

Diseño e implementación de un banco de pruebas automatizado para máquinas eléctricas

Ayron Zetino, Juan Jiménez

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú, EPSEVG
ayron.zetino@estudiantat.upc.edu, juan.manuel.jimenez@estudiantat.upc.edu

Resumen

Este proyecto trata sobre el diseño e implementación de un banco de pruebas automatizado para motores de corriente continua, utilizando la plataforma microcontroladora ESP32. La meta principal es generar gráficos de par contra velocidad a través de una aplicación Android. Se empleará el módulo BTN8982 para la conversión de potencia y se almacenarán los datos en una base de datos de Firebase. La automatización implica el control simultáneo de dos motores, uno actuando como freno para generar par al otro. La conexión Bluetooth permitirá el control remoto desde dispositivos Android, con informes generados en PDF y cargados automáticamente para su visualización en la nube. Se espera optimizar el proceso de pruebas, simplificar la adquisición y análisis de datos, y mejorar la eficiencia y precisión de los ensayos de motores eléctricos. Las conclusiones preliminares señalan un avance significativo en la automatización de bancadas de pruebas, prometiendo mejoras en la eficiencia y precisión de los ensayos, así como un monitoreo remoto más efectivo.

1. Introducción

Los motores de corriente continua (DC) se consideran vitales en numerosas industrias debido a su versatilidad y capacidad inherente para proporcionar control en parámetros como la velocidad, el par, rendimiento o posición [1] [2]. Además, su diseño relativamente simple y su capacidad para funcionar con una variedad de fuentes de alimentación los hacen indispensables en entornos donde la fiabilidad y la eficiencia energética son primordiales.

En este sentido, las bancadas de pruebas se presentan como entornos esenciales para medir y comprender a fondo el rendimiento de los motores eléctricos DC [3]. Estos sistemas brindan la infraestructura necesaria para llevar a cabo pruebas rigurosas que permiten evaluar y entender las características inherentes de estos motores, incluyendo su eficiencia, resistencia y comportamiento ante diferentes cargas y velocidades.

La motivación detrás de este proyecto surge de la complejidad y limitaciones experimentadas en la evaluación manual de motores eléctricos en el entorno educativo. La necesidad de simplificar y mejorar este proceso de evaluación, así como la falta de recursos accesibles para los estudiantes, impulsaron la creación de una solución que no solo optimizará las medidas, sino que también proporcionará una herramienta educativa y práctica para el análisis de motores eléctricos.

Se evidencian las desventajas del método tradicional de uso de las bancadas como lo son “mayor tiempo requerido, falta de confiabilidad y estabilidad de instrumentos de medición en el entorno de producción” [4], impulsando la necesidad de modernizar bancos de ensayo existentes [5]. La transición de un sistema esencialmente manual a uno automatizado se presenta como una solución para optimizar el tiempo, reducir errores en las medidas y evitar el calentamiento de la máquina durante los ensayos, contribuyendo así a la mejora continua en el ámbito de pruebas de motores eléctricos.

Parte fundamental de esta solución es el desarrollo de una aplicación móvil que complementa el equipo de control y medida diseñado para las bancadas de pruebas. Esta aplicación actúa como una interfaz intuitiva y funcional que se conecta al sistema mediante tecnología Bluetooth. No solo permite la monitorización en tiempo real de los parámetros críticos del motor, como la corriente, el voltaje y la velocidad, sino que también facilita la introducción de parámetros específicos para generar pruebas de par y velocidad de manera instantánea. Además, posibilita la creación de informes detallados basados en los resultados obtenidos durante las pruebas.

La combinación de la funcionalidad de la bancada de pruebas automatizada con la interacción proporcionada por la aplicación móvil pretende ofrecer una solución innovadora y práctica para la evaluación de motores eléctricos. Esta iniciativa busca ofrecer una plataforma intuitiva y accesible para usuarios interesados en comprender los principios y operación de los motores eléctricos mediante una interfaz amigable en dispositivos móviles, sentando las bases para potenciales desarrollos futuros en el ámbito de la automatización de pruebas motorizadas.

