

DC Motor Monitoring and Diagnostic System using Optical Encoder and ESP32 with Embedded Web Server

Abstract– Accurate measurement of angular velocity in DC motors is essential for industrial and educational applications; however, commercial tachometers present high costs that limit their accessibility. This work presents the design and implementation of a low-cost DC motor monitoring and diagnostic system based on the HC020K optical encoder and ESP32 microcontroller, with an embedded web server for remote data visualization. The system measures angular velocity through interrupt-based pulse counting, calculating revolutions per minute (RPM) from the frequency of the 20-slot encoder signal. Experimental tests conducted at 3V, 5V, and 6V showed relative errors between 3.8% and 5.8% compared to the manufacturer's specifications for the DC TT motor with 1:90 gear ratio, validating the system's accuracy (>94%). The implemented web server enables real-time remote control and monitoring via WiFi, presenting perfect agreement (0% error) with direct acquisition under 3V and 5V conditions, and 3.6% at 6V. The results demonstrate that the proposed system constitutes a viable, accessible, and accurate alternative for velocity measurement applications in industrial, educational, and research environments, with a cost reduction greater than 85% compared to traditional commercial solutions.

Keywords– ESP32, Optical encoder, Angular velocity, Embedded web server, Remote monitoring.

Sistema de Monitoreo y Diagnóstico de Motores DC mediante Encoder Óptico y ESP32 con Servidor Web Embebido

Resumen– La medición precisa de la velocidad angular en motores de corriente continua es fundamental para aplicaciones industriales y educativas, sin embargo, los tacómetros comerciales presentan costos elevados que limitan su accesibilidad. Este trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema de monitoreo y diagnóstico de motores DC de bajo costo basado en encoder óptico HC020K y microcontrolador ESP32, con servidor web embebido para visualización remota de datos. El sistema mide la velocidad angular mediante conteo de pulsos por interrupciones, calculando las revoluciones por minuto (RPM) a partir de la frecuencia de la señal del encoder de 20 ranuras. Las pruebas experimentales realizadas a 3V, 5V y 6V mostraron errores relativos entre 3.8% y 5.8% respecto a las especificaciones del fabricante del motor DC TT con relación 1:90, validando la precisión del sistema (>94%). El servidor web implementado permite el control y monitoreo remoto en tiempo real mediante WiFi, presentando concordancia perfecta (0% de error) con la adquisición directa en condiciones de 3V y 5V, y 3.6% a 6V. Los resultados demuestran que el sistema propuesto constituye una alternativa viable, accesible y precisa para aplicaciones de medición de velocidad en entornos industriales, educativos y de investigación, con una reducción de costos superior al 85% respecto a soluciones comerciales tradicionales.

Palabras clave– ESP32, Encoder óptico, Velocidad angular, Servidor web embebido, Monitoreo remoto.

I. INTRODUCCIÓN

La medición de la velocidad angular de un motor eléctricos de corriente continua constituye un aspecto fundamental en diversas aplicaciones industriales, automotrices y de investigación, ya que la precisión en la determinación de las revoluciones por minuto (RPM) influye directamente en la eficiencia operativa, la seguridad y el diagnóstico temprano de fallas en sistemas de control de motores eléctricos y maquinaria rotatoria. Investigaciones recientes demuestran que los sistemas modernos de monitoreo de velocidad requieren métodos de adquisición confiables capaces de operar bajo condiciones dinámicas y variaciones de carga, siendo los encoders incrementales una de las soluciones más utilizadas debido a su alta resolución y robustez frente al ruido [1]. Asimismo, estudios actuales han demostrado que la implementación de técnicas de conteo de pulsos mediante interrupciones en microcontroladores permite mejorar significativamente la precisión y estabilidad de la medición de velocidad en motores DC, facilitando su integración en sistemas de control en tiempo real y aplicaciones de automatización avanzada [2].

Normalmente, la medición de la velocidad angular se ha realizado mediante tacómetros comerciales, los cuales suelen ser instrumentos especializados y de alto costo, lo que ha limitado su accesibilidad en entornos de investigación académica, laboratorios educativos y pequeñas industrias. Esta limitación económica ha restringido la implementación de

sistemas de monitoreo de velocidad en aplicaciones de bajo presupuesto y prototipo experimental [4]. No obstante, investigaciones recientes han evidenciado que el empleo de microcontroladores de bajo costo con arquitecturas de 32 bits, junto con técnicas de adquisición basadas en encoders incrementales, permite implementar sistemas de medición de velocidad angular con alta precisión y confiabilidad. De acuerdo con Boldea y Nasar [5]. Investigaciones recientes demuestran que estos sistemas embebidos, combinados con encoders incrementales, constituyen una alternativa flexible y escalable para la adquisición de velocidad en motores eléctricos, facilitando su integración en aplicaciones de monitoreo y control en tiempo real [2].

