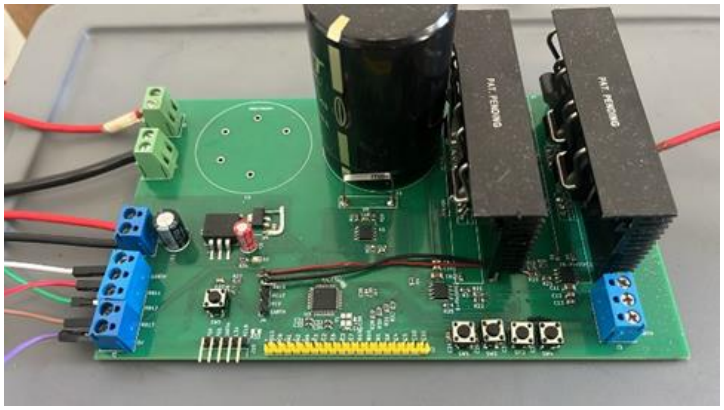

Figura 6. *Puente H fabricado para el accionamiento de un grado de libertad del brazo robótico académico A465.*

Con el propósito de evaluar el desempeño energético de la etapa de potencia, se realizó un análisis térmico y pérdidas para la topología de puente H propuesta y se estableció una comparación con la etapa de potencia original del robot. El esquema tradicional de control de velocidad por PWM consiste en fijar la dirección con un MOSFET encendido fijo y modular el MOSFET diagonal opuesto de manera que, en un sentido, $Q_1 = ON$ (continuo), $Q_2 = Q_3 = OFF$ y $Q_4 = PWM$ y en el opuesto $Q_2 = ON$ (continuo), $Q_1 = Q_4 = OFF$ y $Q_3 = PWM$. El voltaje promedio aplicado al motor es: $V_{motor} = D \cdot V_{dc}$.

Bajo este esquema, se hace un análisis comparativo de las pérdidas y eficiencia entre la nueva etapa y la anterior, para ello se determinarán las pérdidas por conducción, pérdidas por conmutación y pérdidas en el diodo en antiparalelo del MOSFET considerando la carga máxima,

una f_{pwm} = 10kHz y un ciclo de trabajo D = 50%. Además, en cada caso se emplearán los parámetros de los MOSFETs vistos en la hoja de datos.

a) Las pérdidas por conducción (P_{cond}) están dadas por las ecs. (1) y (2):

- Para el MOSFET que modula por PWM (*ej.* Q_1):

$$P_{cond_PWM} = I_{out}^2 \times R_{DS(on)} \times D \quad (1)$$

- Para el MOSFET que se queda fijo en ON (*ej.* Q_4):

$$P_{cond_ON} = I_{out}^2 \times R_{DS(on)} \quad (2)$$

b) Las pérdidas por Conmutación (P_{sw}), las cuales están dadas por la ecs. (3):

$$P_{sw} = \frac{1}{2} \times V_{DS} \times I_{out} \times (t_{on} + t_{off}) \times f_{sw} \quad (3)$$

donde:
$ton \rightarrow$ *tiempo de encendido.*
$toff \rightarrow$ *tiempo de apagado.*

c) Las pérdidas del diodo se estiman por la ecs. (4).

$$P_{diodo} = 2 \times V_{DS} \times I_{out} \times t_d \times f_{sw} \quad (4)$$

donde:
$td \rightarrow$ *tiempo muerto.*

Los resultados comparativos muestran una mejora significativa en el desempeño energético de la etapa de potencia propuesta respecto al diseño clásico basado en los MOSFET IRF9540 e IRF540.

Tabla 3. *Comparativa Corregida (Parámetros y Pérdidas).*

Parámetro / Pérdida	Diseño Moderno (IPP057N15NM6)	Diseño Clásico (IRF9540 / IRF540)	Impacto Técnico
Resistencia $R_{DS(on)}$ lado alto	5.7 mΩ	200 mΩ	35 veces mayor en el puente viejo
Resistencia $R_{DS(on)}$ Lado bajo	5.7 mΩ	77 mΩ	13 veces mayor en la versión antigua.
Pérdidas por Conducción P_{cond}	213 mW	4.425 W	El calor fijo se duplica respecto al cálculo anterior.
Pérdidas por Conmutación P_{sw}	84 mW	420 mW	Transiciones lentas en chips antiguos elevan las pérdidas.
Pérdidas por Diodo P_{diodo}	90 mW	130 mW	El diodo clásico posee mayor caída de voltaje.
Pérdidas Totales del Puente	387 mW	4.975 W	El circuito antiguo desperdicia 13 veces más energía.
Eficiencia de la Etapa	99.83 %	97.96 %	Pierdes casi un 2% de potencia neta solo en calor.