2. Diseño del banco de pruebas

La bancada diseñada para este proyecto consta de un motor de testeo (UUT, unit under test), y de un freno. El freno será otro motor acoplado mecánicamente al motor UUT, el cual a partir de las ecuaciones de fuerza electromotriz y par mecánico mostradas anteriormente, vamos a crear un control para poder regularlo de manera automática (control de par).

La prueba consistirá en alimentar el motor UUT a diferentes tensiones de operación, y para cada una de ellas aplicar diferentes valores de Par actuando a través del freno. Es decir, el motor UUT lo alimentamos con un voltaje fijo y al motor Freno le regulamos el Par.

Para cada uno de estos estados, tomaremos datos de tensión, corriente, velocidad y par a través de sensores que

seleccionaremos más adelante en este documento; y que nos servirán para crear las curvas antes mencionadas.

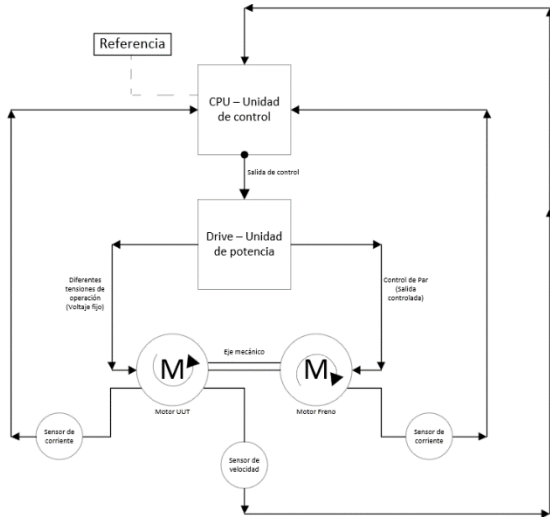


Fig. 1. Diagrama general del proyecto

Para alimentar estos dos motores, tomamos la decisión de utilizar el módulo "DC Motor Control Shield with BTN8982" de INFINEON, que cumple con los requerimientos específicos de los motores de corriente continua suministrados por la universidad (Parvalux MPM4-0002/CONT), cada uno con una potencia de 90W.

El medio puente BTN8982TA es fácil de controlar aplicando señales de nivel lógico a los pines IN e INH. Cuando se aplica un PWM al pin IN, la corriente suministrada al motor puede ser controlada con el ciclo de trabajo del PWM.

Además, tiene la capacidad de controlar motores de hasta 250 W de carga continua y permite PWM de alta frecuencia llegando hasta los 30 kHz [6].

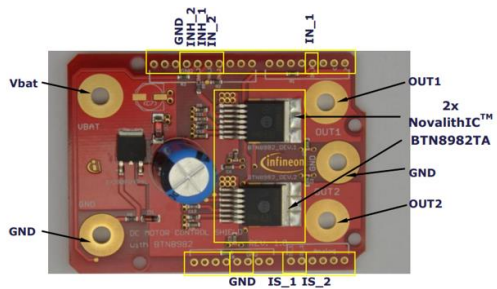


Fig. 2. Motor control shield de Infineon.

El banco de pruebas se ha construido mediante la elaboración de una caja que integra distintos elementos funcionales. Esta caja incluye una entrada de alimentación de voltaje desde la fuente que proveerá energía a la sección de potencia, así como dos salidas de voltaje PWM derivadas de esta misma fuente. Para el control del sistema, se dispone de una entrada de alimentación a través de un conector USB tipo B. Además, se han incorporado dos entradas para sensores LEM, utilizadas para la medición precisa de corriente, y una entrada específica para el encoder modelo HEDS-5500-A11

[7], esencial en la medición de velocidad, según se muestra en la Figura 3.