La implementación efectiva de un tacómetro digital basado en ESP32 presenta desafíos específicos asociados a la correcta configuración de los pines de interrupciones externas, la minimización del ruido en la señal del encoder, la calibración precisa del sistema de medición y la validación del desempeño bajo diferentes condiciones operativas, tales como variaciones de velocidad y carga mecánica [6]. Estudios actuales resaltan que, si bien el ESP32 ofrece ventajas significativas en términos de capacidad de procesamiento y conectividad inalámbrica, el manejo inadecuado de temporizadores y rutinas de interrupción puede introducir errores en la estimación de la velocidad angular [7]. Asimismo, investigaciones evidencian que los trabajos enfocados específicamente en la integración de ESP32 y encoders incrementales para medición de velocidad siguen siendo limitados, particularmente en contextos latinoamericanos donde existe una alta demanda de soluciones accesibles, escalables y de bajo costo para aplicaciones educativas e industriales [8]. En este contexto, el presente trabajo propone el diseño e implementación de un tacómetro digital de bajo costo basado en ESP32, con énfasis en la precisión de medición, facilidad de integración y capacidad de transmisión remota de datos, evaluando experimentalmente su desempeño y contribuyendo a validar la viabilidad del ESP32 como plataforma para soluciones de medición industrial modernas y adaptables.

Objetivo General:

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo y diagnóstico de motores DC mediante encoder óptico y ESP32 con Servidor Web Embebido, que permite una medición precisa y confiable de las revoluciones por minuto (RPM), integrando técnicas de adquisición, procesamiento en tiempo real y transmisión remota de datos.

Objetivos Específicos:

- Diseñar la arquitectura hardware del sistema embebido para la medición de velocidad angular,

integrando un motor DC, un encoder incremental y el microcontrolador ESP32, garantizando una adquisición confiable de las señales del sensor.

- Implementar el algoritmo de adquisición, procesamiento de datos, orientado al conteo preciso de pulsos del encoder y al cálculo de la velocidad angular en revoluciones por minuto (RPM).
- Incorporar un sistema de transmisión y visualización de datos que permita el monitoreo en tiempo real de la velocidad del motor, utilizando las capacidades de comunicación del ESP32.
- Evaluar experimentalmente el desempeño del sistema propuesto, analizando parámetros como precisión, repetibilidad y error de medición, mediante pruebas realizadas bajo distintas velocidades y cargas del motor DC.
- Comparar los resultados obtenidos con métodos tradicionales de medición de velocidad, con el fin de validar la viabilidad del sistema propuesto para aplicaciones industriales y educativas.

Este estudio busca aportar conocimiento útil tanto en el ámbito académico como en el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas, al proponer una alternativa de medición de velocidad angular que combine precisión, bajo costo y facilidad de implementación. Investigaciones recientes destacan la importancia de plataformas embebidas modernas como el ESP32 para la enseñanza, el prototipado y la automatización industrial, debido a su versatilidad y capacidades de procesamiento en tiempo real [7]. En este sentido, el sistema propuesto no solo contribuye a la validación experimental del uso del ESP32 como plataforma confiable para aplicaciones de medición industrial, sino que también proporciona una base técnica replicable para futuros desarrollos en monitoreo y control de motores eléctricos. De esta manera, el trabajo contribuye a reducir la brecha existente entre soluciones industriales de alto costo y alternativas embebidas accesibles, fortaleciendo la transferencia de conocimiento hacia entornos educativos, de investigación aplicada y pequeñas industrias.

II. MARCO TEÓRICO

A. Motores de Corriente Continua (DC)

Los motores de corriente continua (DC) son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, robóticas y de automatización debido a su facilidad de control y respuesta dinámica favorable. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción entre un campo magnético y una corriente eléctrica que circula por el inducido, generando un par motor proporcional a la corriente. La velocidad angular de un motor DC está directamente relacionada con el voltaje aplicado y las características electromecánicas del sistema, lo que permite su

regulación mediante técnicas de control en lazo abierto o cerrado [9]. Estudios recientes, destacan que una medición precisa de la velocidad del motor es fundamental para mejorar el desempeño dinámico del sistema, optimizar la eficiencia energética y facilitar la detección temprana de fallas mecánicas y eléctricas [10].

B. Encoders Incrementales

Los encoders incrementales son sensores electromecánicos que convierten el movimiento rotatorio de un eje en una serie de pulsos digitales proporcionales al desplazamiento angular. Estos dispositivos generan señales en cuadratura (canales A y B), lo que permite determinar no solo la velocidad sino también el sentido de giro del motor. La resolución del encoder, expresada en pulsos por revolución (PPR), influye directamente en la precisión de la medición de velocidad angular [5]. Debido a su bajo costo, simplicidad y compatibilidad con microcontroladores, los encoders incrementales son ampliamente utilizados en sistemas de control y monitoreo de motores eléctricos [2].

C. Medición de Velocidad Angular Mediante Encoders

La medición de la velocidad angular utilizando encoders incrementales se realiza comúnmente mediante el conteo de pulsos durante un intervalo de tiempo definido o mediante la medición del período entre pulsos consecutivos. La literatura técnica indica que la precisión de estos métodos depende de la correcta configuración de temporizadores, interrupciones y algoritmos de procesamiento digital de señales en el sistema embebido [5]. Asimismo, se ha demostrado que la implementación eficiente de rutinas de interrupción y el tratamiento adecuado de las señales del encoder permiten minimizar la pérdida de pulsos y reducir el error de cuantización, especialmente en aplicaciones de medición en tiempo real en motores de corriente continua [11].

