



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA DE AUTOMOTRIZ**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL FRENO
ELECTROMAGNÉTICO DEL BANCO DINAMOMÉTRICO ARMFELD MODELO
CM11, MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL PID Y SIMULACIÓN EN LABVIEW**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero(a) Automotriz

AUTOR: KATHERINE NAHOMI RECALDE LOOR

IVAN JOSUE RUGEL PALMA

TUTOR: ING. JOSE LUIS MALDONADO ORTEGA, MGTR

Guayaquil – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Katherine Nahomi Recalde Loor con documento de identificación N° 0932239445 e Iván Josué Rugel Palma con documento de identificación N° 0942008269; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 19 de agosto del año 2025

Atentamente,



Katherine Nahomi Recalde Loor

0932239445



Iván Josué Rugel Palma

0942008269

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Katherine Nahomi Recalde Loor con documento de identificación N° 0932239445 e Iván Josué Rugel Palma con documento de identificación N° 0942008269, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: Implementación de un Sistema de Control para el Freno Electromagnético del Banco Dinamométrico Armfield Modelo CM11, Mediante Técnicas de Control PID y Simulación en LabVIEW, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de agosto del año 2025

Atentamente,



Katherine Nahomi Recalde Loor

0932239445



Iván Josué Rugel Palma

0942008269

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Luis Maldonado Ortega con documento de identificación N° 1105738395, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL FRENO ELECTROMAGNÉTICO DEL BANCO DINAMOMÉTRICO ARMFIELD MODELO CM11, MEDIANTE TÉCNICAS DE CONTROL PID Y SIMULACIÓN EN LABVIEW, realizado por Katherine Nahomi Recalde Loor con documento de identificación N° 0932239445 y por Iván Josué Rugel Palma con documento de identificación N° 0942008269, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de agosto del año 2025

Atentamente,



José Luis Maldonado Ortega

1105738395

DEDICATORIA

A mis padres, que han sido mi fortaleza y mi refugio, por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba, confiando a ciegas en mis capacidades y alentándome a seguir cuando el camino se volvía difícil. Este logro es reflejo de todo lo que me han enseñado y del apoyo constante que me han brindado, y por eso siempre llevaré su ejemplo como guía en mi vida. A mis hermanos, por consentirme en los días grises, por las risas y por impulsarme siempre a ser una mejor versión de mí misma. A Iván, mi dúo, quien caminó a mi lado con amor, paciencia y complicidad, compartiendo mis sueños, sosteniendo mi mano en las caídas y celebrando conmigo cada pequeño logro como si fuera suyo. Y, a mí, por levantarme después de cada tropiezo, por enfrentar mis miedos y aprender de ellos. Esta dedicatoria es para cada uno de ustedes, porque en sus gestos, en su apoyo y en su amor encontré la perseverancia para llegar hasta aquí.

[Katherine Nahomi Recalde Loor]

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, por ser el que me da sabiduría, inteligencia y paciencia para poder cumplir con cada uno de los retos que tuve que enfrentar en el camino para llegar hasta aquí. Segundo a mis padres, por ser ese apoyo incondicional y enseñarme a no rendirme pese a que el camino sea difícil. Tercero a Katherine por estar presente en cada etapa de lo que fue nuestra vida universitaria, por enseñarme a ser un mejor hombre y sacar todo mi potencial, por siempre estar el uno para el otro y ser un dúo especial. Así que esto fue por mí, para ustedes y por ustedes, los amo.

[Iván Josué Rugel Palma]

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios, por iluminar mi camino en medio de la incertidumbre y por recordarme que todo esfuerzo tiene su recompensa. A mis padres, gracias por ser el ejemplo de esfuerzo y dedicación que ha inspirado cada uno de mis pasos, por su entrega constante y sacrificios silenciosos me enseñaron que la verdadera fuerza se encuentra en la perseverancia y en el compromiso diario. A Iván, por su compañía sincera, por ser un pilar que me ayudó a mantener el equilibrio en medio de los desafíos, su presencia ha sido un faro de motivación y confianza que me impulsó a avanzar siempre con la frente en alto, agradezco el camino que me llevó a él. También con un valor especial, al Ing. José Luis Maldonado, gracias por acompañarnos con su guía constante, su paciencia, su risa y su amabilidad, su apoyo ha sido fundamental en cada etapa de este trabajo, y por ello le guardo un agradecimiento permanente.

[Katherine Nahomi Recalde Loor]

Agradezco a Dios por permitirme vivir este momento y por cada una de las experiencias vividas en esta etapa universitaria, por darme fortaleza para mantenerme en pie en los distintos golpes que me dio la vida y por ayudarme a ser paciente y perseverante. Segundo a mis padres por brindarme los estudios y apoyarme en esta profesión, hicieron todo lo posible para darme los mejores estudios, en honor y agradecimiento doy estas palabras. Tercero a mi tía Cruz, que hizo posible que pueda estudiar esta carrera y sé que no me alcanzará los agradecimientos, pero la incluyo aquí. Cuarto a Katherine, por la paciencia que me tiene, el apoyo incondicional, por cada experiencia junto a ti y las innumerables cosas en las cuales somos idóneos y nos merecemos el uno para el otro. Por último, pero no menos importante al Ing. José Luis Maldonado, por confiar en nuestra perseverancia y capacidades para alcanzar nuestros objetivos, estaremos eternamente agradecidos por habernos acompañado en cada etapa, con su paciencia y gentileza característica, solo me queda decirles gracias a todos los que fueron parte de que esto sea posible.

[Iván Josué Rugel Palma]

RESUMEN

La presente propuesta tuvo como objetivo desarrollar un sistema de control para el freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield modelo CM11, por medio del uso de un controlador PID y el entorno de programación LabVIEW. El proyecto surgió ante la necesidad de mejorar la precisión y confiabilidad en la medición de torque y potencia de motores de combustión interna en prácticas académicas y de investigación en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil. Actualmente, la ausencia de un sistema automatizado genera inestabilidad en las cargas aplicadas, afectando la validez de los resultados generados en los ensayos. Para resolver esta limitación, se desarrolló una interfaz de usuario en LabVIEW que permite supervisar y ajustar en tiempo real los parámetros de frenado, integrando una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6009 para el registro de señales analógicas. La metodología empleada fue de tipo experimental, iniciando con el diagnóstico del sistema, reacondicionamiento de componentes, instalación de la tarjeta DAQ y calibración de la celda de carga. Posteriormente, se implementó un controlador PID, se comenzó con la creación de la función de transferencia del sistema, que describe la relación entre la entrada y la salida del sistema de freno. A partir de esta función de transferencia, se calcularon las ganancias del controlador PID mediante el uso de técnicas de sintonización automática como el método de Ziegler-Nichols en el dominio del tiempo. Las ganancias obtenidas fueron luego graficadas y ajustadas utilizando el PID Turner en Matlab, lo que permitió regular con mayor exactitud la carga del freno en función de la señal de referencia.

Palabras clave: Freno electromagnético, Controlador PID, Banco dinamométrico, LabVIEW, Adquisición de datos.

ABSTRACT

The objective of this proposal was to develop a control system for the electromagnetic brake of the Armfield CM11 dynamometer, through the use of a PID controller and the LabVIEW programming environment. The project arose from the need to improve the accuracy and reliability of torque and power measurements of internal combustion engines in academic and research practices at the Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil campus. Currently, the absence of an automated system generates instability in the applied loads, affecting the validity of the results generated in the tests. To overcome this limitation, a user interface was developed in LabVIEW that allows monitoring and adjusting braking parameters in real time, integrating an NI USB-6009 DAQ data acquisition card for recording analog signals. The methodology used was experimental, starting with system diagnosis, component reconditioning, DAQ card installation, and load cell calibration. Subsequently, a PID controller was implemented, and the system's transfer function was created, which describes the relationship between the brake system's input and output. From this transfer function, the PID controller gains were calculated using automatic tuning techniques such as the Ziegler-Nichols time-domain method. The obtained gains were then graphed and adjusted using the Turner PID in Matlab, which allowed for more precise regulation of the brake load based on the reference signal.

Keywords: Electromagnetic brake, PID controller, Dynamometric bench, LabVIEW, Data acquisition.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION	1
1.1. Problema	1
1.1.1. Antecedentes:.....	1
1.1.2. Importancia y alcances	4
1.1.3. Delimitación:	6
1.2. Objetivos Generales y Específicos	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2. Objetivos Específicos	6
2. CAPÍTULO II. MARCO TEORICO	7
2.1. Motor Volkswagen	8
2.2. Freno electromagnético	9
2.3. Par motor y Potencia	11
2.4. Celda de carga	12
2.5. Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6009	13
2.6. ECU Reprogramable Proteus Large Universal ECU	15
2.7. Control proporcional, integral y derivativo.	16
2.8. Software LabVIEW	17
2.9. Software TunerStudio	18
2.10. Regresión Lineal y coeficiente de determinación R^2	19
3. CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	20
3.1. Metodología	20
3.2. Cronograma	22
3.3. Presupuesto	23
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS	24

4.1. Identificación y evaluación de los componentes del banco.	24
4.2. Implementación de la tarjeta DAQ 6009.	30
4.3. Caracterización de señales de sensores y actuadores	32
4.3.1. Caracterización de la Celda de carga.	32
4.3.2. Caracterización del sensor de posición del cigüeñal (CKP).	35
4.3.3. Caracterización del sensor de temperatura del motor (ECT).	37
4.3.4. Caracterización del sensor del pedal de aceleración (APS).	42
4.3.5. Caracterización del cuerpo de aceleración electrónico (TPS).	42
4.4. Desarrollo de interfaz del sistema de control en LabVIEW para el banco dinamométrico Armfield CM11	44
4.4.1. Bloque A: Obtención de datos de entrada de la DAQ	45
4.4.2. Bloque B: Obtención de señal del sensor CKP (RPM)	48
4.4.3. Bloque C: Obtención de señal del sensor ECT	50
4.4.4. Bloque D: Obtención de señal de la celda de carga (Torque).	53
4.4.5. Bloque E: Control PID de carga del freno electromagnético.	55
4.5. Caracterización del comportamiento del sistema PID	62
4.6. Desarrollo de interfaz gráfica del sistema de control en LabVIEW para el banco dinamométrico Armfield CM11	73
4.7. Proceso de validación de parámetros PID.	78
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1. Conclusiones	82
5.2. Recomendaciones	83
REFERENCIAS	85
ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Banco dinamométrico Armfield CM11	7
Fig. 2. Frenos de Corrientes de Foucault	9
Fig. 3. Freno electromagnético.	10
Fig. 4. Celda de carga	12
Fig. 5. DAQ NI USB 6009	14
Fig. 6. Señales Analógicas en Sistemas DAQ	15
Fig. 7. Proteus Large Universal ECU	15
Fig. 8. Circuito del control PID	16
Fig. 9. Sintonización de Controladores PID.	17
Fig. 10. Diagrama de bloques LabVIEW.	17
Fig. 11. Interfaz de ajuste del mapa de la ECU.	18
Fig. 12. Flujograma del desarrollo del proyecto.	20
Fig. 13. Cables de bujías rotas y presencia de oxido en el freno electromagnético.....	26
Fig. 14. Gabinete desorganizado y conexiones sueltas.....	26
Fig. 15. Ausencia de elementos del banco (fuente alimentación 24V).....	26
Fig. 16. Conexión defectuosa amplificador y celda de carga.	27
Fig. 17. Desmontaje y mantenimiento preventivo del freno electromagnético.	27
Fig. 18. Reacondicionamiento del gabinete y conexiones eléctricas.....	28
Fig. 19. Pin Out de la fuente de alimentación de 24V.	29
Fig. 20. Pines de conexión del sistema de control.	29
Fig. 21. Pines de conexión del sistema de control, fuente de alimentación y DAQ.	30
Fig. 22. Conexión de la DAQ NI USB 6009.	31
Fig. 23. Pines de conexión del amplificador.....	33
Fig. 24. Proceso de calibración de celda de carga.	33
Fig. 25. Caracterización de la celda de carga.....	34
Fig. 26. Pin del sensor de posición del cigüeñal (CKP).....	35
Fig. 27. Esquema de conexión del sensor (CKP) a la DAQ.	36
Fig. 28. Oscilograma del sensor (CKP).	36
Fig. 29. Pines del sensor ECT.....	37
Fig. 30. Pirómetro digital prueba experimental 1.	37
Fig. 31. Prueba experimental 1 del sensor ECT.....	38
Fig. 32. Prueba experimental 2 del sensor ECT.....	39
Fig. 33. Grafica temperatura vs voltaje del sensor ECT ensayo 1.	40
Fig. 34. Conexionado del sensor ECT hacia ECU y DAQ.	41
Fig. 35. Potenciómetro del pedal de aceleración.	42

Fig. 36. Pin out del cuerpo de aceleración electrónico.	42
Fig. 37. Conexión del relé para la conmutación entre el control manual y automático.	43
Fig. 38. Vista de la pantalla principal del entorno LabVIEW 2025.	44
Fig. 39. While Loop con control de parada en LabVIEW.	44
Fig. 40. Inserción del bloque DAQ Assistant desde el menú Measurement I/O.	45
Fig. 41. Esquema de conexión del sistema de adquisición de señales con la DAQ.	45
Fig. 42. Configuración inicial del DAQ Assistant para entrada analógica.	46
Fig. 43. Configuración del DAQ Assistant para adquisición de señales analógicas.	46
Fig. 44. Diagrama de conexiones previas de la DAQ.	47
Fig. 45. Inserción de función Index Array para procesar datos del DAQ.	47
Fig. 46. Inserción de función Wfm Measure desde Signal Processing.	48
Fig. 47. Funciones de Comparison en LabVIEW.	48
Fig. 48. Inserción de funciones numéricas en LabVIEW.	49
Fig. 49. Controles numéricos y visuales en el panel frontal.	49
Fig. 50. Medición de RPM con sensor CKP y bloque Tone Measurements.	50
Fig. 51. Selección de filtros en el menú Signal Processing de LabVIEW.	50
Fig. 52. Configuración del filtro Lowpass tipo Butterworth.	51
Fig. 53. Conversión de voltaje a temperatura mediante ecuación lineal.	52
Fig. 54. Adquisición y conversión de señal del sensor ECT.	52
Fig. 55. Configuración del filtro para la señal de celda de carga.	53
Fig. 56. Conversión de la señal de la celda de carga a peso.	53
Fig. 57. Cálculo de torque a partir del peso obtenido por la celda de carga.	54
Fig. 58. Ubicación del filtro Median Filter PtByPt.	54
Fig. 59. Cálculo del torque real del freno a partir de la señal filtrada.	55
Fig. 60. Cálculo del torque de frenado a partir de la celda de carga en LabVIEW.	55
Fig. 61. Ubicación del bloque PID.	56
Fig. 62. Diagrama de bloques del NI PID en LabVIEW.	56
Fig. 63. Herramientas de agrupamiento y manejo de clases.	57
Fig. 64. Curva de caracterización del freno electromagnético.	58
Fig. 65. Acceso a los bloques de procesamiento matemático y scripts en LabVIEW.	59
Fig. 66. Adición de entradas y salidas al bloque MATLAB Script en LabVIEW.	59
Fig. 67. Script MATLAB con protección de límite inferior para la salida de voltaje.	60
Fig. 68. Configuración del DAQ Assistant para salida analógica de voltaje en LabVIEW.	60
Fig. 69. Configuración del DAQ Assistant para salida analógica de voltaje en LabVIEW.	61
Fig. 70. Configuración del Output range del PID.	61
Fig. 71. Lógica de control de freno manual.	62

Fig. 72. Funciones de temporización.	63
Fig. 73. Medición de tiempo transcurrido con condición lógica.	63
Fig. 74. Bloques de escritura y lectura de archivos.	64
Fig. 75. Grabación condicional de datos a archivo en LabVIEW.....	64
Fig. 76. Adquisición y registro del tiempo con respecto a la carga de frenado.	65
Fig. 77. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial.....	65
Fig. 78. Filtro Promedio Inicial.	66
Fig. 79. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con varios filtros.....	66
Fig. 80. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con filtro 4.	67
Fig. 81. Workspace con variables de tiempo y voltaje.	67
Fig. 82. Ingreso de datos desde Excel.....	68
Fig. 83. Grafica de voltaje en función al tiempo.....	68
Fig. 84. System identification.	69
Fig. 85. System identification opción Time domain data.	69
Fig. 86. Definición de entradas y salidas del workspace.	70
Fig. 87. Panel principal para calcular la relación de transferencia.	70
Fig. 88. Ajuste de parámetros para estimación.	71
Fig. 89. Resultados de la estimación 1.....	71
Fig. 90. Resultados de las diferentes estimaciones.	72
Fig. 91. Importación de datos estimados para crear la planta.....	72
Fig. 92. Propuesta de ganancias iniciales del PID.	73
Fig. 93. Inserción del Tab Control desde el panel de controles.	74
Fig. 94. Adición de una nueva página en un Tab Control.	74
Fig. 95. Visualización de variables en la pestaña de indicadores del panel frontal.	75
Fig. 96. Vista principal del panel frontal con representación gráfica del motor y el freno.....	75
Fig. 97. Panel de gráficas dinámicas del sistema de control.....	76
Fig. 98. Panel de control PID del freno.	77
Fig. 99. Interfaz gráfica de monitoreo y control PID.....	77
Fig. 100. Herramientas del control PID.	78
Fig. 101. Caracterización #2 de las ganancias PID.....	79
Fig. 102. Caracterización final de las ganancias PID.	79
Fig. 103. Caracterización final de las ganancias PID.	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I PROPIEDADES DEL MOTOR VOLKSWAGEN POLO	8
TABLA II CARACTERÍSTICAS DEL FRENO ELECTROMAGNÉTICO.....	11
TABLA III ESPECIFICACIONES TÉCNICAS – CELDA DE CARGA LCEC-100.....	13
TABLA IV ESPECIFICACIONES DAQ NI USB 6009	14
TABLA V CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	22
TABLA VI PRESUPUESTO.....	23
TABLA VII IDENTIFICACIÓN DEL BANCO DINAMOMÉTRICO CM11.	24
TABLA VIII EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	25
TABLA IX DATASHEET DE CONEXIÓN PARA LA DAQ NI USB 6009.	32
TABLA X DATOS DEL PESO Y VOLTAJE DE LA CELDA DE CARGA.....	34
TABLA XI DATOS DE TEMPERATURA Y VOLTAJE DEL SENSOR ECT.	39
TABLA XII DATOS DE TORQUE Y VOLTAJE DEL FRENO ELECTROMAGNÉTICO.	57
TABLA XIII PARÁMETROS PID INICIALES.	78
TABLA XIV PARÁMETROS PID FINALES.....	80

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCION

En el ámbito de la ingeniería automotriz y los bancos dinamométricos, el control de las cargas aplicadas durante las pruebas de motores es esencial para obtener resultados consistentes y comparables. En el caso del banco dinamométrico Armfield modelo CM11, que dispone la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, se ha identificado la importancia de disponer de un sistema automatizado que regule de manera más eficiente el freno electromagnético. Actualmente, la falta de automatización en este proceso provoca fluctuaciones en las cargas aplicadas, lo que afecta la calidad de los ensayos de torque y potencia.

Este proyecto tuvo como objetivo implementar un sistema de control utilizando un controlador PID, con la plataforma de programación LabVIEW, para regular el comportamiento del freno electromagnético en el banco dinamométrico, mediante la integración de una tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6009, se busca automatizar el proceso de control del freno y permitir ajustes dinámicos en tiempo real de los parámetros necesarios para las pruebas. La solución propuesta tiene como fin mejorar la estabilidad en las mediciones obtenidas en los ensayos realizados en el laboratorio.

La implementación del sistema de control PID en el banco dinamométrico es importante para superar las limitaciones actuales del proceso de medición y pruebas, debido a que, sin un sistema automatizado, las fluctuaciones en las cargas aplicadas afectan directamente la calidad de los resultados obtenidos, lo que puede generar inconsistencias en las mediciones de torque y potencia. La regulación del freno electromagnético a través del controlador PID permite mantener cargas más estables durante las pruebas, lo que mejora la fiabilidad de los datos. Además, la capacidad de realizar ajustes dinámicos en tiempo real optimiza el tiempo de prueba y ofrece mayor flexibilidad en los ensayos, lo cual es esencial para las prácticas académicas y la investigación.

1.1. Problema

1.1.1. Antecedentes:

Diversos artículos de la SAE International han demostrado que la ausencia de un controlador apropiado en la parte de comando de un freno electromagnético puede generar inestabilidades en la regulación activa de la carga, lo cual provoca particulares sesgos en los ensayos afectando

la validez de los datos de rendimiento del motor, por lo tanto, la calidad y eficiencia de las pruebas en bancos dinamométricos depende críticamente de la capacidad del sistema de freno para responder dinámicamente a los cambios en carga o velocidad del motor [1]. En este contexto la falta de un sistema de control eficiente puede producir errores de respuesta, tiempos de estabilización prolongados y datos no válidos, por ello, el desarrollo e integración de controles avanzados mediante herramientas como LabVIEW y Simulink representa un estándar en la automatización de laboratorios de ensayo de motores [2].

Una regulación ineficiente del freno electromagnético puede desencadenar complicaciones que comprometen los datos de la medición como la seguridad del ensayo, tal como lo evidencia [3], el torque de frenado generado por corrientes es altamente sensible a factores como la velocidad, la corriente de excitación, la conductividad del material y la geometría del rotor y cuando el sistema de control no logra compensar dinámicamente estos parámetros, se producen variaciones abruptas en la carga aplicada al motor, generando oscilaciones no deseadas en el torque y la potencia. Estas fluctuaciones distorsionan los resultados experimentales y afectan el análisis del desempeño del motor. Adicionalmente, la falta de una regulación exacta en la corriente de flujo incrementa la probabilidad de sobrecalentamiento para los componentes electromagnéticos, lo que disminuye su vida útil y compromete el funcionamiento del banco dinamométrico [4]. La implementación de carga no regulada también representa un riesgo para el sistema de adquisición de datos y la calibración del sistema, lo cual suscita amenazas a la exactitud de los procesos [5].

Tal como lo señala [6], una de las claves para mejorar la confiabilidad en pruebas de motores radica en la implementación de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) ajustados a modelos dinámicos del sistema, lo cual permite reducir errores y tiempos de respuesta. Adicionalmente en [7], se ha enfatizado la importancia de examinar y perfeccionar los parámetros electromagnéticos dinámicamente responsivos de los sistemas de frenado para asegurar una respuesta dinámica apropiada. En ese mismo sentido, en el contexto de los bancos dinamométricos de motores de combustión, la precisión en el control de velocidad y carga resulta esencial para asegurar la validez de las pruebas, especialmente durante los ciclos transitorios. Tal como lo señala [8], uno de los principales desafíos en estos sistemas radica en la naturaleza altamente no lineal y con retardo del motor, la cual introduce perturbaciones significativas en el lazo de control de velocidad.

Por otro lado, usar algoritmos de control y adquisición de datos a través de plataformas como LabVIEW se ha vuelto esencial para mejorar el rendimiento y la precisión en los bancos de ensayo de motores, este tipo de software permite ver en tiempo real lo que está ocurriendo con el motor, registrando datos como temperatura, velocidad, presión y mezcla aire-combustible de forma clara y ordenada. También ayuda a automatizar el control del sistema, por ejemplo, ajustando la velocidad con un PID o activando pruebas de manera programada. Gracias a esto, se reduce el margen de error, se mejora la respuesta del freno dinamométrico y se obtienen resultados más confiables sin depender tanto del operador [9].

El avance de la automatización en la industria automotriz ha promovido el uso de bancos dinamométricos como herramientas fundamentales para la evaluación de motores de combustión interna bajo condiciones controladas. Estos dispositivos permiten determinar parámetros clave como torque, potencia, consumo específico de combustible y emisiones, los cuales son esenciales tanto en la investigación como en la formación técnica de estudiantes de ingeniería. En este contexto, la eficiencia del sistema de frenado y su control juegan un papel crucial en la confiabilidad de los datos obtenidos, sin embargo, los estudios previos han evidenciado que la ausencia de un sistema de control adecuado en los frenos electromagnéticos compromete la estabilidad de carga y la calidad de las mediciones.

En investigaciones, como la desarrollada en [10], se destaca la importancia de automatizar los bancos dinamométricos mediante la integración de controladores PID y plataformas de programación como LabVIEW, lo cual ha demostrado mejorar la respuesta dinámica del sistema y reducir los errores durante las pruebas. Asimismo, en [4] realizaron una comparación entre distintos diseños de frenos de corrientes de Foucault, concluyendo que el control de la corriente de excitación es determinante para minimizar fluctuaciones no deseadas en el torque aplicado. Paralelamente, en [11] propusieron un modelo de optimización multiobjetivo basado en teoría de juegos para mejorar la exactitud del frenado electromagnético, subrayando la necesidad de una regulación precisa ante variaciones de carga y velocidad.

En el ámbito académico ecuatoriano, trabajos como el de [12], abordaron la creación de una interfaz básica para la adquisición de datos en el banco Armfield CM11, sin embargo, no se logró integrar un sistema de control activo sobre el freno. De manera similar, en [13] realizaron una reprogramación de la ECU del motor de ensayo del mismo banco, sin intervenir directamente en el sistema de freno ni su automatización.

El banco dinamométrico Armfield modelo CM11, ubicado en el laboratorio de motores de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, destinado a la evaluación de motores de combustión interna, se encuentra actualmente inoperativo debido a la ausencia de un sistema de control eficiente del freno electromagnético, esta situación impide la correcta regulación de la carga del motor, lo que compromete la capacidad del equipo para realizar diferentes pruebas experimentales. Además, la interfaz de control original presenta incompatibilidades con los sistemas informáticos modernos, lo cual ha generado fallos en la comunicación entre los sensores y actuadores.

La falta de operatividad del sistema de control ha limitado el uso del equipo en actividades de investigación, por lo que ha interrumpido los procesos de análisis comparativo de rendimiento y emisiones, dificultando la aplicación de normativas técnicas vigentes. Esta situación representa una restricción significativa tanto para la formación técnica de los estudiantes como para el desarrollo de proyectos de investigación aplicados al control y evaluación de motores térmicos aplicando carga.

En este contexto, el presente proyecto se orienta a resolver el problema puntual de la ausencia de un sistema de control automático en el freno electromagnético del banco dinamométrico CM11, mediante el diseño e implementación de una solución basada en un controlador PID y el software LabVIEW, que permita restablecer su funcionalidad, mejorar la calidad de las mediciones y potenciar su uso como herramienta académica y de investigación.

1.1.2. Importancia y alcances

El adecuado funcionamiento de los bancos dinamométricos en instituciones de educación superior es fundamental para el desarrollo de competencias técnicas, la validación de investigaciones y la generación de datos confiables en pruebas de motores. A nivel académico, estos equipos permiten simular condiciones reales de operación para la evaluación de parámetros como torque, potencia, consumo de combustible y emisiones, contribuyendo a una formación práctica y aplicada en carreras como Ingeniería Automotriz. En la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, el banco dinamométrico Armfield modelo CM11 ha permanecido inoperativo debido a la falta de un sistema de control activo para su freno electromagnético, lo que ha restringido significativamente su uso tanto en docencia como en investigación.

De acuerdo con [14], la industria automotriz ecuatoriana constituye un sector vital, aportando el 8.7% del PIB industrial, dada esta importancia, la formación técnica especializada es fundamental para responder a las exigencias del mercado. No obstante, informes del Ministerio de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación revelan que la falta de equipos modernos y funcionales en los laboratorios universitarios es un problema recurrente. Esta carencia frena la innovación y la transferencia de tecnología, afectando negativamente la capacidad de los futuros profesionales para aplicar conocimientos en contextos reales, lo que impacta en su empleabilidad y en la generación de soluciones técnicas avanzadas.

Este estudio tiene como objetivo contribuir al fortalecimiento de la infraestructura académica y tecnológica a través de la implementación de un sistema de control PID con interfaz desarrollada en LabVIEW, que permita recuperar la funcionalidad del banco de pruebas. La propuesta impactará directamente en los procesos educativos, facilitando la realización de prácticas experimentales en condiciones controladas, con mediciones fiables y seguras, asimismo, este sistema funcionará como una base para el desarrollo de investigaciones relacionadas con eficiencia energética, combustibles alternativos, simulación de cargas y análisis dinámico de motores.

El proyecto está dirigido principalmente a beneficiar a los estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Automotriz de la UPS, aunque también ofrece oportunidades de colaboración con otras instituciones educativas y sectores industriales interesados en la evaluación del desempeño de motores. Además, al incorporar tecnologías como LabVIEW y controladores PID, se fomenta la adopción de metodologías estandarizadas propias de ambientes profesionales e industriales, contribuyendo así al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 4 de la ONU, que promueve una educación de calidad.

Actualmente, el problema se refleja en la incapacidad para realizar pruebas de torque y potencia bajo condiciones de carga controlada, lo que dificulta la validación de resultados de proyectos de titulación, la simulación de los parámetros de operación del motor y la comparación del rendimiento ante diferentes tipos de combustible. La ausencia de una plataforma de ensayo operativa limita la investigación, desaprovecha los recursos existentes y afecta negativamente el progreso académico de los estudiantes.

1.1.3. Delimitación:

El presente proyecto se desarrolló en la ciudad de Guayaquil, Ecuador, específicamente en el Laboratorio de Motores de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil, Campus Centenario, durante el período académico 66, comprendido entre mayo y agosto del año 2025. Está enfocado en el sector académico, dentro del campo de la ingeniería automotriz, y se orienta a mejorar las condiciones de enseñanza e investigación mediante la implementación de un sistema de control PID con LabVIEW en el banco dinamométrico Armfield CM11.

La intervención se delimita exclusivamente al entorno institucional de la carrera de Ingeniería Automotriz, sin extenderse a otros programas o sectores productivos, y su aplicación se restringe a fines didácticos, experimentales y de validación interna, sin propósitos comerciales ni industriales.

1.2. Objetivos Generales y Específicos

1.2.1. Objetivo General

Implementar un sistema de control para el freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11, utilizando técnicas de control PID y herramientas de simulación LabVIEW.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el estado actual del freno electromagnético y su sistema de control en el banco dinamométrico Armfield CM11, mediante inspecciones técnicas, para la identificación del estado inicial.
- Diseñar un sistema de control PID adaptado para el freno electromagnético, mediante modelado matemático y desarrollo de software para la optimización de la respuesta del sistema frente a variaciones de carga y velocidad.
- Integrar el sistema de control PID con el software LabVIEW, para una supervisión en tiempo real, facilitando el control del sistema.
- Validar el sistema diseñado mediante el análisis de los datos de salida del sistema de control respecto a los valores estándar previamente establecidos.

2. CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

Este capítulo expone los principios teóricos que fundamentan la implementación del sistema de control aplicado al freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11. Se explican aspectos esenciales relacionados con el mecanismo de frenado, la regulación mediante control PID, la utilización del entorno LabVIEW y la celda de carga, estableciendo la base técnica necesaria para realizar la implementación del sistema propuesto.

Los bancos dinamométricos son dispositivos utilizados para medir el rendimiento de motores y sistemas de transmisión, proporcionan datos precisos sobre emisiones, consumo específico de combustible, potencia y torque generados [15]. En el caso del banco dinamométrico Armfield CM11, presentado en la Figura 1, se trata de un modelo didáctico empleado dentro de lo académico y de investigación para la evaluación de motores de combustión interna y sistemas de control de frenado, ya que utiliza la corriente de Foucault capaz de dar una carga variable al motor permitiendo la generación de las curvas de potencia y torque [16]. Este equipo está compuesto por un freno electromagnético, sensores de sondeo y un sistema de adquisición de datos, lo que permite realizar pruebas controladas bajo diferentes condiciones de carga y velocidad.



Fig. 1. Banco dinamométrico Armfield CM11 [15].

2.1. Motor Volkswagen

Un estudio realizado por [17] mencionan que, el motor Volkswagen de 1.6 litros integrado en el banco dinamométrico Armfield CM11 representa una herramienta enfocada en la exploración y progresos en la ingeniería automotriz aunque incorpora un ciclo termodinámico Otto, el cual se complementa con un sistema de alimentación electrónica, además, este sistema tiene la capacidad de modificar de manera dinámica los mapas de inyección de combustible y los tiempos de encendido, adaptándose así a una amplia gama de condiciones de carga y velocidades de funcionamiento. Con base en las mediciones tomadas durante los ensayos, es posible calibrar con exactitud los valores de torque y potencia del motor, lo cual permite realizar un análisis dinámico del sistema [17].

Este análisis toma en cuenta la fuerza de frenado ejercida por el dinamómetro y la relación aire-combustible que es controlada de manera externa, ambas claves para caracterizar el desempeño del motor en distintas condiciones de operación. En la Tabla I se presentan las principales especificaciones técnicas de este motor, que se convierten en una guía para las prácticas experimentales dentro de la carrera de ingeniería automotriz.

TABLA I

PROPIEDADES DEL MOTOR VOLKSWAGEN POLO [15] [17].

Parámetro	Especificación
Desplazamiento	1.6 litros
Sistema de encendido	Electrónico
Sistema de inyección	Electrónica programable
Ciclo de operación	Otto, 4 tiempos
Disposición del motor	En línea
Potencia estimada	~100 hp @ 5600 rpm
Torque estimado	~145 Nm @ 3800 rpm
Sistema de aceleración	Electrónico
Refrigeración	Por liquido
Tipo de combustible	Gasolina

2.2. Freno electromagnético

El freno electromagnético es un componente clave en los bancos dinamométricos, ya que se distingue por estar controlado por un ordenador, el cual gestiona tanto los elementos actuadores como los sistemas de medición durante ensayos de corta duración, este tipo de freno está compuesto por un disco móvil, acoplado al eje del motor, su funcionamiento se basa en la inducción de corrientes parásitas en un disco conductor, lo que genera una fuerza de frenado proporcional a la corriente aplicada, es decir, se deslizan dos elementos rígidos que generan un par resistente, cuya magnitud es medida mediante una celda de carga [18].

El freno electromagnético, basado en las corrientes de Foucault, se utiliza en los bancos dinamométricos para generar un torque resistivo sobre el motor sin contacto físico, por lo que este tipo de freno se fundamenta en la ley de la inducción electromagnética como se muestra en la Figura 2, cuando un conductor atraviesa un campo magnético, se generan las corrientes parásitas en el material conductor, las cuales a su vez generan un campo magnético contrario que produce la fuerza de frenado [19]. La eficiencia del freno depende de varios factores, como la geometría del disco, el material ferromagnético utilizado, la corriente de excitación, y la velocidad entre el rotor y el estator. Este sistema no requiere contacto físico directo, lo que minimiza el desgaste y las pérdidas por fricción, sin embargo, su rendimiento puede verse afectado por variaciones de temperatura y por la resistencia magnética del material, lo que requiere un sistema de control preciso para mantener una carga constante durante las pruebas [20].

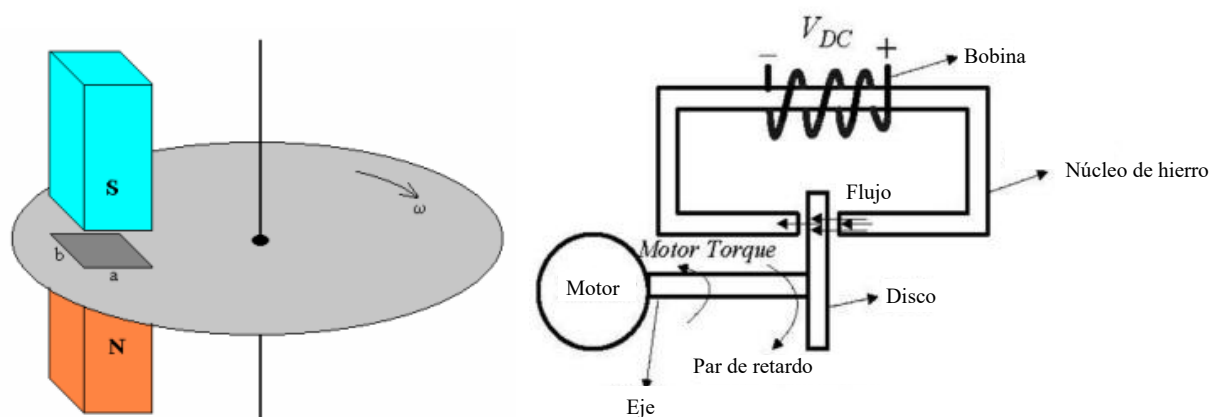


Fig. 2. Frenos de Corrientes de Foucault [3] [4].

El freno electromagnético CM11, mostrado en la Figura 3, usa corrientes de Foucault para generar un par de frenado sin contacto físico mecánico, aplicando una carga regulada al motor. Según las especificaciones detalladas en la Tabla II, este freno cuenta con una potencia nominal de 60 kW y es capaz de generar un torque máximo de 145 Nm, lo que lo hace apto para ensayos de alto rendimiento, además, opera dentro de un rango de voltaje de 220 a 240 V y una frecuencia de 50 a 60 Hz, lo que le permite adaptarse fácilmente a diferentes configuraciones de suministro eléctrico [21].



Fig. 3. Freno electromagnético.

El sistema utiliza fusibles de 20 amperios y está equipado con un sistema de ventilación forzada para su enfriamiento, lo que garantiza un funcionamiento continuo y seguro. La velocidad de operación máxima es de 6000 rpm y el rango de carga se expresa en función de la señal de control, siendo 50pC equivalente a 10 VDC, esto significa que el freno electromagnético del banco Armfield CM11 recibe analógicamente una señal de control en el rango de 0 a 10 voltios que define la carga al motor [21]. Dicha señal puede ser enviada desde un computador a el software LabVIEW por medio de la DAQ NI USB-6009. Dado que esta tarjeta únicamente tiene una salida de 5 V en su escala analógica, se necesita un circuito amplificador o un módulo externo que eleve el voltaje a los 10 V requeridos, de esta manera, el sistema puede regular de forma precisa la carga de rotación del motor y, por ende, mantener constante la carga durante las distintas pruebas. Además, el sistema es completamente controlado electrónicamente desde un ordenador, siendo ideal para aplicaciones didácticas y de laboratorio [21].

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL FRENO ELECTROMAGNÉTICO [21].

Parámetro	Especificación
Fabricante/Modelo	Klam / K40
Potencia nominal	60 kW
Torque nominal	145 Nm
Voltaje	220 / 240 V
Frecuencia	50 / 60 Hz
Fusibles	20 A
Tipo de freno	Electromagnético de corriente de Foucault
Modo de operación	Sin contacto, mediante inducción magnética
Tipo de control	Controlado electrónicamente mediante LabVIEW desde un ordenador
Rango de carga	50pC = 10 v DC
Velocidad máxima	6000 rpm
Sistema de enfriamiento	Ventilación forzada
Aplicación	Ensayos didácticos y de laboratorio

2.3. Par motor y Potencia

El par motor y la potencia son parámetros fundamentales en la evaluación del desempeño de motores de combustión interna, especialmente durante ensayos en bancos dinamométricos. El par motor, llamado como torque, representa la fuerza de giro que el motor puede ejercer sobre su eje de salida, y se expresa comúnmente en Newton-metros (Nm) [22]. Por su parte, se indica en [22], que la potencia es una medida del rendimiento del motor para realizar trabajo en función del tiempo, y está vinculada de forma directa con el torque y la velocidad angular por medio de la Ecuación 1.

$$P = \frac{T \times \omega}{1000} = [\text{kW}] \quad (1)$$

Donde P es la potencia en kilovatios (kW), T es el torque en Nm, y ω es la velocidad medida de forma angular en radianes por segundo. En aplicaciones prácticas, esta relación se convierte en la Ecuación 2 [22].

$$P = \frac{T(Nm) \times RPM}{9549} = [kW] \quad (2)$$

Los dinamómetros permiten obtener estas mediciones de forma controlada, lo cual es esencial para analizar el desempeño del motor con distintos niveles de carga, determinar su eficiencia, y comparar su rendimiento con diferentes tipos de combustible o configuraciones de encendido. Estas mediciones también son relevantes para validar simulaciones computacionales, ajustar mapas de inyección y realizar análisis termodinámicos del ciclo de combustión.

2.4. Celda de carga

Es reconocido como un sensor diseñado para medir fuerzas o cargas, y convertir esa fuerza en una señal eléctrica proporcional, que puede ser interpretada por instrumentos de medición, sistemas de adquisición de datos o controladores [23]. Este dispositivo se basa comúnmente en galgas extensiométricas, que detectan pequeñas deformaciones en un elemento elástico cuando se le aplica carga. En la Figura 4 se ilustra una celda de carga LCEC-100 integrada en la estructura del banco y posicionada para medir las fuerzas ejercidas sobre la pared del banco durante las pruebas, su conexión permite el monitoreo en tiempo real de los niveles de torque y carga, lo cual es vital durante la calibración de los parámetros del control PID.