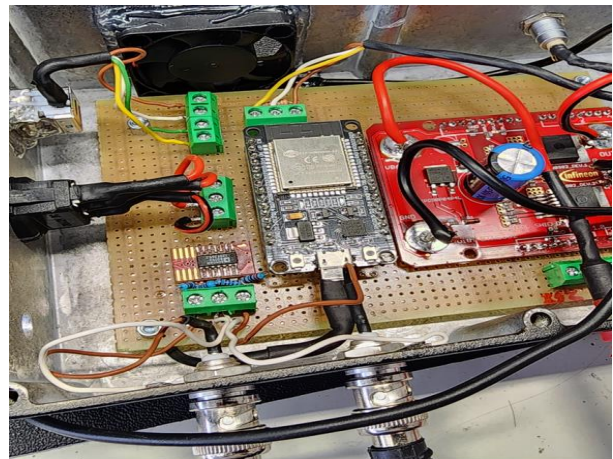


Fig. 3. Montaje de la caja de control-potencia 1

La estructura de la caja también cuenta con un ventilador y un interruptor que permite encender y apagar todo el sistema. En su interior encontramos la placa ESP32, el módulo convertidor de potencia BTN, dos amplificadores operacionales y las diferentes conexiones entre estos elementos y los elementos externos.

Como mencionamos anteriormente, el principio de funcionamiento de la bancada consiste en controlar el par del motor que trabaja como freno a través del control de la corriente variando el voltaje de salida PWM del módulo controlado por el ESP32. Para lograr esto se realiza el montaje de conexión que se muestra en la Figura 4.

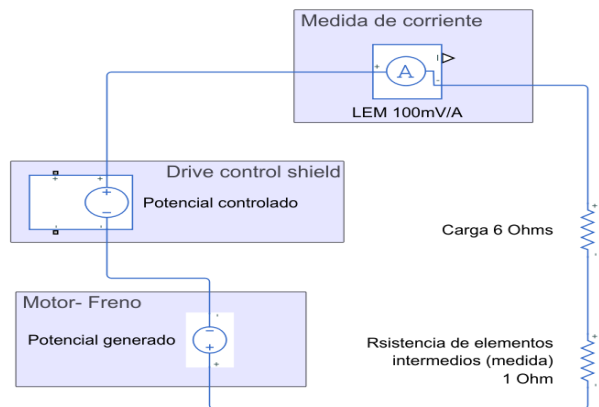


Fig. 4. Montaje de conexión elementos de la bancada

3. Aplicación móvil

La aplicación móvil creada tiene el nombre de "BANCADA AUTOMATIZADA" y desempeña un papel fundamental en el sistema al ofrecer una combinación integral de funcionalidades; es capaz de proporcionar una visualización en tiempo real de los valores de corriente y velocidad, y actúa como una interfaz versátil para el inicio y control de ensayos

de par-velocidad, permitiendo especificar parámetros propios de cada motor. Con una interfaz diseñada para ser intuitiva y amigable, facilita una comprensión clara y precisa de los datos capturados.

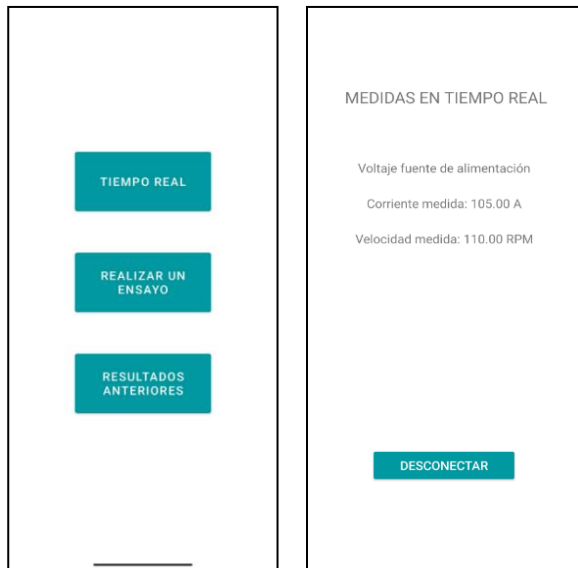


Fig. 5. Pantalla inicial de la App (Izquierda), Pantalla TIEMPO REAL (Derecha)

Esta aplicación permite al usuario acceder instantáneamente a los valores de voltaje, corriente y velocidad obtenidos a través de los sensores LEM y el encoder respectivamente. Además de la visualización en tiempo real, ofrece la funcionalidad de almacenar un historial de mediciones, permitiendo un seguimiento detallado del rendimiento del motor a lo largo del tiempo.