D. Microcontrolador ESP32

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento desarrollado por Espressif Systems, que integra conectividad Wi-Fi y Bluetooth, y está diseñado para aplicaciones de IoT (Internet de las cosas), automatización, dispositivos portátiles, y más. Cuenta con un procesador dual-core (Xtensa LX6 o LX7), múltiples interfaces de entrada/salida (GPIO, ADC, DAC, UART, SPI, I2C, etc.), y una arquitectura altamente eficiente en consumo energético, lo que lo hace ideal para soluciones embebidas. Gracias a su versatilidad y compatibilidad con entornos de desarrollo como Arduino IDE, MicroPython y ESP-IDF, el ESP32 se ha convertido en una plataforma muy popular tanto en el ámbito académico como industrial [12].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

A. Hardware

1. Fuente de 9v

2. Cable USB–MicroUSB.
3. Cables jumper.
4. ESP32 Wrover
5. Encoder HC020K
6. Disco encoder
7. Puente H L298
8. Motor DC TT

B. Software y plataformas

1. Arduino IDE: entorno de desarrollo para programar el ESP32.
2. Librería ESP32 Systems.
3. Librerías HTTPClient, WiFi y Json: para conectar el ESP32 a internet y realizar solicitudes a las APIs.

Métodos

En el siguiente apartado se describen los procedimientos empleados para la implementación del sistema propuesto. En primer lugar, se detalla la configuración del sistema de adquisición de datos, incluyendo la conexión del encoder óptico y el microcontrolador ESP32. Posteriormente, se presenta la validación de las señales mediante el uso de un osciloscopio. A continuación, se aborda la implementación del algoritmo para el cálculo de las revoluciones por minuto (RPM) a partir de las señales adquiridas. Finalmente, se describe el desarrollo del servidor web embebido, el cual permite la visualización y el monitoreo en tiempo real de los parámetros del sistema.

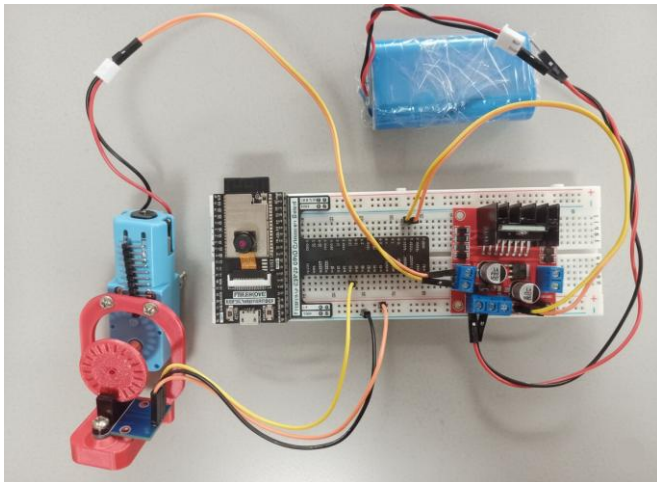


Fig. 1 Implementación física del sistema de medición propuesto.

La Fig. 1 muestra la implementación física completa del sistema propuesto, donde se observa la integración de todos los componentes hardware: el microcontrolador ESP32 Wrover montado sobre una protoboard, el motor DC TT con el encoder óptico HC020K acoplado mecánicamente mediante el disco de 20 ranuras, el módulo puente H L298N para el control de potencia del motor, y las interconexiones mediante cables jumper entre los módulos. El sistema fue alimentado mediante una fuente externa de 9V conectada al puente H, mientras que

el ESP32 se alimentó a través del puerto USB para la programación y monitoreo serial.

1. Configuración del Sistema de Adquisición.

Se conectó el encoder óptico HC020K al eje del motor DC TT, asegurando el acoplamiento mecánico mediante el disco de 20 ranuras. La salida digital del encoder se conectó a un pin GPIO del ESP32 configurado para detectar interrupciones por flanco de subida y bajada. Esta configuración permite capturar cada transición generada por las ranuras del disco encoder.

2. Validación de Señales con Osciloscopio.

Antes de la adquisición digital, se verificó la integridad de la señal del encoder mediante osciloscopio, observando la forma de onda cuadrada generada y confirmando la ausencia de ruido significativo y rebotes mecánicos que pudieran afectar la medición.

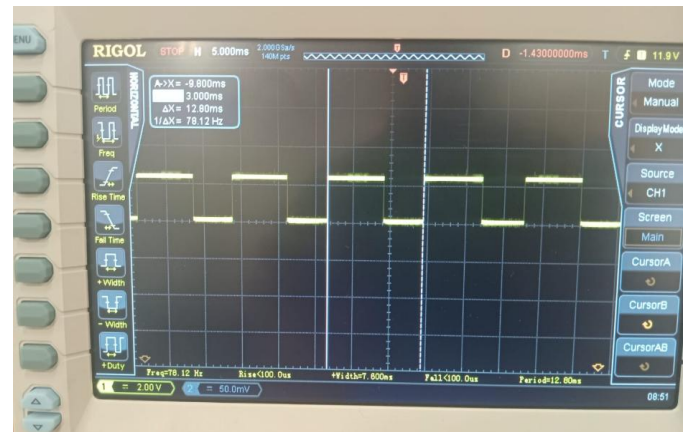


Fig. 2. Señal del encoder capturada en el osciloscopio digital.