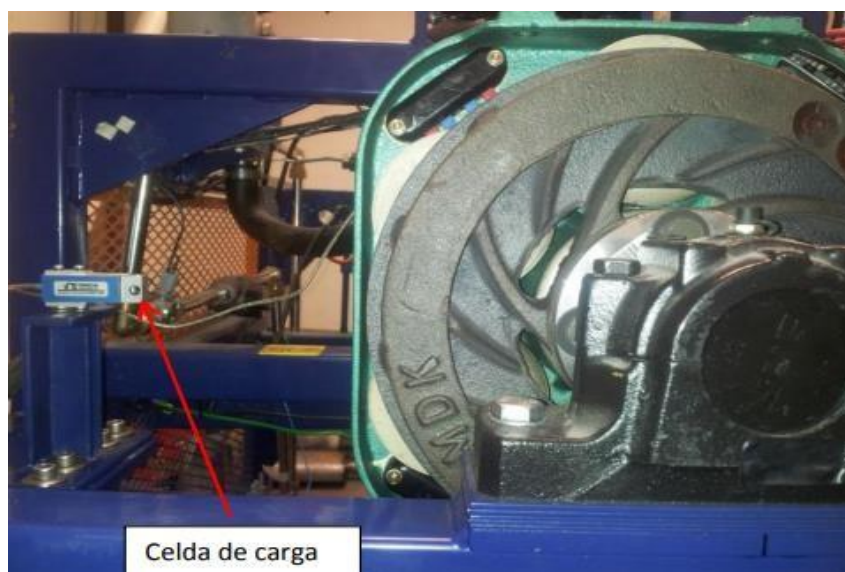


Fig. 4. Celda de carga [18].

Como se puede visualizar en la Tabla III, esta celda tiene una capacidad nominal de 100 libras de fuerza y tiene la capacidad de medir fuerzas de compresión, además, tiene una salida estándar de 3 mV/V y funciona bien con el recomendado 10 VDC. La celda opera dentro de un bajo margen de error, con valores de linealidad de menos del 0.03% de capacidad, lo que permite obtener lecturas consistentes durante las pruebas. Su estructura es hecha de aluminio con recubrimiento IP67, protegiendo el instrumento del polvo y la humedad característicos de los entornos industriales, también puede soportar temperaturas que oscilan entre -55 y 90 grados Celsius. Estas características la hacen apropiada para su uso en las aplicaciones de banco del dinamómetro Armfield CM11, donde se requiere precisión en la medición del torque aplicado por el motor [23].

TABLA III

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS – CELDA DE CARGA LCEC-100 [23].

Parámetro	Especificación
Modelo	LCEC-100
Capacidad nominal	100 lbf (45 kgf)
Tipo de carga	Compresión (calibrada en compresión)
Salida nominal	3 mV/V nominal
Excitación recomendada	10 VDC (máximo 15 VDC)
Linealidad	±0.03% de la escala completa
Rango de temperatura operativa	-55 a 90 °C (-65 a 200 °F)
Rango de temperatura compensada	-15 a 65 °C (0 a 150 °F)
Sobrecarga segura	150%
Resistencia de ingreso	350 Ω +50/-3.5 Ω
Resistencia de salida	350 ±3.5 Ω
Carga lateral permitida	50% de la capacidad nominal
Clase de protección	IP67
Cableado	Cable blindado de 4 conductores, 3 m

2.5. Tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB 6009

En la Figura 5 se presenta la tarjeta de adquisición de datos USB-6009 de National Instruments, se destacan varios elementos clave: el soporte para el cable USB, que evita tensiones en la conexión; los terminales de tornillo, utilizados para la entrada y salida de señales; el indicador

LED, que muestra el estado del dispositivo; y el conector USB, que permite la comunicación con la computadora y su alimentación. Esta tarjeta es ampliamente utilizada en automatización, control y monitoreo, especialmente con el software LabVIEW.

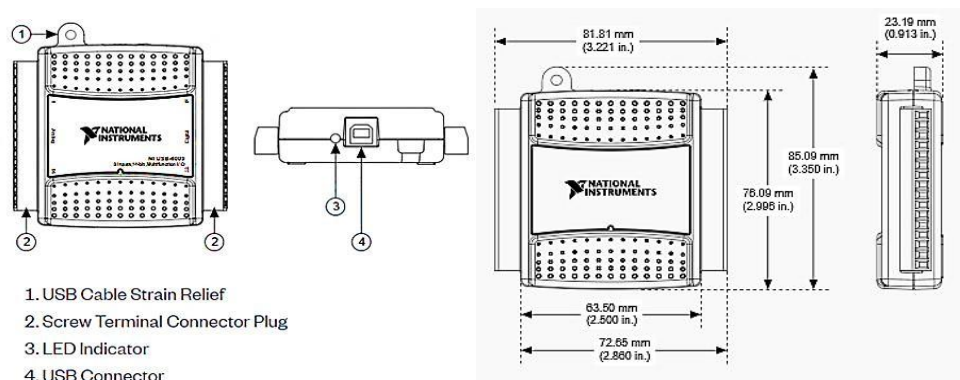


Fig. 5. DAQ NI USB 6009 [24].

Como se menciona la DAQ NI USB-6009 es una herramienta empleada para la digitalización de señales analógicas provenientes de los sensores del banco dinamométrico, posee entradas y salidas analógicas, En la Tabla IV, se visualiza sus principales características, las cuales garantiza la captura precisa de datos en los ensayos experimentales [24].

TABLA IV
ESPECIFICACIONES DAQ NI USB 6009 [24].

	Descripción	Característica
Entradas analógicas	Diferencial	4
	De un solo extremo	8, seleccionable por software
	Diferencial	14 bits
	De un solo extremo	13 bits
Resolución de entrada	Frecuencia máxima de muestreo	48 kS/s, dependiente del sistema
	Voltaje de trabajo	± 10 V
	Impedancia de entrada	144 k Ω
	Salidas analógicas	2
Salida analógica	Resolución de salida	12 bits
	Rango de salida	0 V a +5 V
	Impedancia de salida	50 Ω
	P0. <0.7>	8 líneas
E/S digitales	P1. <0.3>	4 líneas

La DAQ se encarga de capturar las señales físicas (temperatura y velocidad angular del motor) como se visualiza en la Figura 6 y convertirlas en señales procesables por un software de control como LabVIEW. La precisión de las señales adquiridas depende de la resolución de bits del sistema DAQ, así como de la frecuencia de muestreo [25].

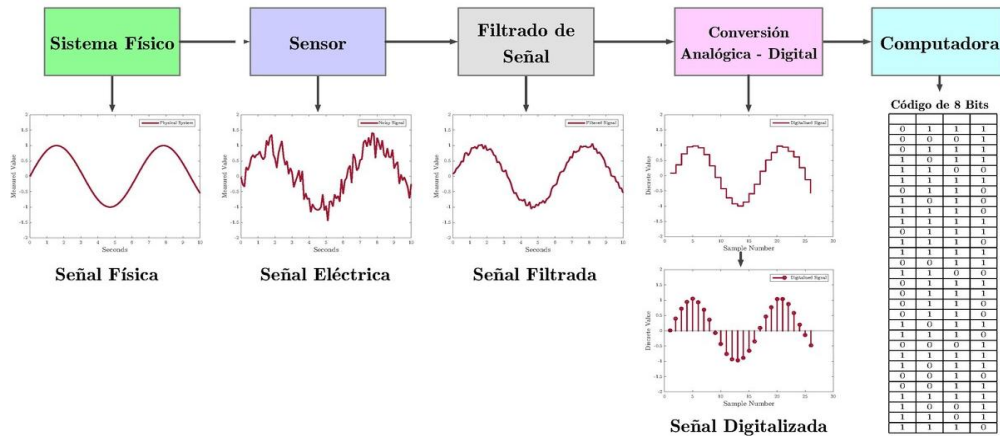


Fig. 6. Señales Analógicas en Sistemas DAQ [25].

2.6. ECU Re-programable Proteus Large Universal ECU

La Unidad de Control Electrónico (ECU) re-programable es un módulo electrónico que permite modificar los niveles de rendimiento de un motor de combustión interna. La Proteus Large Universal ECU que se puede visualizar de forma física en la Figura 7, es un controlador que soporta múltiples protocolos de comunicación por medio de 3 socket, capaz de manejar hasta 128 entradas y salidas digitales y análogas, debido a su capacidad de reprogramación permite modificar dinámicamente parámetros del motor, como los mapas de inyección con software como TunerStudio, lo cual es esencial para mantener las pruebas de forma correcta ante cambios de carga inducidos por el freno electromagnético [26].



Fig. 7. Proteus Large Universal ECU [27].

2.7. Control proporcional, integral y derivativo.

El control PID, es una forma de regulación usada en sistemas de control automático [28]. Con respecto al freno electromagnético, el PID permite regular la corriente que se aplica al freno para mantener constante la carga sobre el motor que se está probando, la correcta configuración se basa en la combinación de tres parámetros K_p (proporcional) que ajusta la respuesta del sistema en función del error instantáneo, K_i (integral) que corrige errores acumulativos y K_d (derivativo) que anticipa cambios en la señal de error para reducir oscilaciones, es esencial para garantizar una respuesta estable y minimizar errores en la aplicación de la carga [29].

El diagrama de la Figura 8 muestra cómo trabaja un controlador PID, en este diagrama está representado un sistema con retroalimentación donde la señal de referencia $r(t)$ (el dato que se espera) es comparado con la salida real del sistema $y(t)$, produciendo una diferencia o error $e(t)$. Este error se calcula mediante tres acciones en paralelo: una acción proporcional (P) que responde de forma inmediata al error, una acción integral (I) que elimina desviaciones constantes en base a la acumulación del error en el tiempo, y una acción derivativa (D) que toma en cuenta cómo se está cambiando el error para anticipar el comportamiento futuro del sistema. La combinación de las tres acciones permite crear la señal de control que será entregada al proceso $u(t)$ para ser ajustada de manera que cumpla con las metas establecidas.

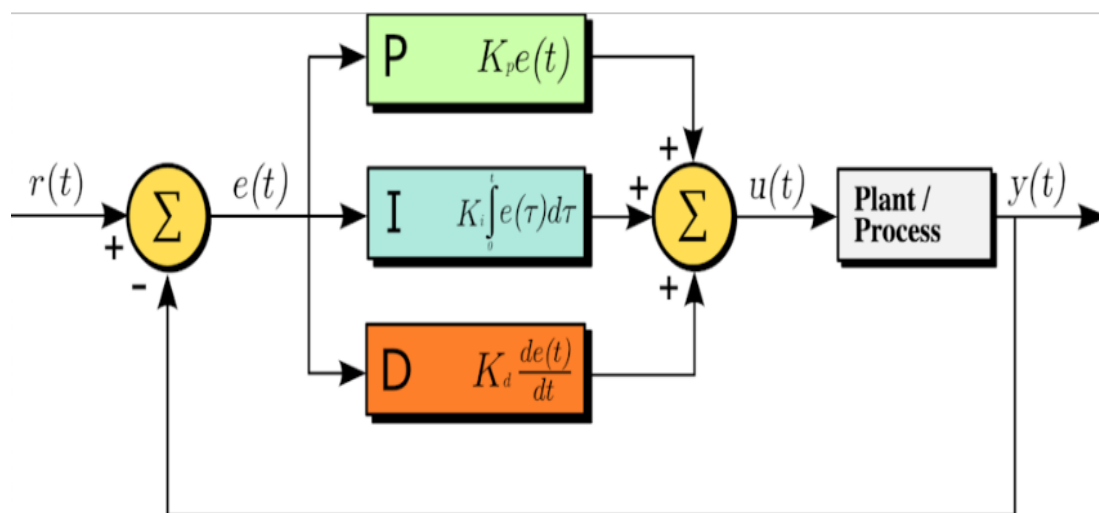


Fig. 8. Circuito del control PID [30].

Existen varios métodos para la optimización de controladores PID algunos de los enfoques más reconocidos para el ajuste son el método de Ziegler-Nichols y el de Cohen-Coon. Ambos métodos proporcionan un punto de partida para los valores de K_p , K_i y K_d , pero la sintonización debe ser verificada y ajustada experimentalmente para adaptarse a las

condiciones específicas del sistema como se muestra en la Figura 9. En sistemas como el freno electromagnético, que tienen comportamientos no lineales, la sintonización permite minimizar oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema.

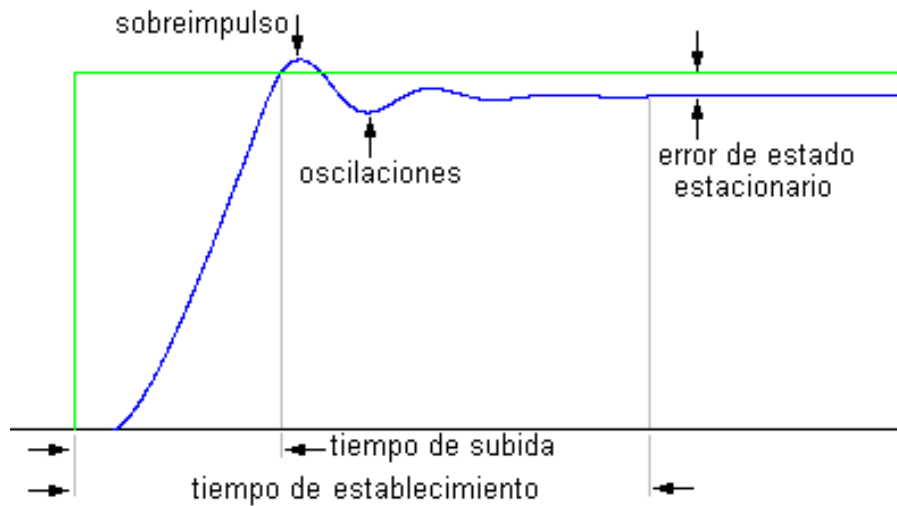


Fig. 9. Sintonización de Controladores PID [31].

2.8. Software LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación visual utilizada en la implementación de sistemas de control, fallas de un motor y adquisición de datos en entornos industriales y de investigación, se puede visualizar su software en la Figura 10, donde se representa un diagrama de bloques con un control PID y dispositivos de adquisición de datos, que facilita la interacción entre señales de entrada y salida, así como el procesamiento de datos en tiempo real, al permitir construir programas de forma visual. Debido a su versatilidad de uso, este tipo de estructuras es común en entornos educativos, laboratorios y aplicaciones industriales [32].

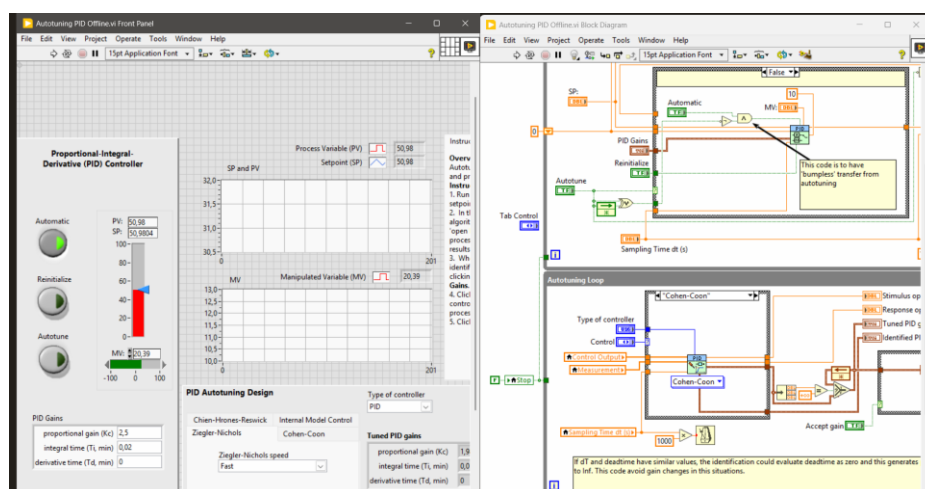


Fig. 10. Diagrama de bloques LabVIEW.

2.9. Software TunerStudio

TunerStudio es un software de calibración y monitoreo en tiempo real, diseñado específicamente para trabajar con sistemas de gestión electrónica del motor como MegaSquirt, Speeduino, entre otros. Su principal utilidad radica en la capacidad de visualizar y modificar variables esenciales del motor, tales como la proporción de aire y combustible (AFR), el avance del encendido, y la eficiencia volumétrica (VE), mediante mapas tridimensionales y gráficos en tiempo real como se visualiza en la Figura 11. TunerStudio incluye una función llamada Analyze Live, conocida también como Auto tune, que ajusta automáticamente el mapa de inyección de combustible. Para utilizar esta herramienta es necesario contar con una ECU compatible y una sonda lambda de banda ancha conectada al sistema [33].

	100	88	93	97	99	113	112	121	127	129	124	120	115
	95	85	96	96	95	111	112	117	118	124	119	112	103
	90	75	90	93	93	86	95	115	111	118	118	111	101
m	80	69	82	77	81	81	88	104	95	102	104	104	96
a	75	52	63	74	75	79	87	89	90	92	87	90	80
p	70	43	45	71	71	76	80	83	89	85	80	79	78
k	65	42	42	60	67	70	70	79	83	80	82	80	78
p	60	42	41	50	62	66	68	78	81	71	75	73	72
a	55	38	36	39	50	62	65	73	74	63	68	67	65
	50	33	36	38	44	58	60	59	66	60	61	60	59
	40	33	37	39	41	45	48	50	49	45	48	47	46
	25	30	31	41	41	52	38	33	27	28	27	27	26
		800	1100	1400	1800	2300	2800	3200	4200	5200	5700	6300	7000

Fig. 11. Interfaz de ajuste del mapa de la ECU [33].

Este programa es compatible con múltiples ECUs programables, tales como MegaSquirt, Speeduino, MS3Pro, MicroSquirt, y otras. Esta compatibilidad lo convierte en un software ampliamente utilizado en proyectos de desarrollo automotriz, prototipado rápido, y sistemas experimentales de combustión interna, además, TunerStudio incluye funciones para la personalización de dashboards y alertas de fallas. Esto lo convierte en una herramienta ampliamente utilizada tanto en ambientes académicos como en entornos industriales de bajo costo, especialmente para la calibración de ECUs programables en proyectos de investigación y desarrollo [33].

2.10. Regresión Lineal y coeficiente de determinación R^2

En [34], se determina que la regresión lineal es un proceso matemático que busca ajustar una recta de regresión para un conjunto de datos, de manera que se minimicen las desviaciones entre los valores observados y los que predice la estrategia. Esta técnica se utiliza para obtener la Ecuación 3.

$$y = mx + b \quad (3)$$

Donde:

- y = es la variable dependiente, aquí identificada como el voltaje.
- x = es la variable independiente (en este caso, el peso).
- m = es la pendiente, que indica la relación entre las dos variables.
- b = es la intersección en el eje y , también conocida como el término constante.

El coeficiente de determinación, conocido como R^2 , es un indicador estadístico que refleja qué tan bien un modelo de regresión representa los datos observados. Su valor varía entre 0 y 1, donde un número cercano a 1 señala que el proceso captura la mayor parte de las desviaciones presente en los datos, mientras que un valor semejante a 0 indica que el proceso no logra ajustar dicha variabilidad. En esencia, R^2 evalúa la efectividad del modelo para predecir o reproducir los resultados basándose en la relación entre las variables analizadas [34].

3. CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

El propósito de este capítulo es establecer el diseño metodológico que guía el desarrollo del presente trabajo de titulación. En esta sección se describe los métodos y las técnicas empleadas para la recopilación y análisis de datos, así como el cronograma de actividades y el presupuesto asociado a la ejecución del proyecto.

3.1. Metodología

El presente estudio se realiza desde un enfoque cuantitativo y experimental, dado que se fundamenta en la adquisición, gestión y análisis de datos para el diseño del sistema de control del banco. Como se puede apreciar en la Figura 12, la metodología se estructura en distintas fases para garantizar el correcto desarrollo del sistema de control PID en el freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11 y su integración con el software LabVIEW.

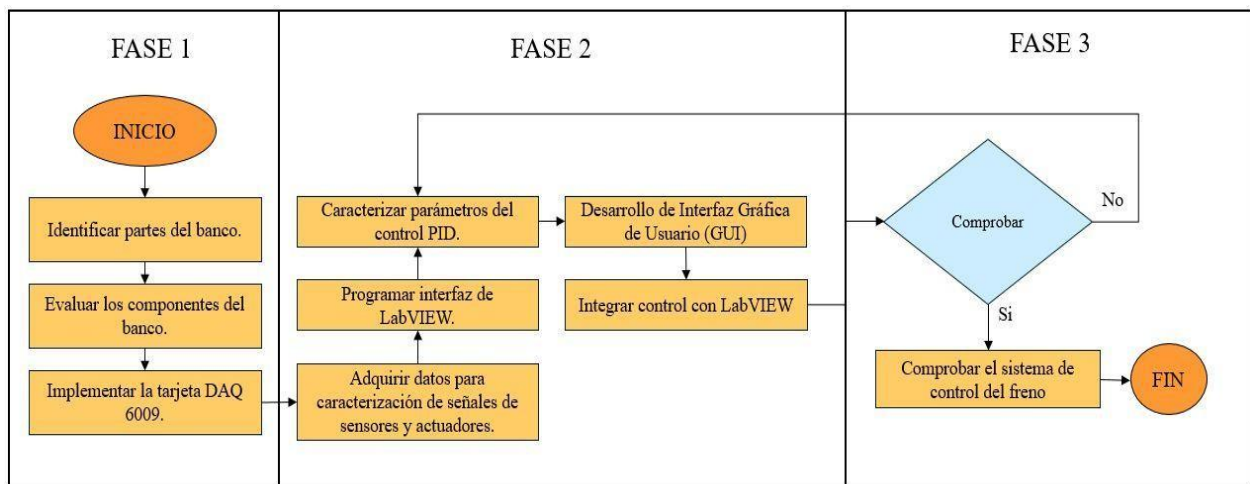


Fig. 12. Flujograma del desarrollo del proyecto.

En la primera fase, se inició con la identificación de los elementos del banco dinamométrico, enfocándose en reconocer tanto las partes mecánicas como electrónicos involucrados en el sistema de freno electromagnético, esta caracterización permitió establecer el punto de partida del proyecto y definir las conexiones físicas disponibles para la integración con LabVIEW. Posteriormente, se evaluó el estado de funcionamiento de dichos componentes mediante inspecciones visuales, pruebas de continuidad y verificación funcional. Una vez verificada la operatividad del banco, se procedió con la instalación de la DAQ NI USB-6009, herramienta esencial para la lectura de señales analógicas del sistema de freno.

La segunda fase correspondió al desarrollo del sistema de control, inicialmente, se caracterizaron los parámetros necesarios para configurar un controlador PID, identificando la relación entre las variables de entrada (señal de referencia o consigna) y la salida (intensidad de frenado), este proceso se complementó con la adquisición de datos provenientes de sensores conectados al banco, tales como sensores CKP y TPS, para ello, se utilizó LabVIEW, plataforma que permitió el diseño gráfico del control, el registro de datos y seguimiento en tiempo real. A continuación, se desarrolló una Interfaz de Usuario Gráfica (GUI) dentro del mismo entorno, diseñada para que el operador pueda monitorear el estado del sistema y ajustar los parámetros PID de manera manual o automática. Finalmente, se integraron los módulos de adquisición, procesamiento y visualización en un único entorno funcional dentro de LabVIEW.

La tercera fase se centró en la validación del sistema implementado, en esta etapa se realizaron pruebas funcionales del freno electromagnético bajo condiciones controladas. Para verificar su desempeño, se diseñó un proceso de comprobación lógica donde, si los resultados del control no cumplían con los criterios de estabilidad y respuesta deseados, se retroalimentaba el sistema regresando a las fases anteriores para ajustar los parámetros del controlador o mejorar la configuración de adquisición. Una vez que los resultados fueron satisfactorios, se procedió con la comprobación final del sistema de control, asegurando su estabilidad operativa, capacidad de respuesta ante variaciones en la consigna y compatibilidad con el entorno LabVIEW.

Cabe destacar que este procedimiento metodológico integró herramientas de medición, programación y control que garantizaron el correcto desarrollo del sistema. Entre los principales recursos se encuentran:

- Multímetro
- Osciloscopio
- Pirómetro
- Cautín
- Sensores de señal analógica
- Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009
- Dinamómetro Armfield modelo CM11
- Software LabVIEW 2020
- Computador portátil

3.2. Cronograma

En la Tabla V, se detalla el cronograma de actividades que describe las principales tareas a realizar a lo largo del desarrollo del proyecto, con su respectiva planificación temporal. Las actividades se distribuyen en semanas para garantizar una ejecución ordenada y eficiente del trabajo de titulación.

TABLA V
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividades	Año	2025															
	Meses	Mayo				Junio				Julio				Agosto			
	Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Identificación de las partes del banco dinámico																	
Evaluación del estado del freno electromagnético y sensores																	
Implementación de la tarjeta DAQ 6009																	
Adquisición de datos para caracterización																	
Presentación del Anteproyecto																	
Programación de la interfaz en LabVIEW																	
Caracterización y ajuste de parámetros del controlador PID																	
Integración del control PID con el banco y la interfaz LabVIEW																	
Comprobación del sistema de control del freno electromagnético																	
Elaboración y entrega del informe final																	

3.3 Presupuesto

El financiamiento para el desarrollo del proyecto cubre los insumos y materiales necesarios para la implementación del sistema de control y la caracterización del freno electromagnético. A continuación, se hace un desglose de los costos asociados en la Tabla VI.

TABLA VI
PRESUPUESTO







Elemento	Precio Unitario	Cantidad	Valor Total	Observación
DAQ NI 6009	\$120	1	\$120	
Cables	\$1	20	\$20	
Marcadores o identificadores de cables	\$4	2	\$8	
Terminales de enchufe hembra y macho	\$0.5	20	\$10	
Transformador de 110V AC a 24V DC	\$120	1	\$120	
Tornillos	\$0.25	40	\$10	
Sensor CKP	\$80	1	\$80	
Comprobación de bobina	\$4	2	\$8	
Amplificador	\$25	1	\$25	
Interruptor de desconexión rotativo	\$20	1	\$20	
Uso de laboratorio por hora	\$25	40	\$1000	No valorativo
Gastos varios	\$50	1	\$50	
		TOTAL	\$1471	

4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4.1. Identificación y evaluación de los componentes del banco.

La primera etapa del proceso cubre la identificación de las partes del banco dinamométrico con propósito de entender la estructura y funcionalidad del sistema, para ello, se llevó a cabo una inspección visual, lo que permitió observar la configuración de los componentes, la manera que están enlazados, su función dentro del conjunto general y los posibles puntos de entrada o salida de señales, a continuación, se presenta los principales componentes encontrados durante esta fase en la Tabla VII.

TABLA VII
IDENTIFICACIÓN DEL BANCO DINAMOMÉTRICO CM11.

Elemento	Figura	Elemento	Figura
Motor Volkswagen		Gabinete	
Freno electromagnético		Panel de control	
Celda de Carga		Cuerpo de aceleración TPS	

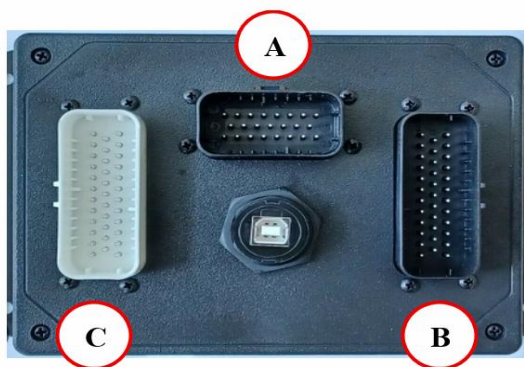
Sistema
de
control
del freno



Amplificador



Ecu
Programable



En la segunda etapa del proceso, se realiza una evaluación detallada de los componentes del banco dinamométrico Armfield CM11, esta etapa estuvo orientada a examinar a fondo el estado funcional de cada parte del sistema, la cual fue posible detectar una serie de anomalías que representaban limitaciones importantes para el funcionamiento adecuado del banco. En la Tabla VIII se presentan de manera organizada las fallas detectadas, mientras que las Figuras 13, 14, 15 y 16 ilustran visualmente algunos de los hallazgos observados durante esta fase de diagnóstico.

TABLA VIII

EVALUACIÓN DE LOS COMPONENTES.

Elemento	Diagnostico	Actividades
Cables de bujías	Deteriorado (Rotos).	Reemplazar.
Freno electromagnético	Oxidado.	Realizar mantenimiento.
Gabinete	Conexiones eléctricas sueltas / desorganizado.	Asegurar y organizar las conexiones del gabinete.
Falta de elementos	Fuente de alimentación 24V.	Implementar.
Sistema de control	Inoperativo.	Diseñar e implementar.
Cable de celda de carga	Inoperativo (Sin continuidad).	Reemplazar.



Fig. 13. Cables de bujías rotas y presencia de oxido en el freno electromagnético.



Fig. 14. Gabinete desorganizado y conexiones sueltas.

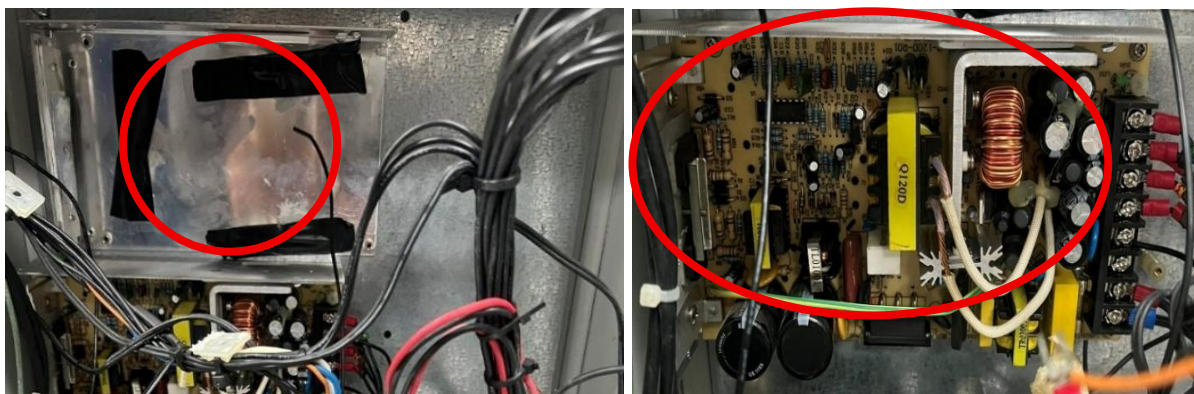


Fig. 15. Ausencia de elementos del banco (fuente alimentación 24V).

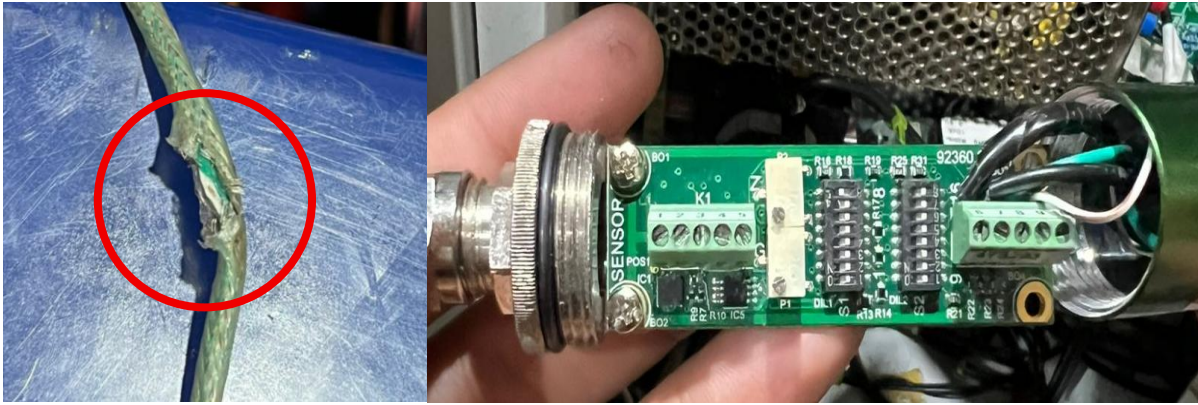


Fig. 16. Conexión defectuosa amplificador y celda de carga.

Tras el análisis realizado, fue evidente que el banco dinamométrico no se encontraba en condiciones óptimas para ofrecer un funcionamiento adecuado ni para llevar a cabo procesos de adquisición de datos que puedan ser utilizados en futuras investigaciones académicas o técnicas. A continuación, se procede en esta misma etapa a realizar el reacondicionamiento de los componentes, comenzando con el desmontaje del freno electromagnético, uno de los componentes claves del banco, utilizando herramientas específicas como juegos de llaves y dados, además de la pluma hidráulica, lo cual facilitó la manipulación de objetos pesados como se ilustra en la Figura 17. El disco conductor presentaba signos evidentes de corrosión superficial, por lo que se aplicó un mantenimiento preventivo utilizando un producto desoxidante, lo cual ayudó a restaurar su superficie, una vez finalizado el mantenimiento, se procedió a reinstalar el freno electromagnético, verificando que todo opere con normalidad.



Fig. 17. Desmontaje y mantenimiento preventivo del freno electromagnético.

Como parte de las acciones comprendidas dentro de esta misma etapa, se realizó pruebas de continuidad eléctrica con el propósito de verificar el estado de todas las líneas

internas del gabinete principal del banco dinamométrico. Esta actividad fue fundamental, ya que durante la revisión inicial se detectaron irregularidades en algunas conexiones, como cables sueltos, roturas parciales en los conductores y falsos contactos que podían generar fallos intermitentes o incluso riesgos de seguridad durante la operación del sistema, para ejecutar esta labor se utilizó un multímetro digital, herramienta que permitió comprobar que cada conexión estuviera correctamente establecida y que el flujo eléctrico se mantuviera constante en todo el recorrido. A medida que se identificaban los puntos defectuosos, se procedía inmediatamente a su corrección, en algunos casos, los cables fueron descartados y reemplazados por nuevos conductores, garantizando así una transmisión segura de la señal. Además, se aprovechó la intervención para organizar todas las conexiones internas, reubicándolas y asegurándolas de forma más ordenada dentro del gabinete, esto no solo facilitó el acceso para futuras intervenciones o mantenimientos, sino que también incrementó la seguridad general del sistema, minimizando riesgos de cortocircuitos o interferencias. La Figura 18 ilustra el resultado de esta mejora, evidenciando el estado final del cableado tras haber sido intervenido.



Fig. 18. Reacondicionamiento del gabinete y conexiones eléctricas.

Se procedió con la adquisición e instalación de una nueva fuente de alimentación de 24V DC con una capacidad de 30 amperios. Esta fuente brinda la energía requerida para operar la tarjeta de control que opera el freno electromagnético. En la Figura 17 se puede apreciar con claridad la disposición física de esta fuente dentro del sistema. Adicionalmente, en la Figura 19 se visualiza la forma en que fue conectada a la red eléctrica convencional del laboratorio, aprovechando a una alimentación de 110V (fase y neutro). Esta entrada de corriente alterna es transformada por la fuente en una salida de 24V de corriente continua, que posteriormente es

dirigida al sistema de control del freno y al amplificador de la celda de carga. La Figura 20 permite visualizar la conexión del sistema de control del freno.

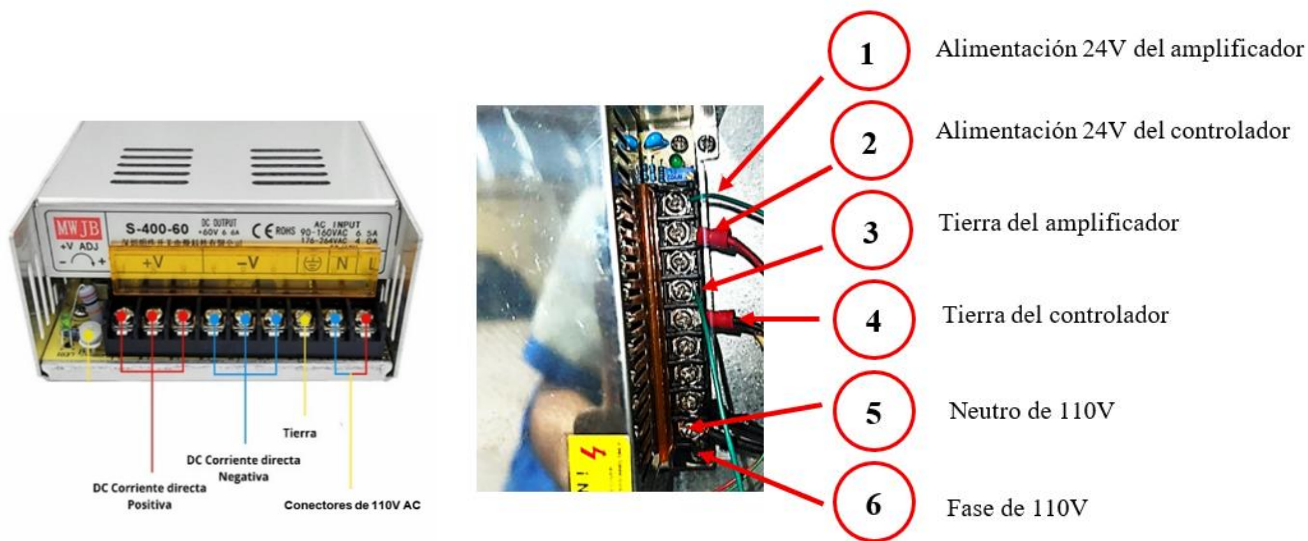


Fig. 19. Pin Out de la fuente de alimentación de 24V.

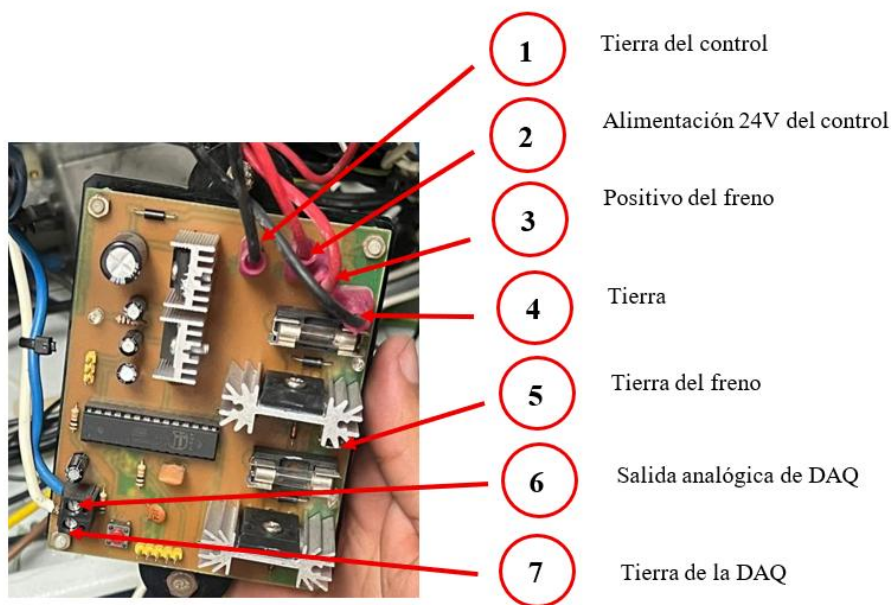


Fig. 20. Pines de conexión del sistema de control.

Una vez aseguradas las condiciones eléctricas y la alimentación del sistema, se realizó la comprobación de funcionamiento de la tarjeta encargada del control del freno electromagnético. Esta tarjeta permite gestionar el frenado de forma controlada, para efectuar dicha verificación, se utilizó una conexión de prueba que incluyó la integración de la tarjeta DAQ y un potenciómetro, siguiendo un esquema que puede observarse en la Figura 21. Esta configuración provisional tuvo como finalidad comprobar que el controlador del freno

respondiera adecuadamente a las variaciones de señal simuladas desde el potenciómetro, es decir, se simuló una entrada analógica que, en condiciones reales, sería generada por el software LabVIEW o por el sistema de control automático, la respuesta del controlador fue evaluada en función de su reacción a estos cambios de voltaje. Cabe destacar que dicha tarjeta incluye un microcontrolador ATmega, conocido por su versatilidad en aplicaciones de control y debido a este componente, la tarjeta puede interpretar señales de entrada, procesarlas y actuar sobre el freno en tiempo real. Esta verificación temprana resultó ser de gran utilidad, ya que nos permitió detectar posibles errores de conexión o fallas en el hardware antes de continuar con la integración completa del sistema.