No solo se limita a ser una interfaz de observación; la aplicación desempeña un papel crítico en la ejecución y control de los ensayos. Brinda la capacidad de iniciar, detener y ajustar parámetros de los ensayos, otorgando al usuario control sobre el proceso. Estos ensayos son fundamentales para la evaluación del par y la velocidad del motor, presentando gráficamente esta relación para un análisis detallado y preciso.

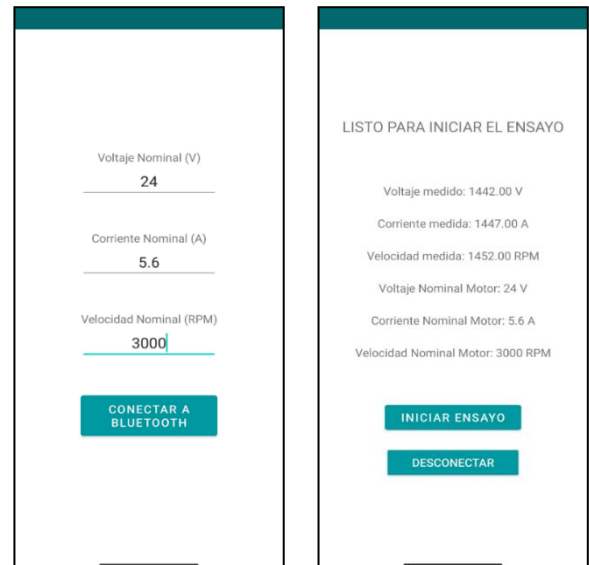


Fig. 6. Pantalla Parámetros del motor (Izquierda), Pantalla Ensayo Par-Velocidad (Derecha)

Una vez finalizada la prueba, la aplicación dirige automáticamente al usuario a otra actividad donde se muestran gráficos que representan los resultados del ensayo.

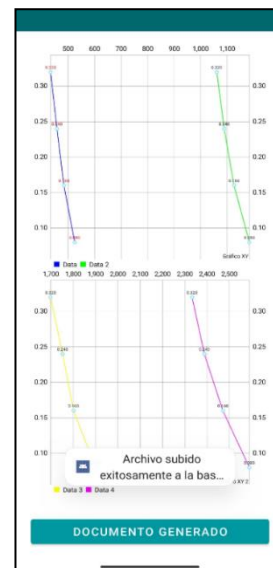


Fig. 7. Gráficas de los resultados de la prueba par-velocidad

Estas representaciones gráficas se guardan como imágenes en el dispositivo móvil y se integran en el informe generado en esta misma actividad, el cual también se almacena localmente en el dispositivo. Además, en esta actividad se envía el documento generado a la nube, específicamente a la base de datos de Google Firebase.

El documento generado incluye datos importantes, como los parámetros nominales del motor ingresados por el usuario, una tabla con todas las medidas adquiridas durante el ensayo, y las gráficas representativas obtenidas en la actividad anterior.

INFORME RESULTADOS DEL ENSAYO

Este informe muestra los resultados del ensayo realizado al motor con las siguientes características nominales:
 Voltaje = 24 V
 Corriente = 5.6A
 Velocidad = 3000RPM

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de velocidad, par (calculado), voltaje y corriente.

VELOCIDAD (RPM)	PAR (Nm)	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)
525.0	0.08	4.8	2.27
484.0	0.16	4.8	2.67
458.0	0.24	4.8	2.95
434.0	0.32	4.8	3.05
1184.0	0.08	9.6	3.3
1126.0	0.16	9.6	3.8
1089.0	0.24	9.6	4.17
1061.0	0.32	9.6	4.54
1900.0	0.08	14.4	4.0
1801.0	0.16	14.4	4.87
1752.0	0.24	14.4	5.31
1688.0	0.32	14.4	5.73
2590.0	0.08	19.2	4.0
2471.0	0.16	19.2	5.72
2388.0	0.24	19.2	6.34
2333.0	0.32	19.2	6.75

Fig. 8. Documento PDF generado por cada ensayo (página 1)