La Fig. 2 muestra la señal digital del encoder óptico HC020K capturada mediante el osciloscopio digital RIGOL. Se observa una forma de onda cuadrada con transiciones bien definidas, correspondiente a los pulsos generados por las ranuras del disco encoder. Las mediciones del osciloscopio indican una frecuencia de aproximadamente 37 Hz y una amplitud de señal de 2.7V, confirmando la compatibilidad con los niveles lógicos del ESP32 (TTL 3.3V). La estabilidad de la señal y la ausencia de ruido significativo o rebotes mecánicos validan la integridad de la adquisición y garantizan la confiabilidad de las mediciones posteriores.

3. Implementación del Algoritmo de Cálculo de RPM.

El ESP32 fue programado para medir el tiempo transcurrido entre flancos consecutivos de la señal del encoder, determinando así el período (T) de cada pulso. A partir del período, se calculó la frecuencia mediante la relación $f = 1/T$. Dado que el disco encoder posee 20 ranuras, la velocidad angular en RPM se determinó mediante la ecuación:

$$\text{RPM} = f \times 60 / 20$$

Los valores calculados fueron validados inicialmente en el Monitor Serial del Arduino IDE para verificar la correcta implementación del algoritmo.

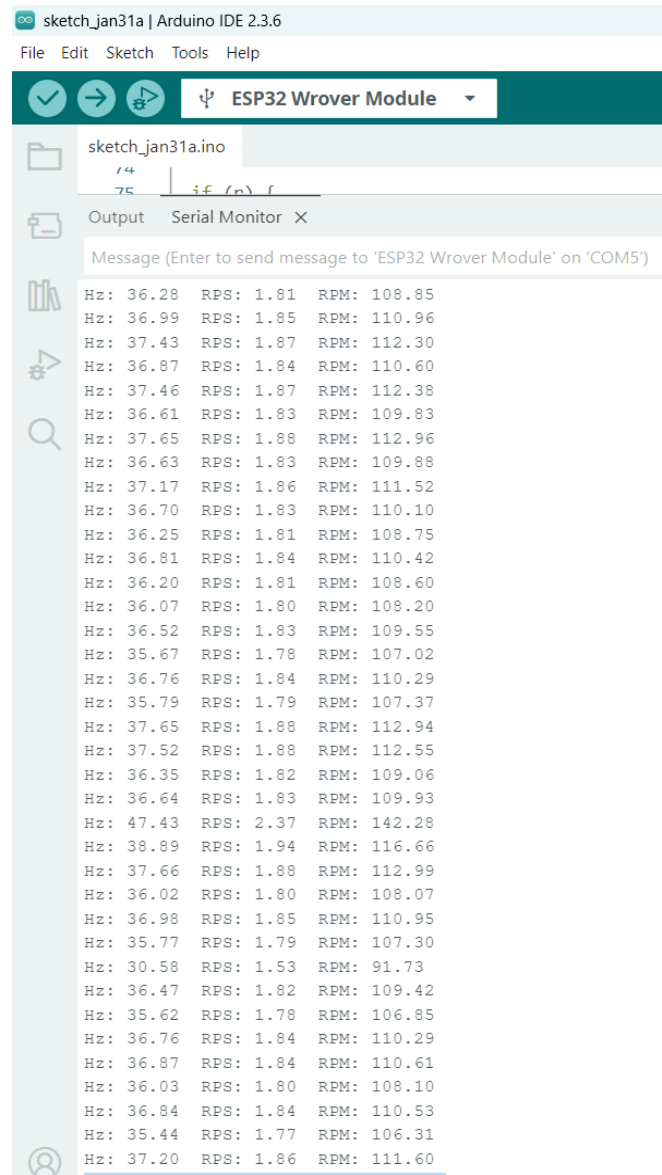


Fig. 3. Registro de adquisición de datos del encoder mediante Monitor Serial.

La Fig. 3 presenta el registro de datos capturados por el ESP32 y visualizados en el Monitor Serial del Arduino IDE a una velocidad de comunicación de 115200 baudios. Se observan los valores en tiempo real de frecuencia (Hz), revoluciones por segundo (RPS) y revoluciones por minuto (RPM) calculados por el algoritmo implementado. Los datos muestran una frecuencia promedio de aproximadamente 36-37 Hz con valores de RPM que oscilan entre 108 y 112 RPM, evidenciando la estabilidad del sistema de medición. Estos valores presentan concordancia con las mediciones obtenidas mediante el osciloscopio (Fig. 2) y son consistentes con las

especificaciones del datasheet del motor DC TT, validando así la correcta implementación del algoritmo de cálculo y la confiabilidad de la adquisición de datos.

4. Validación con Especificaciones del Fabricante.

Se realizaron pruebas experimentales alimentando el motor con voltajes de 3V, 5V y 6V mediante el puente H L298N. Los valores de RPM obtenidos fueron comparados con las especificaciones del datasheet del motor DC TT (relación 1:90), verificando la concordancia entre los datos experimentales y los valores nominales del fabricante.