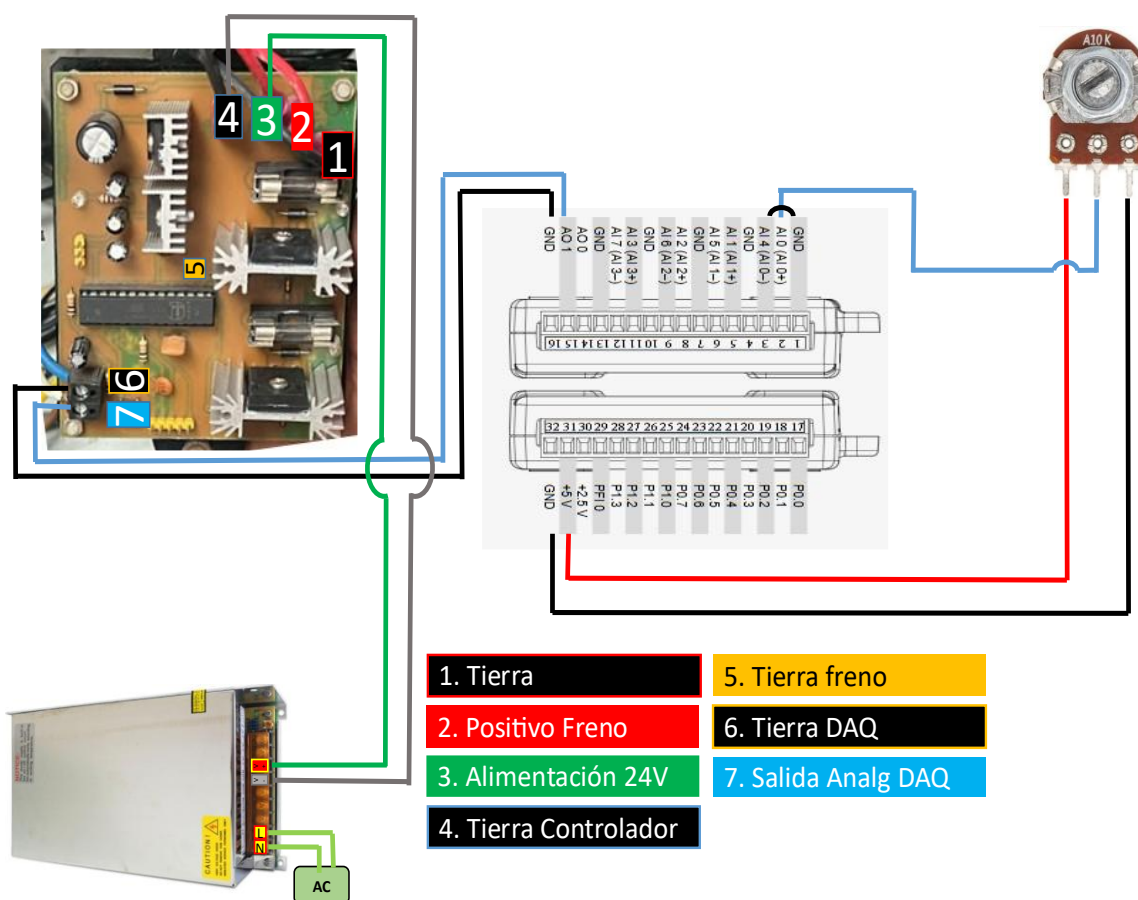


Fig. 21. Pines de conexión del sistema de control, fuente de alimentación y DAQ.

4.2. Implementación de la tarjeta DAQ 6009.

En la tercera etapa, se procede con la instalación de la tarjeta DAQ NI USB-6009, este dispositivo establece el puente de comunicación entre el banco dinamométrico físico y la computadora, permitiendo que todos los datos provenientes de los sensores puedan ser procesados y visualizados mediante el software LabVIEW. La instalación no solo implicó la

conexión física de la tarjeta a través del puerto USB, sino también la identificación y asignación de cada canal analógico para su correcto funcionamiento.

En esta etapa se conectaron principalmente tres señales de entrada: por un lado, la correspondiente al sensor CKP que permite obtener la velocidad de giro del motor de combustión; por otro, la señal emitida del sensor de carga, que refleja el esfuerzo aplicado en función del frenado, y finalmente, la señal del sensor ECT que proporciona la lectura en tiempo real de la temperatura del refrigerante del motor. Esta tercera señal resultó particularmente importante para monitorear el estado térmico del motor durante las pruebas, permitiendo detectar incrementos de temperatura y prevenir sobrecalentamientos que pudieran comprometer la integridad del ensayo.

Paralelamente, se configuraron las salidas analógicas de la tarjeta DAQ, la primera transmite las señales de control necesarias para activar o regular el freno electromagnético y la segunda salida, a través de un relé, permite al usuario decidir si trabajar con el potenciómetro o controlar el cuerpo de aceleración desde LabVIEW, enviando la señal correspondiente al sensor de posición del acelerador. La Figura 22 permite visualizar la forma en que estas conexiones fueron realizadas.

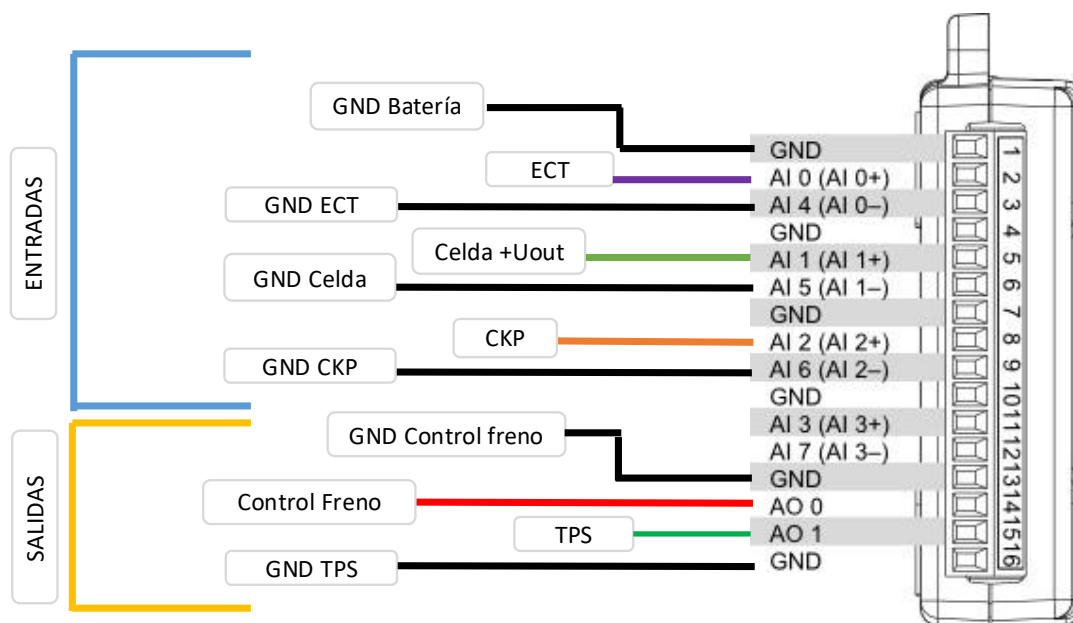


Fig. 22. Conexión de la DAQ NI USB 6009.

A continuación, en la Tabla IX se describe el datasheet para la DAQ.

TABLA IX
DATASHEET DE CONEXIÓN PARA LA DAQ NI USB 6009.

Señal de entrada	Pines DAQ 6009
Señal del sensor CKP (+)	AI2 (PIN8)
Señal del sensor CKP (-)	AI6 (PIN9)
Señal del sensor ECT (+)	AI0 (PIN2)
Señal del sensor ECT (-)	AI4 (PIN3)
Señal de celda de carga (+)	AI1 (PIN5)
Señal de celda de carga (-)	AI5 (PIN6)
Señal de Salida	Pines DAQ 6009
GND del control del freno electromagnético	GND (PIN13)
Señal del control del freno electromagnético	AO0 (PIN14)
Señal del control del acelerador (TPS)	AO1 (PIN15)
GND del control del acelerador (TPS)	GND (PIN16)

Una vez instalada la tarjeta de adquisición, se inicia la captura de datos de sensores y actuadores para caracterizar sus señales bajo distintas condiciones del motor. Se evalúa la linealidad y la respuesta temporal de los dispositivos, lo cual es necesario para configurar el sistema de control con base en un comportamiento físico real.

4.3. Caracterización de señales de sensores y actuadores

4.3.1. Caracterización de la Celda de carga.

Uno de los procedimientos dentro de la fase 2, fue la calibración de la celda de carga junto con su respectivo amplificador, para llevarla a cabo correctamente, se inició retirando el perno que conecta físicamente la celda al freno electromagnético, lo que permitió aislarla mecánicamente del sistema y se procedió a alimentar la celda utilizando la fuente de 24V previamente instalada en el sistema, la cual ofrece la corriente continua necesaria para que el sensor funcione adecuadamente.

En esta fase fue indispensable la identificación de los pines del módulo amplificador, ya que cada uno de ellos desempeña una función determinada dentro del proceso de acondicionamiento de la señal. Algunos pines están destinados exclusivamente a la alimentación positiva y negativa, mientras que otros son responsables de recibir la señal que

entra desde la celda y de generar la señal amplificada que se transmitirá posteriormente hacia la tarjeta DAQ. La correcta conexión de estos pines fue fundamental para evitar errores de lectura, sobre todo considerando que las señales emitidas de la celda de carga son de muy baja magnitud y altamente sensibles a cualquier interferencia. La Figura 23 ilustra con claridad la disposición de estos pines. Este paso, representa la base para que el sistema pudiera realizar mediciones precisas de torque en cada ensayo posterior.

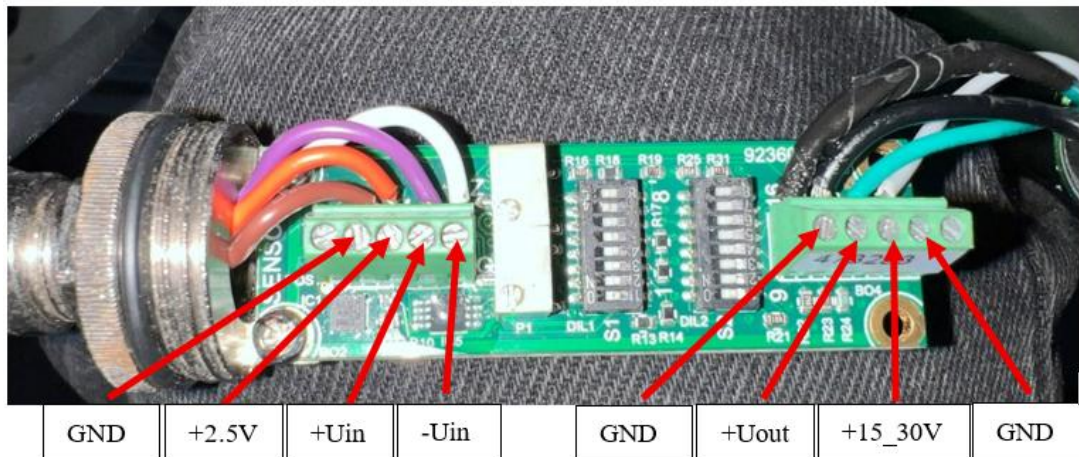


Fig. 23. Pines de conexión del amplificador.

La calibración consistió en aplicar diferentes pesos conocidos directamente sobre la celda, utilizando como referencia una balanza digital, lo cual garantizó que las masas utilizadas fueran confiables. Para cada peso añadido, se registró el valor de salida que aparecía en el multímetro conectado al terminal de salida +Uout del amplificador. La Figura 24 documenta visualmente el proceso de calibración, mostrando el posicionamiento de las pesas sobre la celda y la lectura en el multímetro.



Fig. 24. Proceso de calibración de celda de carga.

De esta manera, se generó una tabla de valores que refleja cómo variaba el voltaje en función del aumento progresivo de carga. A continuación, se muestra en la Tabla X, los datos de voltaje con respecto al peso añadido.

TABLA X

DATOS DEL PESO Y VOLTAJE DE LA CELDA DE CARGA.

Caracterización de la celda de carga													
Voltaje (V)	0,3	0,4	0,5	0,62	0,72	1	1,23	1,58	2,01	2,32	2,54	2,88	3,34
Peso (Kg)	0	1	2,22	3,02	4,19	8,33	10,58	12,2	16,36	20,5	22,4	26,3	31,5

Una vez obtenidos los datos de peso y voltaje (ver Tabla 10), se analiza su relación mediante regresión lineal, registrando los valores en Excel, esta técnica permitió observar cómo varía el voltaje según el peso aplicado. Los resultados se representaron en un gráfico de dispersión en la Figura 25, con el voltaje en el eje x y el peso en el eje y, sobre el cual se trazó la línea de tendencia correspondiente.

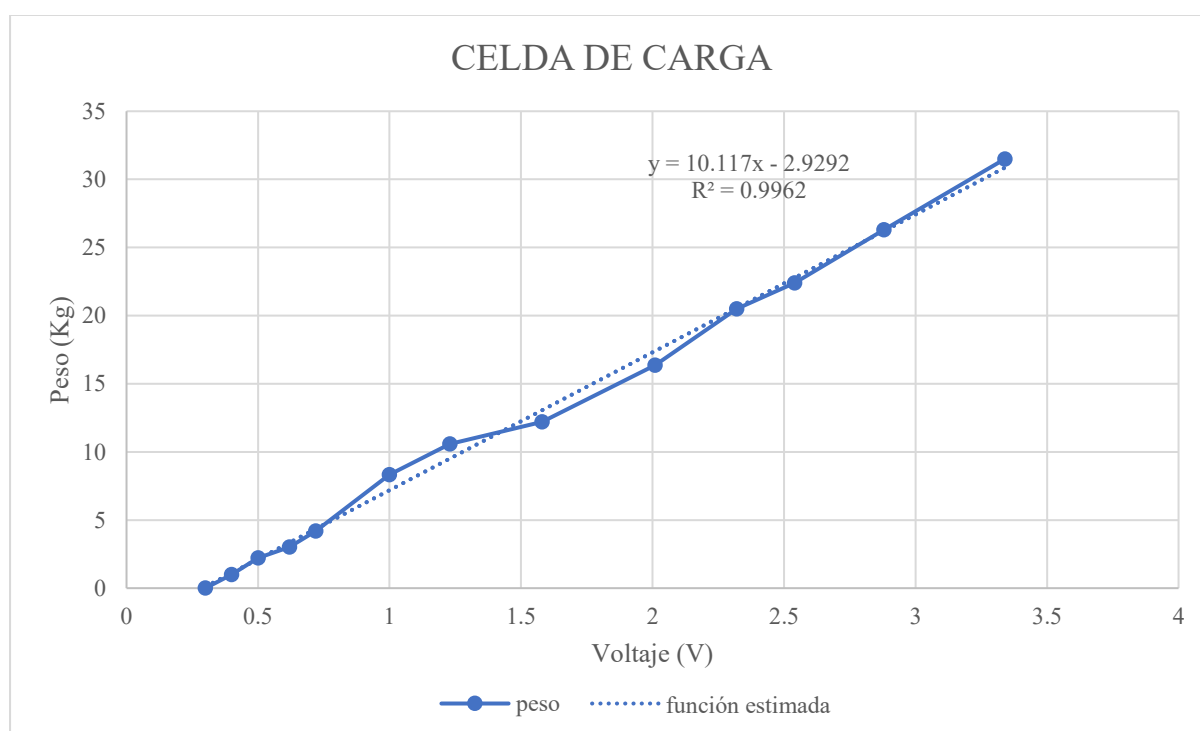


Fig. 25. Caracterización de la celda de carga.

La ecuación de la línea de tendencia que se encuentra en la Figura 25, predice el voltaje para cualquier valor dado de peso, esta relación matemática permite el proceso de conversión de unidades dentro del sistema de adquisición de datos, ya que transforma una magnitud física

como la masa, expresada en kilogramos, en una señal eléctrica medible por el sistema (voltaje), permitiendo así el posterior procesamiento digital de la información.

$$f(x) = 10.117x - 2.9292 \quad (4)$$

La Ecuación 4, tiene un coeficiente de determinación $R^2=0.9962$, lo que indica que el 99.62% de la variabilidad en el voltaje puede ser explicada por el peso, con esto se determina la validez de esta ecuación. Además, contar con una expresión matemática tan precisa es indispensable para su implementación en el software LabVIEW, donde será utilizada como función de conversión en tiempo real.

4.3.2. Caracterización del sensor de posición del cigüeñal (CKP).

Se tomó en cuenta la señal del sensor CKP de tipo hall, donde primero se identifica los pines del socket (alimentación, tierra y señal) como se muestra en la Figura 26.



Fig. 26. Pin del sensor de posición del cigüeñal (CKP).

Para adquirir los datos provenientes del sensor de posición del cigüeñal, se procedió a realizar un empalme en el cable correspondiente a la línea de señal, específicamente en el Pin 2 del conector del sensor. Este punto de conexión fue elegido por ser el canal que transmite la información del régimen del motor, es decir, los pulsos generados por la rotación del cigüeñal. A partir de este punto, el cable fue dirigido hacia el Pin 10 de la ECU programable, que actúa como interfaz entre el sensor y los sistemas de control. El objetivo de este procedimiento fue permitir el acceso directo a dicha señal desde la tarjeta de adquisición de datos DAQ NI USB-6009 como se muestra en la Figura 27.

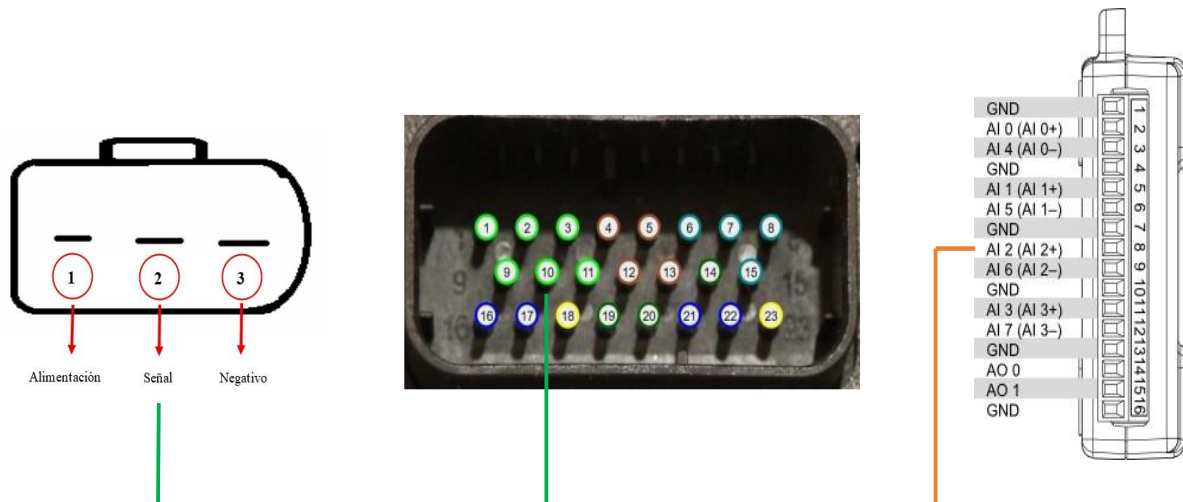


Fig. 27. Esquema de conexión del sensor (CKP) a la DAQ.

Debido a esta conexión, la DAQ puede interpretar la señal digital como una secuencia de pulsos, los cuales están relacionados con la velocidad de rotación del motor. En este caso, se aprovechó la configuración del motor que utiliza una rueda dentada con un diente perdido, para facilitar la sincronización y la detección del punto de referencia del ciclo del motor como se muestra en el oscilograma de la Figura 28, esta característica permite transformar los pulsos eléctricos en lecturas de RPM.

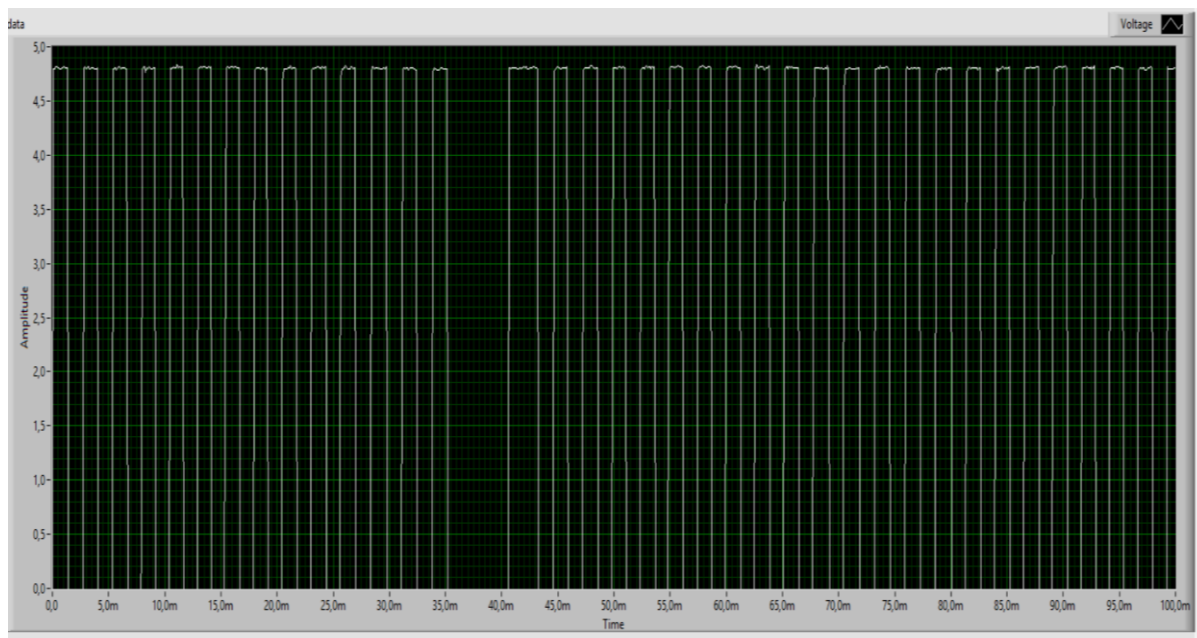


Fig. 28. Oscilograma del sensor (CKP).

4.3.3. Caracterización del sensor de temperatura del motor (ECT).

Dentro de los sensores a caracterizar se encuentra el sensor ECT, que se ubica en los ductos de refrigeración del motor para medir la temperatura del líquido refrigerante. Este sensor actualmente ocupa dos pines como se muestra en la Figura 29.

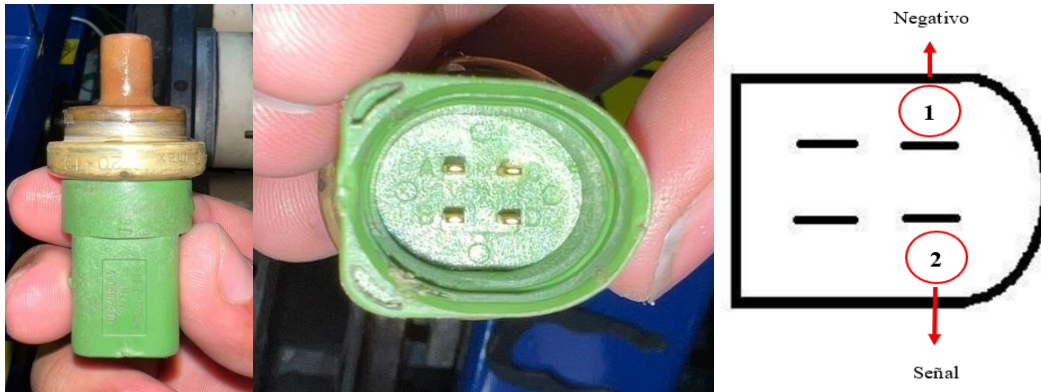


Fig. 29. Pines del sensor ECT.

Para esta caracterización se empleó un calefactor como fuente de calor y se utilizaron dos instrumentos de medición externos para registrar las variables de interés:

- Un pirómetro digital infrarrojo, utilizado para medir la temperatura superficial del agua en contacto directo con el sensor, con el fin de obtener el valor real de referencia en $^{\circ}\text{C}$ como se muestra en la Figura 30.



Fig. 30. Pirómetro digital prueba experimental 1.

- Un multímetro digital, conectado a la salida del sensor ECT, utilizado para registrar en tiempo real la señal de voltaje (V) emitida por el sensor ante cada variación de temperatura.

Se energizó el calefactor y se incrementó la temperatura de forma gradual como se muestra en la Figura 31, se registraron manualmente los valores de temperatura del agua y el correspondiente voltaje generado por el sensor, asegurando que no se produjeran daños ni condiciones de riesgo para los equipos utilizados.



Fig. 31. Prueba experimental 1 del sensor ECT.

Se realizó una segunda prueba experimental orientada a registrar el comportamiento eléctrico del sensor bajo condiciones reales de funcionamiento del motor. Se instaló el sensor ECT en el motor a evaluar, asegurando su ubicación en el alojamiento correspondiente del sistema de refrigeración. Simultáneamente, se realizó la conexión del sensor a dos instrumentos:

- Un multímetro digital, configurado para medir voltaje en corriente continua (DC), se conectó al terminal de salida del sensor con respecto a tierra.
- Una computadora portátil con el software TunerStudio previamente configurado y conectado a la ECU del motor.

Con todo el sistema conectado, se procedió a encender el motor, en estado frío, el software TunerStudio mostró valores como valor inicial la temperatura ambiente, a medida que el motor alcanzaba su temperatura de operación, la temperatura aumentó progresivamente, siendo registrada por TunerStudio en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en el panel de monitoreo.

Paralelamente, se registró el voltaje correspondiente leído en el multímetro digital, el cual mostraba una variación decreciente a medida que aumentaba la temperatura, debido al comportamiento negativo típico de un termistor NTC.

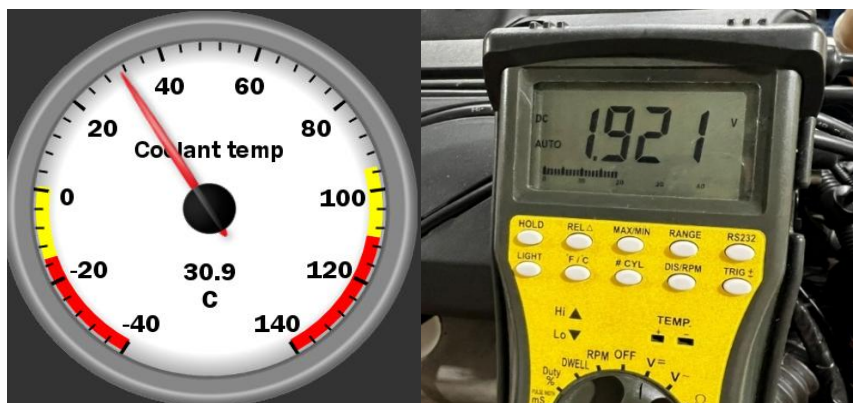


Fig. 32. Prueba experimental 2 del sensor ECT.

A continuación, se muestra en la Tabla XI los valores obtenidos.

TABLA XI
DATOS DE TEMPERATURA Y VOLTAJE DEL SENSOR ECT.

Caracterización del sensor ECT			
Ensayo 1: Calefactor		Ensayo 2: Software	
Temperatura (°C)	Voltaje (V)	Temperatura (°C)	Voltaje (V)
21.7	2.113	21,20	2,098
26.4	2.024	25,90	2,009
31.4	1.941	30,90	1,926
35.5	1.84	35,00	1,825
41.2	1.746	40,70	1,731
46.2	1.641	45,70	1,626
51.0	1.543	50,50	1,528
56.0	1.425	55,50	1,410
61.0	1.335	60,50	1,320
65.7	1.218	65,20	1,203
70.9	1.097	70,40	1,082
76.0	0.977	75,50	0,962
80.7	0.893	80,20	0,878
84.2	0.777	83,70	0,762
89,69	0,674	-	-
94,60	0,570	-	-
99,50	0,465	-	-
104,40	0,361	-	-
109,31	0,257	-	-

Durante el desarrollo del ensayo 2, realizado mediante el software TunerStudio para la caracterización del sensor ECT, se evidenció una limitación en la lectura de los valores de temperatura, específicamente, el software solo permitió registrar temperaturas hasta un valor máximo de 83,7 °C. A partir de este punto, no se obtuvo mayor retroalimentación del sensor en la interfaz, pese a que el sistema físico continuaba incrementando la temperatura. Esta situación podría estar relacionada con una restricción en la configuración del software, una limitación del protocolo de comunicación empleado o del rango operativo establecido por el software para la lectura del sensor.

Este hecho no afectó la validez de los resultados obtenidos, ya que el rango cubierto por el software corresponde al rango operativo habitual del motor en condiciones normales. Sin embargo, se complementó el análisis con el ensayo 1 (calefactor), el cual permitió registrar valores superiores de temperatura y voltaje, ampliando así el rango de caracterización del sensor ECT, lo cual, podría reflejar un comportamiento real con carga en el motor.

Los datos recopilados en la Tabla 11 se ingresaron en Microsoft Excel para realizar un ajuste por regresión lineal, como se muestra en la Figura 33 para el ensayo 1.

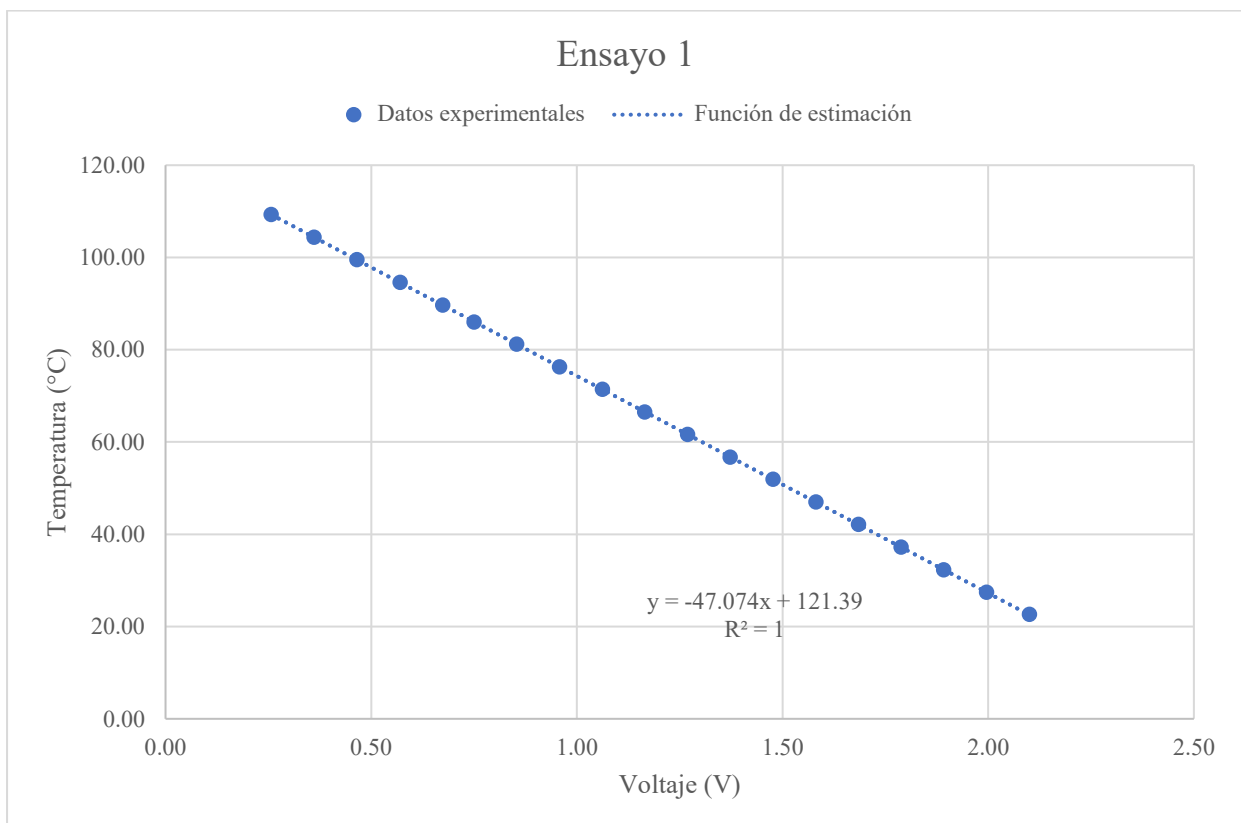


Fig. 33. Grafica temperatura vs voltaje del sensor ECT ensayo 1.

En el gráfico correspondiente al ensayo 1 se obtuvo una relación lineal entre el voltaje del sensor ECT y la temperatura, representada por la Ecuación 5.

$$f(x) = -47.074x + 121.39 \quad (5)$$

Por otro lado, en el gráfico del ensayo 2 se obtuvo la Ecuación 6.

$$f(x) = -47.027x + 121.31 \quad (6)$$

Considerando ambas ecuaciones, se concluye que la ecuación del ensayo 1 es la más adecuada para ser utilizada como modelo de calibración del sensor ECT dentro del sistema de adquisición de datos, esto se debe a que ofrece el mejor ajuste posible, con un $R^2=1$, lo cual garantiza mayor confiabilidad en la conversión de voltaje a temperatura. Además, su forma matemática mantiene coherencia con la del segundo ensayo, lo que refuerza la validez del comportamiento obtenido y respalda técnicamente su implementación.

Adicionalmente, durante el proceso de caracterización del sensor ECT, se realizó un empalme de un cable desde la línea de señal del sensor hacia el pin 20 del conector C de la ECU programable como se muestra en la Figura 34. Esta conexión permitió redirigir la señal analógica del sensor hacia la DAQ 6009, facilitando su lectura e interpretación en el entorno de LabVIEW.

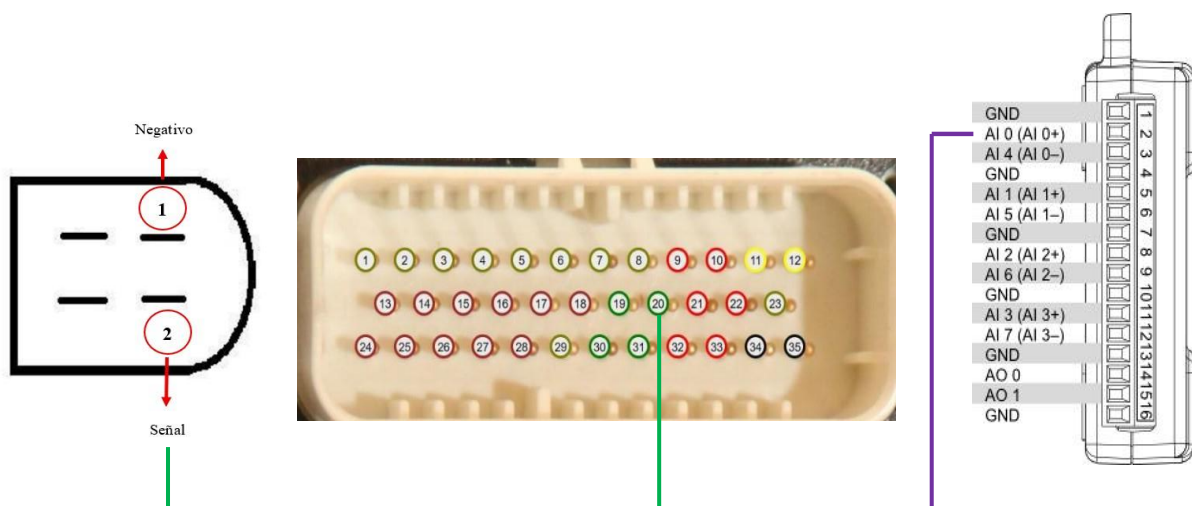


Fig. 34. Conexión del sensor ECT hacia ECU y DAQ.

4.3.4. Caracterización del sensor del pedal de aceleración (APS).

El dispositivo encargado de registrar el movimiento del pedal es un potenciómetro de 6 pines ubicado en el panel de control del banco dinamométrico, como se muestra en la Figura 35, transmitiendo datos a la ECU sobre la posición exacta del mismo. Esta información permite regular electrónicamente la apertura del cuerpo de aceleración, es necesario incluir dos señales: la del potenciómetro, que indica la demanda del operador, y la del cuerpo de aceleración, que ajusta su apertura según la señal del pedal.

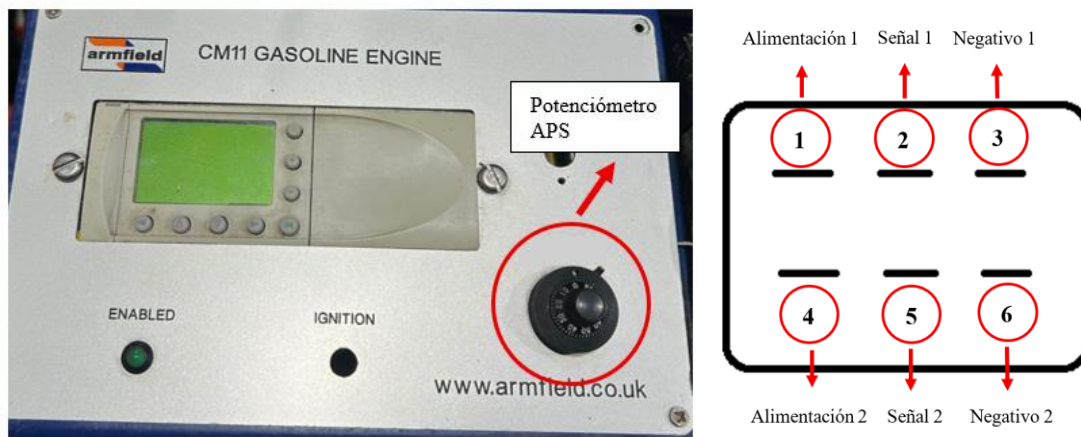


Fig. 35. Potenciómetro del pedal de aceleración.

4.3.5. Caracterización del cuerpo de aceleración electrónico (TPS).

Para establecer su correcta conexión y funcionamiento, se procedió a la identificación de los terminales eléctricos presentes en su conector de 6 pines, los cuales están distribuidos en dos hileras de tres terminales cada una, como se muestra en la Figura 36.

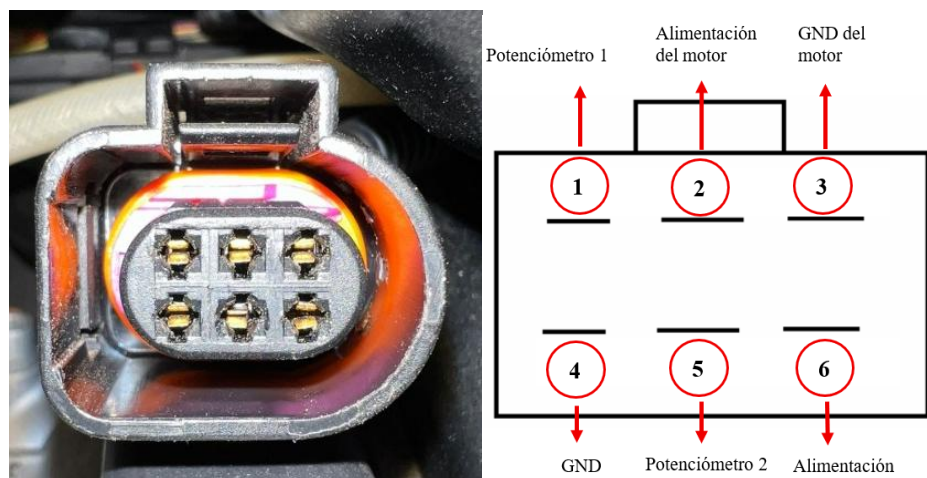


Fig. 36. Pin out del cuerpo de aceleración electrónico.

Con el objetivo de permitir el control remoto del cuerpo de aceleración desde el entorno de LabVIEW, se implementó un sistema de conmutación basado en un relé automotriz de 5 pines. Esta solución técnica fue necesaria debido a que el potenciómetro del TPS (Throttle Position Sensor) se encontraba físicamente instalado en el panel de mando del banco dinamométrico, imposibilitando su manipulación directa durante las pruebas automatizadas.