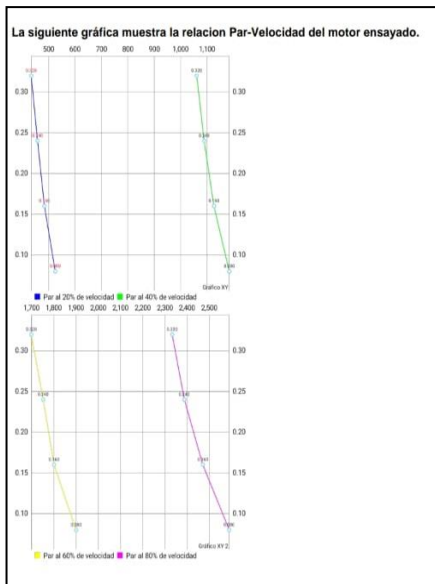


Fig. 9. Documento PDF generado por cada ensayo (página 2)

Este listado de documentos, disponible en la nube, permite un acceso rápido y centralizado a los informes generados, facilitando la colaboración, el análisis comparativo y el seguimiento de los resultados a lo largo del tiempo. Esta funcionalidad proporciona una valiosa herramienta para la gestión y revisión de los datos de manera eficiente y desde cualquier ubicación con acceso autorizado a la plataforma Firebase.

4. Resultados

Para obtener los resultados teóricos, nos apoyaremos en una simulación realizada en Simulink. Debido a que ambos motores son de iguales características, se nos simplificara el trabajo porque comparten las mismas constantes. Ahora bien, de momento conocemos los parámetros nominales del motor, y debemos encontrar las constantes para poder echar a andar nuestro modelo.

Además, sabemos que el voltaje nominal del motor a probar es de 24 V, la corriente nominal es de 5.2 A y que la velocidad nominal es de 3000 rpm. Con estos datos, tenemos la información suficiente para calcular las constantes teóricas.

Se sabe que,

$$V - E = K_e * W_n,$$

por lo tanto,

$$K_e = (V - E)/W_n[V/rad/s]$$

$$K_e = ((24V - 5.2A * 0.6\Omega)/3000rpm) * (1rev/2 * \pi rad) * (60s/1min);$$

$$K_e = 0.06646295 V/rad/s$$

Asumiendo que la potencia entregada es igual a la potencia mecánica, entonces las constantes del motor son iguales; entonces tenemos que:

$$K_e = K_t = 0.06646295 Nm/A$$

Ahora para encontrar la inercia del motor, hemos desacoplado el sistema para hacer ensayos sobre el motor. Hemos tomado las siguiente mediciones:

Voltaje [V]	Corriente [A]	Velocidad [rpm]	Velocidad [rad/s]
2	0.45	267	27.96
4	0.53	556	58.22
6	0.62	865	90.58
8	0.7	1166	122.10
10	0.76	1463	153.20
12	0.83	1768	185.14
14	0.89	2059	215.61
16	0.94	2351	246.19
18	0.98	2651	277.61
20	1.01	2946	308.50
22	1.05	3252	340.54
24	1.09	3557	372.48

Tabla 1. Resultados medidos del motor desacoplado

Ahora vamos a calcular gráficamente las constantes de rozamiento viscoso y seco, haciendo uso de k*i según la siguiente figura:

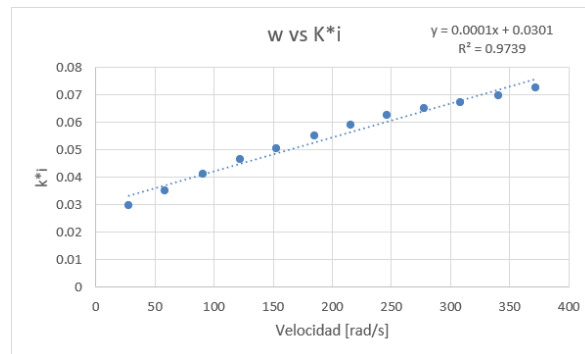


Fig. 10. Coeficiente de rozamiento seco y viscoso

De la figura anterior tenemos que:
 El coeficiente de rozamiento seco $C=0.0301$
 El coeficiente de rozamiento viscoso $f=0.0001$

Según nuestras pruebas el motor tarda 2.6 segundos aproximadamente en detenerse completamente luego de girar a 3500 rpm estando desacoplado (24vdc). Con esto podemos calcular la inercia del motor:

$$J = \frac{f * T}{\ln\left(1 + \frac{w_0 * f}{C}\right)}$$

Donde w_0 es la velocidad en donde se tomó la medida y T es el tiempo que tarda en detenerse.

$$J = \frac{0.0001 * 2.6}{\ln\left(1 + \frac{372 * 0.0001}{0.0301}\right)}$$

entonces $J = 0.0003231 \text{ Nm}^2$

Ahora que ya tenemos los valores de las constantes, las podemos colocar en nuestro modelo para hacer las .