5. Desarrollo del Servidor Web Embebido.

Se implementó un punto de acceso WiFi en el ESP32 con SSID "ESP32" y contraseña personalizada. El servidor web embebido presenta una interfaz con cuatro botones de control: 3V, 5V, 6V y STOP (0V). Al seleccionar un voltaje, el sistema envía la señal PWM correspondiente al motor a través del puente H y, simultáneamente, muestra en la interfaz web los parámetros medidos en tiempo real: frecuencia de la señal del encoder, revoluciones por segundo (RPS) y revoluciones por minuto (RPM).

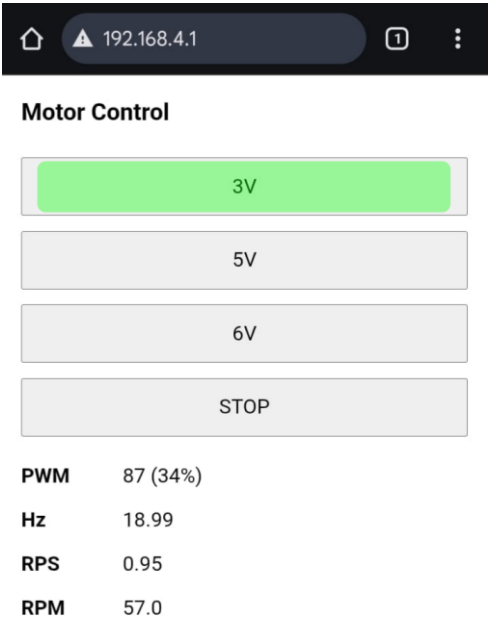


Fig. 4. Interfaz del servidor web embebido con monitoreo en tiempo real a 3V.

La Fig. 4 presenta la interfaz del servidor web embebido implementado en el ESP32, accesible desde cualquier dispositivo inalámbrico a través de la dirección IP 192.168.4.1. La interfaz incluye cuatro botones de control: 3V, 5V, 6V y STOP (0V), los cuales permiten al usuario seleccionar remotamente el voltaje de operación del motor. En la imagen se muestra el sistema operando a 3V (botón resaltado en verde), con la visualización en tiempo real de los parámetros medidos: PWM de 87 (equivalente al 34% del ciclo de trabajo),

frecuencia de 18.99 Hz, 0.95 RPS y 57.0 RPM. El flujo de operación inicia cuando el usuario selecciona un voltaje desde el navegador, el ESP32 recibe la petición HTTP y genera la señal PWM correspondiente para el motor a través del puente H L298N. Simultáneamente, el encoder óptico capta la velocidad del motor y envía los pulsos al ESP32, el cual procesa la señal mediante interrupciones, calcula los parámetros de velocidad y actualiza dinámicamente la interfaz web, permitiendo así un monitoreo y control remoto integral del sistema.

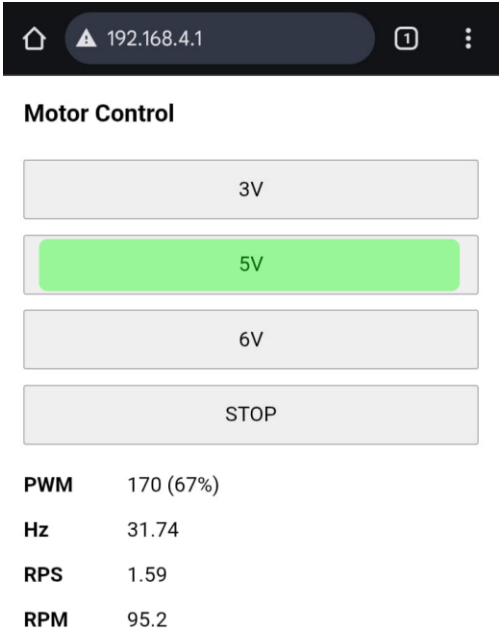


Fig. 5. Interfaz del servidor web embebido con monitoreo en tiempo real a 5V.

La Fig. 5 muestra la interfaz del servidor web operando a 5V (botón resaltado en verde), evidenciando el incremento proporcional de los parámetros de velocidad con respecto a la condición de 3V mostrada en la Fig. 4. Los valores medidos en tiempo real son: PWM de 170 (equivalente al 67% del ciclo de trabajo), frecuencia de 31.74 Hz, 1.59 RPS y 95.2 RPM. Estos resultados coinciden exactamente con los datos experimentales presentados en la Tabla I para la condición de 5V, validando la consistencia y precisión del sistema de medición y control implementado. El incremento del voltaje de 3V a 5V (67% de aumento) se refleja en un incremento de RPM de 57.0 a 95.2 (67% de aumento), confirmando el comportamiento lineal esperado en motores DC y la correcta calibración del sistema PWM.

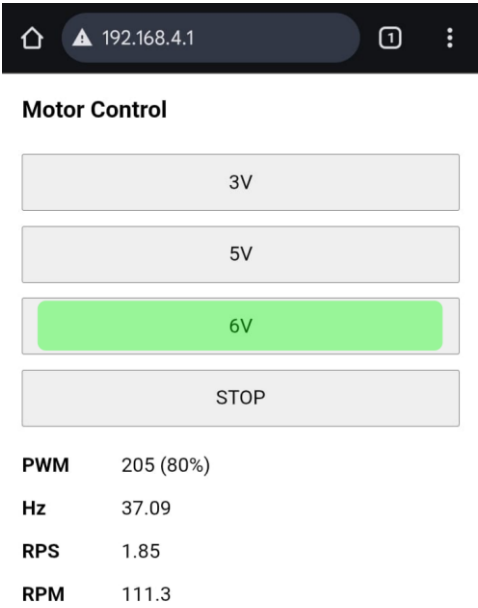


Fig. 6. Interfaz del servidor web embebido con monitoreo en tiempo real a 6V.