El relé actúa como interruptor electrónico controlado por una señal digital proveniente del módulo DAQ y cuando este activa el relé, se habilita el paso de voltaje hacia el potenciómetro del cuerpo de aceleración, el cual se controla a través de una salida analógica (AO1) del mismo sistema de adquisición de datos. Esto permite modificar la posición del acelerador desde el software LabVIEW, simulando la acción de un conductor.

La Figura 37 muestra la disposición de los terminales del relé y sus respectivas conexiones:

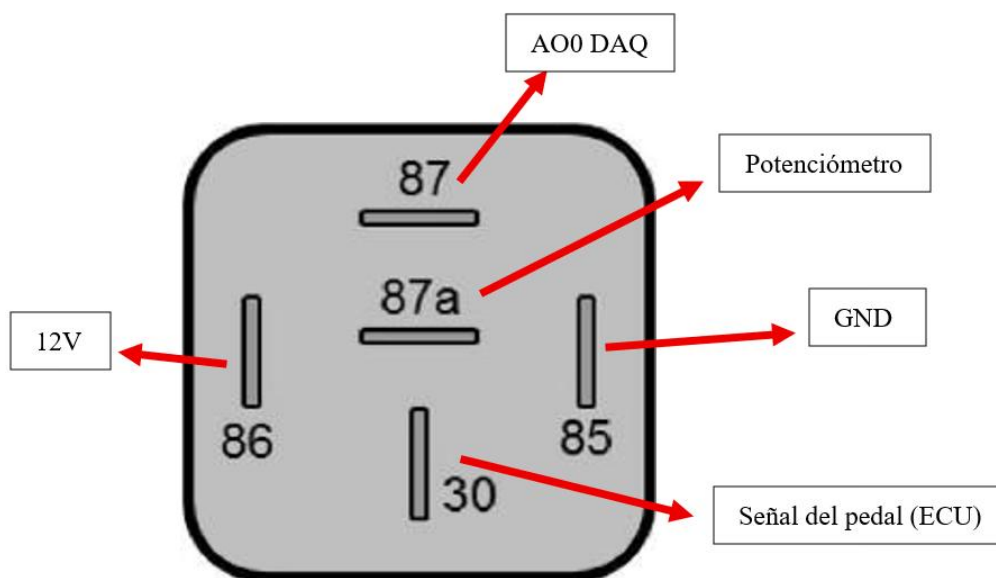


Fig. 37. Conexión del relé para la conmutación entre el control manual y automático.

A continuación; se explica cada pin:

- Pin 86: Conectado a +12V, energiza la bobina del relé.
- Pin 85: Conectado a GND, completa el circuito de activación.
- Pin 87a: Salida hacia el potenciómetro, en estado normalmente cerrado (NC), simulación de la señal del pedal.
- Pin 87: Conectado a la salida analógica AO1 del DAQ, habilita el control desde LabVIEW cuando el relé está activado.
- Pin 30: Señal del pedal hacia la ECU.

4.4. Desarrollo de interfaz del sistema de control en LabVIEW para el banco dinamométrico Armfield CM11

El desarrollo del software inicia con la apertura del entorno gráfico LabVIEW 2025. Desde la pantalla inicial, se selecciona la opción “Blank VI” como se muestra en la Figura 38, para crear un nuevo entorno de programación donde se desarrollará todo el control. Esta interfaz se compone de dos ventanas principales: el panel frontal (Front Panel), que sirve como la interfaz gráfica donde el usuario interactúa con los controles y visualiza las salidas, y el diagrama de bloques (Block Diagram), que contiene la lógica de programación y las conexiones entre los distintos componentes del sistema.

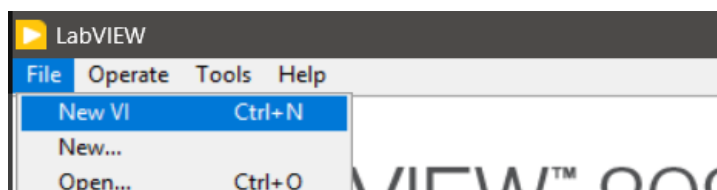


Fig. 38. Vista de la pantalla principal del entorno LabVIEW 2025.

El proceso inicia con el diagrama de bloques, que es donde se implementa la lógica del sistema, se determina la inclusión del nodo de control de ejecución como se muestra en la Figura 39, para lo cual se accedió a la categoría Structures y se seleccionó la estructura While, fue ubicada en el área de trabajo para delimitar el ciclo de ejecución continua. Posteriormente, dentro de este bucle, se incorporó un control de tipo booleano dando clic derecho, este control llamado Stop actúa como condición de parada para el ciclo.



Fig. 39. While Loop con control de parada en LabVIEW.

4.4.1. Bloque A: Obtención de datos de entrada de la DAQ

Dentro del While Loop, se inserta un nodo de tipo 'DAQ Assistant' mediante clic derecho en el diagrama de bloques para ingresar a la opción Measurement I/O, se procede a escoger NI-DAQmx y se selecciona DAQ Assistant como se muestra en la Figura 40.

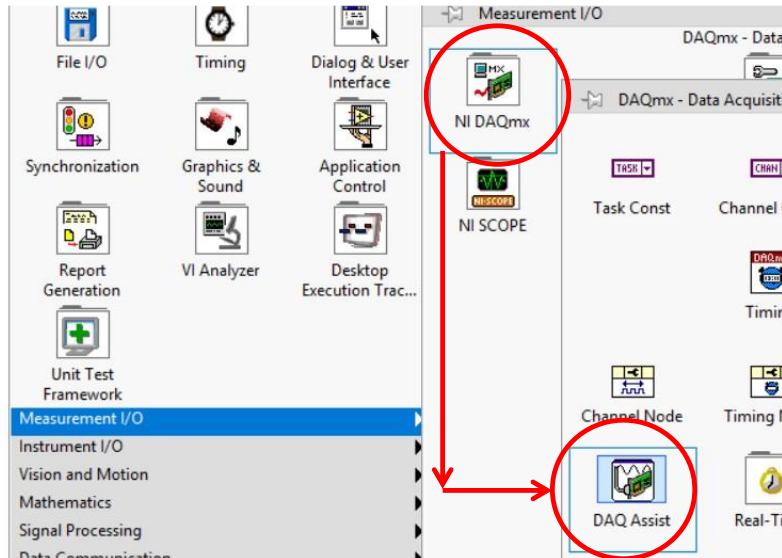


Fig. 40. Inserción del bloque DAQ Assistant desde el menú Measurement I/O.

Este nodo permitió leer múltiples señales analógicas desde una tarjeta de adquisición de datos (DAQ). Los pines utilizados se muestran en la Figura 41.

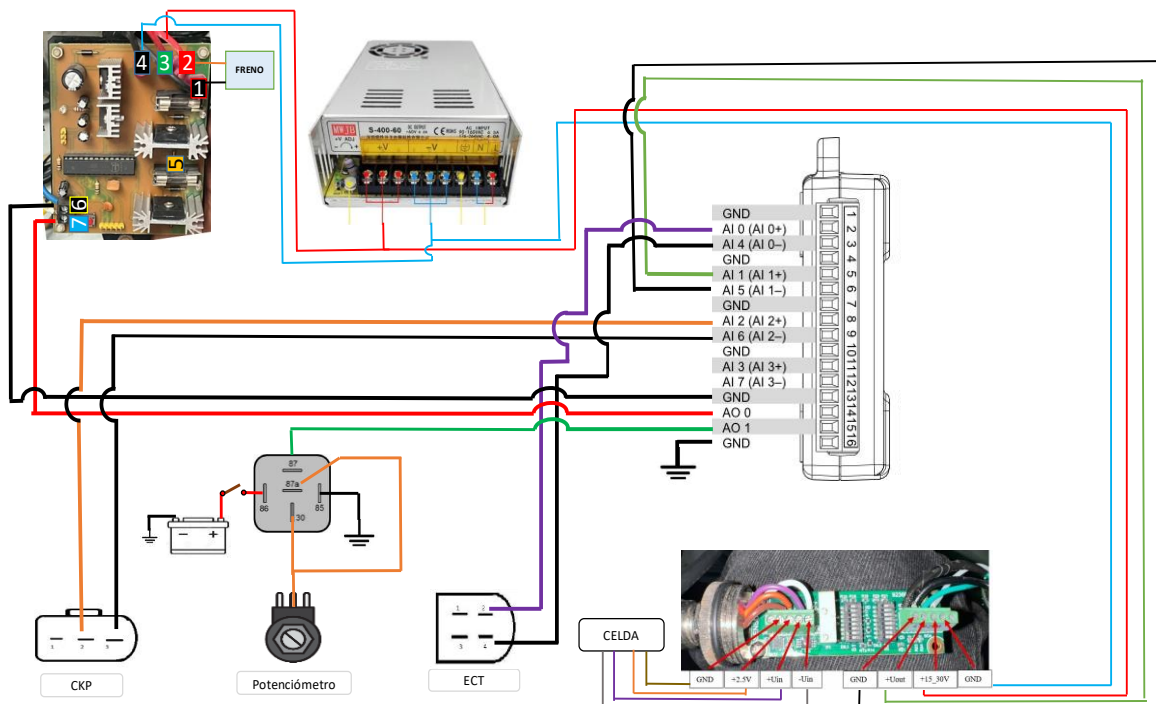


Fig. 41. Esquema de conexión del sistema de adquisición de señales con la DAQ.

Dentro del asistente DAQ, se escoge la opción Acquire Signals, después a Analog Input y por último la opción Voltage como se muestra en la Figura 42, seleccionando los canales correspondientes a los sensores CKP, ECT y la celda de carga.

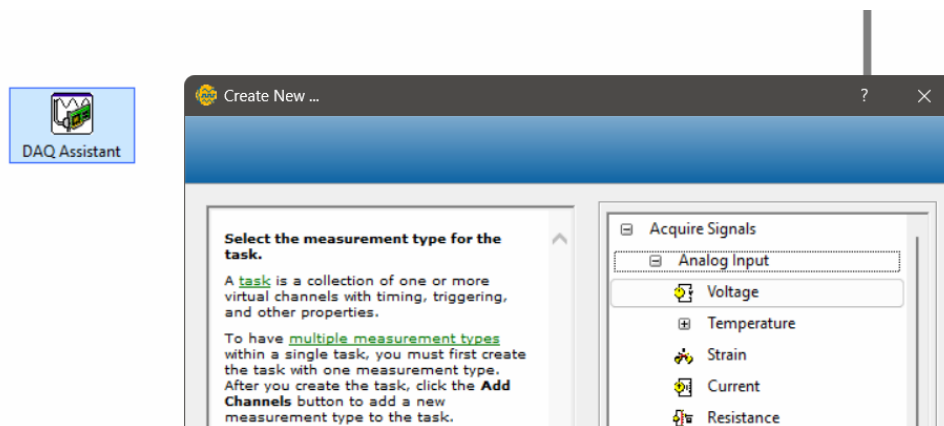


Fig. 42. Configuración inicial del DAQ Assistant para entrada analógica.

Se configura el modo de muestreo como Continuous Samples, estableciendo una tasa de adquisición de datos de 10 kHz para garantizar una lectura estable de las señales, como se muestra en la Figura 43. Esta frecuencia de muestreo se consideró por la frecuencia de operación del motor, es decir, cuando el motor funciona a una velocidad de 2500 RPM, esto equivale a 41.67 Hz (frecuencias en revoluciones por segundo).

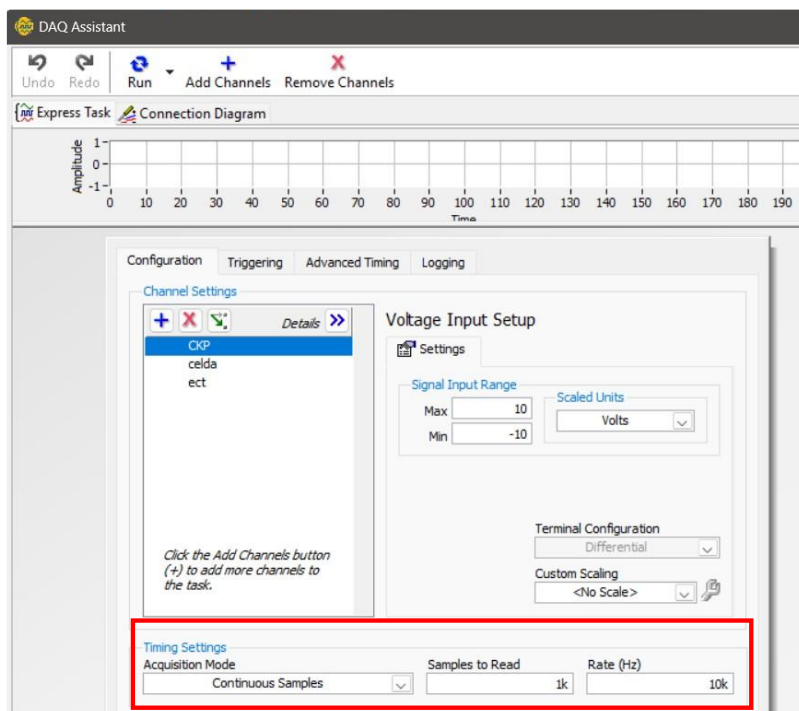


Fig. 43. Configuración del DAQ Assistant para adquisición de señales analógicas.

En este apartado, se presenta el diagrama de conexión correspondiente a la DAQ, donde se visualiza de forma previa la disposición de pines y la asignación de señales como se muestra en la Figura 44.

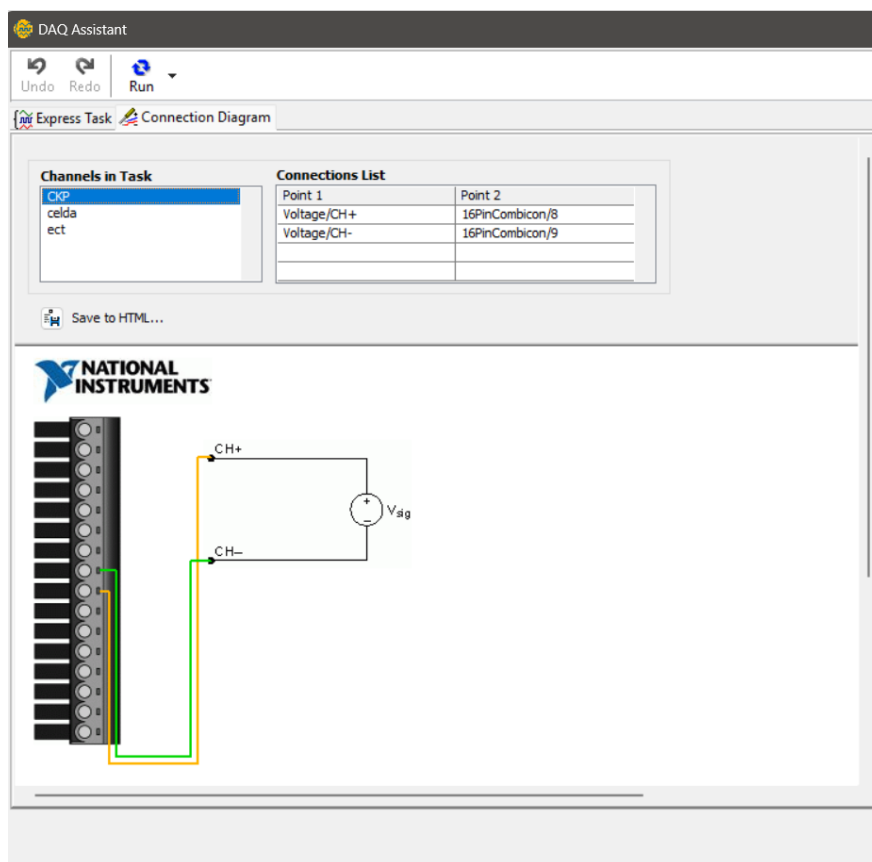


Fig. 44. Diagrama de conexiones previas de la DAQ.

Una vez configurado, se conectan los terminales de entrada del DAQ Assistant a una matriz de datos (Index Array) para extraer individualmente los datos provenientes de cada sensor como se muestra en la Figura 45. Estas señales son utilizadas para procesar la información del sensor CKP, sensor ECT y de la celda de carga.

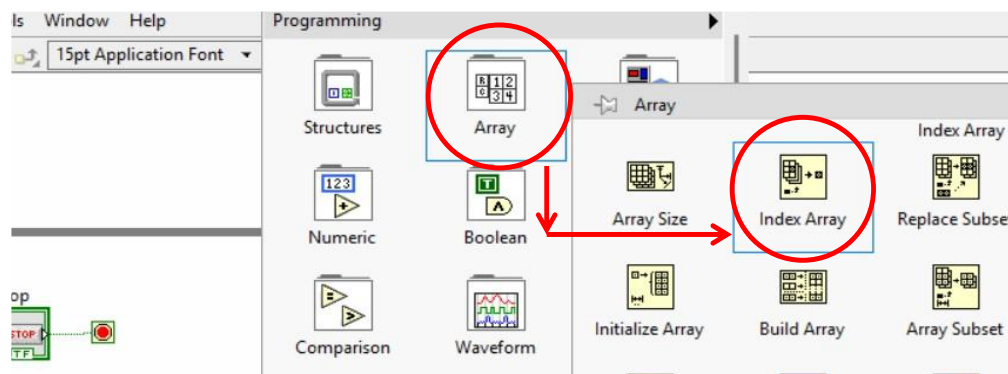


Fig. 45. Inserción de función Index Array para procesar datos del DAQ.

4.4.2. Bloque B: Obtención de señal del sensor CKP (RPM)

Para la señal del CKP, se implementó un bloque de análisis de tono Tone Measurements, el cual funciona como un contador de picos, ubicado en Signal Processing, después se selecciona Waveform Measurements, que permite calcular la frecuencia del pulso generado por el sensor, correspondiente a la velocidad de rotación como se muestra en la Figura 46.

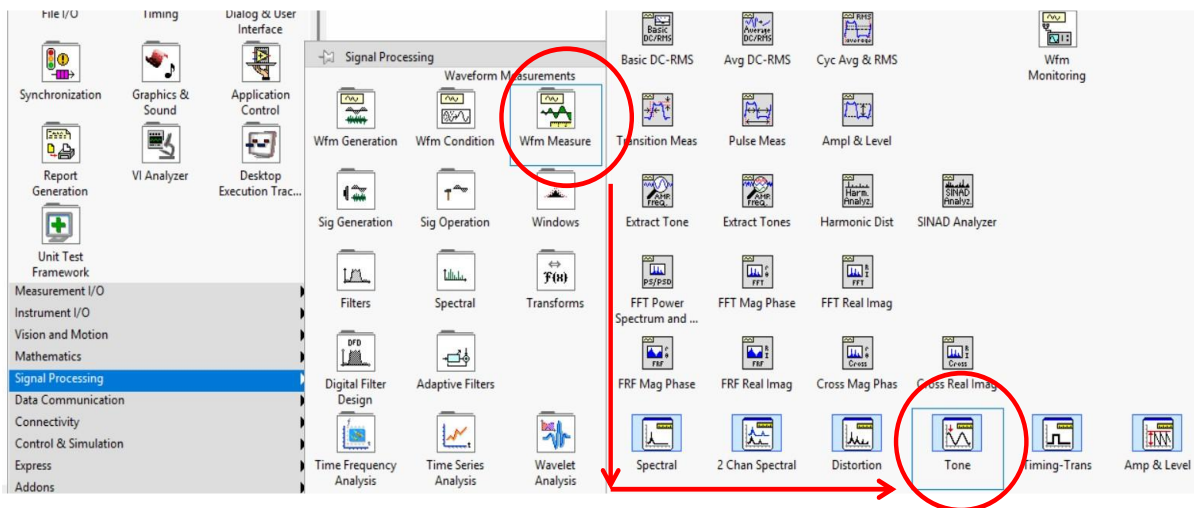


Fig. 46. Inserción de función Wfm Measure desde Signal Processing.

En esta sección del diagrama de bloques se utiliza una lógica condicional para validar la señal de frecuencia obtenida a partir del sensor CKP antes de ser utilizada como salida, para ello, se emplea el bloque Greater? ubicado en Programming, en la sección Comparison como se muestra en la Figura 47, el cual compara si la frecuencia calculada por la función Tone Measurements es mayor a un umbral mínimo, que en este caso es 0.5 Hz, definido mediante una constante numérica la cual esta ubicada en la sección Numeric y se escoge Numeric Constant como se muestra en la Figura 48.

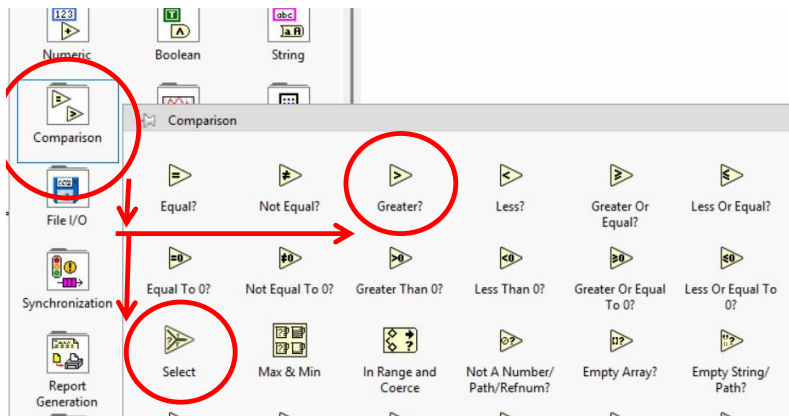


Fig. 47. Funciones de Comparison en LabVIEW.

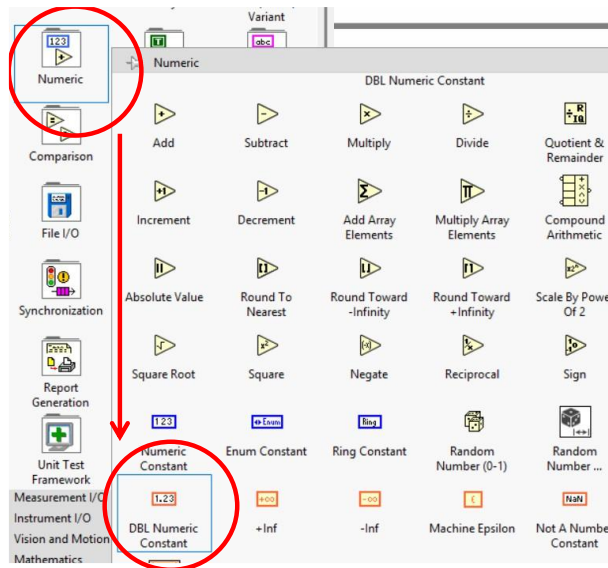


Fig. 48. Inserción de funciones numéricas en LabVIEW.

Esta comparación genera una salida booleana que se conecta al bloque Select (también disponible en la sección Comparison), el cual actúa como una compuerta lógica de decisión, es decir, si la condición de comparación es verdadera (es decir, la frecuencia es mayor a 0.5 Hz), se permite que el valor original de frecuencia continúe su camino en el diagrama. En cambio, si la condición es falsa se fuerza la salida a cero o a un valor predeterminado, evitando así interpretar ruido o señales inválidas como RPM reales.

Finalmente, el resultado se visualiza mediante un indicador numérico, creado con clic derecho sobre la salida del último nodo matemático y seleccionando Create, Indicador. Este valor también puede representarse gráficamente en un medidor tipo dial o meter, arrastrado desde el panel frontal mediante Controls Palette, sección Numeric y se selecciona Meter, para facilitar su interpretación como se muestra en la Figura 49.

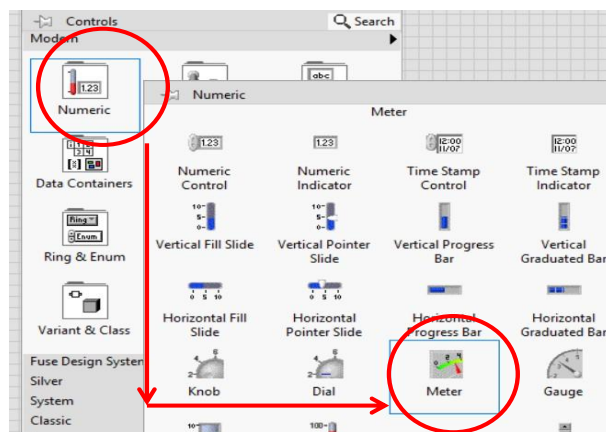


Fig. 49. Controles numéricos y visuales en el panel frontal.

Todo el sistema queda encapsulado dentro del While Loop, lo que permite visualizar en tiempo real las RPM del motor a partir de la señal del CKP conectada a la tarjeta DAQ como se muestra en la Figura 50.

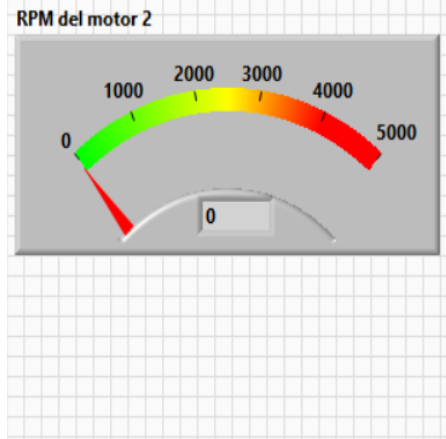
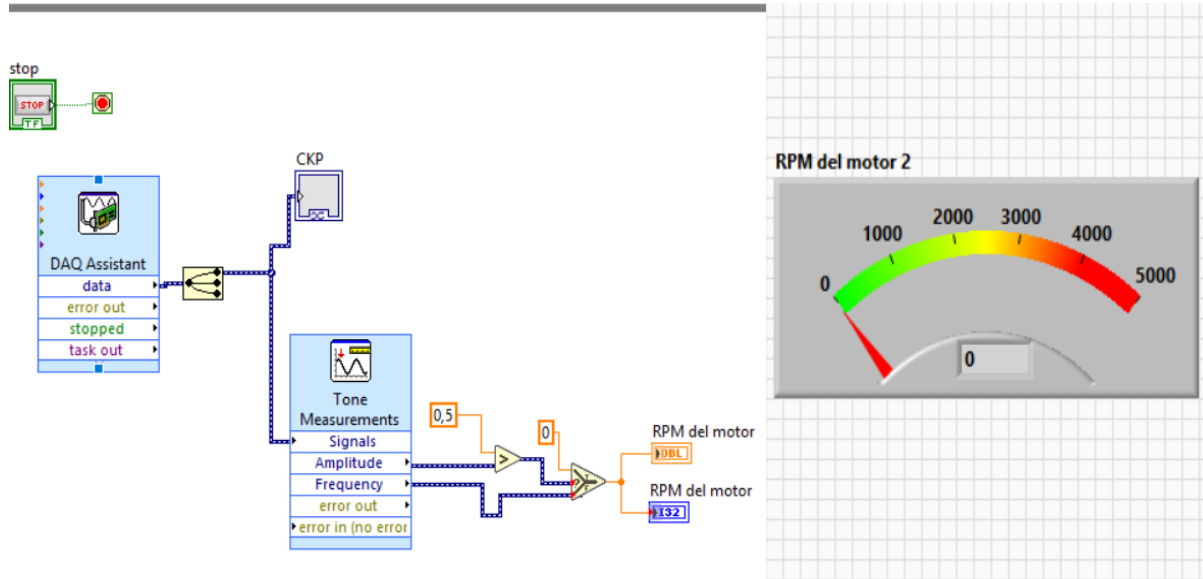


Fig. 50. Medición de RPM con sensor CKP y bloque Tone Measurements.

4.4.3. Bloque C: Obtención de señal del sensor ECT

En la sección correspondiente al procesamiento del sensor ECT, se comienza extrayendo la señal de voltaje adquirida mediante el bloque DAQ Assistant, el cual fue previamente configurado para capturar múltiples canales de entrada analógica. La señal obtenida se dirige hacia un filtro, que se encuentra en la ruta Signal Processing como se muestra en la Figura 51.

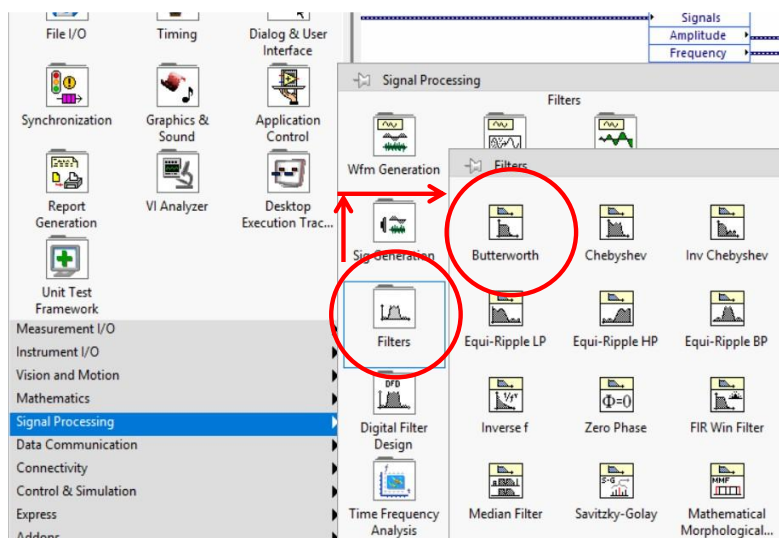


Fig. 51. Selección de filtros en el menú Signal Processing de LabVIEW.

En la Figura 52 se observa la configuración del filtro (Lowpass) con una frecuencia de corte de 10 Hz, utilizado para atenuar componentes de alta frecuencia y conservar la señal útil. Se emplea un filtro IIR con topología Butterworth y orden 3, lo que garantiza una respuesta suave y estable. A la derecha se comparan la señal original (Sample Data), con alto nivel de ruido, y la señal filtrada (Sample Result), que muestra una forma de onda más limpia gracias al efecto del filtro.

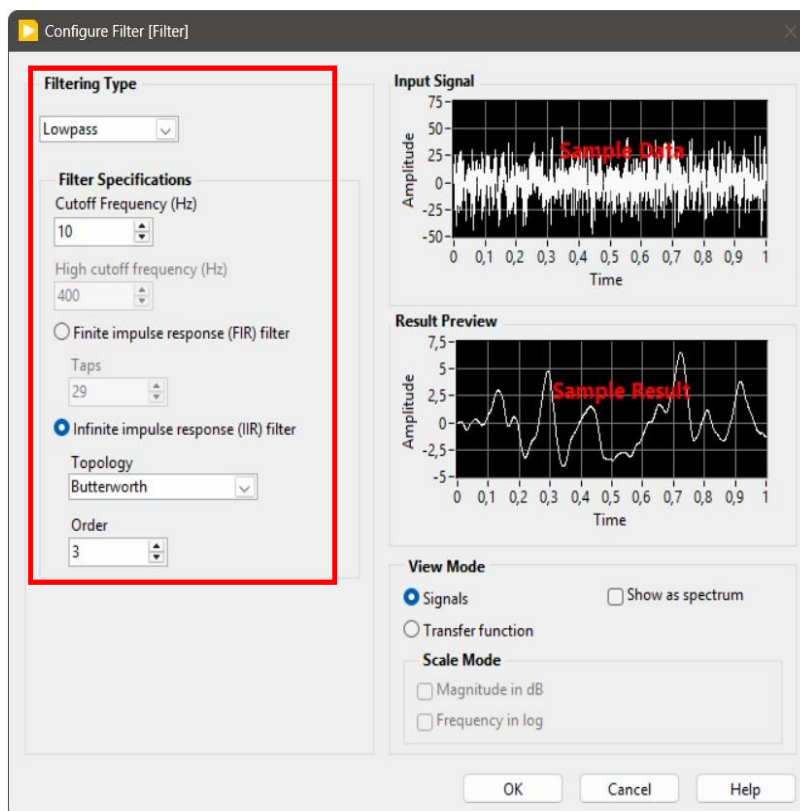


Fig. 52. Configuración del filtro Lowpass tipo Butterworth.

Una vez que se tiene la señal filtrada, se procede a aplicar la Ecuación 5 obtenida en los ensayos previos del sensor ECT. Para implementar esta función, se inserta una constante numérica con el valor -47.071 , seleccionada desde el menú Programming, dentro de Numeric, y se conecta al bloque Multiply, que también se encuentra en esa misma categoría. A este bloque se conecta además la salida del filtro, logrando así el producto entre la señal y la pendiente de la recta. El resultado de esta multiplicación se adiciona a una segunda constante, 121.38 , añadida desde el mismo submenú de constantes numéricas. De esta manera, el bloque de suma ejecuta la operación completa de transformación del voltaje a temperatura en grados Celsius como se muestra en la Figura 53.

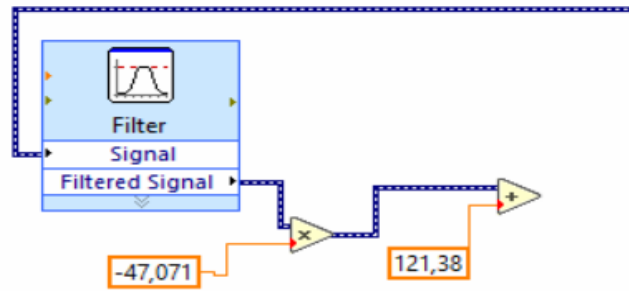


Fig. 53. Conversión de voltaje a temperatura mediante ecuación lineal.

Finalmente, el valor resultante de temperatura se visualiza mediante elementos insertados en el panel frontal. El primero es un Numeric Indicator, que se inserta desde Controls, dentro del grupo Modern y la categoría Numeric, permitiendo mostrar el valor numérico exacto de la temperatura calculada. El segundo es un medidor tipo Gauge, también ubicado en la categoría Numeric, que proporciona una representación gráfica, facilitando la interpretación visual del valor medido. Ambos indicadores se conectan a la salida del bloque de suma, completando así el proceso de lectura, conversión y visualización en tiempo real de la temperatura proporcionada por el sensor ECT como se muestra en la Figura 54.

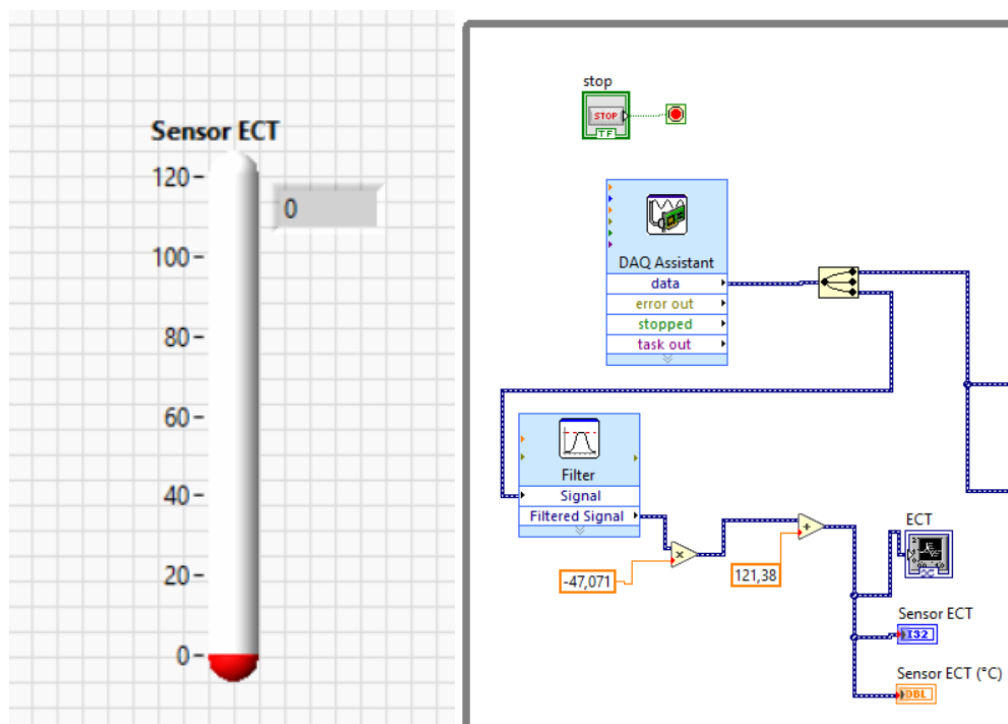


Fig. 54. Adquisición y conversión de señal del sensor ECT.

4.4.4. Bloque D: Obtención de señal de la celda de carga (Torque).

En este apartado se implementa la lectura y conversión de la señal proveniente de la celda de carga para calcular el torque real aplicado al freno. El proceso comienza con la adquisición de datos mediante el bloque DAQ Assistant, esta señal se dirige hacia un filtro, donde se aplica un filtro Lowpass con topología Butterworth y orden 3. La frecuencia de corte se establece en 5 Hz como se muestra en la Figura 55.

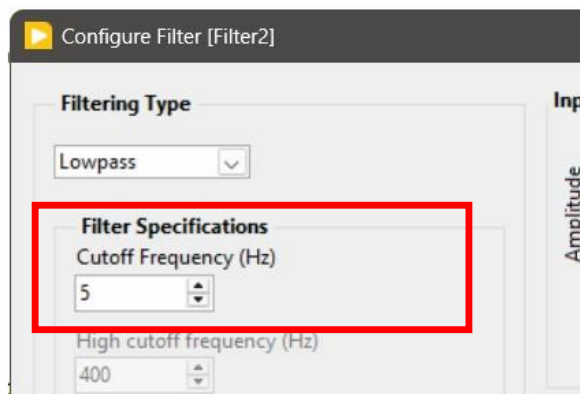


Fig. 55. Configuración del filtro para la señal de celda de carga.

La señal filtrada se procesa utilizando una Ecuación 4 de calibración previamente obtenida, para ello, se insertan dos constantes numéricas correspondientes a la pendiente (10.117) y a la ordenada al origen (2.9292) de la recta de calibración, estas se conectan a un bloque de multiplicación y a un bloque de suma, respectivamente, el resultado representa el valor del peso en kilogramos medido por la celda de carga, este valor se muestra mediante un indicador numérico, con el nombre Peso (Kg) como se muestra en la Figura 56.

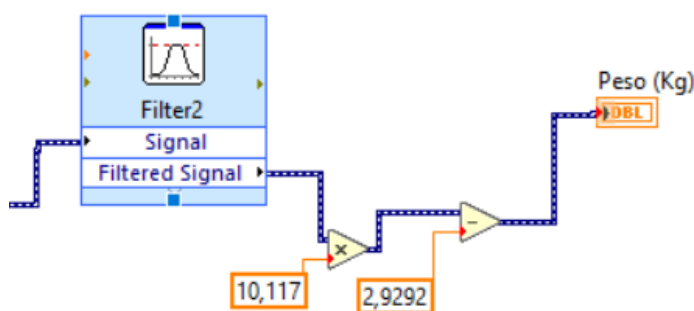


Fig. 56. Conversión de la señal de la celda de carga a peso.

A continuación, se procede a calcular el torque, el peso se convierte a fuerza multiplicándolo por la constante de gravedad (9.81 m/s²), utilizando un nuevo bloque Multiply,

el valor de fuerza obtenido se multiplica nuevamente por una constante correspondiente al brazo de palanca del freno (en este caso, 0.3 metros), empleando otro bloque de multiplicación como se muestra en la Figura 57.

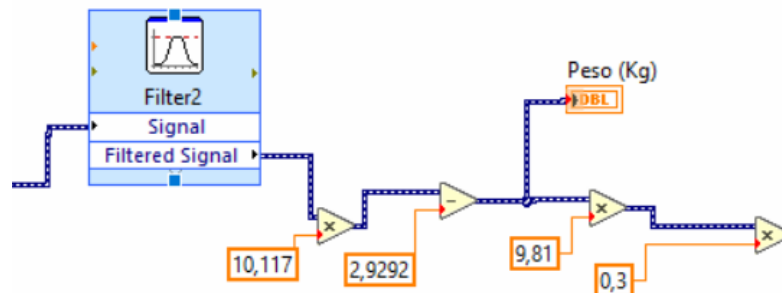


Fig. 57. Cálculo de torque a partir del peso obtenido por la celda de carga.

Para mejorar la visualización y estabilidad de la lectura, esta señal de torque se somete a un proceso adicional mediante un bloque de promedio móvil, específicamente el bloque Mean PtByPt, que se encuentra en Signal Processing, dentro de Point-by-Point, en la subcategoría Filters, como se ilustra en la Figura 58. Este filtro realiza un cálculo del promedio de los valores de la señal en una ventana de tiempo específica, suavizando así las fluctuaciones y reduciendo el ruido de alta frecuencia. Al aplicar el promedio, se obtiene una representación más estable de la señal de torque, eliminando picos y oscilaciones no deseadas, lo que facilita su análisis.