La principal diferencia se encuentra en la resistencia de conducción de los dispositivos empleados. En el diseño moderno, los MOSFET IPP057N15NM6 presentan una resistencia $R_{DS(on)}$ de 5.7mΩ tanto en el lado alto como en el lado bajo del puente H, mientras que la configuración anterior presenta valores de 200mΩ y 77mΩ, respectivamente.

Esta reducción de resistencia permite disminuir de manera importante las pérdidas por conducción, las cuales pasan de 4.42 W en el diseño clásico a únicamente 213 mW en la etapa propuesta. Asimismo, las pérdidas por conmutación disminuyen de 423 mW a 84 mW, debido a las menores pérdidas dinámicas asociadas con los dispositivos de potencia modernos. Las pérdidas correspondientes a la conducción del diodo intrínseco también se reducen de 130 mW a 90 mW, lo que se atribuye a una menor caída de tensión directa durante los intervalos de tiempo muerto. Como resultado, las pérdidas totales estimadas del puente H se reducen de 4.975 W en el diseño clásico a 387 mW en la nueva etapa, lo que representa una reducción aproximada del 92.2% en la potencia disipada.

La eficiencia estimada de la etapa de potencia aumenta de (97.96%) a (99.83%). Aunque la diferencia porcentual puede parecer moderada, su efecto es relevante desde el punto de vista térmico, ya que el diseño clásico disipa aproximadamente 4.588 W adicionales en forma de calor. Esta reducción favorece la confiabilidad de los semiconductores, disminuye la necesidad de disipadores de mayor tamaño y contribuye a una implementación más compacta y eficiente para la rehabilitación del grado de libertad del brazo robótico.

En el análisis térmico la temperatura de unión T_j de los semiconductores está dada por la ecs. (5):

$$T_j = T_a + (P_{MOSFET} \times R_{\theta JA}) \quad (5)$$

donde:
$T_a \rightarrow$ *Temperatura ambiente.*
$P_{MOSFET} \rightarrow$ *Pérdidas en el MOSFET*
$R_{\theta JA} \rightarrow$ *Resistencia térmica unión – ambiente*

Para las condiciones de cálculo de T_a se asume 25°C, $R_{\theta JA}$ para encapsulados TO-220 de 62°C/W y se evalúa el transistor de mayor estrés en cada puente durante la modulación por PWM sin disipador. El resultado se muestra en la gráfica de la Figura 7 donde claramente se muestra que el IPP057N15NM6 se desempeña con un estrés térmico muy bajo en comparación con el IRF9540 incluso logrando eliminar la necesidad de disipador de calor en la práctica, a diferencia de la anterior el cual es requerido.

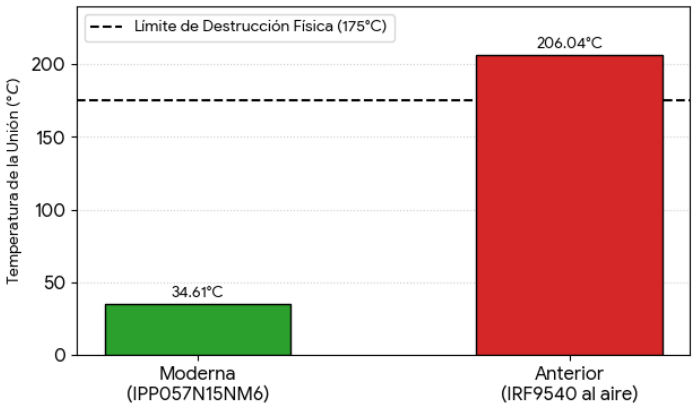

Figura 7. *Análisis térmico entre las dos etapas de potencia.*

Para validar el funcionamiento de la etapa de potencia se realizaron pruebas experimentales en lazo abierto con el servomotor operando sin carga mecánica. El propósito de estas pruebas fue verificar la capacidad del puente H para accionar el motor en diferentes niveles de tensión, así como comprobar la adquisición funcional de las señales del encoder incremental y la estimación de la velocidad por parte del microcontrolador dsPIC33CK64MC105. Debido a que el sistema se evaluó en lazo abierto, no se implementó una estrategia de control basada en retroalimentación; por tanto, la señal de velocidad se utilizó únicamente como variable de instrumentación y visualización durante la evaluación del accionamiento.