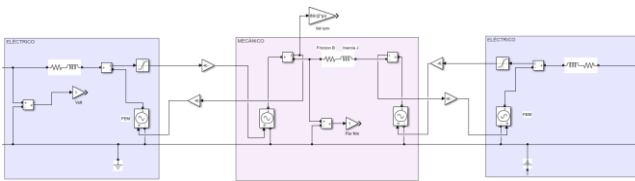


Fig. 11. Modelo eléctrico equivalente del banco de pruebas automatizado

En la simulación y en la bancada implementada se realizan 4 pruebas, una al 20% del voltaje nominal, otra al 40%, otra al 60% y la última al 80%. En cada una de ellas vamos a variar el Par con un control PID a 35%, 50%, 65% y 80% del Par nominal (en el freno). A continuación, presentamos una tabla resumen con los datos obtenidos de la simulación:

Velocidad [rpm]	Par [Nm]	Voltaje [V]	Corriente [A]
518	0.15	4.8	1.98
472	0.22	4.8	2.51
434	0.29	4.8	2.96
402	0.36	4.8	3.33
1170	0.15	9.6	2.42
1109	0.22	9.6	3.13
1054	0.29	9.6	3.77
1005	0.36	9.6	4.34
1834	0.15	14.4	2.73
1776	0.22	14.4	3.51
1703	0.29	14.4	4.24
1645	0.36	14.4	4.92
2501	0.15	19.2	2.99
2429	0.22	19.2	3.82
2362	0.29	19.2	4.60
2298	0.36	19.2	5.34

Tabla 2. Resultados simulados par a 35%, 50%, 65% y 80% del par nominal

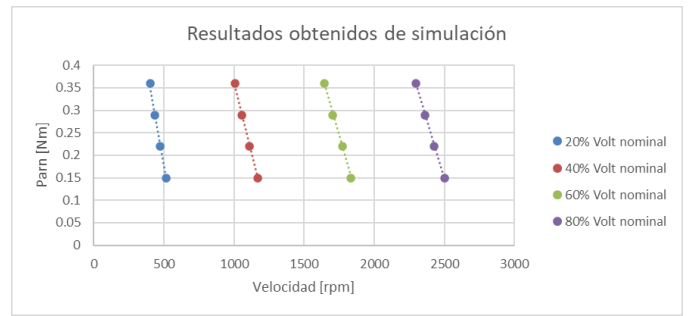


Fig. 12. Gráfico Par-Velocidad obtenido de simulación

Velocidad [rpm]	Par [Nm]	Voltaje [V]	Corriente [A]
505	0.15	4.8	2.38
487	0.2	4.8	2.65
464	0.27	4.8	2.84
454	0.32	4.8	3.02
1171	0.14	9.6	3.46
1131	0.2	9.6	3.77
1103	0.26	9.6	4.13
1081	0.32	9.6	4.31
1815	0.14	14.4	4.35
1760	0.2	14.4	4.88
1753	0.26	14.4	5.14
1720	0.32	14.4	5.48
2532	0.14	19.2	5.0
2464	0.2	19.2	5.5
2422	0.26	19.2	5.88
2376	0.31	19.2	6.3