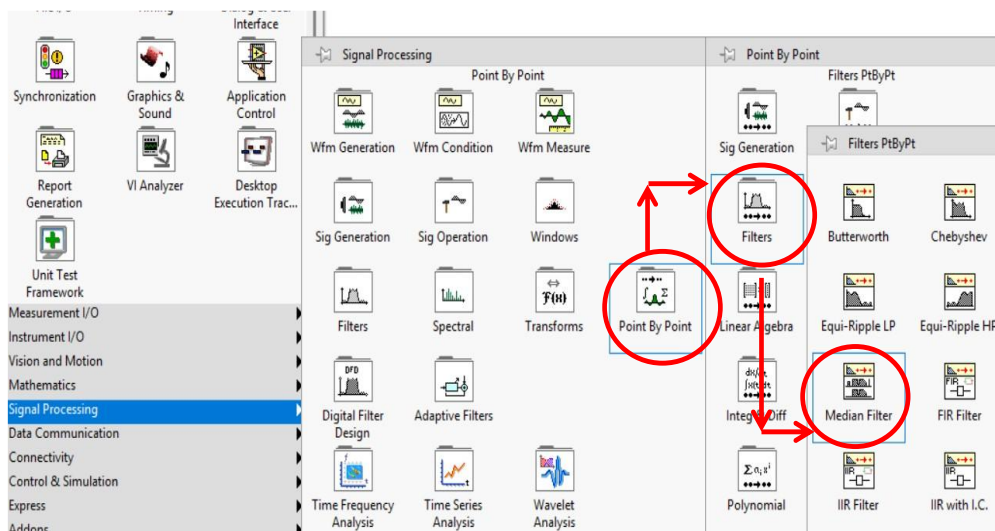


Fig. 58. Ubicación del filtro Median Filter PtByPt.

A este bloque se le ingresa como parámetro una constante de valor de 50, la cual representa el número de datos para obtener la media instantánea, como es muestra en la Figura 59, es decir, se calculará la media de las últimas 50 muestras de torque.

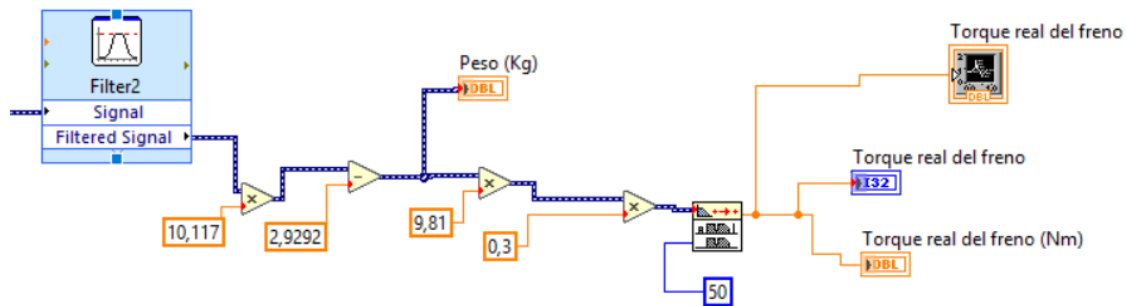


Fig. 59. Cálculo del torque real del freno a partir de la señal filtrada.

El resultado final de esta operación representa el torque real del freno en Nm, este valor se visualiza mediante dos indicadores: Numeric Indicator y Vertical Fill Slide. Ambos se insertan desde el menú Controls en la categoría Modern y Numeric, y se conectan a la salida del último bloque de cálculo. Se etiquetan como Torque real del freno (Nm). De este modo, se completa la cadena de adquisición, filtrado, calibración y conversión de la señal de la celda de carga, permitiendo medir en tiempo real el par ejercido por el sistema de freno del banco dinamométrico como se muestra en la Figura 60.

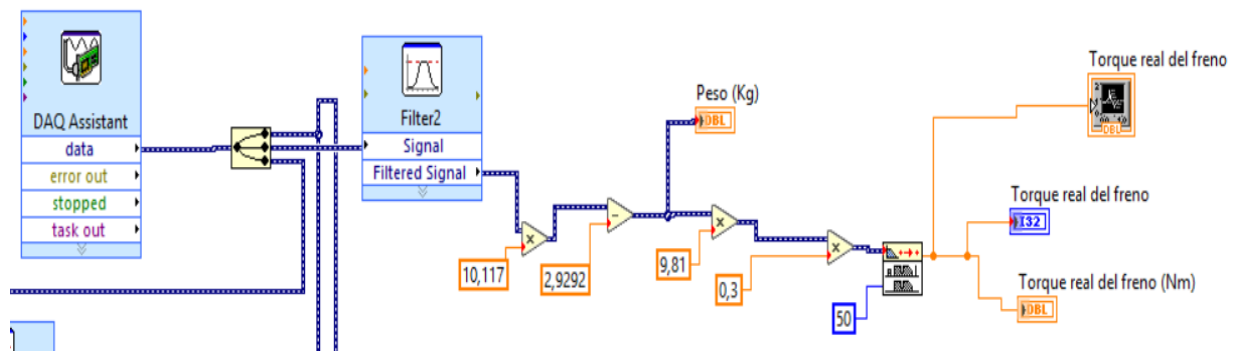


Fig. 60. Cálculo del torque de frenado a partir de la celda de carga en LabVIEW.

4.4.5. Bloque E: Control PID de carga del freno electromagnético.

En este punto, se incorpora el bloque de control PID desde la paleta Control Design & Simulation como se muestra en la Figura 61.

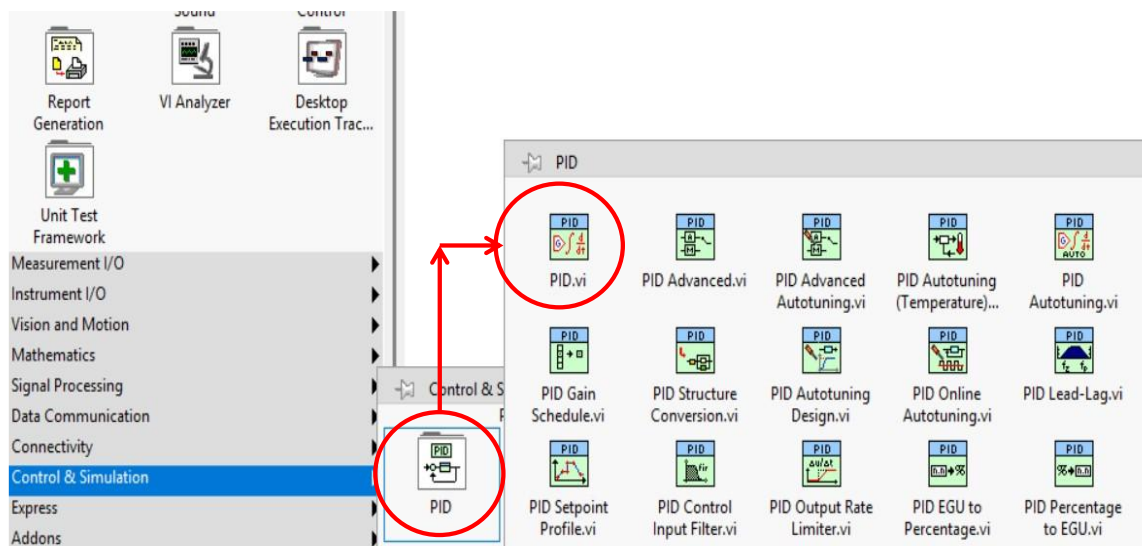


Fig. 61. Ubicación del bloque PID.

Este bloque integra el PID, recibiendo como entradas el setpoint (valor deseado) y la variable de proceso (retroalimentación o valor medido), así como una estructura de ganancias. Las ganancias PID reciben el error y calcula la señal de control basándose en los parámetros K_p , K_i y K_d que se configuran en un clúster llamado 'PID gains', a continuación, se muestra en la Figura 62 el diagrama de conexión.

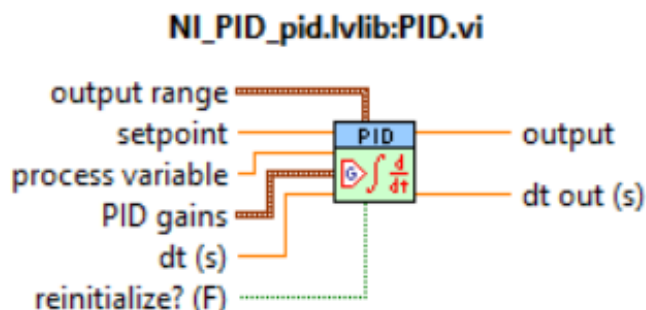


Fig. 62. Diagrama de bloques del NI PID en LabVIEW.

La primera entrada es el *setpoint*, que representa el valor objetivo o de referencia que se desea alcanzar, en este caso, corresponde al torque deseado, definido como un control numérico tipo doble precisión (DBL), el cual se crea en el panel frontal. La segunda entrada esencial es la variable de proceso, denominada *process variable*, esta señal proviene del sistema físico, en este caso del sensor de torque real del freno, dado que este valor se obtiene a través de la celda de carga, procesada mediante el amplificador.

Luego se configura la entrada PID gains, que agrupa las tres constantes del controlador: ganancia proporcional (K_c), tiempo integral (T_i) y tiempo derivativo (T_d). Para ello, se deben

crear tres controles numéricos en el panel frontal, etiquetados como proportional gain (K_c), integral time (T_i , min) y derivative time (T_d , min). Estos tres controles se agrupan en el bloque diagrama utilizando la función Bundle, que se encuentra en la categoría Programming, sección Clúster, Class & Variant como se muestra en la Figura 63, la salida del nodo Bundle se conecta directamente a la entrada PID gains.

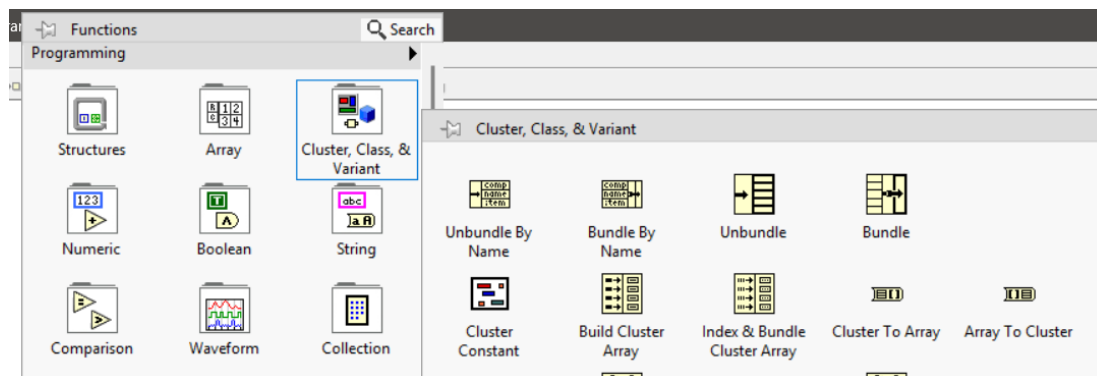


Fig. 63. Herramientas de agrupamiento y manejo de clases.

La salida principal del bloque PID es la terminal output, la cual representa la señal de control final (voltaje de control de 0 a 5V). Esta señal debe convertirse en un valor de voltaje apropiado para controlar el freno, para ello primero fue necesario establecer una relación funcional entre el torque deseado (producido por el bloque PID) y la señal de voltaje que activa el freno. Para ello, se llevó a cabo un proceso experimental de caracterización en el que se aplicaron distintos niveles de voltaje al freno, en condiciones de régimen constante (aproximadamente 2500 RPM), y se registró el torque real utilizando la celda de carga.

Los datos obtenidos se muestran a continuación en la Tabla XII.

TABLA XII

DATOS DE TORQUE Y VOLTAJE DEL FRENO ELECTROMAGNÉTICO.

Caracterización entre voltaje aplicado y torque generado													
Voltaje (V)	0,25	0,50	0,75	1	1,25	1,50	1,75	2	2,25	2,50	2,75	3	3,25
Torque (Nm)	11,45	12,58	14,88	18,50	23,1	28,9	35,64	42,7	51,4	60,7	72,2	81,82	91,4

Los datos fueron organizados en una Tabla en el software Microsoft Excel, lo que permitió representar gráficamente la relación entre el torque (Nm) y el voltaje (V) como se muestra en la Figura 64.

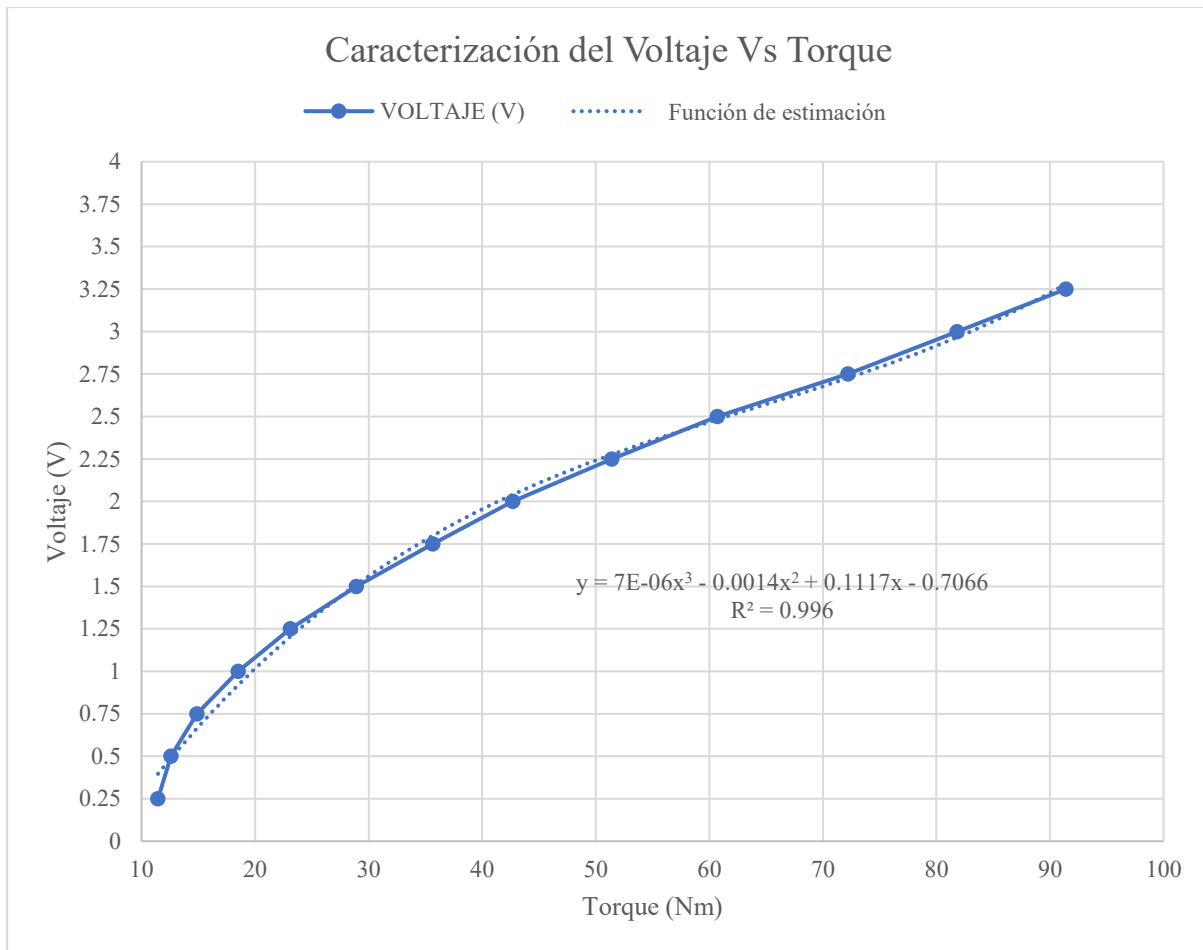


Fig. 64. Curva de caracterización del freno electromagnético.

La curva resultante presentó un comportamiento no lineal, por lo que se ajustó una función polinómica de tercer grado que describe esta relación de manera precisa. Utilizando la herramienta de regresión del propio Excel, se obtuvo la Ecuación 7 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.996$ y la ecuación obtenida, que permite predecir el valor de voltaje necesario para alcanzar un determinado torque deseado, es:

$$f(x) = 0.000007x^3 - 0.0014x^2 + 0.1117x - 0.7066 \quad (7)$$

El diseño del lazo de control automático del freno electromagnético se concreta al vincular la salida del controlador PID al bloque de procesamiento matemático. Específicamente, el terminal output del bloque PID, el cual representa la señal de control en unidades de torque (Nm), esto se enlaza al nodo de script MATLAB (MATLAB Script Node) dentro del entorno de programación gráfica de LabVIEW. Esta configuración se encuentra disponible en la paleta MathScript RT Module como se muestra en la Figura 65 y permite la inclusión de código MATLAB directamente en el diagrama de bloques.

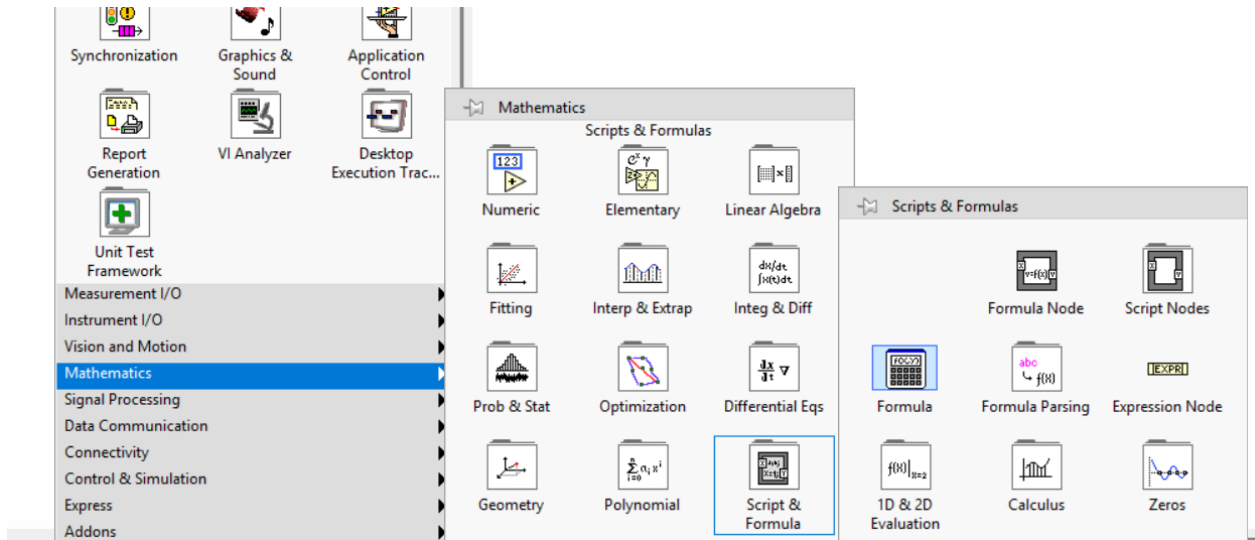


Fig. 65. Acceso a los bloques de procesamiento matemático y scripts en LabVIEW.

Dentro de este nodo MATLAB se implementa la Ecuación 7 previamente obtenida a partir del proceso de caracterización del freno electromagnético, se agrega un entrada y salida en el contorno del script que representan las variables de entrada y salida como se muestra en la Figura 66.

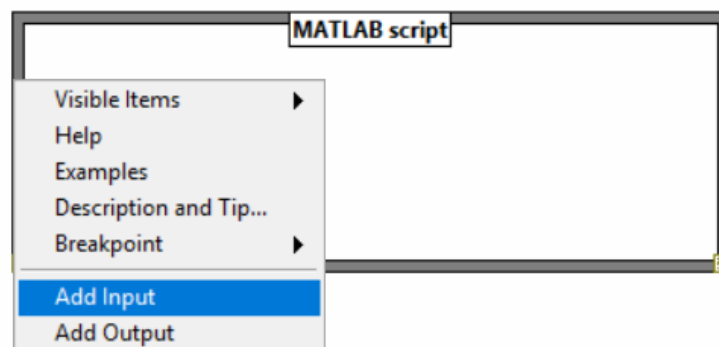
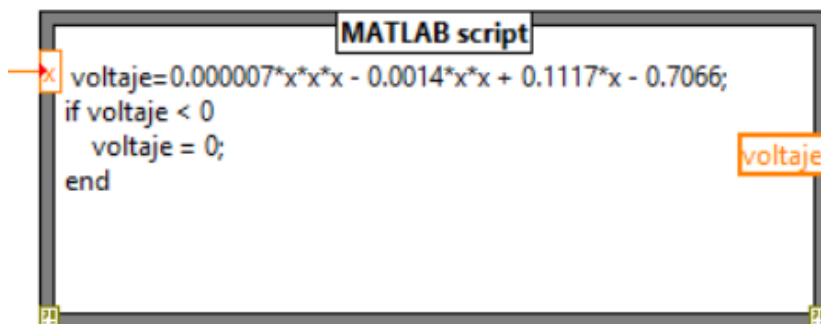


Fig. 66. Adición de entradas y salidas al bloque MATLAB Script en LabVIEW.

Para evitar errores durante la ejecución, en el interior del script se incluye una condición de saturación que impide la generación de valores negativos. Es decir, si el resultado de la ecuación arroja un voltaje inferior a cero, el script asigna directamente el valor de cero voltios como salida. Esto es crucial, ya que el freno electromagnético no está diseñado para operar con señales negativas, y hacerlo podría resultar en un comportamiento errático o daños al sistema como se muestra en la Figura 67.



```

MATLAB script
voltaje=0.000007*x*x*x - 0.0014*x*x + 0.1117*x - 0.7066;
if voltaje < 0
    voltaje = 0;
end
  
```

Fig. 67. Script MATLAB con protección de límite inferior para la salida de voltaje.

La señal de salida del nodo MATLAB, etiquetada como voltaje, representa el valor analógico final que debe ser enviado al actuador, este valor resultante se conecta a un segundo DAQ Assistant, que se agrega desde el menú Measurement I/O. Este se configura en modo de salida analógica, seleccionando el canal físico de generación correspondiente como se muestra en la Figura 68.

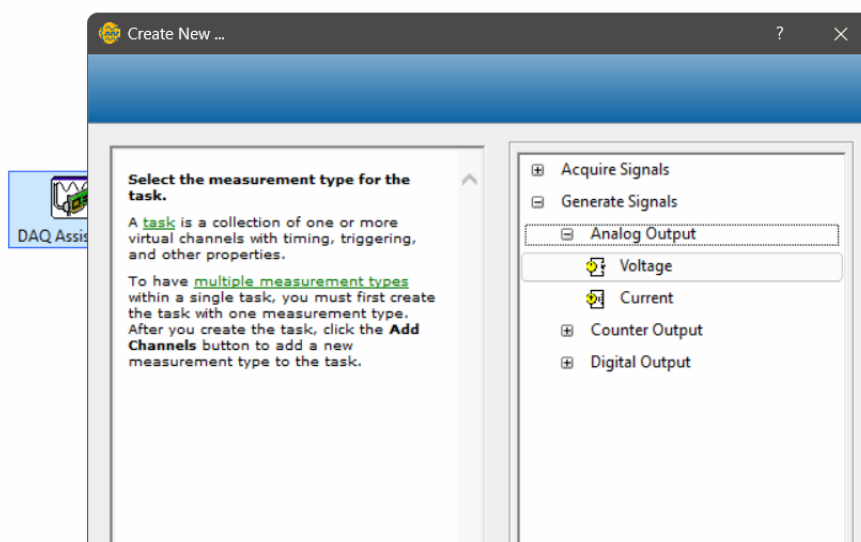


Fig. 68. Configuración del DAQ Assistant para salida analógica de voltaje en LabVIEW.

Se configura un canal denominado voltajefreno, cuyo propósito es generar una señal eléctrica que será enviada al freno electromagnético para regular su carga de manera proporcional al voltaje aplicado. En la sección Voltage Output Setup, se define el rango de salida de la señal entre 0 y 5 voltios, ya que el freno con el que se trabaja opera correctamente únicamente dentro de este rango. Si se aplican voltajes fuera de estos valores, el freno no responde o puede generar errores de funcionamiento como se muestra en la Figura 69.

De este modo, se logra que el valor de la carga sea transmitido como una señal analógica hacia el actuador del freno, permitiendo al operador regular la fuerza aplicada de forma progresiva como se muestra en la Figura 71.

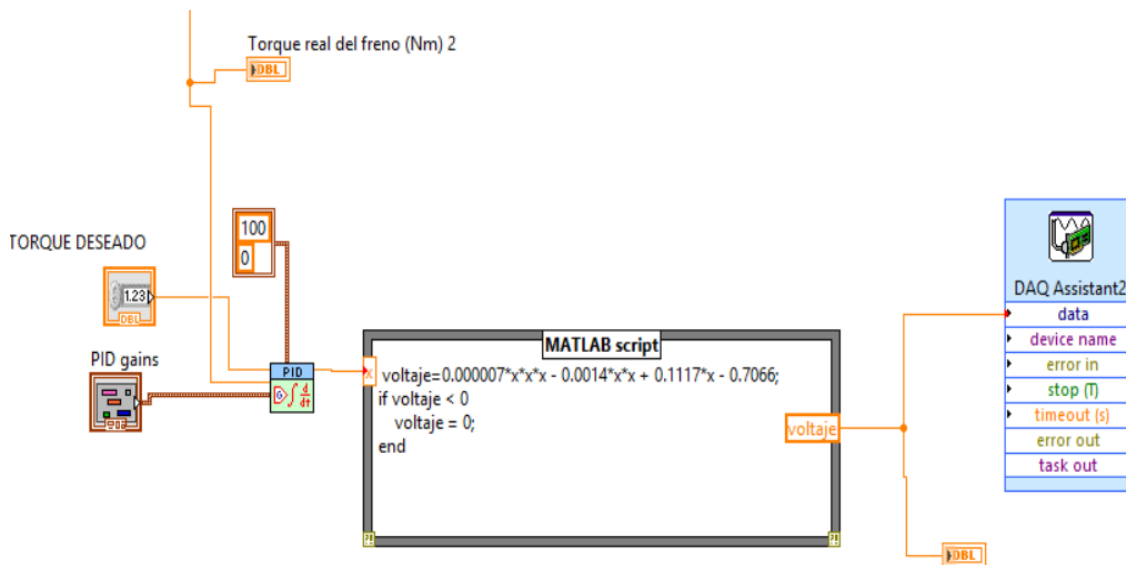


Fig. 71. Lógica de control de freno manual.

4.5. Caracterización del comportamiento del sistema PID

Para obtener las ganancias del controlador PID, se utilizó una combinación de técnicas empleando LabVIEW, Excel y MATLAB. Aunque esta sección en LabVIEW no forma parte del sistema de control, permitió realizar la adquisición de datos en tiempo real para obtener el comportamiento físico del sistema con el banco dinamométrico en operación, aplicando carga al freno de manera progresiva evaluando la respuesta dinámica y su comportamiento.

En LabVIEW, se utilizó el bloque DAQ Assistant para configurar una entrada analógica de voltaje, en este caso proveniente del sensor de carga. La señal de voltaje adquirida del sensor de carga puede contener ruido, por lo cual se insertó un filtro de señal Lowpass, la frecuencia de corte del filtro se establece con un control numérico, que permite modificar este parámetro desde el panel frontal de forma dinámica.

Para capturar el instante de tiempo asociado a cada valor leído de la celda, se incluyó el bloque Elapsed Time, el cual se encuentra en la categoría Timing como se muestra en la Figura 72, este bloque se utiliza para obtener el tiempo transcurrido desde el inicio de la ejecución del programa, se configuró una base de tiempo de 25 ms, es decir, si el tiempo llega a 25s se detiene y se incluye un valor a 1.5V como factor escalón, utilizando bloques de

comparación (mayor que y menor que) para sincronizar la captura y la escritura del dato como se muestra en la Figura 73.

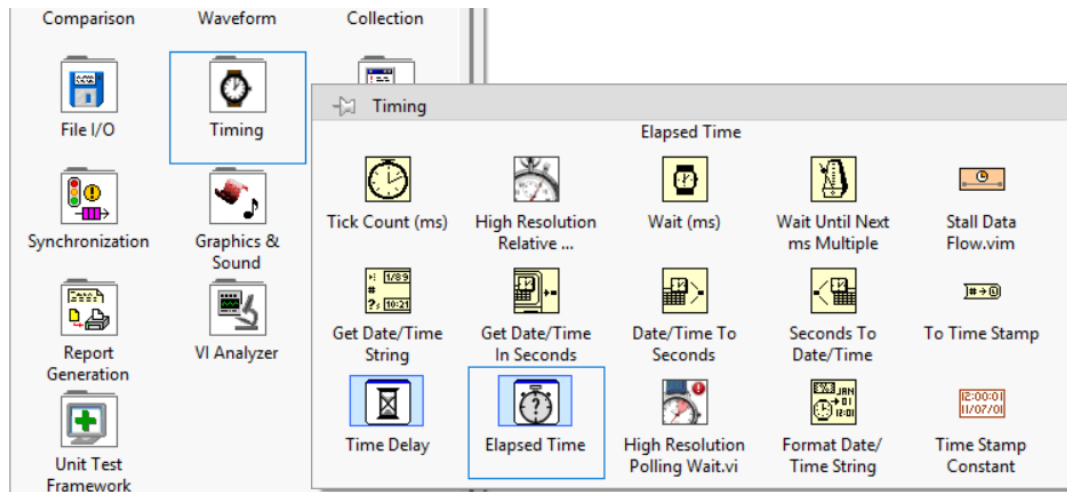


Fig. 72. Funciones de temporización.

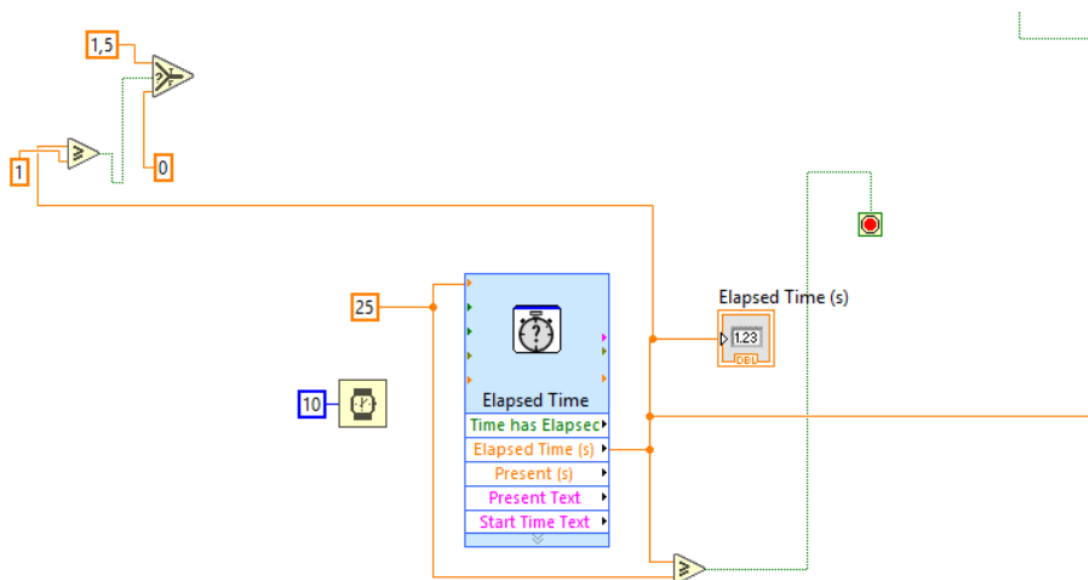


Fig. 73. Medición de tiempo transcurrido con condición lógica.

Para guardar los datos, se utiliza una estructura condicional denominada Case Structure activada por el control booleano grabar, cuando este control está en verdadero (True), se activa la escritura de datos en un archivo, se emplea el nodo Write to Measurement File, que se encuentra en la categoría File I/O como se muestra en la Figura 74, este bloque permite guardar la información adquirida en un archivo .xls, y se define la dirección del archivo usando un control tipo *Path* que permite al usuario seleccionar manualmente la carpeta de destino y el nombre del archivo desde el panel frontal como se visualiza en la Figura 75.

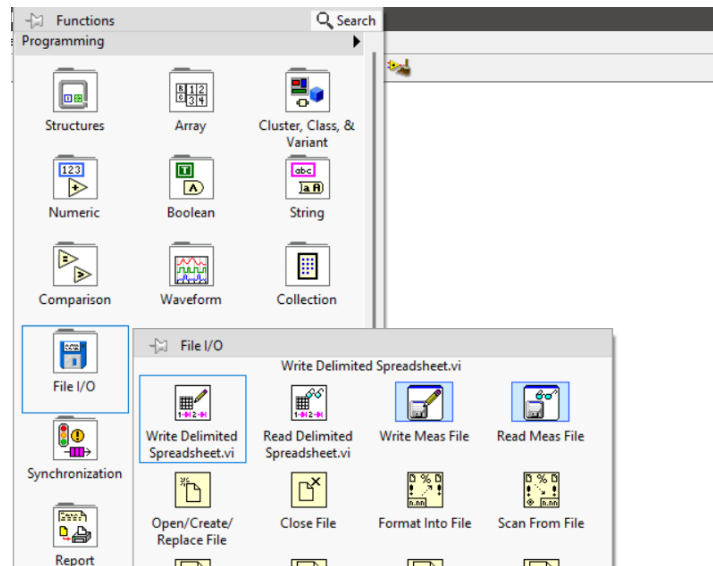


Fig. 74. Bloques de escritura y lectura de archivos.

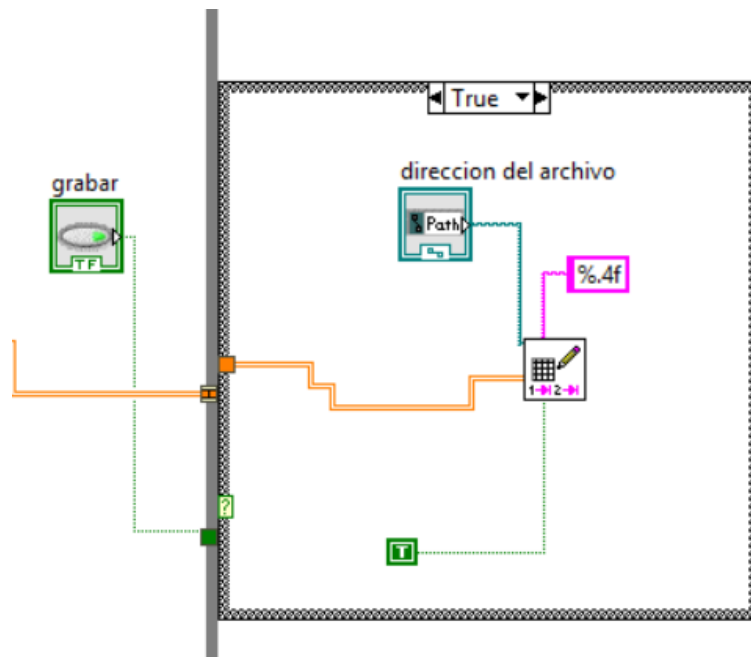


Fig. 75. Grabación condicional de datos a archivo en LabVIEW.

En la parte inferior izquierda del diagrama, se incluye un control de carga de freno manual, el cual es un control numérico que permite establecer un valor deseado que se envía al segundo bloque DAQ Assistant, configurado como salida analógica, con este valor se simula la aplicación de carga al freno durante la prueba. Finalmente, todos estos bloques están conectados dentro de un bucle While como se muestra en la Figura 76, el cual asegura que el programa se ejecute de forma continua, es decir, garantiza la captura secuencial de datos en tiempo real, junto con su respectivo almacenamiento.

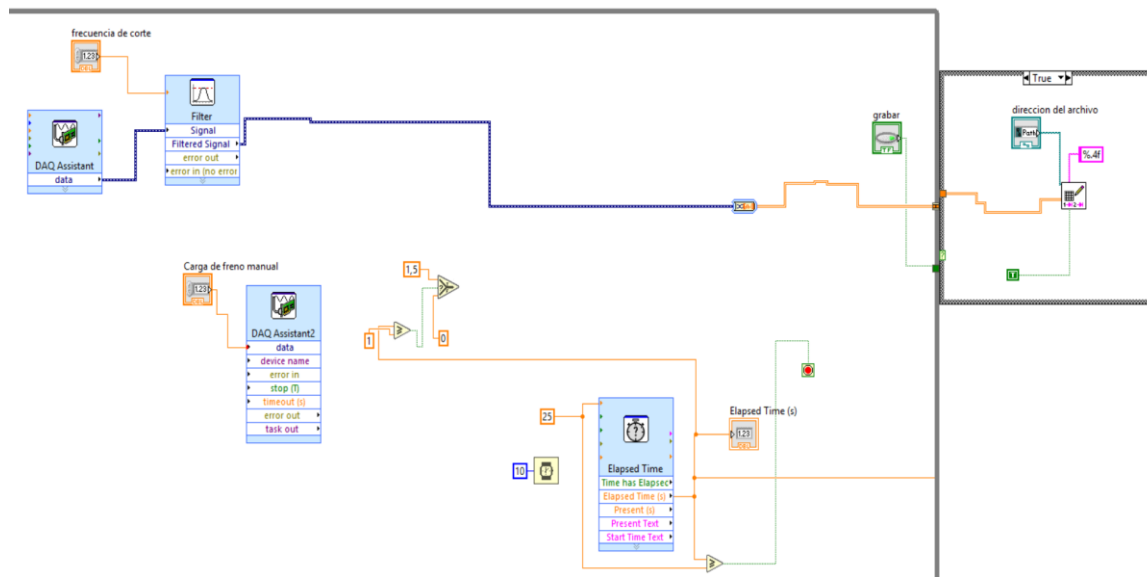


Fig. 76. Adquisición y registro del tiempo con respecto a la carga de frenado.

Una vez completada la toma de datos desde el entorno de LabVIEW, se procedió a abrir el archivo generado por el bloque de escritura directamente con Microsoft Excel, revelando una gran cantidad de datos organizados en columnas. Al revisar el archivo, se observó que el total de muestras registradas ascendía a aproximadamente 24.999 datos, lo cual era esperable dada la configuración de muestreo empleada en LabVIEW. Sin embargo, al graficar estos valores en Excel, se hizo evidente que existía una gran cantidad de ruido a la señal útil como se muestra en la Figura 77, lo que dificultaba la interpretación directa de los datos.

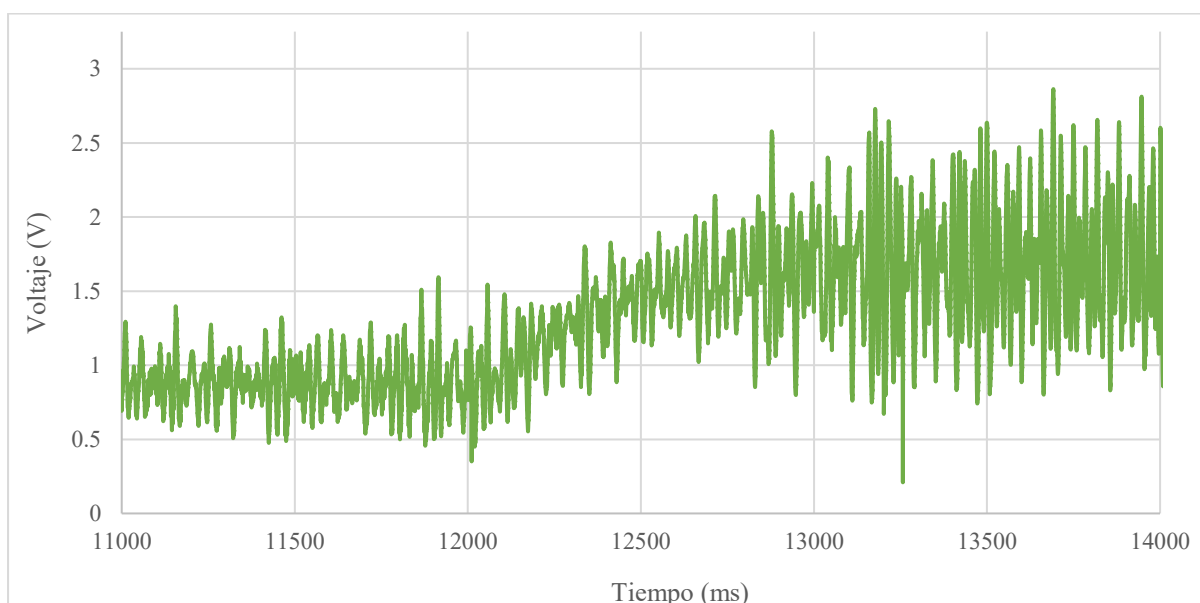


Fig. 77. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial.