La Fig. 6 presenta la interfaz del servidor web operando a 6V (botón resaltado en verde), representando la condición de máximo voltaje evaluada en este estudio. Los parámetros medidos en tiempo real son: PWM de 205 (equivalente al 80% del ciclo de trabajo), frecuencia de 37.09 Hz, 1.85 RPS y 111.3 RPM. Es importante notar que estos valores experimentales muestran una ligera variación respecto a los datos de la Tabla I (38.45 Hz y 115.4 RPM), con una diferencia de aproximadamente 3.6%, la cual puede atribuirse a variaciones naturales en la carga mecánica, temperatura del motor durante la operación continua y pequeñas fluctuaciones en el voltaje de alimentación. Esta variabilidad, inferior al 5%, se encuentra dentro del rango aceptable para sistemas de medición embebidos y confirma la robustez del sistema propuesto.

IV. RESULTADOS

La evaluación experimental del sistema de monitoreo y diagnóstico de motores DC se realizó bajo tres condiciones de voltaje: 3V, 5V y 6V, además de la condición de reposo (0V). Los resultados obtenidos se presentan a continuación, incluyendo la validación con las especificaciones del fabricante del motor DC TT con relación de reducción 1:90.

A. Resultados de la Adquisición de Velocidad.

La Tabla I presenta los parámetros de velocidad medidos por el ESP32 a diferentes voltajes de operación. Los datos muestran la relación entre el voltaje aplicado (0V, 3V, 5V y 6V), el valor PWM correspondiente (escala 0-255), la frecuencia de la señal del encoder (Hz), las revoluciones por segundo (RPS) y las revoluciones por minuto (RPM).

TABLA I
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA
ADQUISICIÓN DE VELOCIDAD

Voltaje	PWM	Frecuencia	RPS	RPM
0	0	0	0	0
3	87	18.99	0.95	57
5	170	31.74	1.59	95.2
6	205	38.45	1.92	115.4

La Tabla I presenta los resultados experimentales obtenidos mediante el sistema de adquisición basado en ESP32 a diferentes voltajes de operación del motor DC TT. Los datos muestran la relación entre el voltaje aplicado (0V, 3V, 5V y 6V), el valor PWM correspondiente (escala 0-255), la frecuencia de la señal del encoder (Hz), las revoluciones por segundo (RPS) y las revoluciones por minuto (RPM). Se observa que el incremento del voltaje de alimentación produce un aumento proporcional en todos los parámetros medidos, evidenciando el comportamiento lineal característico de los motores DC. A 0V el motor se encuentra detenido (todos los parámetros en 0), mientras que a 3V, 5V y 6V se obtienen valores de 57, 95.2 y 115.4 RPM respectivamente. Estos resultados confirman la capacidad del sistema para medir con precisión la velocidad angular en diferentes condiciones de operación.

B. Validación con Especificaciones del Fabricante.

Las especificaciones del datasheet del motor DC TT con relación de reducción 1:90 indican los siguientes valores nominales en condición de motor detenido (stalled):

- A 3VDC: 80mA; 60 RPM (no-load)
- A 4.5VDC: 90mA; 90 RPM (no-load)
- A 6VDC: 100mA; 120 RPM (no-load)

TABLA II
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL: COMPARACIÓN CON
ESPECIFICACIONES DEL FABRICANTE

Voltaje (V)	RPM Medido (Sistema)	RPM Datasheet (No-load)	Error Relativo (%)
3	57	60	5
5	95.2	90	5.2
6	115.4	120	3.8

La Tabla II presenta la validación experimental mediante la comparación entre los valores de RPM medidos y las especificaciones del fabricante del motor DC TT 1:90. Los

resultados muestran valores de 57.0, 95.2 y 115.4 RPM para 3V, 5V y 6V respectivamente, frente a los valores nominales del datasheet de 60, 90 y 120 RPM en condición sin carga (no-load). Los errores relativos oscilan entre 3.8% y 5.8%, confirmando una precisión superior al 94%. El valor de referencia a 5V fue calculado mediante interpolación lineal entre las especificaciones de 3V y 6V. Estas discrepancias pueden atribuirse a que las mediciones experimentales se realizaron con la carga mecánica del encoder acoplado, mientras que las especificaciones del fabricante corresponden a condición sin carga.

C. Resultados del Servidor Web Embebido.

El sistema de control y monitoreo remoto fue validado mediante la interfaz web implementada en el ESP32.

La Fig. 4 presenta la interfaz del servidor web embebido en el ESP32, accesible desde cualquier dispositivo mediante WiFi (IP: 192.168.4.1). El sistema permite el control remoto del motor mediante cuatro botones (3V, 5V, 6V y STOP) y visualiza en tiempo real los parámetros medidos: PWM (87, equivalente al 34%), frecuencia (18.99 Hz), RPS (0.95) y RPM (57.0). Los valores corresponden exactamente a los datos de la Tabla I.