La velocidad se obtuvo a partir del conteo de pulsos generados por el encoder durante un intervalo de muestreo definido. Este procedimiento introduce un promedio temporal inherente, ya que la velocidad calculada corresponde a la variación acumulada de posición dentro de cada periodo de muestreo. Bajo las condiciones de operación consideradas, dicho promedio permitió atenuar las variaciones de alta frecuencia asociadas con la cuantización del conteo y con posibles perturbaciones eléctricas derivadas de la conmutación PWM. Por esta razón, no se incorporó un filtro digital adicional en la señal de velocidad. Esta decisión también evitó introducir retardo adicional en la medición, el cual podría afectar la observación de los transitorios del sistema durante las pruebas.

Es importante señalar que el objetivo de esta etapa no fue realizar una caracterización metrológica del encoder ni determinar su error absoluto de velocidad mediante la comparación con un tacómetro externo. La evaluación se orientó a comprobar que el encoder, el módulo QEI y la rutina de procesamiento implementada en el microcontrolador proporcionaran una señal de velocidad estable, coherente y suficientemente representativa para observar la respuesta del servomotor y validar la operación del driver. En consecuencia, no se incluyeron tablas de error respecto a un instrumento externo, ya que dichas mediciones requerirían un procedimiento específico de calibración, condiciones de carga controladas, trazabilidad del instrumento de referencia y un análisis de incertidumbre fuera del alcance de este trabajo. Para facilitar la visualización experimental, la velocidad estimada fue escalada y representada mediante el convertidor digital-analógico (DAC) integrado del dsPIC33CK64MC105. El criterio de escalamiento se definió considerando la velocidad nominal del servomotor, de 3000 rpm, asociada a su tensión nominal de alimentación de 48 V. De esta forma, se estableció una correspondencia lineal en la que 3000 rpm equivalen a 3.3 V, valor máximo de salida del DAC. Así, la velocidad medida por el encoder puede observarse directamente en el osciloscopio como una señal analógica proporcional a la velocidad angular del eje.

En las figuras 8, 9 y 10 muestran las condiciones de operación evaluadas: alimentación nominal de 48 V, alimentación de 24 V y alimentación de 12 V, correspondientes al 100 %, 50 % y 25 % de la tensión nominal, respectivamente. En cada prueba, la señal azul representa la tensión aplicada al motor, mientras que la señal amarilla corresponde a la salida del DAC, previamente escalada para representar la velocidad estimada. En la condición de 48 V, el motor sin carga alcanzó una velocidad cercana a 3000 rpm, reflejada mediante una salida próxima a 3.3 V. Para 24 V, la velocidad observada fue aproximadamente de 1500 rpm, con una salida cercana a 1.65 V; mientras que, para 12 V, se obtuvo una velocidad aproximada de 750 rpm representada por un nivel de alrededor de 0.8 V. En conjunto, los resultados muestran un comportamiento consistente entre la tensión aplicada, la respuesta de velocidad del servomotor sin carga y la señal analógica generada por el DAC. Esto permite validar la operación del puente H, la generación de PWM y la lectura funcional del encoder para fines de supervisión del sistema.

Los resultados no deben interpretarse como una validación de exactitud absoluta de la velocidad, sino como evidencia experimental de que la plataforma desarrollada adquiere y procesa adecuadamente las variables cinemáticas requeridas para la evaluación inicial del driver y para futuras estrategias de control de velocidad y posición.

Figura 8. *Prueba de control en lazo abierto del servomotor a velocidad nominal.*

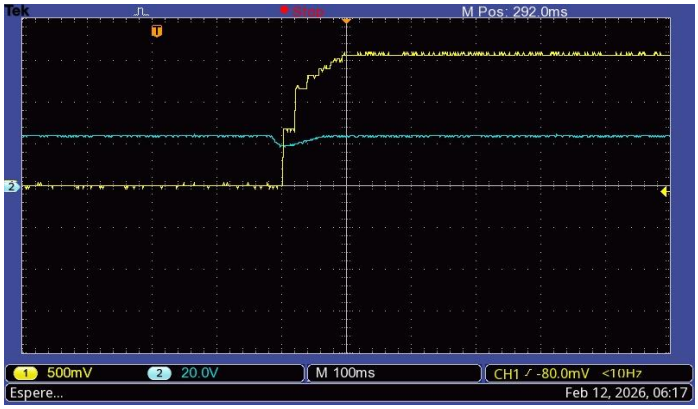

Figura 9. *Prueba de control en lazo abierto del servomotor a 0.5 de la velocidad nominal.*

Adicionalmente, se validó la adquisición de la posición angular relativa del eje mediante la representación de la señal del encoder a través del DAC del microcontrolador. En esta prueba, la salida analógica se escaló de manera que una revolución completa del eje, equivalente a 360°, correspondiera a 3.3 V, mientras que la posición de referencia de 0° se asociara con 0 V. La señal amarilla mostrada en la Figura 10 representa, por tanto, la posición angular instantánea del rotor.