En la gráfica inicial, los picos y variaciones abruptas del voltaje generaban una forma irregular y distorsionada, lo cual era poco representativo del comportamiento real de la carga medida, ante esta situación, se optó por implementar un método de filtrado de datos basado en promedios móviles, utilizando como base un promedio de 50 muestras. Es decir, se calculó la media de cada grupo consecutivo de 50 datos, desplazándose uno a uno a través del conjunto original, generando así una nueva serie de datos suavizados como se muestra en la Figura 78.

C3					
=PROMEDIO(A3:A52)					
A	C	D	E	F	
Voltaje	Filtro 1				
1.0087					
0.8446	0.854156				
1.0239	0.856904				
0.8446	0.859042				

Fig. 78. Filtro Promedio Inicial.

Una vez aplicado el primer filtro, se volvió a graficar el nuevo conjunto de datos en Excel, observando una señal mucho más continua, aunque aún con cierta presencia de pequeñas oscilaciones, por tanto, se decidió repetir el proceso de promediado cuatro veces adicionales, aplicando sobre cada resultado una nueva media móvil, los datos suavizados se copiaban y pegaban en una nueva columna de Excel, asegurando que el proceso fuera reversible y se conservara el historial de transformación, cada etapa de promediado se validó gráficamente, asegurando que no se alterara la tendencia general de la señal como se muestra en la Figura 79.

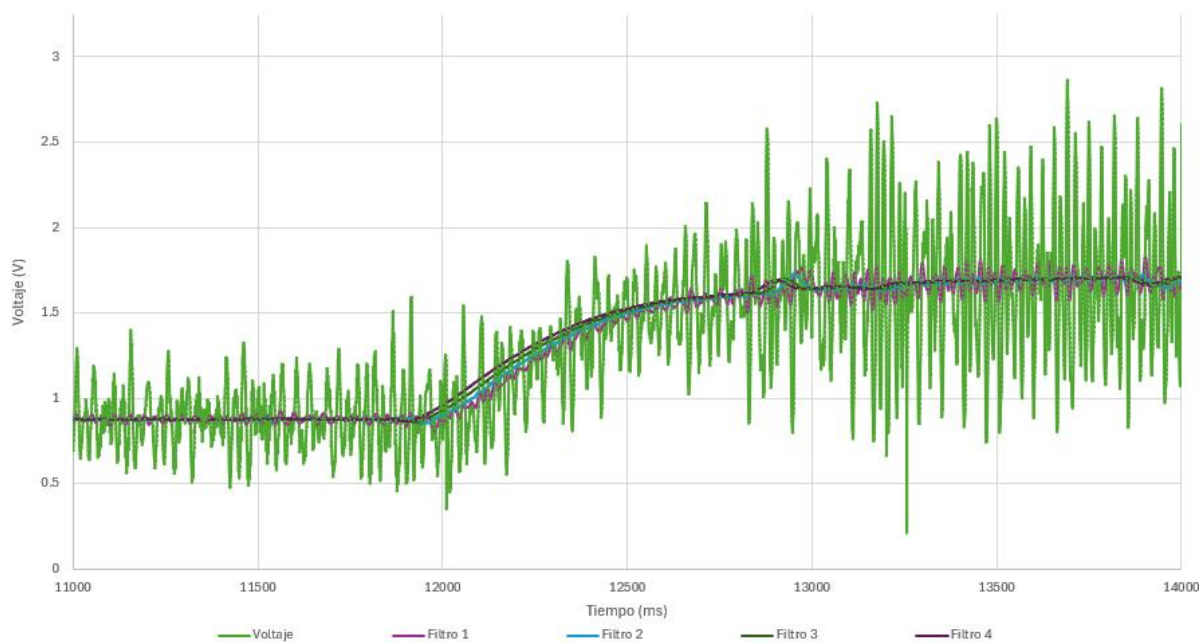


Fig. 79. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con varios filtros.

Al concluir el filtrado, se obtuvo una señal final que evidenciaba de manera clara los escalones aplicados manualmente con el freno, así como la respuesta dinámica del sistema como se muestra en la Figura 80.

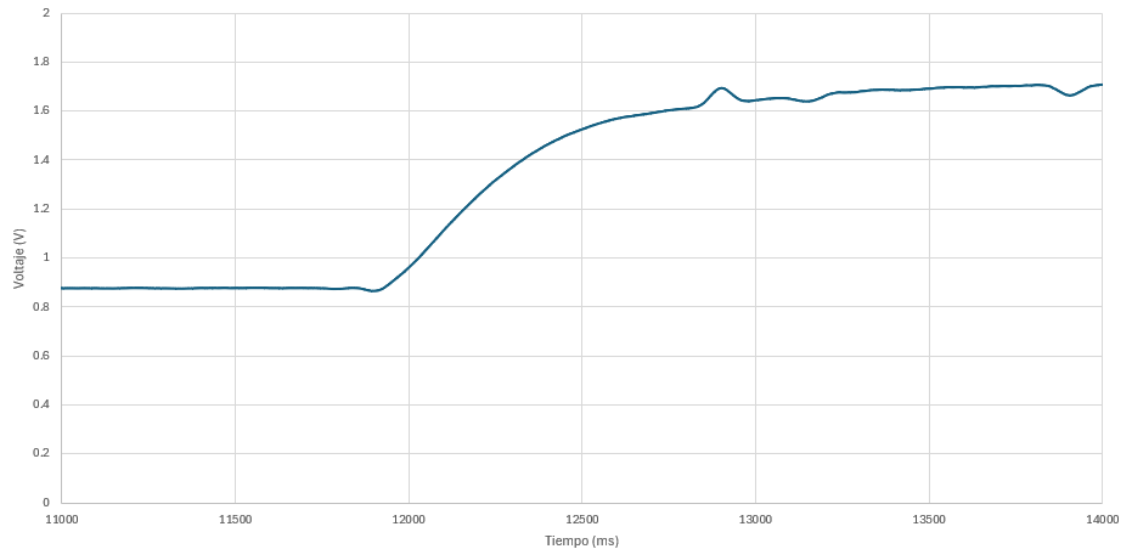


Fig. 80. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con filtro 4.

El siguiente paso consistió en importar los datos del comportamiento al entorno de MATLAB para estimar la función de transferencia y construir un modelo dinámico que representara el comportamiento del sistema. Primero, se crean las variables en el Command Window de MATLAB para almacenar los datos de entrada (tiempo) y salida (voltaje), asignándolas inicialmente como variables vacías en el Workspace como se muestra en la Figura 81 junto a otras variables.

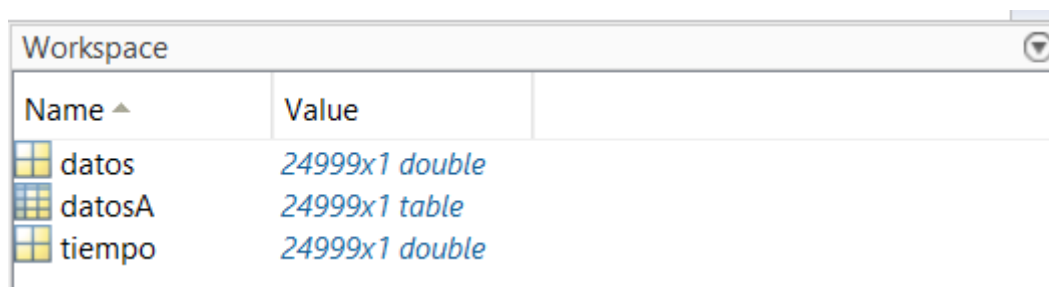


Fig. 81. Workspace con variables de tiempo y voltaje.

El vector de tiempo abarcó desde 0 ms hasta 24.999 ms, y los valores de salida correspondientes a la señal filtrada fueron copiados directamente desde el archivo Excel a la variable de voltaje en MATLAB como se muestra en la Figura 82.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0.8776													
2	0.8776													
3	0.8776													
4	0.8776													
5	0.8776													
6	0.8775													
7	0.8775													
8	0.8775													
9	0.8775													
10	0.8776													
11	0.8776													
12	0.8776													
13	0.8776													
14	0.8776													

Fig. 82. Ingreso de datos desde Excel.

Es fundamental que ambas variables, tiempo y voltaje, contengan el mismo número de datos, ya que esto es crucial para la estimación adecuada de la función de transferencia. En la siguiente fase, se verificó que los datos estuvieran correctamente alineados, sin errores o valores atípicos. Para ello, se generó una gráfica preliminar mediante el comando `plot(datos)`, lo que permitió observar visualmente la forma de la señal y verificar que la respuesta del sistema coincidiera con la entrada escalón aplicada manualmente durante las pruebas como se muestra en la Figura 83.

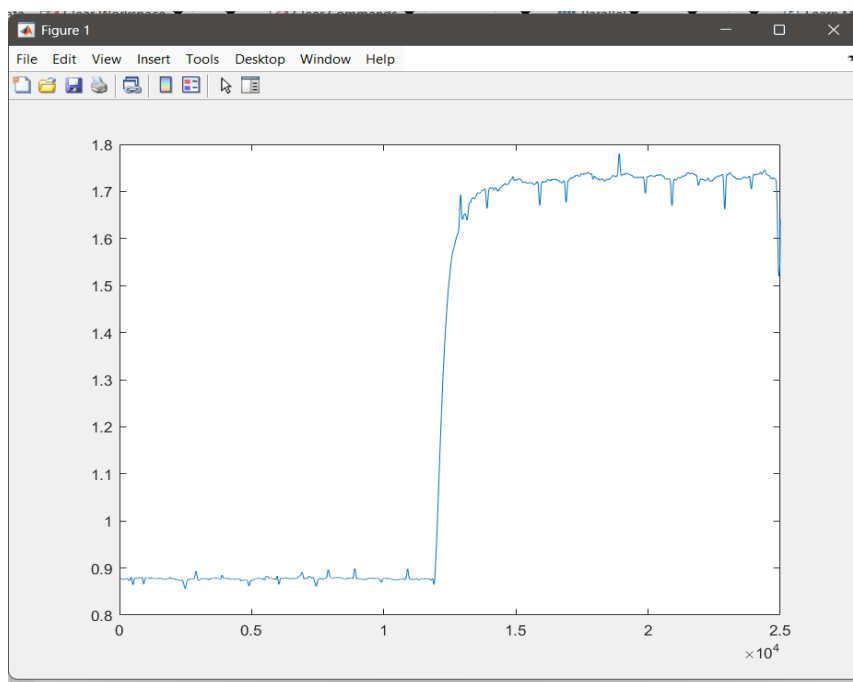


Fig. 83. Grafica de voltaje en función al tiempo.

Con los datos listos y verificados, se accedió a la herramienta System Identification Tool de MATLAB, disponible en la sección de aplicaciones como se visualiza en la Figura 84. Se procedió a elegir el tipo de modelo como "Time Domain Data" como se presenta en la Figura 85. Luego, se importaron los datos donde se especificaron las variables de entrada y salida como se ejemplifica en la Figura 86.

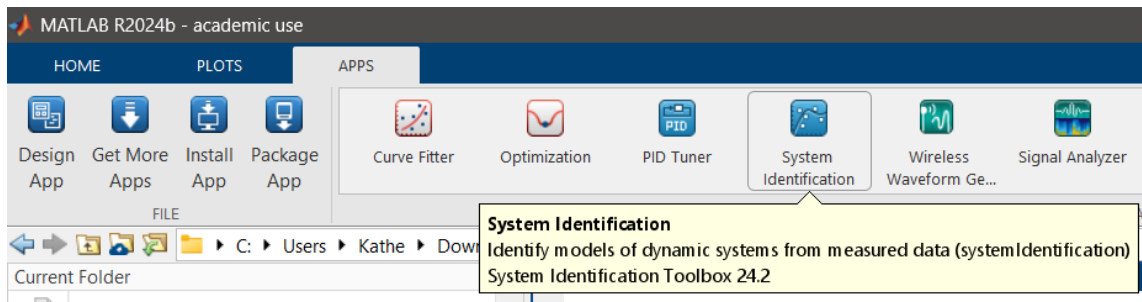


Fig. 84. System identification.

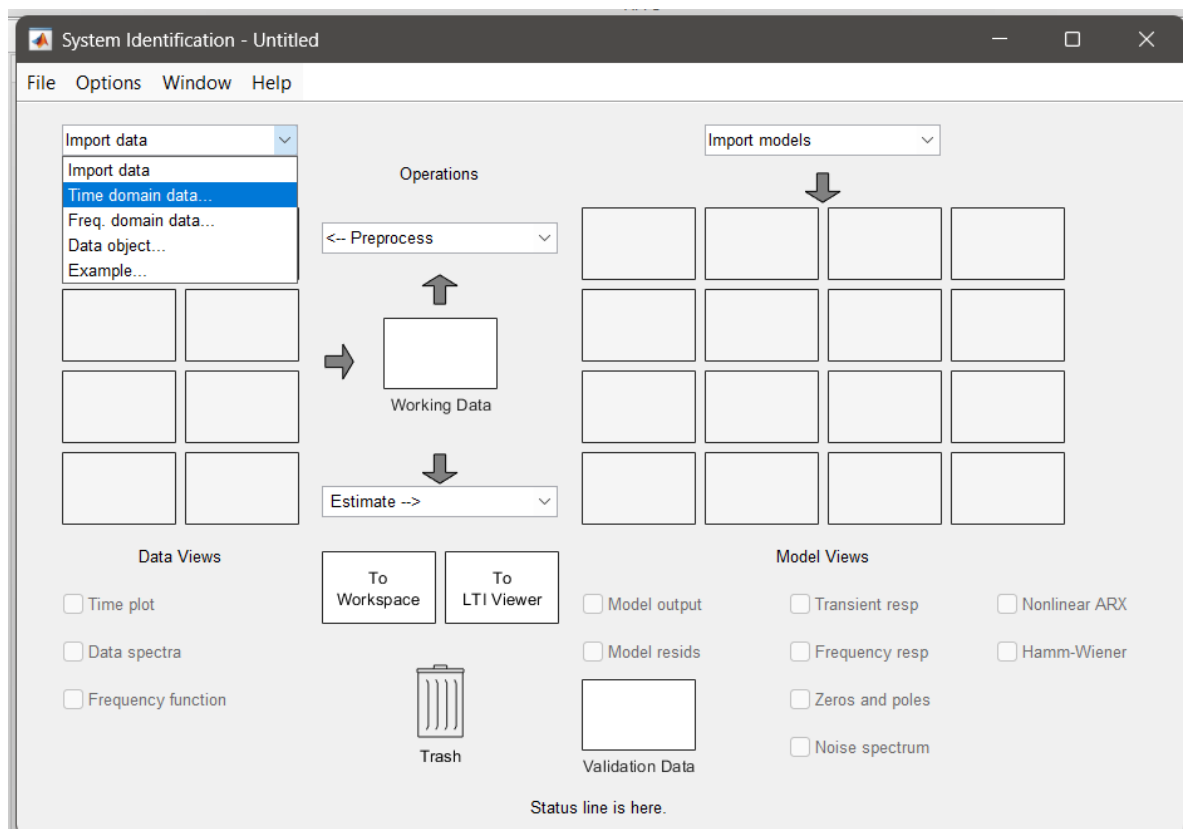


Fig. 85. System identification opción Time domain data.

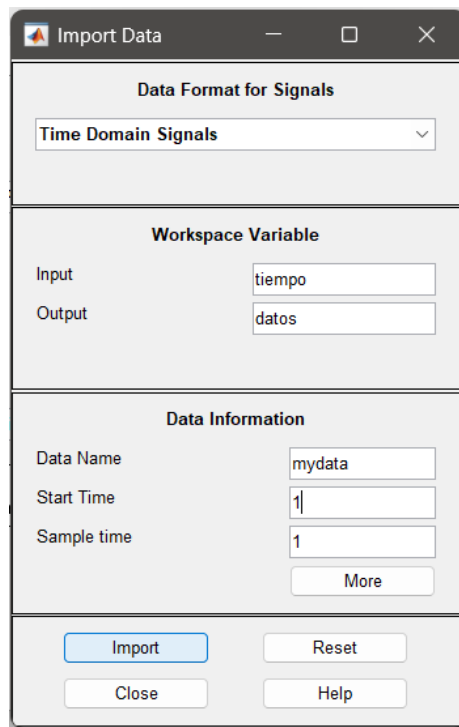


Fig. 86. Definición de entradas y salidas del workspace.

A continuación, en la aplicación de System Identification, se seleccionó el modelo de función de transferencia (Transfer Function Model) dentro de la opción de estimación de modelos como se muestra en la Figura 87.

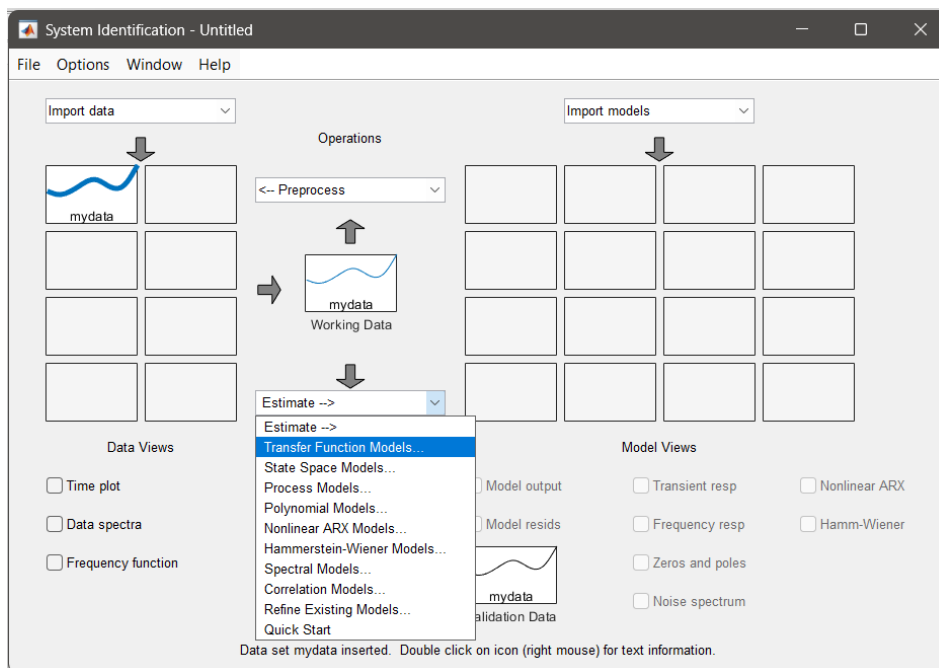


Fig. 87. Panel principal para calcular la relación de transferencia.

Se abre una nueva ventana, donde se puede configurar el número de polos y ceros de la función de transferencia del sistema, se puede ajustar hasta obtener la mejor representación del comportamiento dinámico del sistema. En caso de no conocer la respuesta de la planta de manera precisa, se puede trabajar con los valores que ya viene predeterminados por sistema, que son dos números de polos y uno para cero como se muestra en la Figura 88.

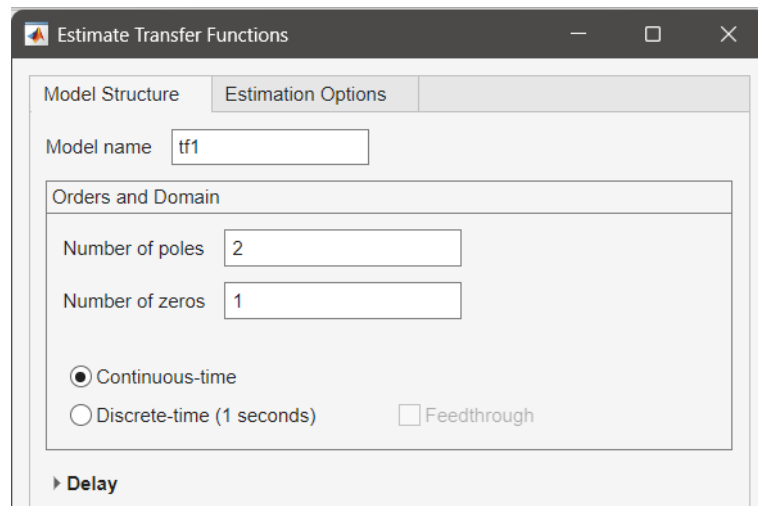


Fig. 88. Ajuste de parámetros para estimación.

El proceso de estimación se ejecutó, y el sistema proporcionó un porcentaje de estimación. Si este valor era bajo, se requería seguir variando el número de polos y ceros hasta obtener una mejor estimación. Para el modelo tf1, el resultado de la estimación fue 63.82% como se muestra en la Figura 89, lo que indicaba un buen ajuste, aunque aún podría mejorar.

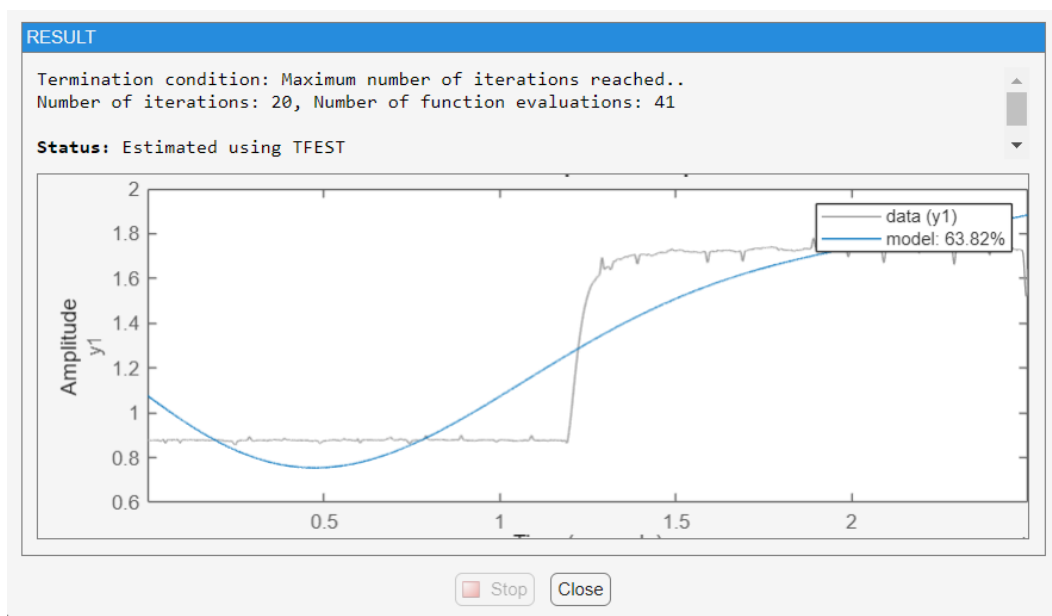


Fig. 89. Resultados de la estimación 1.

La estimación más cercana se logró con 5 número de polos y 3 ceros, la cual nos dio un porcentaje de 75.58% como se muestra en la Figura 90.

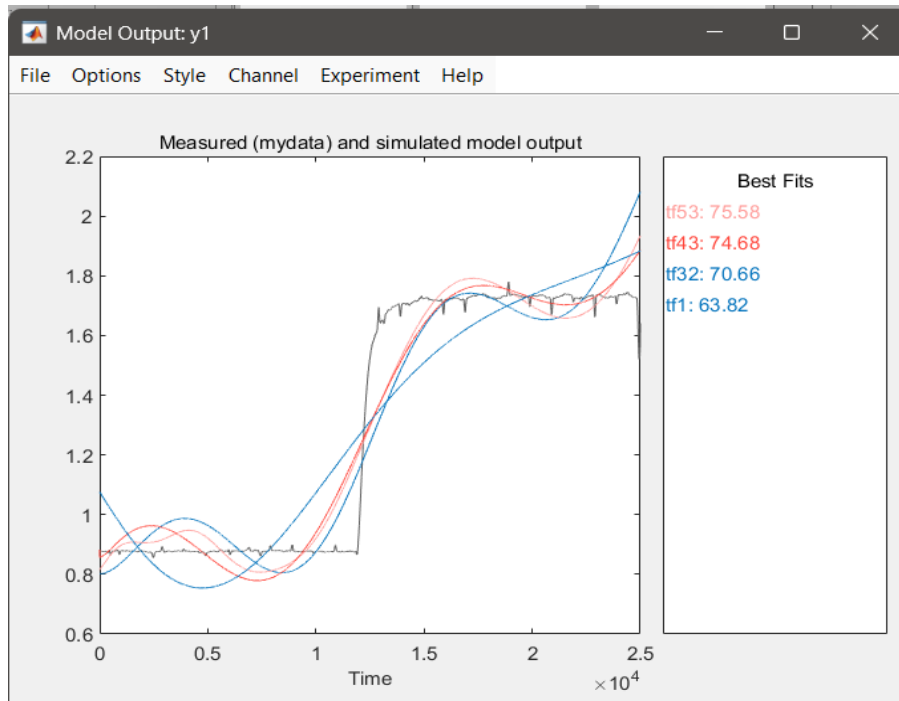


Fig. 90. Resultados de las diferentes estimaciones.

Este modelo fue luego exportado desde la herramienta System Identification al Workspace de MATLAB y se procedió a acceder a la herramienta PID Turner desde la misma pestaña de APPS. En esta herramienta, se importó la planta para el diseño del controlador, lo cual se reflejó automáticamente en la lista de opciones disponibles como se muestra en la Figura 91. Dentro del PID Turner, se configuró el tipo de controlador como PID estándar en su forma paralela, y se estableció el dominio de trabajo en el tiempo, para poder evaluar la respuesta al escalón del sistema bajo control.

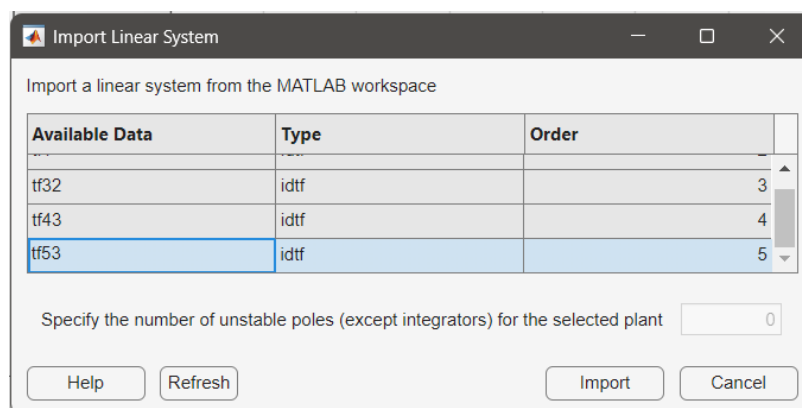


Fig. 91. Importación de datos estimados para crear la planta.

Con los datos, el PID Turner ajusto con relación a la función de transferencia las ganancias PID, la cual se fue ajustando en función a la forma de repuesta deseada como se visualiza en la Figura 92.

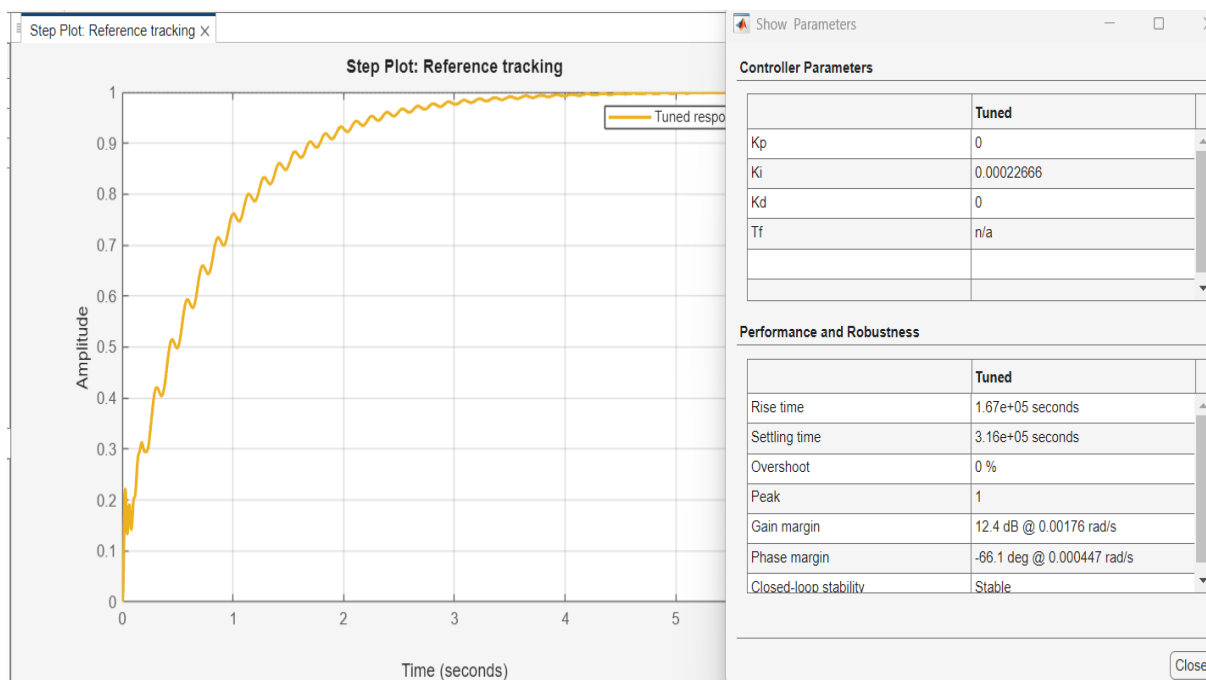


Fig. 92. Propuesta de ganancias iniciales del PID.

Una vez obtenidos los parámetros del PID, estos fueron anotados y almacenados para su posterior implementación en LabVIEW. Los valores de K_p , K_i y K_d fueron introducidos manualmente en el bloque PID dentro del diagrama de bloques de LabVIEW, con el objetivo de validar experimentalmente su comportamiento en condiciones reales. Este procedimiento permitió integrar de manera efectiva el controlador PID al sistema automatizado de pruebas del banco dinamométrico, completando así el proceso de diseño y ajuste del sistema de control.

4.6. Desarrollo de interfaz gráfica del sistema de control en LabVIEW para el banco dinamométrico Armfield CM11

Para el diseño del panel frontal, el primer paso fue insertar Tab Control, el cual se encuentra en el menú Controls dentro del grupo Modern y la categoría Layout como se muestra en la Figura 93, este componente permite dividir el panel en diferentes secciones organizadas mediante pestañas.

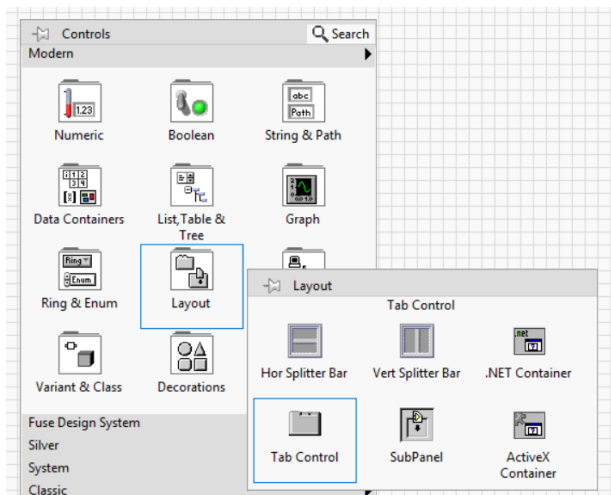


Fig. 93. Inserción del Tab Control desde el panel de controles.

Al dar clic derecho sobre el Tab control, se nos permite personalizar su estructura y contenido. En este caso, se ha seleccionado la opción Add Page After, que permite agregar una nueva pestaña adicional después de la que está actualmente activa como se muestra en la Figura 94.

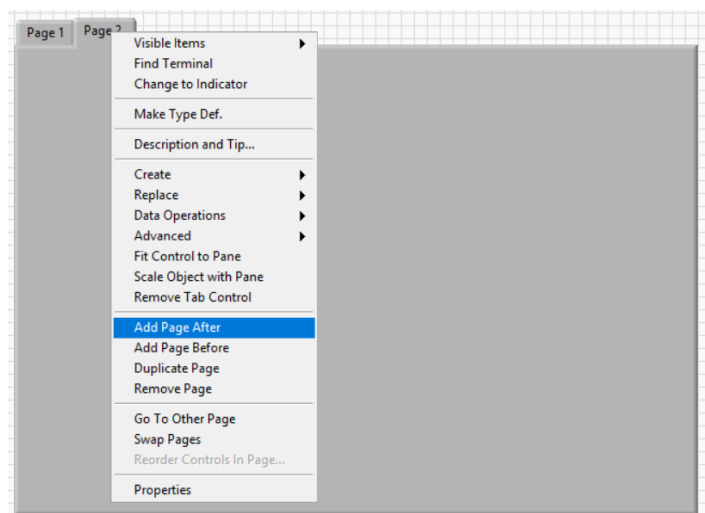


Fig. 94. Adición de una nueva página en un Tab Control.

Con el fin de estructurar adecuadamente la interfaz del programa desarrollado en LabVIEW y facilitar la interpretación de los datos adquiridos, se implementó una pestaña específica denominada Indicadores tal como se muestra en la Figura 95. Esta sección fue diseñada para agrupar de manera ordenada todos aquellos elementos que permiten visualizar las principales señales de entrada provenientes de la tarjeta DAQ, se incluyeron los instrumentos de visualización correspondientes al sensor de temperatura del refrigerante (ECT), al sensor de velocidad del motor (RPM) y al torque real entregado por el freno

electromagnético. Esta disposición permite al usuario identificar las variaciones de las señales que ingresan al sistema desde los sensores conectados.

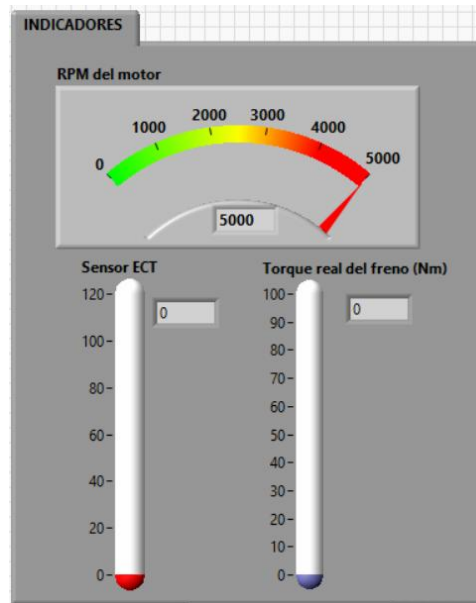


Fig. 95. Visualización de variables en la pestaña de indicadores del panel frontal.

Después se agregó otro Tab Control, la primera pestaña se denominó vista principal y la segunda como graficas. El contenido de vista principal que se observa en la Figura 96, es diseñada para representar el funcionamiento del banco dinámico Armfield CM11, en el centro de la interfaz se ilustra un motor de combustión interna, acompañado del freno electromagnético representado a la izquierda.

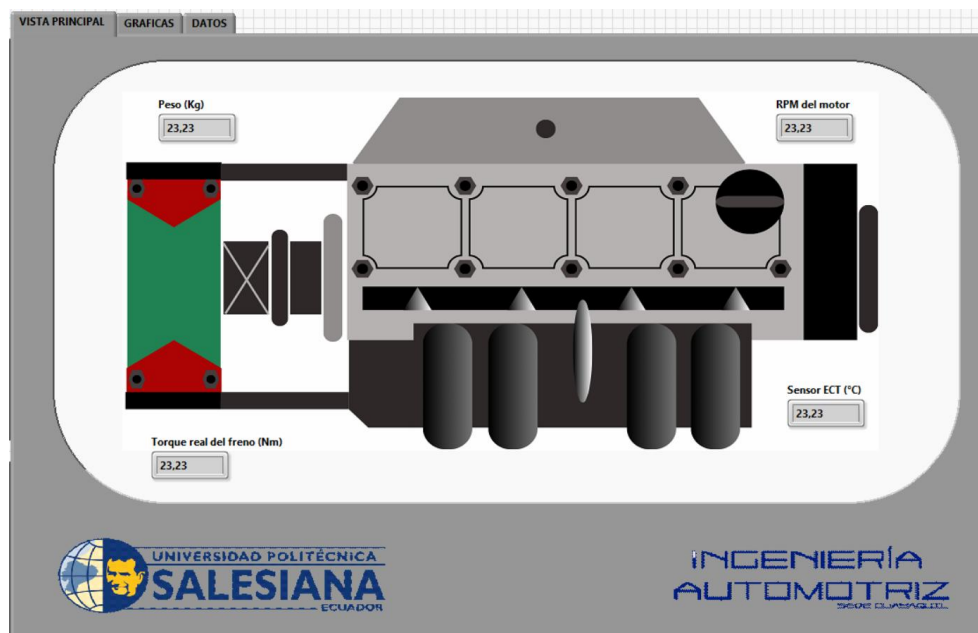


Fig. 96. Vista principal del panel frontal con representación gráfica del motor y el freno.

Alrededor del gráfico del motor se han dispuesto indicadores numéricos que muestran en tiempo real variables importantes del sistema. En la parte superior izquierda aparece un indicador de Peso (Kg), al centro inferior se ubica el Torque real del freno (Nm), y en el lado derecho se visualizan dos lecturas más: RPM del motor en la parte superior derecha y Sensor ECT ($^{\circ}\text{C}$) en la parte inferior derecha. Finalmente, se destaca en la parte inferior de la pestaña el logotipo de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, junto con la leyenda "Ingeniería Automotriz" como identificación institucional y de carrera.

La segunda pestaña correspondiente a la sección de Gráficas, se han incorporado cuatro gráficos para representar en tiempo real el comportamiento de variables críticas del sistema de frenado y del motor como se muestra en la Figura 97. En la parte superior izquierda se encuentra la gráfica titulada Control PID freno, destinada a visualizar la señal de control generada por el algoritmo PID para actuar sobre el freno electromagnético. A su lado, en la parte superior derecha, se ubica la gráfica denominada CKP, que representa la señal del sensor de posición del cigüeñal. En la parte inferior izquierda, se encuentra la gráfica Torque freno, que monitorea la señal de salida de la celda de carga convertida en torque. Y, en la parte inferior derecha se ubica la gráfica ECT, que registra la señal de temperatura captada por el sensor ECT, útil para analizar el comportamiento térmico del motor durante la prueba.

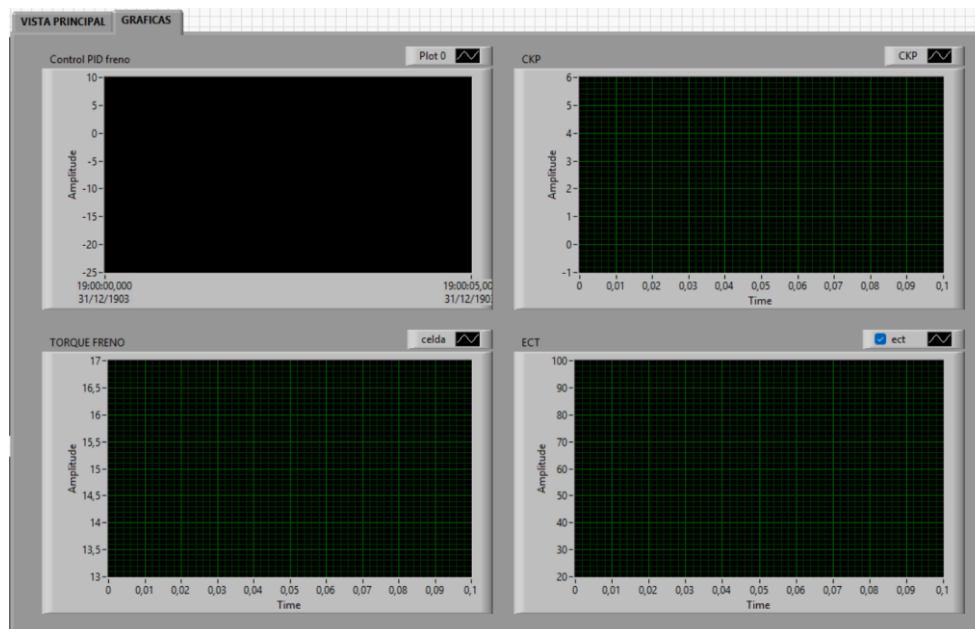


Fig. 97. Panel de gráficas dinámicas del sistema de control.