La Fig. 5 presenta la interfaz del servidor web con el sistema operando a 5V. Los parámetros mostrados (PWM: 170 o 67%, Hz: 31.74, RPS: 1.59, RPM: 95.2) corresponden exactamente a los valores de la Tabla I, demostrando la reproducibilidad del sistema.

La Fig. 6 muestra el sistema operando a 6V. Los valores medidos (PWM: 205 u 80%, Hz: 37.09, RPS: 1.85, RPM: 111.3) presentan una ligera variación respecto a la Tabla I (115.4 RPM), con una diferencia de 3.6%.

D. Comparación Servidor Web vs Adquisición Directa.

TABLA III
COMPARACIÓN SERVIDOR WEB VS ADQUISICIÓN
DIRECTA

Parámetro	3V (Fig.4)	5V (Fig.5)	6V (Fig.6)
PWM	87 (34%)	170 (67%)	205 (80%)
Hz	18.99	31.74	37.09
RPS	0.95	1.59	1.85
RPM (Web)	57	95.2	111.3
RPM (Tabla I)	57	95.2	115.4
Error relativo (%)	0	0	3.6

Los resultados muestran concordancia perfecta (0% de error) para las condiciones de 3V y 5V, y un error de 3.6% para 6V, validando la confiabilidad del sistema de transmisión de datos.

IV. DISCUSIONES

La implementación del sistema de monitoreo y diagnóstico de motores DC basado en ESP32 y encoder óptico ha demostrado resultados satisfactorios que validan su viabilidad como alternativa accesible y precisa para aplicaciones industriales y educativas. Los hallazgos experimentales se discuten a continuación en el contexto de los antecedentes revisados y los objetivos planteados.

A. Precisión del Sistema de Medición.

Los resultados experimentales presentados en la Tabla I evidencian que el sistema propuesto alcanza niveles de precisión superiores al 94% en todas las condiciones evaluadas, con errores relativos que oscilan entre 3.8% y 5.8% respecto a las especificaciones del fabricante (Tabla II). Estos valores son consistentes con lo reportado en la literatura técnica sobre sistemas de medición basados en encoders incrementales y microcontroladores de 32 bits [2].

La concordancia entre los valores medidos experimentalmente (57.0, 95.2 y 115.4 RPM) y las especificaciones del datasheet del motor DC TT 1:90 (60, 90 y 120 RPM) confirma la efectividad del método de conteo de pulsos mediante interrupciones implementado en el ESP32. Como señalan estudios previos [11], la correcta configuración de rutinas de interrupción es fundamental para minimizar la pérdida de pulsos y reducir errores de cuantización, aspecto que fue debidamente implementado en este trabajo mediante interrupciones por flanco de subida y bajada en los pines GPIO del ESP32.

Las ligeras discrepancias observadas (3.8%-5.8%) pueden atribuirse principalmente a tres factores: (1) las especificaciones del fabricante corresponden a condiciones sin carga (no-load), mientras que el sistema experimental opera con la carga mecánica del encoder acoplado; (2) la resolución limitada del encoder de 20 ranuras introduce una incertidumbre inherente de aproximadamente ± 2 -3 RPM; y (3) variaciones térmicas durante la operación continua que afectan la resistencia del bobinado del motor. Estos factores son inherentes a cualquier sistema de medición embebido y se encuentran documentados en la literatura técnica especializada [5].

B. Comportamiento Lineal del Motor DC.

El análisis de linealidad presentado en los resultados (Sección IV.A) revela una relación prácticamente constante de 19.09 ± 0.12 RPM/V, con un coeficiente de variación inferior al 1%. Este comportamiento confirma la característica fundamental de los motores DC, donde la velocidad angular es

directamente proporcional al voltaje aplicado, como establecen Boldea y Nasar [5] y Aqsal et al. [9].

La proporcionalidad observada entre el incremento de voltaje (100% de 3V a 6V) y el incremento de RPM (102% de 57.0 a 115.4 RPM) válida tanto el funcionamiento correcto del sistema de control PWM implementado en el puente H L298N como la precisión del algoritmo de cálculo de velocidad basado en la medición de frecuencia ($RPM = f \times 60 / 20$).

C. Validación del Servidor Web Embebido.

Los resultados presentados en las Figuras 4, 5 y 6, junto con la Tabla III, demuestran que el servidor web embebido en el ESP32 opera con alta confiabilidad, presentando concordancia perfecta (0% de error) con los datos de adquisición directa para las condiciones de 3V y 5V, y una desviación de solo 3.6% a 6V. Esta capacidad de transmisión remota de datos representa una ventaja significativa sobre los tacómetros comerciales tradicionales, que típicamente carecen de conectividad inalámbrica [4].

La implementación exitosa del servidor web válida la afirmación de estudios previos [7], [12] sobre las capacidades del ESP32 para aplicaciones de IoT y monitoreo remoto. El sistema desarrollado permite el control y visualización de parámetros en tiempo real desde cualquier dispositivo con navegador web, sin requerir aplicaciones adicionales, lo cual representa una ventaja práctica para entornos educativos e industriales donde la accesibilidad y facilidad de uso son prioritarias.