Durante el giro en sentido negativo, el conteo del encoder disminuye y la salida del DAC presenta una reducción progresiva desde valores cercanos a 3.3 V hasta aproximarse a 0 V, representando el desplazamiento angular desde 360° hasta 0°. Al alcanzar la posición de referencia, la señal de índice Z del encoder permite sincronizar o reinicializar el contador de posición, con lo cual la salida analógica retorna al valor máximo e inicia un nuevo ciclo de representación angular. Este comportamiento confirma la detección adecuada de los canales A, B y Z del encoder, así como el funcionamiento del módulo QEI para determinar el sentido de giro y la posición angular relativa del eje.

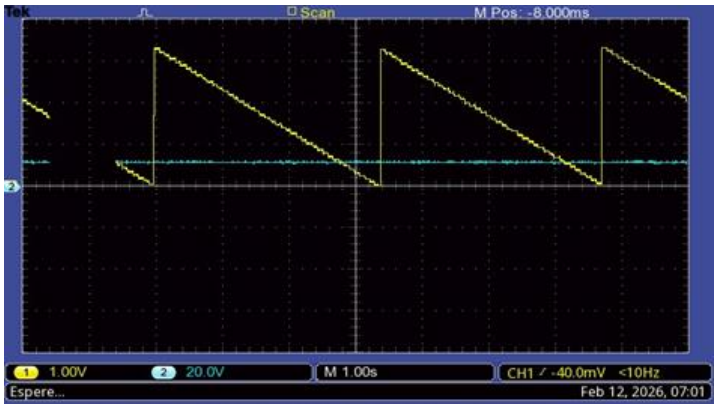

Figura 10. *Señal de posición durante giro del motor.*

Los resultados obtenidos validan el funcionamiento de la tarjeta electrónica desarrollada para la rehabilitación de un grado de libertad del brazo robótico, particularmente de la etapa de potencia basada en un puente H y de la integración del microcontrolador dsPIC33CK64MC105 en la PCB. Las pruebas en lazo abierto, realizadas con el servomotor sin carga, permitieron comprobar la operación del driver ante diferentes niveles de tensión de alimentación, correspondientes a 48 V, 24 V y 12 V, así como verificar una respuesta de velocidad coherente con dichas condiciones de operación. Asimismo, las pruebas de adquisición del encoder confirmaron que la plataforma desarrollada permite obtener y procesar las señales requeridas para la estimación de velocidad, posición angular relativa, sentido de giro y sincronización mediante la señal de índice Z.

El propósito de estas pruebas no fue realizar una caracterización metrológica del encoder ni cuantificar el error absoluto de las mediciones de velocidad y posición mediante instrumentos externos, sino verificar la funcionalidad de la instrumentación integrada en la PCB durante la operación del accionamiento. Bajo las condiciones evaluadas, el periodo de muestreo seleccionado proporcionó señales suficientemente estables para la visualización y supervisión experimental, sin requerir una etapa adicional de filtrado digital. Por otra parte, el análisis de pérdidas mostró que la selección de MOSFET IPP057N15NM6 reduce las pérdidas totales estimadas del puente H de 4.975 W a 387 mW, incrementando la eficiencia estimada de (97.96%) a (99.83%) respecto al diseño clásico. En conjunto, los resultados demuestran que la PCB propuesta integra adecuadamente la etapa de potencia, el procesamiento de señales y la instrumentación necesaria para operar el servomotor, constituyendo una plataforma viable para la posterior implementación y evaluación de estrategias de control de velocidad y posición.

Referencias

[1] A. Marsh, "In 1961, the First Robot Arm Punched In," IEEE Spectrum, Aug. 30, 2022. [Online]. Available: https://spectrum.ieee.org/unimation-robot

[2] A. Gasparetto and L. Scalera, "A Brief History of Industrial Robotics in the 20th Century," Advances in Historical Studies, vol. 8, no. 1, pp. 24–35, Feb. 2019.

[3] M. Ryalat, N. Almtireen, G. Al-Refai, H. Elmoaqet, and N. Rawashdeh, "Research and Education in Robotics: A Comprehensive Review, Trends, Challenges, and Future Directions," Journal of Sensor and Actuator Networks, vol. 14, no. 4, Art. no. 76, 2025, doi: 10.3390/jsan14040076.