Tabla 3. Resultados bancada par a 35%, 50%, 65% y 80% del par nominal

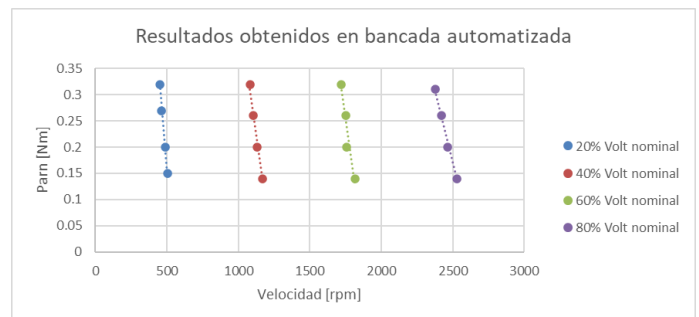


Fig. 13. Gráfico Par-Velocidad obtenido desde aplicación "bancada automatizada"

5. Comparación de resultados

Una vez hemos obtenido los datos podemos compararlos, podemos decir que son bastante similares.

A continuación, presentamos la comparación de los datos obtenidos:

6. Conclusiones

Este proyecto ha logrado con éxito el diseño y desarrollo de un equipo de control y medida que integra un ESP32 y el módulo BTN, brindando la capacidad de adaptar señales para controlar y medir las magnitudes físicas más importantes de motores de corriente continua (DC).

La implementación de una aplicación móvil conectada vía Bluetooth ha permitido la interacción remota, posibilitando la monitorización en tiempo real y la generación instantánea de pruebas de par y velocidad, simplificando significativamente el proceso de evaluación de motores DC.

Esta automatización no solo optimiza el procedimiento manual actual, sino que también mejora la eficiencia y precisión de los ensayos al facilitar la adquisición automatizada de datos y la generación de informes. Estos logros respaldan el avance hacia una evaluación más efectiva y accesible de motores eléctricos, allanando el camino para futuros desarrollos en el ámbito de la automatización de pruebas.

Las posibilidades de desarrollo futuro derivadas de este proyecto son amplias y prometedoras. Una dirección potencial incluye la expansión de la aplicación móvil y del código del ESP32, al disponer de mediciones de corriente y velocidad, se abren las puertas a una variedad de ensayos; incluyendo, por ejemplo: la variación de parámetros PID para el control de velocidad, o la optimización de envío de datos a una nueva base de datos para poder aplicar análisis estadísticos y predecir el comportamiento de motores. Además, se podría considerar la implementación de técnicas de aprendizaje automático para optimizar automáticamente los parámetros de control y adaptarse a condiciones variables.

Otra área de mejora potencial es la incorporación de funciones de seguridad adicionales en el sistema, como la detección y prevención de condiciones anómalas o la implementación de un sistema de parada de emergencia automático. Esto garantizaría un entorno de prueba seguro y confiable, especialmente al realizar ensayos con cargas más pesadas o en condiciones extremas.

Además, la colaboración con instituciones educativas y la comunidad de investigación podría enriquecer el proyecto al obtener retroalimentación valiosa y permitir la validación en entornos más diversos. La expansión del sistema para adaptarse a diferentes tipos de motores y la incorporación de interfaces de usuario más intuitivas también podrían ser consideradas para mejorar la accesibilidad y versatilidad del equipo de control y medida.

En resumen, este proyecto no solo establece una base sólida para la evaluación eficiente de motores eléctricos, sino que también abre la puerta a futuras investigaciones y desarrollos que pueden contribuir significativamente al campo de la automatización de pruebas motorizadas y la ingeniería eléctrica en general.