Se incorporó un tercer Tab Control, específicamente diseñado para gestionar todo lo relacionado con el sistema de frenado del banco dinamométrico mediante algoritmo PID, el

cual automatiza la respuesta del freno en función de un valor de consigna y de la señal de retroalimentación, permitiendo así mantener el sistema en equilibrio. Esta sección, que se presenta en la Figura 98, incluye parámetros ajustables como la ganancia proporcional, integral y derivativa, así como el valor deseado de torque.

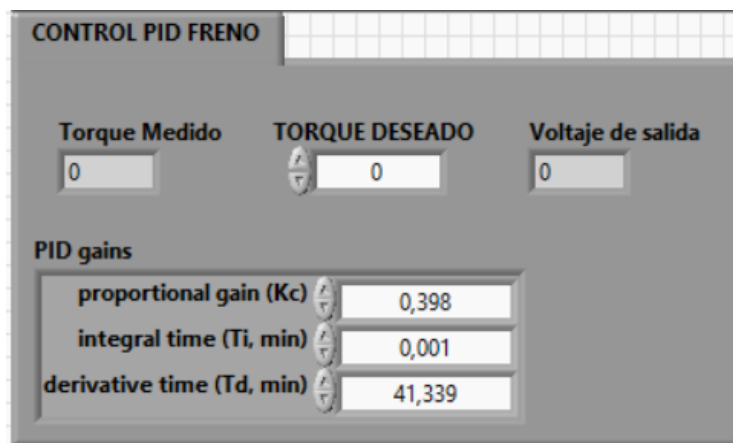


Fig. 98. Panel de control PID del freno.

A continuación, se muestra en panel frontal completo en la Figura 99.

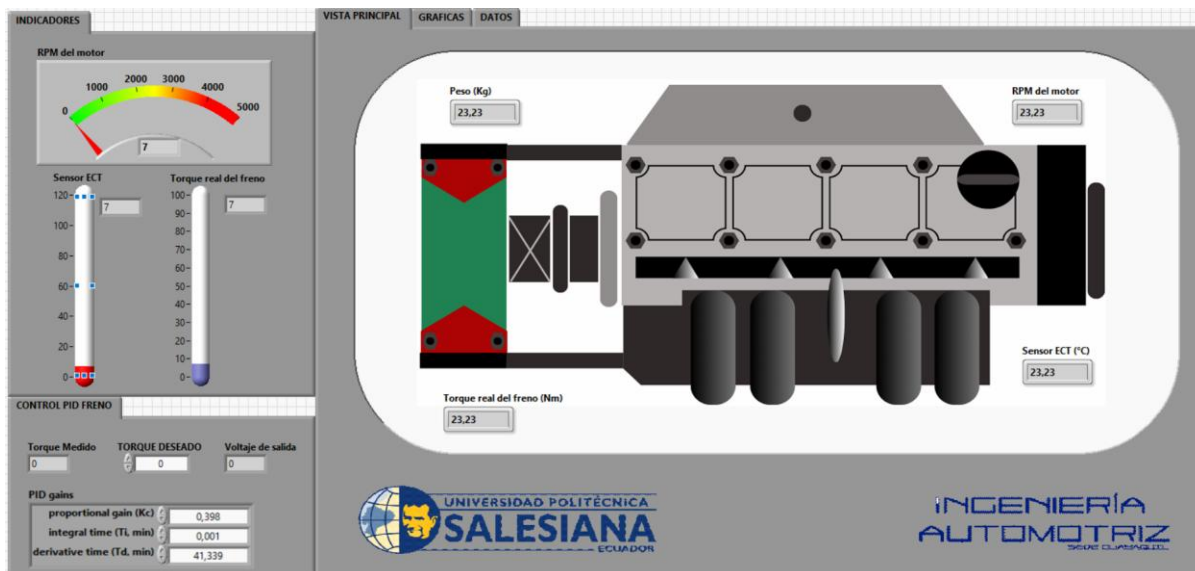


Fig. 99. Interfaz gráfica de monitoreo y control PID.

Con todos los bloques implementados, se guarda el proyecto como archivo .vi. El usuario puede ejecutar el programa desde el botón Run, observando en tiempo real cómo el sistema adquiere los datos, calcula el torque, aplica el control PID y ajusta el voltaje de salida hacia el freno, cumpliendo así con el objetivo de regular la carga en función del peso deseado ingresado por el usuario.

4.7. Proceso de validación de parámetros PID.

Una vez obtenidos los parámetros iniciales del controlador PID mediante el proceso de identificación y sintonización en MATLAB, se procedió a ingresar estos valores en el bloque PID dentro de LabVIEW. Los parámetros iniciales se muestran en la Tabla XIII.

TABLA XIII

PARÁMETROS PID INICIALES.

Parámetros PID	
Parámetro	Valor
Kp	0.42923
Ti	0.00059169
Td	77.8429

Estos valores se configuraron en el sistema y se ejecutó la primera simulación del banco dinamométrico con el motor encendido, funcionando a una velocidad constante de 2500 RPM. Durante la simulación, se observaron variables como el torque real, la salida del PID y el voltaje aplicado al freno electromagnético. En esta primera prueba experimental, se notó que el sistema tenía un tiempo de estabilización de aproximadamente 15 segundos, y se detectó un sobre impulso del 10% en el torque deseado, lo cual indicaba que el sistema aún no estaba completamente optimizado. La respuesta del freno no era completamente estable, ya que el sistema tardaba en alcanzar el valor deseado y mostraba oscilaciones ligeras que comprometían la precisión de la medición.

Con base en estas observaciones, se decidió modificar las ganancias del controlador PID, los valores originales fueron ajustados en MATLAB, incrementado y disminuyendo los controles de velocidad y robustes en PID Turner como se muestra en la Figura 100.

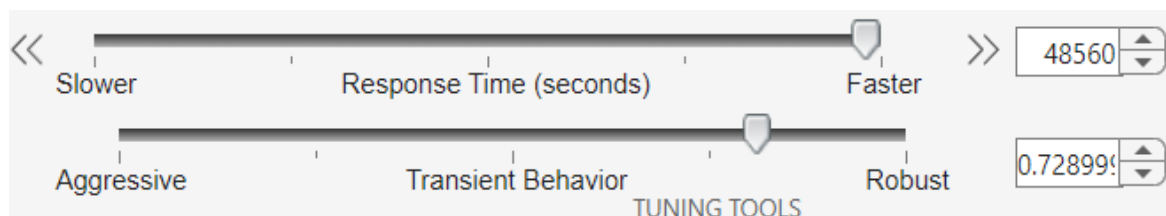


Fig. 100. Herramientas del control PID.

Los valores sintonizados se muestran en la Figura 101.

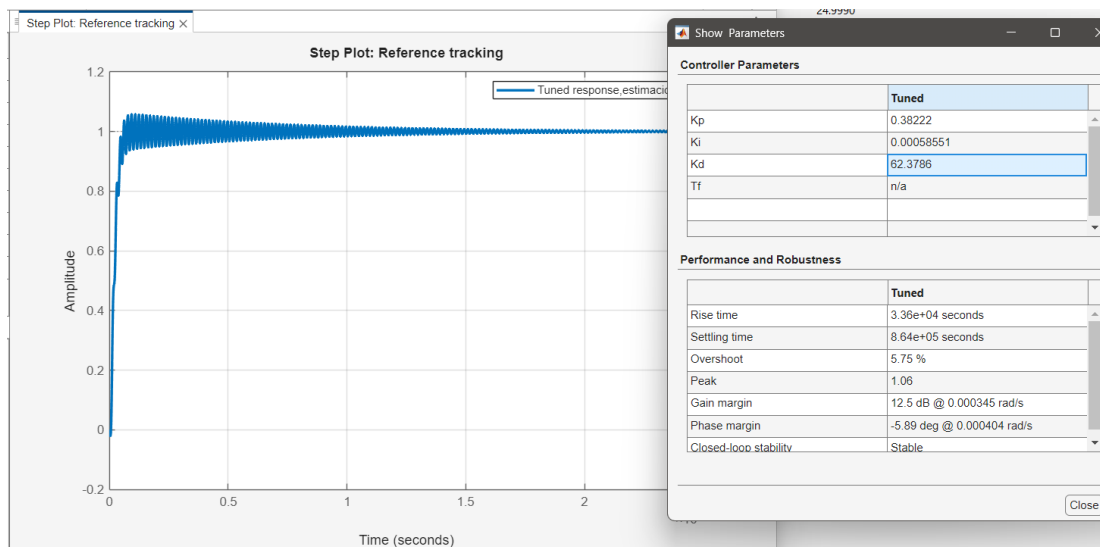


Fig. 101. Caracterización #2 de las ganancias PID.

Estos nuevos valores fueron ingresados en LabVIEW y se ejecutó una segunda simulación. En esta prueba, el sistema presenta en simulación un tiempo de estabilización reducido y una sobre oscilación moderada del 5.75%, evidenciando una alta rapidez de respuesta y una mejora en el comportamiento general. No obstante, un tiempo de estabilización excesivamente corto puede no ser siempre conveniente, ya que dificulta la visualización clara de la transición entre el torque de referencia (setpoint) y el torque medido. En estas condiciones, la señal alcanza su valor objetivo de forma tan rápida que resulta complejo analizar el proceso de ajuste y la dinámica de corrección del controlador, lo cual puede ser relevante en pruebas orientadas a evaluar el comportamiento transitorio del sistema.

En la tercera prueba, se realizaron nuevos ajustes en los parámetros PID como se muestra en la Figura 102.

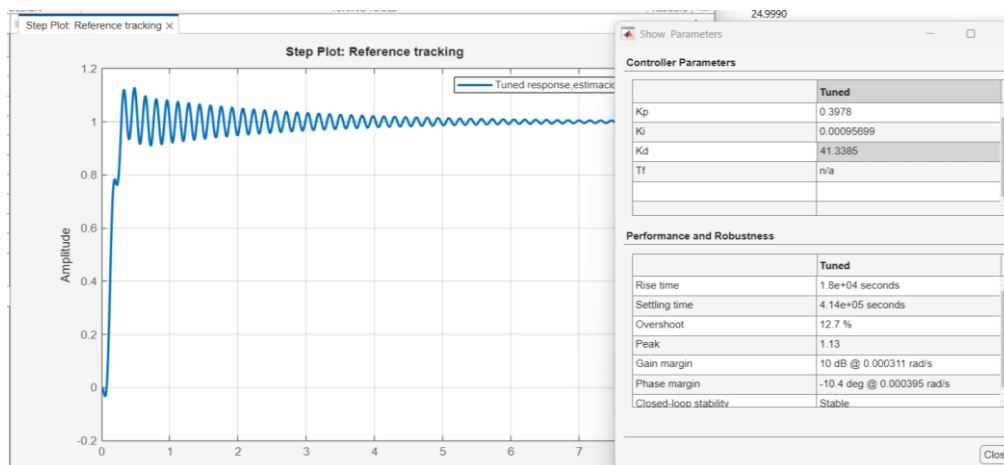


Fig. 102. Caracterización final de las ganancias PID.

Estos valores fueron ingresados nuevamente en LabVIEW, y se ejecutó la simulación. Esta fase muestra un incremento del tiempo de estabilización y una sobre oscilación del 12%, lo que denota un comportamiento más amortiguado y con transitorios de mayor duración.

Al implementar estas configuraciones mediante el software de control en LabVIEW y aplicarlas al freno electromagnético del banco, se observó que cada ajuste respondió de manera particular a las condiciones de operación reales. La última configuración permitió una transición hacia el estado estable con oscilaciones más suaves y un asentamiento progresivo, lo cual es coherente con su carácter menos agresivo en términos de ganancia derivativa y proporcional. Este tipo de respuesta puede resultar ventajoso en pruebas donde se priorice un control más gradual del torque y una menor exigencia sobre los elementos mecánicos y eléctricos del sistema. Estas mejoras en la respuesta del sistema confirmaron que las ganancias ajustadas eran adecuadas para el control del freno electromagnético.

Para validar que el sistema respondiera correctamente a variaciones en la carga, se introdujeron perturbaciones en el torque aplicado, simulando cambios desde 12 hasta 50 Nm. El sistema mantuvo la estabilidad y logró regresar al setpoint deseado sin desviaciones significativas menores al 2%. Este comportamiento validó la efectividad del controlador PID y demostró que las ganancias ajustadas eran capaces de manejar cargas variables de manera efectiva. Durante las pruebas, también se observó que el sistema fue capaz de mantener una respuesta estable a lo largo del tiempo, incluso con cambios repentinos en las condiciones operativas del motor. El controlador PID demostró ser robusto frente a variaciones en la carga y en la velocidad del motor, ajustando el torque de manera eficiente sin la necesidad de intervención manual.

Con el sistema validado, se documentaron los parámetros finales del PID, que se muestra en la Tabla XIV.

TABLA XIV

PARÁMETROS PID FINALES.

Parámetros PID	
Parámetro	Valor
Kp	0.3978
Ti	0.00095699
Td	41.3385

Estos valores fueron implementados para el funcionamiento final del freno electromagnético en el banco dinamométrico, y su rendimiento fue considerado satisfactorio. El análisis comparativo entre las configuraciones permitió identificar que las diferencias en los parámetros de sintonización, aunque mínimas, generan variaciones significativas en la respuesta dinámica del freno electromagnético. Esto resalta la importancia de seleccionar la configuración del controlador no solo en función de los resultados simulados, sino también considerando las condiciones operativas del banco.

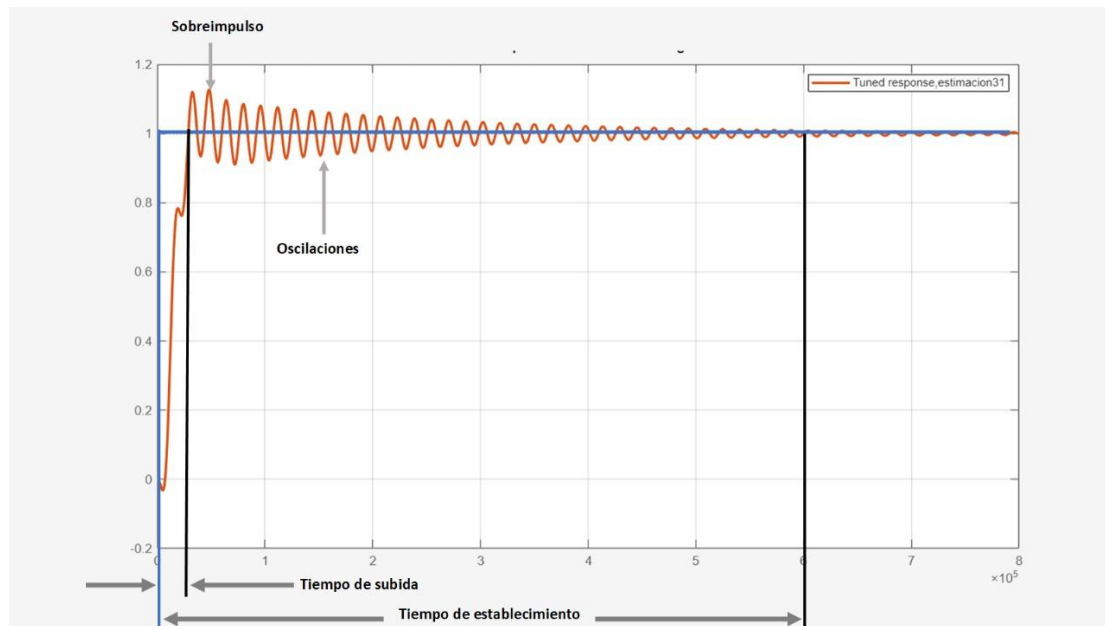


Fig. 103. Caracterización final de las ganancias PID.

En la Figura 103 se observa la respuesta al escalón del sistema, donde se identifican claramente el tiempo de subida, el sobreimpulso, las oscilaciones y el tiempo de estabilización. Si bien un tiempo de estabilización muy reducido puede parecer ventajoso a primera vista, en ciertos casos no resulta lo más conveniente. Esto se debe a que una respuesta excesivamente rápida reduce el intervalo de tiempo en el que es posible visualizar la transición entre el torque de referencia (setpoint) y el torque medido, dificultando el análisis del comportamiento transitorio. En aplicaciones de control de frenos electromagnéticos, contar con un margen temporal moderado para que el sistema alcance su estado estable permite evaluar de manera más precisa cómo el controlador corrige el error y ajusta el torque aplicado.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se implementó un sistema de control PID para el freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11, lo que permitió automatizar el proceso de regulación de carga y mejorar la estabilidad en las mediciones de torque y potencia. La integración de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 y el entorno LabVIEW facilitó la adquisición de señales en tiempo real, proporcionando un control eficiente sobre las pruebas. Este sistema no solo optimizó la respuesta del freno electromagnético, sino que también garantizó la medición de parámetros clave como el torque y la potencia generada, contribuyendo significativamente a la confiabilidad de los ensayos.

Durante el proceso de diagnóstico inicial del banco, se identificaron varias fallas críticas que afectaban su operatividad, como cables de bujías deteriorados, la ausencia de la fuente de alimentación de 24V, la celda de carga sin continuidad y el freno electromagnético oxidado. Estas fallas comprometían la capacidad del banco dinamométrico para realizar pruebas precisas y estables. Sin embargo, mediante un reacondicionamiento que incluyó la sustitución de cables, la instalación de una fuente de alimentación adecuada, la limpieza y mantenimiento del freno electromagnético, el sistema recuperó su operatividad. Este proceso permitió garantizar la correcta transmisión de señales y la medición precisa de los parámetros, lo que constituyó una mejora importante en el rendimiento general del banco.

La aplicación de la función de transferencia resultó fundamental para la caracterización de los parámetros del controlador PID, ya que permitió modelar matemáticamente el comportamiento dinámico del freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11. Este modelo proporcionó una base sólida para la sintonización inicial del PID en Matlab, evitando depender únicamente de métodos empíricos y reduciendo el tiempo de ajuste. Gracias a la función de transferencia, fue posible predecir la respuesta del sistema ante variaciones de consigna, identificar posibles retardos y optimizar los valores de K_p , T_i y T_d antes de las pruebas físicas, minimizando riesgos de sobrecarga y mejorando la precisión del control. Esta metodología aseguró que el proceso de ajuste fuera más eficiente, seguro y respaldado por un análisis técnico riguroso.

Se desarrolló una interfaz gráfica en LabVIEW que permite la supervisión del funcionamiento real del banco dinamométrico Armfield CM11, priorizando su fácil

interpretación y operación por parte del usuario. El sistema incorpora un esquema visual que integra un motor de combustión interna al centro y el freno electromagnético a la izquierda, acompañados de indicadores numéricos estratégicamente ubicados para mostrar en tiempo real variables clave del sistema: peso aplicado (Kg), torque real del freno (Nm), RPM del motor y temperatura medida por el sensor ECT ($^{\circ}\text{C}$). Esta interfaz, combinada con la pestaña Gráficas, permite al operador monitorear de manera ordenada tanto las variables instantáneas como la evolución temporal de los parámetros, optimizando la experiencia de uso y reduciendo la posibilidad de errores operativos.

La sintonización del controlador PID permitió optimizar la respuesta del sistema de frenado electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11. Inicialmente, las ganancias obtenidas fueron $K_p = 0,42923$, $T_i = 0,00059169$ s y $T_d = 77,8429$ s, valores que, si bien permitían el funcionamiento básico del sistema, presentaban un tiempo de estabilización prolongado y un sobre impulso considerable. Tras el ajuste realizado mediante pruebas experimentales y validación en el entorno LabVIEW, se determinaron los parámetros finales de $K_p = 0,3978$, $T_i = 0,00095699$ s y $T_d = 41,3385$ s, lo que redujo significativamente el sobre impulso y mejoró la estabilidad del sistema. El tiempo de estabilización se redujo a 7 segundos, y el sobre impulso fue disminuido al 2%, favoreciendo una respuesta más rápida y controlada del freno ante variaciones de carga.

5.2. Recomendaciones

Establecer inspecciones periódicas al freno electromagnético, celda de carga, conexiones eléctricas y tarjeta DAQ, con el fin de prevenir corrosión, desgaste mecánico o fallos en la transmisión de datos, garantizando así la operatividad continua del banco.

La tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 ha demostrado ser una herramienta confiable y adecuada para la captura de señales del sistema de control, permitiendo la medición de variables clave para el análisis del torque y potencia del motor. No obstante, considerando la posibilidad de ampliar el alcance del estudio e incorporar sensores adicionales como los de presión de admisión, relación aire-combustible (AFR) y consumo de combustible, se recomienda evaluar la implementación de una tarjeta de adquisición con un mayor número de canales analógicos y digitales como la DAQ 6212. Esta ampliación permitiría integrar más parámetros de medición en tiempo real, facilitando un análisis más integral y detallado del rendimiento del motor bajo distintas condiciones. Además, esta mejora constituye una

oportunidad interesante para futuras investigaciones o proyectos de tesis enfocados en la optimización y expansión de sistemas de adquisición de datos en aplicaciones automotrices.

Se recomienda aprovechar el banco dinamométrico y el freno electromagnético actualmente operativo no solo para la medición de torque y potencia, sino también como plataforma versátil para el desarrollo de una variedad de proyectos de investigación y aplicación práctica. Entre las posibles ampliaciones se incluyen estudios sobre combustibles alternativos, que permitirán evaluar el comportamiento del motor con diferentes tipos de combustibles más sostenibles; análisis detallados de ciclos transitorios para comprender mejor la respuesta dinámica del motor ante variaciones rápidas de carga y velocidad; y la validación y calibración de modelos de simulación computacional de motores, contribuyendo a una mejor correlación entre datos experimentales y predicciones teóricas. Esta diversificación de pruebas y proyectos maximizará el aprovechamiento del equipo disponible, fomentando una formación más integral y aportando valor científico y tecnológico al área de investigación automotriz.

REFERENCIAS

- [1] S. DeCoste, A. Scalzi, J. Chen y D. DelVescovo, «Minimización del Tiempo de Prueba en Estado Estacionario en un Laboratorio de Dinamómetro de Motores,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2023-01-0209/>.
- [2] A. Bragadeshwaran, K. Chidambaram, K. Chellapan, S. Pemmareddy, V. Rajasekar, D. Sathiaseelan, E. Mohamed y N. Tharun, «Model Based Integrated Control Strategy for Effective Brake Energy Recovery to Extend Battery Longevity in Electric Two Wheelers,» 2024. [En línea]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09544070231167616>.
- [3] S. Arango Salazar y J. Idárraga Vargas, «Freno Electromagnético: Prototipo para Experimentación,» 2013. [En línea]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1131/Informe%20final_Prototipo%20Freno%20electromagnetico%20o%20de%20EDDY_.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] A. Doroudi, A. Namnabat y H. Nazifi, *A Comparative Study of Foucault Brake System to Consider the Effect of Disc Shape and Material for Increasing Eddy Current Loss and Braking Torque*, Iran: International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), 2023.
- [5] V. M. Jardim Da Mata, B. S. Silva Pereira y A. A. Maria Lagana, *Automation of Eddy Current Dynamometer for Engine Testing and Calibration*, Sao Paulo: SAE International, 2022, p. 18.
- [6] A. Simmonds Mendoza, N. Cabrera Londoño, N. Berdugo Barandica, J. Roldan Mckinley y E. Yime Rodriguez, *Implementación de Control PID de Nivel en Laboratorio Usando PLC Siemens S7-300*, Universidad del Atlántico, 2018.
- [7] D. Ruan, H. Xie, K. Song y G. Zhang, *Adaptive Speed Control based on Disturbance Compensation for Engine Dynamometer System*, Tianjin University, 2019.
- [8] S. García Hernández, J. Barreto Sandoval, E. Gutiérrez Guerrero y R. Morales, *Nueva Posición de los Frenos Electromagnéticos para el Control de la Turbulencia en Planchón Delegado.*, vol. 14, Morelia: Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la UMSNH, 2017.
- [9] T. Koc, D. Karayel, B. Boru, V. Ayhan, I. Cesur y A. Parlak, *Design and Implementation of the Control System of an Internal Combustion Engine Test Unit*, Istanbul: Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- [10] D. A. Castro Leon y M. R. Pizarro Quito, «Ampliación de la Capacidad de Toma de Datos en el Banco Dinamométrico marca Armfield Modelo CM11,» 2017. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14405/1/UPS-CT007079.pdf>.
- [11] Y. Fan, G. Yang y Q. Sun, *Analytical Modeling of Cylindrical Eddy Current Brakes and Multi-Objective Optimization on Game Theory*, Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2024.
- [12] M. L. Feijo Agila y V. O. García García, «Adecuación del Banco Dinamométrico Marca Armfield CM11 para el Acoplamiento de diferentes motores ciclo Otto,» 09 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12826/1/UPS-CT006696.pdf>.

- [13] Á. D. Bermeo Romero y J. L. Salazar Siguenza, «Optimización en la Toma de Muestras de Distantas Variables del Banco Dinamométrico Marca Armfield Modelo CM11,» 03 2016. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12032/1/UPS-CT005838.pdf>.
- [14] INEC, «Instituto Nacional de Estadística y Censos,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>.
- [15] Armfield, *Internal Combustion Engines CM11*, 2020.
- [16] W. M. J. d. Mata, «Control digital de un dinamómetro de corrientes de Foucault,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-08072021-134756/publico/ValterManuelJardimdaMataCorr20.pdf>.
- [17] L. A. Aguirre Bajaña y M. W. Rivera Alvarado, «Repotenciación Avanzada del Sistema de Inyección Electrónica del Motor de Encendido Provocado en el Dinamómetro Armfield CM11 mediante Reprogramación de Módulos de Control Electrónico,» 2025. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29974/1/UPS-GT006126.pdf>.
- [18] A. M. Arichavála Alvarracin y C. G. Jerez Guaman, «Diseño e implementación de un Software para Adquisición y Visualización de Parámetros Funcionales del Banco Dinamométrico Marca Armfield Modelo CM11,» 2017. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15068/1/UPS-CT007437.pdf>.
- [19] R. Scapini, L. Pietta, L. Ferrao, D. Luceiro, M. Martins y L. Michels, *Sistema para controle de frenagem para dinamometro de correntes de foucault*, Rio Grande: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012.
- [20] M. Gulbahce, D. Kocabas y A. Atalay, *A study to determine the act of excitation current on braking torque for a low power eddy current brake*, Chicago, IL: International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013.
- [21] BM Trada Certification, *Armfield gasoline engine CM11*, UKAS Quality Management, 2007.
- [22] J. Castillo, V. Rojas y J. Martinez, «Determinación del Torque y Potencia de un Motor de Combustión Interna a Gasolina Mediante el Uso de Bujía con Senzor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático,» vol. 39, nº 1, p. 9, 2017.
- [23] OMEGA, *Force Transducer LCEC Series*, 2020.
- [24] National Instrument, «Especificaciones de la DAQ USB 6009,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6009-specs/page/specs.html?srsltid=AfmBOoqJafQfSKRwQvENUbLcNQrphrsMMTIBZTPY8FoSKUrSITcakdz>.
- [25] IQS Directory, «Servicios de Sistemas de Adquisición de Datos,» [En línea]. Available: <https://www.iqsdirectory.com/data-acquisition-systems/>.
- [26] Rusefi, «Pin Out Proteus Large Universal,» [En línea]. Available: <https://rusefi.com/docs/pinouts/proteus/>.
- [27] Rusefi, «ECU universal grande proteus,» [En línea]. Available: <https://www.shop.rusefi.com/shop/p/spring-blade-cyy7n>.

- [28] National Instrument, «Funciones Avanzadas en el Ajuste PID,» 05 2025. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/labview/advanced-features-in-pid-tuning.html>.
- [29] J. Tibola, R. Lago, T. LanzaNova, M. Santos y H. Pinheiro, *Modeling and Control of a Low-Cost Driver For an Eddy Current Dynamometer*, vol. 27, SBA Brazilian Society for Automatics, 2016, pp. 368-378.
- [30] Wikipedia, «Controlador PID,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID.
- [31] Michael, «PID ¿Cómo sintonizar un lazo PID?,» Control Real Español, 2017. [En línea]. Available: <https://controlreal.com/es/pid-como-sintonizar-un-lazo-pid/?noamp=mobile>.
- [32] National Instrument, «¿Qué es NI LabVIEW?,» [En línea]. Available: https://www.ni.com/es/shop/labview.html?srsId=AfmBOoqEzMF_oizAfGNx_wikInzHYEJ55uAzM1B61iGctS3MoqBI0jZo.
- [33] EFI Analytics, «Estudio de Análisis EFI TunerStudio,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.tunerstudio.com/index.php/tuner-studio>.
- [34] N. Roustaei, *Aplicación e Interpretación del Análisis de Regresión Lineal*, vol. 13, National Library of Medicine, 2024, pp. 151-159.

ANEXOS

Anexo 1. Especificaciones del banco dinamométrico Armfield CM11.

DISCOVER
armfield

CM SERIES: INTERNAL COMBUSTION ENGINES
GASOLINE ENGINE – CM11MKII

BIOFUEL COMPATIBLE





Typical CM11MkII mimic diagram



Integrated eddy current dynamometer to vary engine load

FEATURES

- > Modern, high efficiency, 3-cylinder automotive engine
- > Biofuel compatible
- > Integrated eddy current dynamometer to vary engine load
- > Plotting of characteristic torque and power curves against engine speed
- > Full software control of system, including load and throttle settings
- > Closed loop software control of brake loading to maintain constant engine speed during measurements
- > User control of ignition timing and fuel injection now standard
- > Secondary water cooling by heat exchanger, with measurement of temperature change and flow rate
- > MkII version fitted with wideband Lambda sensor for improved performance
- > Remote emergency stop, and facility for safety interlocks
- > Optional operation on LPG as well as gasoline and biofuel
- > Optional measurement of cylinder pressure, and plotting this on a p-V diagram

The Armfield CM11MkII biofuel compatible, Gasoline Engine provides a self-contained engine test rig, which enables students to investigate a range of engine performance characteristics. The unit is designed to be linked to a computer, and is supplied with sophisticated educational data acquisition software.













This data sheet is available online at:
www.armfield.co.uk/cm11mkii

ISSUE 2

DESCRIPTION

The Armfield CM11MkII is a self-contained integrated, multi-cylinder engine, dynamometer and instrumentation system, based on a VAG (Volkswagon Automotive Group) 1.2 Litre, 3-cylinder engine, as used in a number of VW cars. This engine is a modern design, with electronic engine management of ignition and fuel injection settings.

The Armfield CM11MkII can be run on a wide variety of biofuels and ethanol mixes. It can be used for fuel testing and comparison exercises. (After each run on non-standard fuel, the engine should be run for a short time on standard gasoline.)

An eddy current dynamometer provides a variable load on the engine, enabling the characteristic power and torque curves to be reproduced in the laboratory. The system comes complete with extensive instrumentation, including RPM measurement, torque (from which power can be calculated), plus various temperatures, pressures and flows (see Technical Specification).

The whole system is designed to be linked to a computer using the software provided. This provides real time monitoring of the various sensors, with a wide range of data logging and graphical display options. The dynamometer and throttle can both be controlled electronically, which makes installation into a closed test cell very straightforward, and enables for remote operation. A safety 'watchdog' facility ensures the system shuts down safely in the event of computer failure or software lock-up.

The interfaces are compatible with packages such as LabVIEW™ and MatLab for users who wish to provide their own control and monitoring software. A further advantage of the computer control is that stable RPM readings can be easily achieved using the closed loop control function on the dynamometer drive.

A closed loop primary water-cooling system is incorporated, complete with a heat exchanger for connecting into a secondary cold water supply.

A feature of the system is the Engine Control Unit (ECU), which controls the ignition timing and fuel injection characteristics. The user has full access to this information, and advanced users can vary the parameters to explore engine performance under different conditions.

Also the injector opening times are available from the ECU software and they can be used to calculate accurate fuel consumption.

The ECU software can either be run on the same computer as is used for control and data logging, or can be run on a separate computer.

TECHNICAL SPECIFICATION

Engine Data

Engine Model:	VAG type AWY
Displacement:	1198cc
Bore:	76.5mm
Stroke:	86.9mm
Cylinders:	3 (6 valve)
Nominal Power:	40kW @ 4700 rpm (running on gasoline)
Nominal Torque:	106Nm @ 3750 rpm (running on gasoline)

Dynamometer Data

Dynamometer Type:	Eddy current
Cooling:	Air cooled
Max Power:	55kW for 20 minutes

Instrumentation and Sensors:

- Engine speed counter
- Load cell to measure torque
- Inlet air flow measured by orifice plate
- Inlet air temperature
- Secondary cooling water flow and temperatures (inlet and outlet)
- Lambda sensor (wideband)



OPTIONS

The CM11MkII can be ordered with a number of optional accessories. These must be ordered with the CM11MkII. They cannot be fitted retrospectively.

CM11-12 Engine Indicator Set

The engine indicator set comprises a high temperature pressure sensor integrated into a spark plug. A separate charge amplifier provides signal conditioning to generate a voltage that can be logged on the computer. A special routine in the Armfield software enables for high speed data acquisition of this signal, and automatically plots the results on a p-V diagram. Note: The spark plug used in this arrangement is not identical to the other sparkplugs. This sensor is a high precision unit and is physically delicate.

CM11-13 LPG Fuel System

The Liquid Petroleum Gas (LPG) option includes the pipework, solenoid valves, injectors and an LPG control unit to enable the engine to be run on LPG as well as gasoline. The engine is started on gasoline, and when hot enough, can be switched to run under LPG.

The equipment is supplied with a flexible feed pipe terminating in a 6mm OD copper tube and a self sealing quick release connector suitable for fitting to the LPG bottles available in many countries.

The user must supply a liquid offtake LPG bottle, and if necessary a suitable fitting to the feed pipe.

INSTALLATION

The CM11MkII should be installed in a well ventilated area with exhaust gas extraction facilities. The unit is supplied on wheels for ease of movement, these can be removed and the unit bolted to the floor for permanent installation.

Apart from the master on/off switch, and the cooling water, everything can be controlled remotely enabling the engine to be installed in a dedicated test cell, and operated from outside the cell.

It is supplied with a 5m USB lead, giving a maximum distance between the unit and the controlling computer of approximately 4m.

REQUIREMENTS

Electricity: 220-240V, single phase, 10 Amps
Cooling water: 6 l/min at 3 bar pressure, <20°C

The user must have access to one or two PCs (according to preference).

See Essential Equipment for further requirements.

ESSENTIAL EQUIPMENT

Two free USB ports are required, one to run the Armfield data logging and control software, and one to run the ECU software.

OVERALL DIMENSIONS

Height:	1.50m
Width:	1.50m
Depth:	1.00m

SHIPPING SPECIFICATION

Volume:	3.00m ³
Weight:	500kg (approx.)

Anexo 2. Especificaciones de la ceda de carga.

SEALED BEAM LOAD CELLS FOR LOW-CLEARANCE INSTALLATIONS



**Tension/Compression
Calibrated in Compression
50 lb to 1000 lb
23 kg to 455 kgf**



LCEC Series



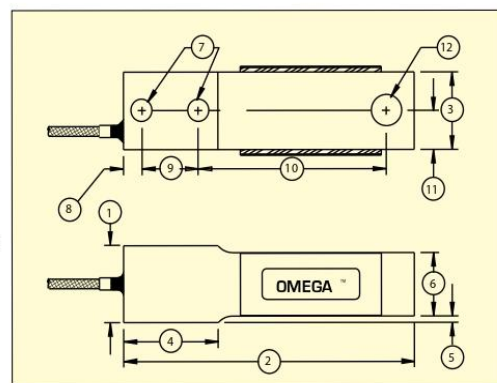
- ✔ Very High Precision
- ✔ Low Profile
- ✔ Waterproof, Corrosion Resistant
- ✔ Barometrically Insensitive

LCEC Series load cells are designed to operate in all weather or wet industrial environments. Their low profile and high side load capability simplify mechanical installation considerations. Their weather sealing, high precision, and repeatability make them ideal for rugged industrial use in testing, batching, weigh pits, and applications that are exposed to the elements.

SPECIFICATIONS

- Excitation:** 10 Vdc (15V maximum)
- Output:** 3 mV/V nominal
- Calibration:** NIST-traceable
- Linearity:** ±0.03% full scale
- Hysteresis:** ±0.02% full scale
- Repeatability:** ±0.01% full scale
- Creep (after 20 min):** ±0.03%
- Zero Balance:** ±1% full scale
- Operating Temp Range:** -55 to 90°C (-65 to 200°F)
- Compensated Temp Range:** -15 to 65°C (0 to 150°F)
- Thermal Effects:**
 - Zero:** ±0.0015% rdg/°F maximum
 - Span:** ±0.0008% full scale/°F maximum
- Safe Overload:** ±150% of capacity
- Ultimate Overload:** ±300% of capacity
- Input Resistance:** 350 Ω +50/-3.5 Ω
- Allowable Side Load at Rated Load:** 50% rated capacity
- Protection Class:** IP67

LCEC-1K shown actual size.



Output Resistance: 350 ±3.5 Ω
Construction: Aluminum
Electrical: 3 m (10') insulated 4-conductor shielded color-coded cable

Dimensions: inches and mm

See Drawing Above	CAPACITY (lb)									
	50		100		250		500		1000	
	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm
1	0.98	24.9	0.98	24.9	0.98	24.9	1.0	25.4	1.50	38.1
2	2.38	60.5	2.38	60.5	2.38	60.5	3.88	98.6	5.00	127.0
3	0.50	12.7	0.50	12.7	0.50	12.7	0.50	12.7	1.00	25.4
4	0.97	24.6	0.97	24.6	0.97	24.6	1.25	31.8	1.75	44.5
5	0.11	2.80	0.11	2.80	0.11	2.80	0.09	2.30	0.10	2.50
6	0.82	20.8	0.82	20.8	0.82	20.8	0.82	20.8	1.36	34.5
7	0.17	4.30	0.17	4.30	0.17	4.30	0.28	7.10	0.41	10.3
8	0.25	6.40	0.25	6.40	0.25	6.40	0.25	6.40	0.38	9.70
9	0.50	12.7	0.50	12.7	0.50	12.7	0.75	19.1	1.00	25.4
10	1.31	33.3	1.31	33.3	1.31	33.3	2.50	63.5	3.25	82.6
11	0.25	6.40	0.25	6.40	0.25	6.40	0.25	6.40	0.50	12.7
12	0.17	4.30	0.17	4.30	0.17	4.30	0.40	10.2	0.40	10.2

To Order

CAPACITY	MODEL NO.	COMPATIBLE METERS*
50 lb	LCEC-50	DPiS, DP41-S, DP25B-S
100 lb	LCEC-100	DPiS, DP41-S, DP25B-S
250 lb	LCEC-250	DPiS, DP41-S, DP25B-S
500 lb	LCEC-500	DPiS, DP41-S, DP25B-S
1000 lb	LCEC-1K	DPiS, DP41-S, DP25B-S

*Visit us online for compatible meters. DPiS meter suitable for one direction measurement only.

Ordering Examples: LCEC-250, 250 lb capacity load cell.
 LCEC-1K, 1000 lb capacity load cell.

Model 9235/36**Multichannel amplifier** **How to open the tube housing**

- Undo the PG cable glands at both ends of the tube housing.
By doing this you reduce the risk of damaging the connecting cable when opening the housing.
- Unscrew the deeply knurled end fitting from the housing.
The end fittings on the housing are connected to the rest of the housing via a threaded fitting.
- Now carefully slide the end fitting away from the housing.
- Unscrew the housing from the finely knurled end fitting.
- Slide the housing away from the circuit board.

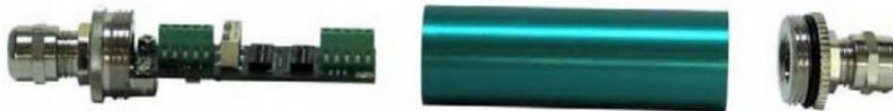


Figure 3: Once the housing is unscrewed from the end fittings, the circuit board is exposed.

4.1.2 Terminal assignments 9236

Connect the 9236 exclusively to power supplies that are equipped with a safety transformer in accordance to EN 61558.

Note:

Devices connected to the input and output circuits that are connected to the 9236's signal lines must also be fitted with a safety transformer to EN 61558.