[4] W. Chen, W. Chi, S. Ji, H. Ye, J. Liu, Y. Jia, J. Yu, and J. Cheng, "A Survey of Autonomous Robots and Multi-Robot Navigation: Perception, Planning and Collaboration," Biomimetic Intelligence and Robotics, vol. 5, no. 2, Art. no. 100203, 2025.

[5] K. McFall, K. Huang, H. Gilbert, M. Jouaneh, H. Bai, and D. Auslander, "Mechatronics and Robotics Education: Standardizing Foundational Key Concepts," Journal of Higher Education Theory and Practice, vol. 20, no. 10, Art. no. 3653, Dec. 2020, doi: 10.33423/jhetp.v20i10.3653.

[6] J. Weinberg, "A Multidisciplinary Model for Using Robotics in Engineering Education," in Proceedings of the ASEE Annual Conference and Exposition, 2001. [Online]. Available: https://peer.asee.org/a-multidisciplinary-model-for-using-robotics-in-engineering-education.pdf

[7] A. Concha Sánchez, J. F. Figueroa-Rodríguez, A. G. Fuentes-Covarrubias, R. Fuentes-Covarrubias, and S. K. Gadi, "Recycling and Updating an Educational Robot Manipulator with Open-Hardware Architecture," Sensors, vol. 20, no. 6, Art. no. 1694, 2020, doi: 10.3390/s20061694.

[8] A. Concha Sánchez, J. F. Figueroa-Rodríguez, A. G. Fuentes-Covarrubias, R. Fuentes-Covarrubias, and S. K. Gadi, "Recycling and updating an educational robot manipulator with open-hardware architecture," Sensors, vol. 20, no. 6, Art. no. 1694, 2020, doi: 10.3390/s20061694.

[9] J. Zhao, Y. Gu, Q. Hou, and Z. Zhang, "Research on educational robot system based on vision processing," Sensors, vol. 23, no. 2, Art. no. 1038, 2023, doi: 10.3390/s23021038.

[10] R. de J. Kelly-Martínez, I. G. Zepeda-Valencia, and M. del C. Monroy-Lara, "Modelado de servo accionamientos analógicos de velocidad con un motor PMDC embebido," Revista ICBI, 2023.

[11] A. M. Kassem, H. M. Hasanien, and S. A. Zaid, "Modelling and control of DC motor speed and position," in Proceedings of Atlantis Press, 2020.

[12] D. M. Ovalle Martínez, J. M. Moreno Quintero, and L. F. Combita, "Diseño e implementación de un sistema de control de velocidad y posición de un motor DC," Revista Tecnologías de la Información Aplicadas, vol. 8, no. 1, 2021. [Online]. Available: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tia/article/view/21951

[13] T. Pallejà Cabré, A. Saiz Vela, M. Tresanchez Ribes, J. Moreno Blanc, J. Ribó Pablo, and F. Clariá Sancho, "Didactic platform for DC motor speed and position control in Z-plane," ISA Transactions, vol. 118, pp. 116–132, 2021.

[14] G. Hernández Millán, L. H. Ríos Gonzales, and M. Bueno López, "Implementación de un controlador de posición y movimiento de un robot móvil diferencial," Tecnura, 2019.

[15] M. Ali, S. T. Hussain, and M. Usman, "DC motor speed control using PID on Arduino and MATLAB," 2023. [Online]. Available: ResearchGate.

[16] M. Nassim and A. Abdelkader, "Speed control of DC motor using fuzzy PID controller," arXiv preprint arXiv:2108.05450, 2021.

[17] J. C. Crisóstomo Reyna, "Diseño de un controlador descentralizado por retroalimentación de posición y velocidad para mejorar el control de posición de un robot de tres grados de libertad," Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2024.

[18] S. Mobayen, F. Piltan, and S. Mobayen, "Advances in control techniques for rehabilitation exoskeleton robots," Preprints.org, 2024. [Online]. Available: https://www.preprints.org/

[19] P. Román Graván and P. Tadeu, "Robotics in university teacher training: A comparative analysis of perceptions between Spain and Portugal," IJERI: International Journal of Educational Research and Innovation, no. 23, 2025.

[20] D. Figueiredo and A. J. M. Osório, "Estado da arte da robótica educativa na escolaridade inicial," in Proc. XV Congreso Internacional Gallegoportugués de Psicopedagogía / II Congreso de la Asociación Científica Internacional de Psicopedagogía, A Coruña, Spain, Sep. 2019, pp. 3997–4008.