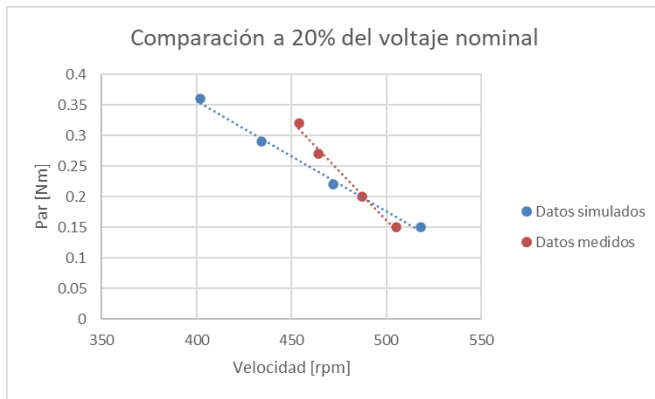


Fig. 14. Comparación datos simulados y datos medidos a 20% del voltaje nominal

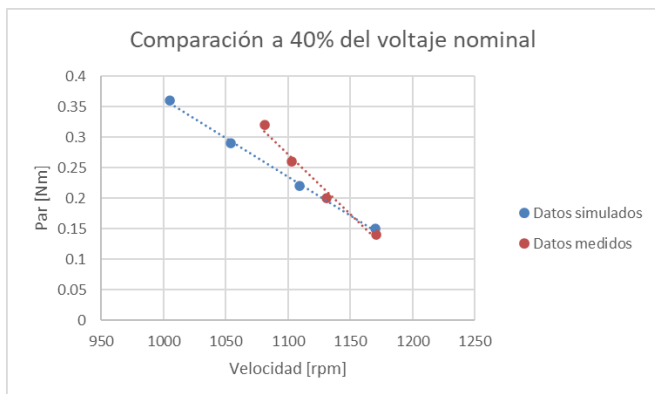


Fig. 15. Comparación datos simulados y datos medidos a 40% del voltaje nominal

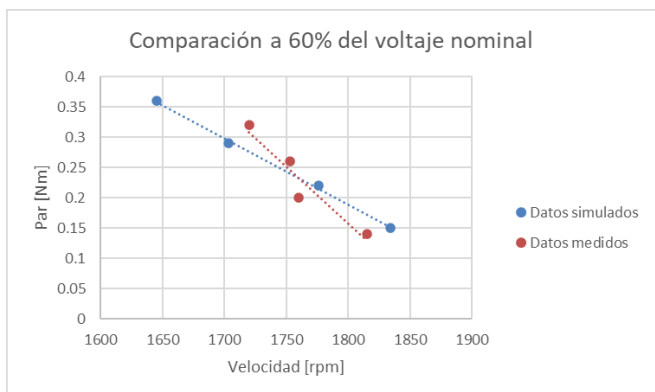


Fig. 16. Comparación datos simulados y datos medidos a 60% del voltaje nominal

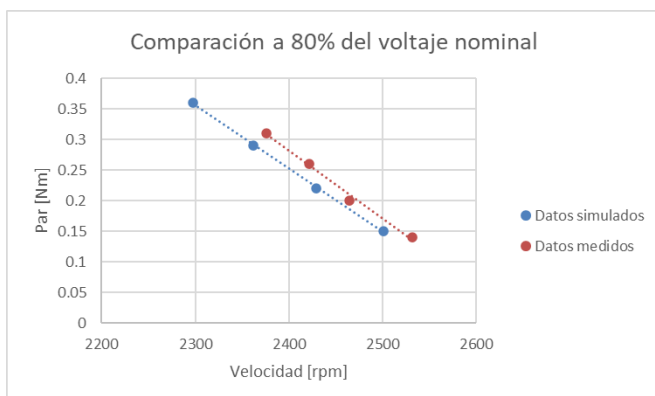


Fig. 17. Comparación datos simulados y datos medidos a 80% del voltaje nominal

Referencias

- [1] J. BAE, K. CHO y D.-H. LEE, Parallel Position Control Scheme of Permanent Magnet DC Motors with a Low-Resolution Sensor, 2020.
- [2] I. OKORO y C. ENWEREM, Model-based Speed Control of a DC Motor Using a Combined Control Scheme, 2019.
- [3] V. BURENIN, J. ZAREMBO, A. ŽIRAVECKA y L. RIBICKIS, Model of Laboratory Test Bench Setup for Testing Electrical Machines, 2020.
- [4] K. B. Chavhan y R. Ugale, «Automated test bench for an induction motor using LabVIEW,» *IEEE*, 2016.
- [5] F. D. P. G.-L. R. C.-G. Alfonso Bachiller-Soler, «Diseño de un banco de ensayo automatizado para motores Brushless,» 2011.
- [6] Infineon, «www.infineon.com,» 2016. [En línea]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Motor_Control_Shield_with_BTN8982TA_for_Arduino-UM-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4624ca27d02014cb20b89867eed.
- [7] AVAGO_Tech, «<https://www.mouser.es/>,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.avagotech.com/docs/AV02-1046EN>.