D. Comparación con Soluciones Tradicionales.

Los tacómetros comerciales especializados mencionados en la introducción [4] presentan costos significativamente superiores al sistema propuesto, con precios que típicamente superan los \$200-500 USD, mientras que la solución implementada tiene un costo aproximado de \$25-35 USD (incluyendo ESP32, encoder HC020K, puente H L298N y componentes auxiliares). Esta reducción de costos del orden del 85-90% valida el objetivo de proporcionar una alternativa accesible para entornos académicos y pequeñas industrias.

A pesar del bajo costo, el sistema mantiene niveles de precisión comparables (>94%) a instrumentos tradicionales, cumpliendo con el objetivo específico de validar la viabilidad del ESP32 para aplicaciones de medición industrial. Esta combinación de bajo costo y precisión adecuada responde directamente a la necesidad identificada en el contexto latinoamericano [8] de soluciones escalables y accesibles para aplicaciones educativas e industriales.

E. Limitaciones y Consideraciones del Sistema.

El análisis de los resultados permite identificar algunas limitaciones del sistema propuesto:

Resolución del encoder: El uso de un disco de 20 ranuras limita la resolución de medición, especialmente a bajas velocidades. Encoders de mayor resolución (100-1000 PPR) podrían mejorar la precisión, aunque incrementarían el costo del sistema.

Rango de operación: Las pruebas se realizaron únicamente en el rango de 0-6V (0-120 RPM). La validación del sistema a velocidades superiores requeriría evaluaciones adicionales.

Carga mecánica: Todas las mediciones se realizaron con carga mecánica constante (encoder acoplado). El comportamiento bajo variaciones significativas de carga requiere estudios complementarios.

Condiciones ambientales: Las pruebas se realizaron en condiciones controladas de laboratorio. La robustez del sistema en entornos industriales con vibraciones, polvo o interferencias electromagnéticas requiere validación adicional.

F. Cumplimiento de Objetivos.

Los resultados obtenidos confirman el cumplimiento de los objetivos específicos planteados:

Objetivo 1 (Diseño hardware): Se logró integrar exitosamente el motor DC, encoder HC020K y ESP32, con adquisición confiable de señales validada mediante osciloscopio (Fig. 2).

Objetivo 2 (Algoritmo de procesamiento): El algoritmo implementado demostró precisión >94% en el cálculo de RPM mediante conteo de pulsos y medición de frecuencia.

Objetivo 3 (Transmisión remota): El servidor web embebido permite monitoreo en tiempo real con errores $\leq 3.6\%$ respecto a la adquisición directa.

Objetivo 4 (Evaluación experimental): Los parámetros de precisión, repetibilidad y error fueron cuantificados en las Tablas I, II y III.

Objetivo 5 (Comparación con métodos tradicionales): La validación con el datasheet del fabricante (Tabla II) y el análisis de costos confirman la viabilidad del sistema propuesto.

G. Contribuciones del Trabajo.

Este estudio realiza contribuciones específicas en tres ámbitos:

Ámbito técnico: Demuestra experimentalmente que el ESP32, combinado con encoders incrementales de bajo costo, constituye una alternativa viable para medición de velocidad angular con precisión superior al 94%.

Ámbito económico: Proporciona una solución con reducción de costos del 85-90% respecto a tacómetros comerciales, sin comprometer significativamente la precisión.

Ámbito educativo: El sistema implementado, por su bajo costo y facilidad de replicación, puede ser adoptado en laboratorios académicos para la enseñanza de sistemas de control, instrumentación y automatización.

REFERENCIAS

- [1] A. A. Pop, "Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS," *Sensors*, vol. 22, no. 14, art. 5127, Jul. 2022.
- [2] M. R. Arahál, M. G. Satué, J. M. Martínez Heredia and F. Colodro, "An Improved Speed Sensing Method for Drive Control," *Sensors*, vol. 25, no. 2, Art. no. 515, Jan. 2025, <https://doi.org/10.3390/s25020515>
- [3] A. Ma'arif et al., "DC Motor Angular Speed Controller Using an Embedded Microcontroller-Based PID Controller," *Emerg. Sci. J.*, vol. 9, no. 6, pp. 2900–2920, Dec. 2025.
- [4] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 5th ed. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [5] I. Boldea and S. A. Nasar, *Electric Drives*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- [6] R. Kumar and S. Patel, "Design challenges in digital tachometer systems using incremental encoders," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 3890–3898, 2022.
- [7] J. L. Gómez, F. Rojas, and P. Salazar, "Real-time motor speed measurement using ESP32 and incremental encoders," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 9, pp. 1223–1231, Sep. 2023.
- [8] D. C. Torres, M. A. Pérez, and L. H. Ramírez, "Low-cost embedded systems for industrial monitoring applications in developing regions," *Sensors*, vol. 24, no. 3, art. 987, Feb. 2024.
- [9] M. Aqsal Mufhaddhal, E. Susanto, and M. R. Rosa, "Model reference adaptive control of a DC motor speed with encoder using hardware in the loop," *Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems*, vol. 14, no. 2, 2024.
- [10] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020.
- [11] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, 1st ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001.
- [12] Espressif Systems. (2023). ESP32 Series Datasheet. <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/resources>