Note:

Always use shielded measurement cables. With burster sensors, the cable shield is not usually connected to the sensor housing. Place the connecting cable's shield on the connector shells, which are electroconductively connected to the measuring amplifier housing. As a rule, the cable shield should be connected to (protective) ground via the power supply lead and/or subsequent evaluation electronics.

Alternatively, you can connect the cable shield. If you do this, the shield is connected to the functional ground (FE) of the 9236. When doing this, take into account the ground connections of the input-side and output-side electronics.

Note:

If the shield connector connects to the sensor housing then it must not be connected to the plug connector.



Multichannel amplifier

Model 9235/36

Functional ground

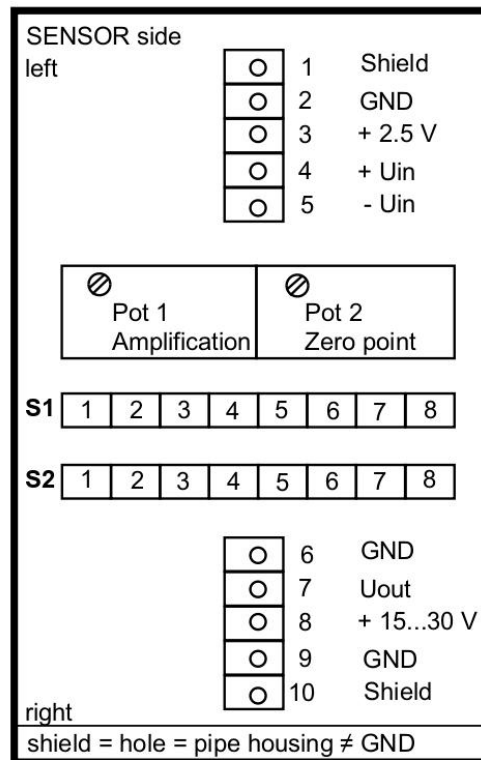
With the IP67 version, the cable shield is always placed on the tube housing.

- Ensure a proper ground connection when installing on a conductive material.

The measurement inputs and outputs are not electrically isolated from each other or from the supply voltage. The housing is isolated from the electronics.

- Electrical connections with the housing should only be made via the plug connector housings.
- Ensure proper ground connections for the sensor, cable shield and subsequent electronics.

Terminal assignment for circuit board and version in tube housing



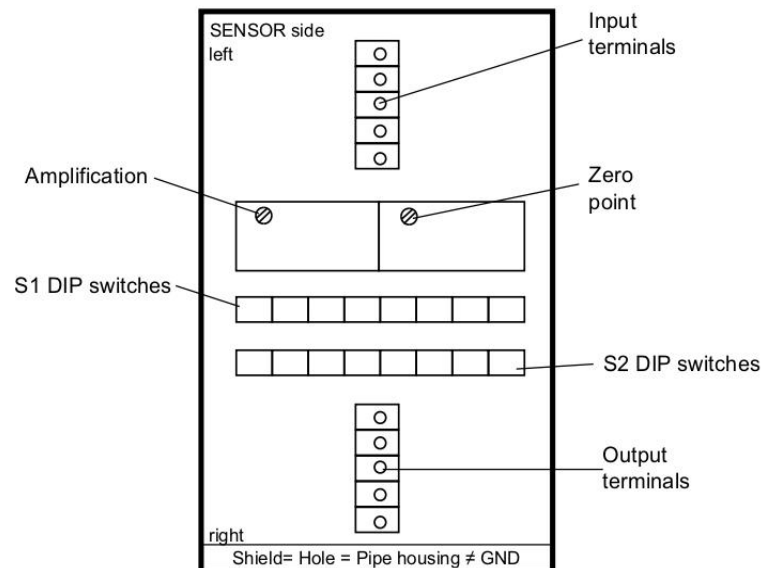
Model 9235/36

Multichannel amplifier

4.2 Operation of 9236

4.2.1 Controls of 9236

The 9236 has one circuit board for each channel. This circuit board contains all the controls that are required for operation of the 9236.



4.2.2 Switching on 9236

Before switching on the 9236, you have to connect all sensors and appliances.

- Connect the device to the excitation voltage.

The device is switched on by applying the excitation voltage.

Warm-up period takes approx. 10 min.

If the excitation voltage is switched off during a running measurement the amplifier would continue the measurement after the energy is switched back on.

4.2.3 Functional test of 9236

Note:

The 9236 does not have an optical or acoustic signal generator.

- Switch on the 9236 without sensors or devices connected to it.
- Check the sensor excitation voltage.

The 9236 is factory set to 2.5 V.

Model 9235/36**Multichannel amplifier****Caution!**

Risk of damage to components.

Before opening or closing the housing, isolate the 9236 from the power supply.

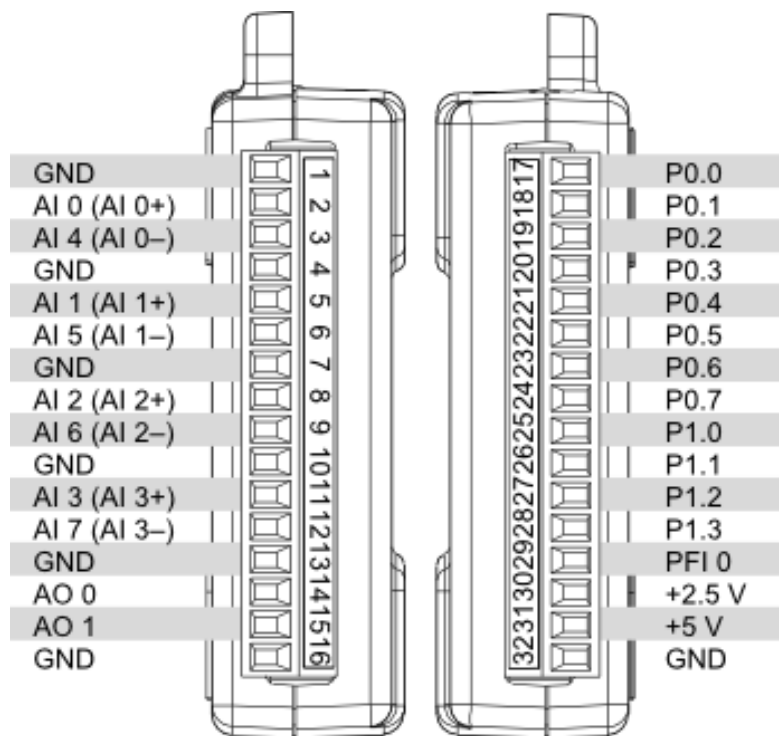
How to set the sensitivity of the 9236:

- Disconnect the 9236 from the power supply.
- Open the housing of the 9236, if applicable.
- Set DIP switches S1-1 to S1-8 and S2-1 to S2-5 to the "OFF" position.
- Look up the appropriate sensitivity in the following table.

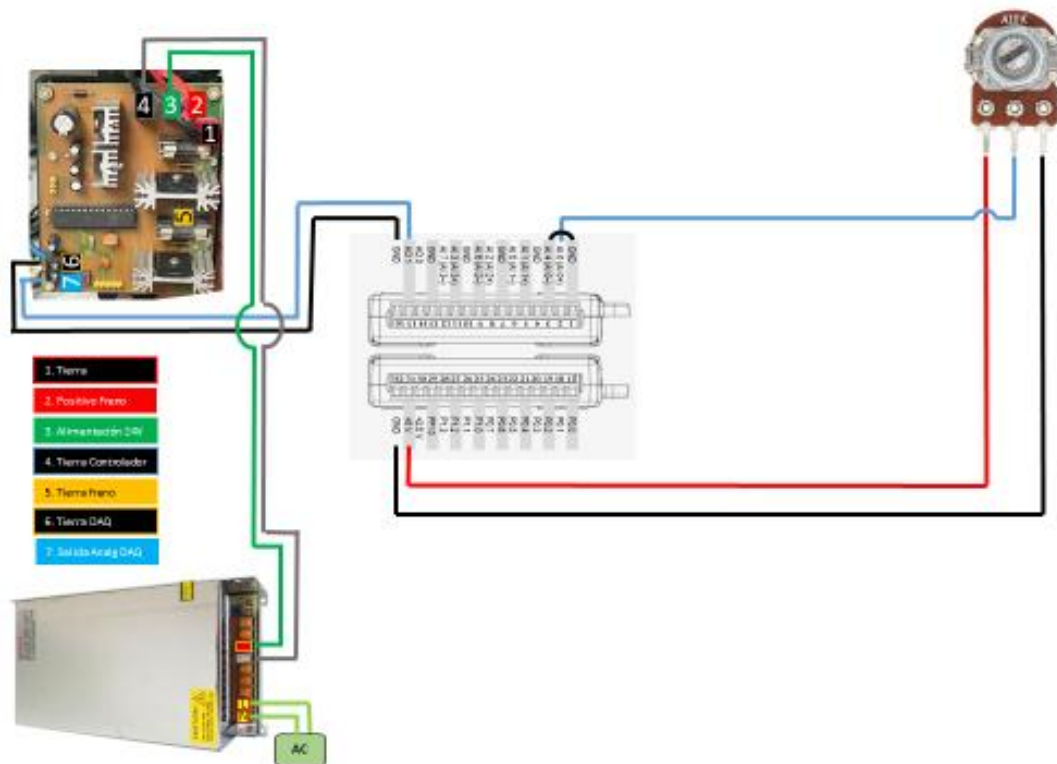
Number	Sensitivity (mV/V)
S1-1	0.5
S1-2	0.75
S1-3	1
S1-4	1.25
S1-5	1.5
S1-6	2
S1-7	2.5
S1-8	3
S2-1	5
S2-2	10
S2-3	15
S2-4	20
S2-5	30

- Set the associated DIP switch to the "ON" position.
After you have set the sensitivity on the 9236, you can now finely adjust it.
- For fine adjustment, connect the 9236 to the power supply.

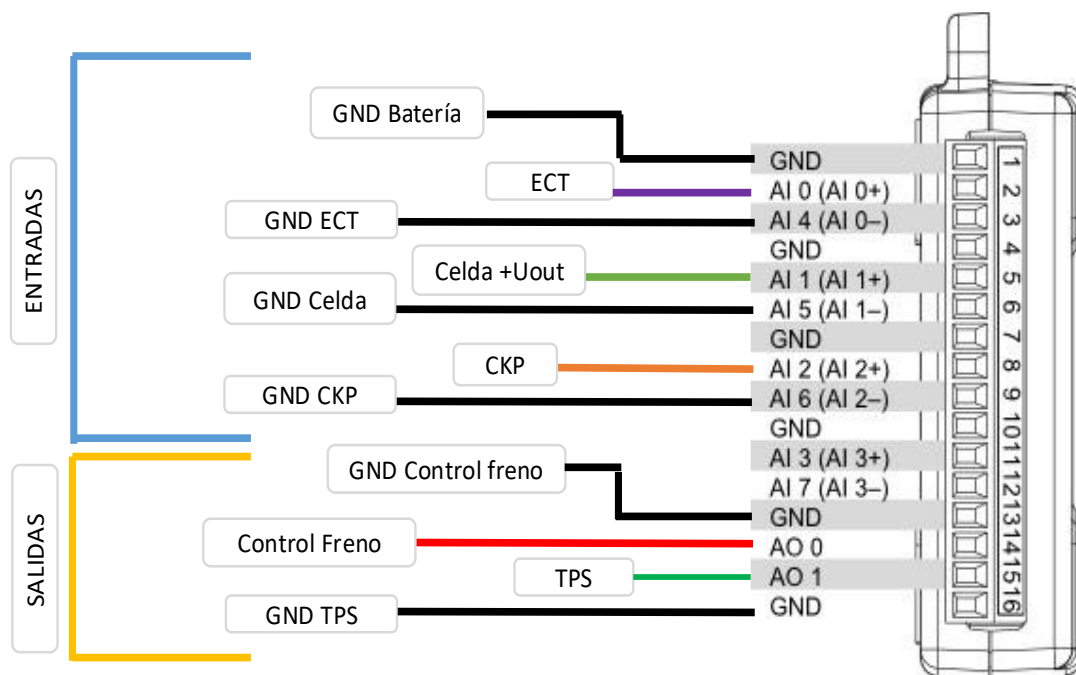
Anexo 4. Pines de la DAQ NI 6009 USB



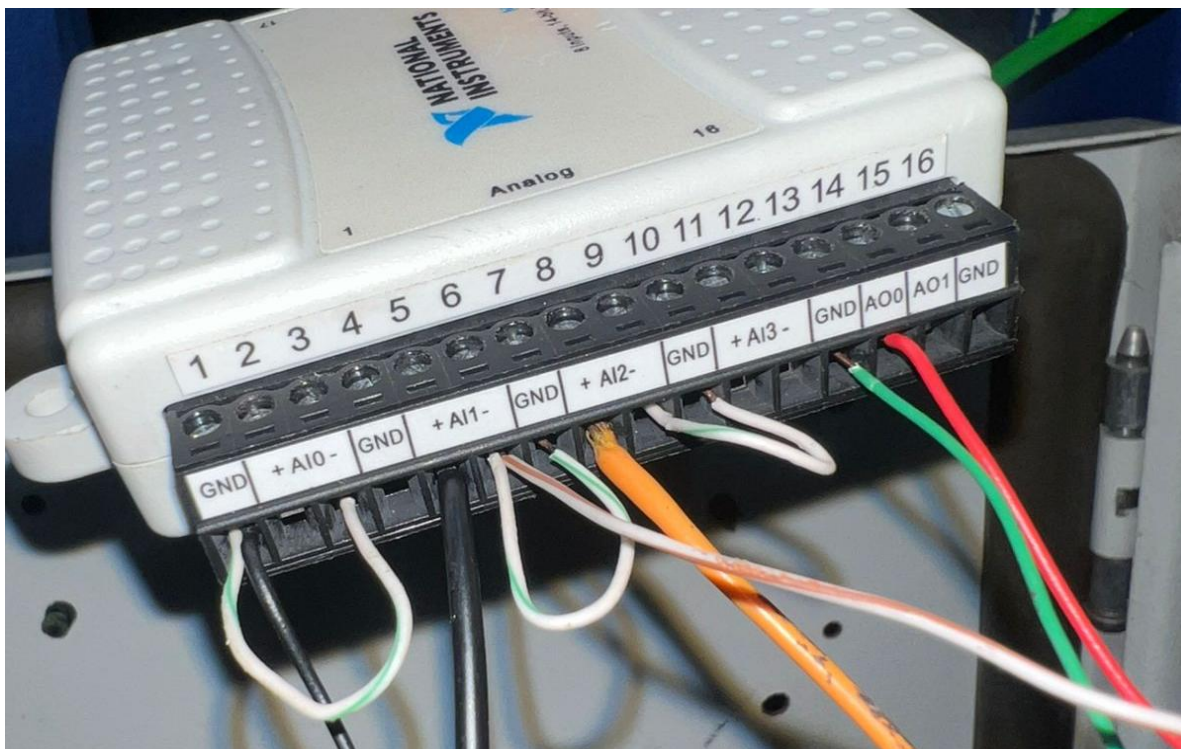
Anexo 5. Esquema de conexión comprobación de control del freno.



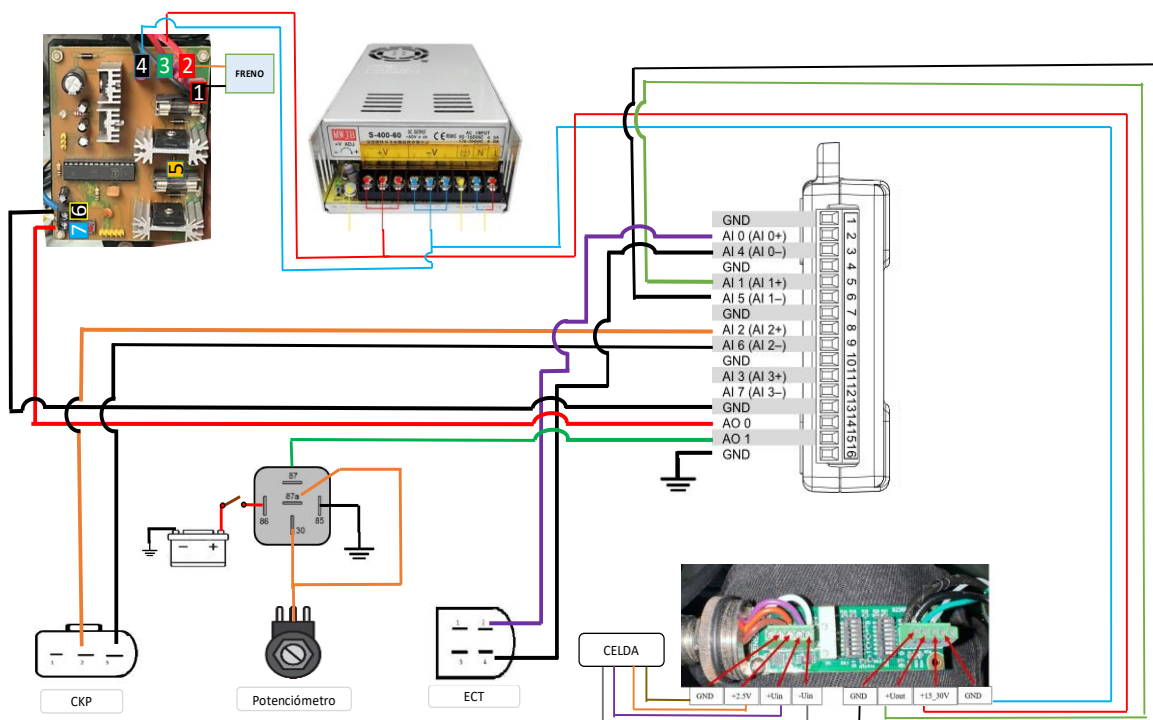
Anexo 6. Esquema de conexión de la DAQ.



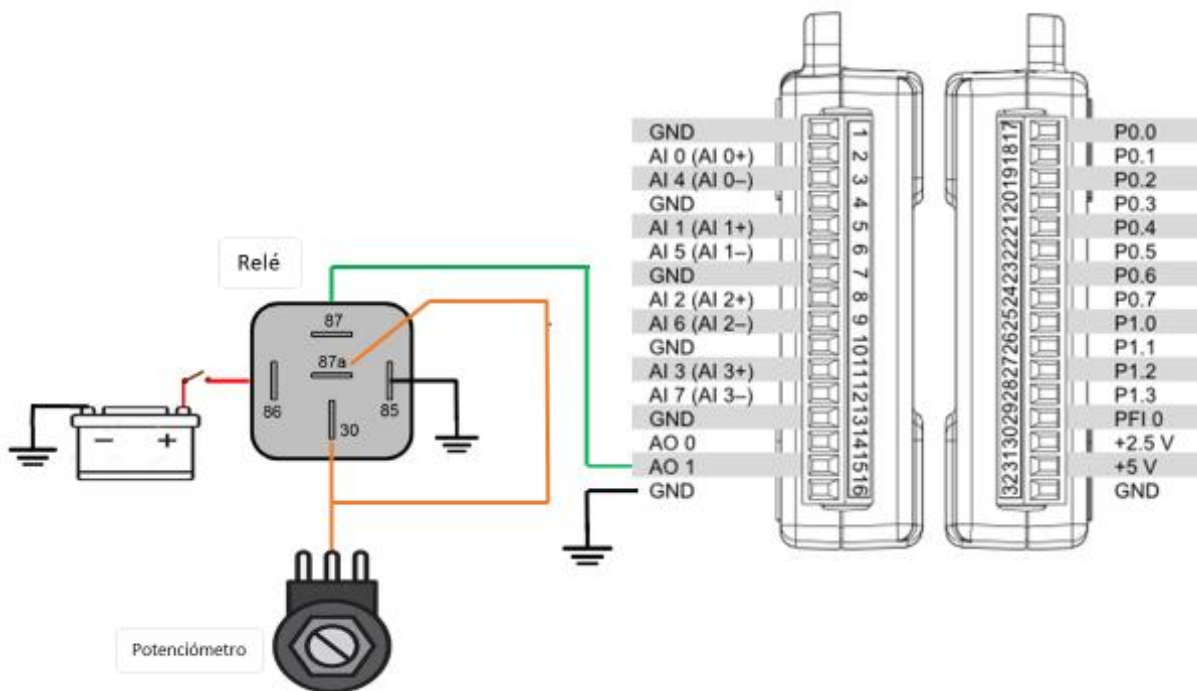
Anexo 7. Esquema de conexión física de la DAQ.



Anexo 8. Esquema de conexión de sensores y actuadores con la DAQ



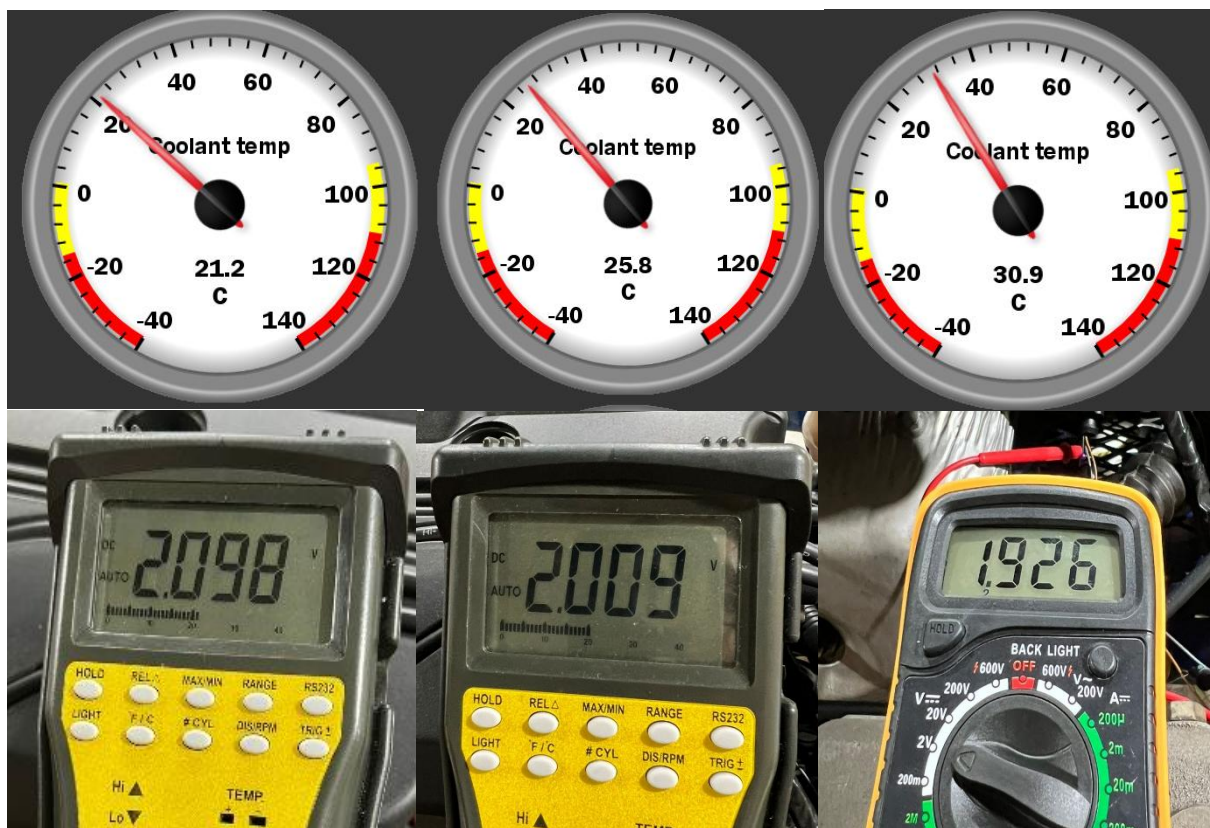
Anexo 9. Esquema de conexión del relé para conmutación del acelerador.

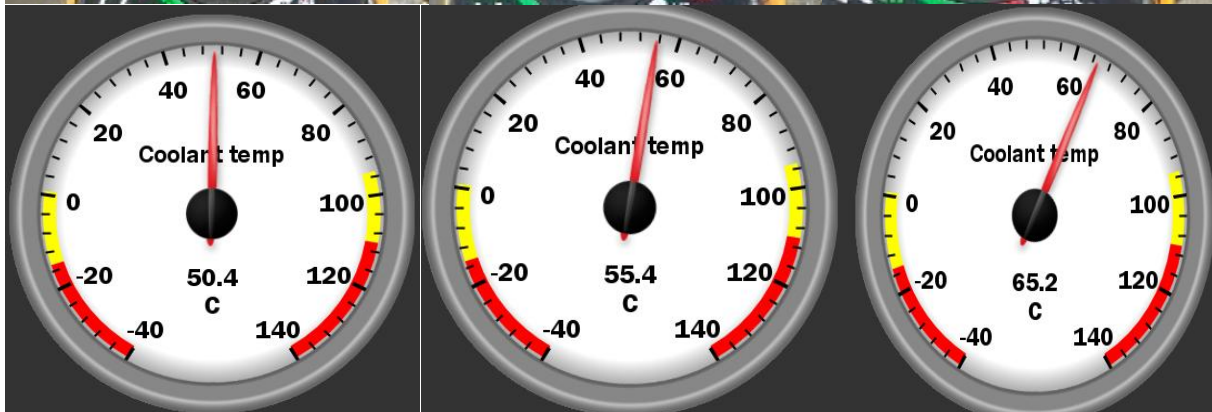
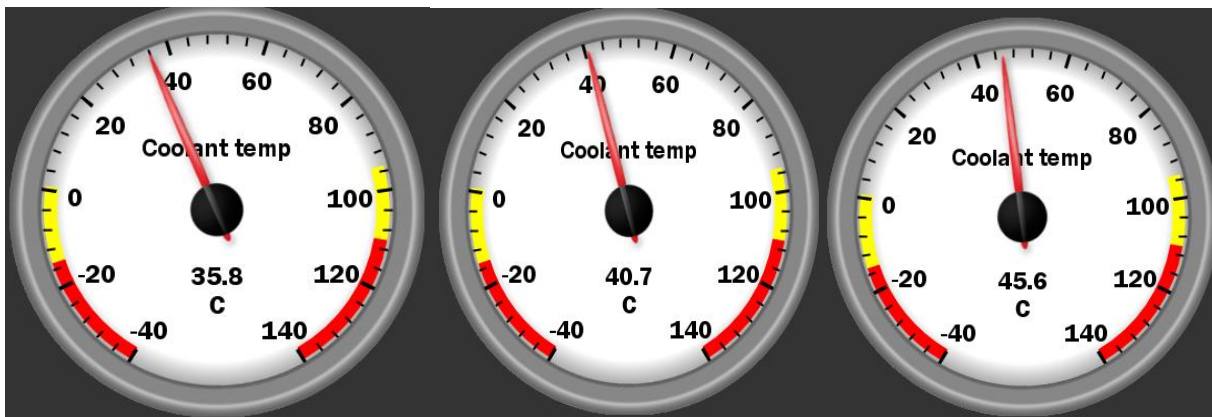


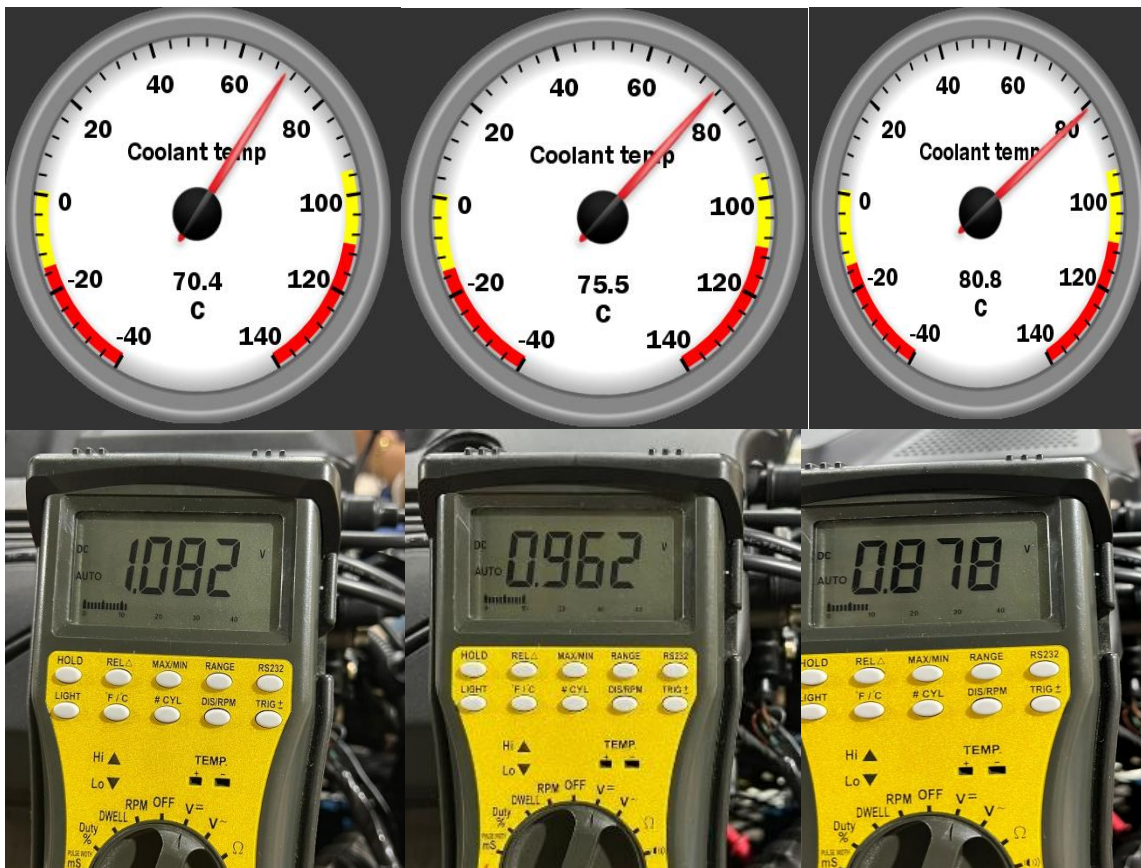
Anexo 10. Caracterización de la celda de carga



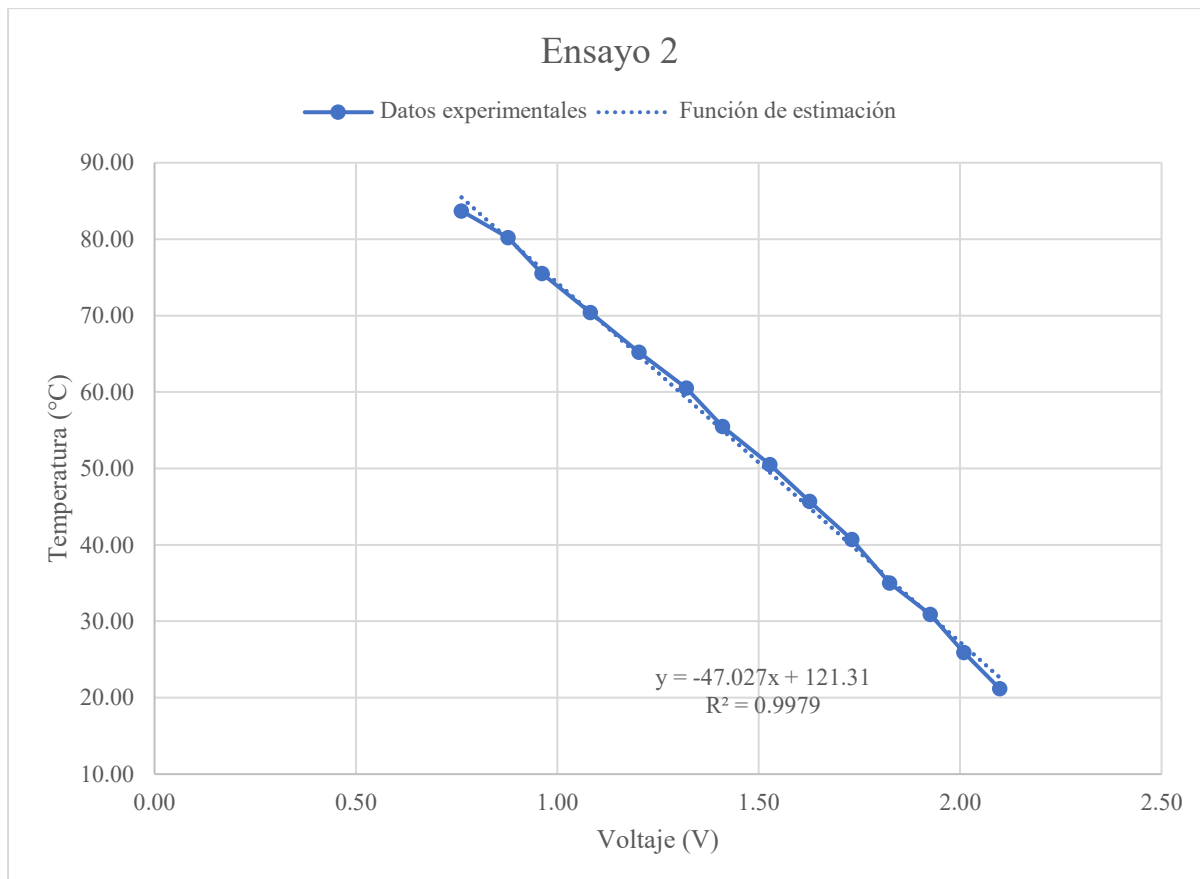
Anexo 11. Caracterización del sensor ECT



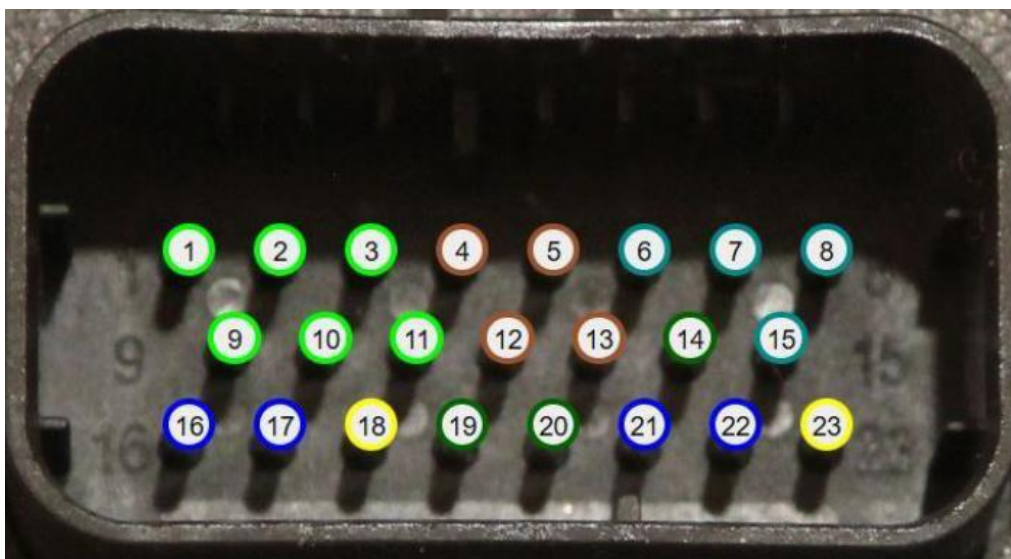




Anexo 12. Grafica de caracterización del sensor ECT ensayo 2.

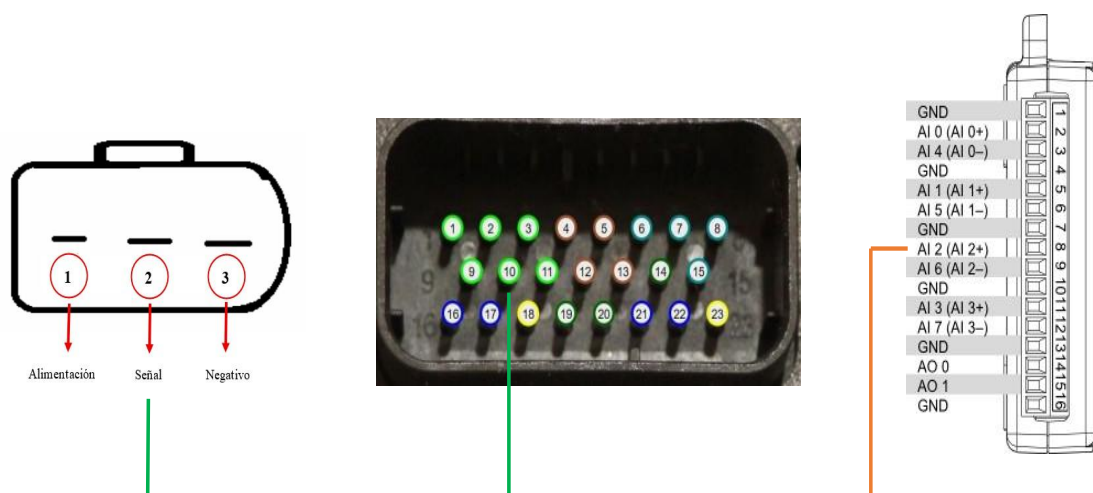


Anexo 13. Socket A de la ECU.

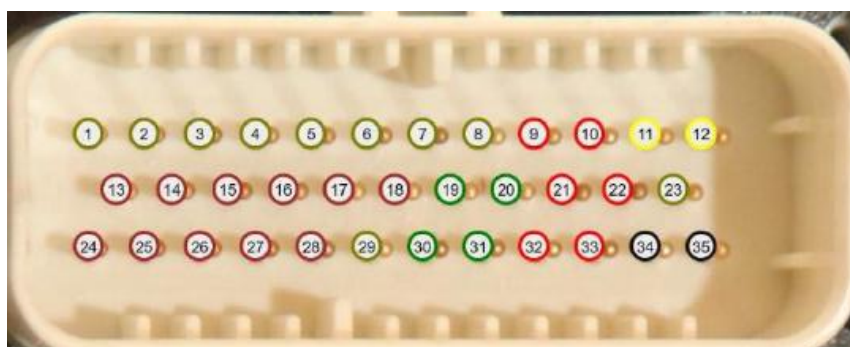


PIN	FUNCIÓN	COLOR
1	Sensor CMP	Verde
7	ETB 1+	Celeste
8	ETB 2-	Celeste
10	Sensor CKP	Verde
18	Fuente de alimentación de la ECU – 12V	Amarillo
19	GND	Verde
20	GND	Verde
23	Alimentación del relé principal – 12V	Amarillo

Anexo 14. Pines del socket A – Pin 10 Sensor CKP

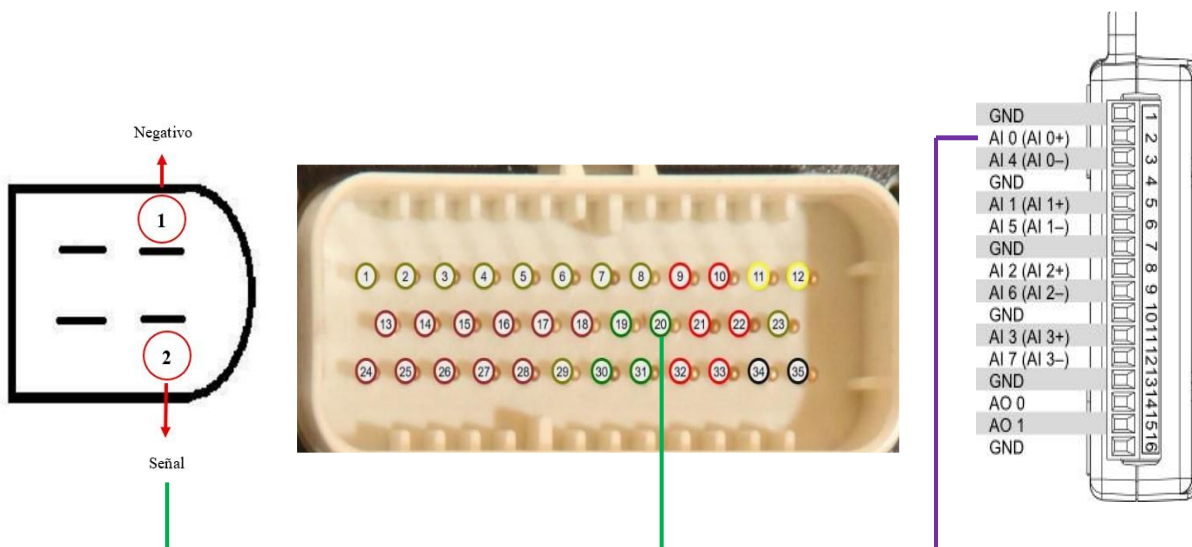


Anexo 15. Socket C de la ECU.

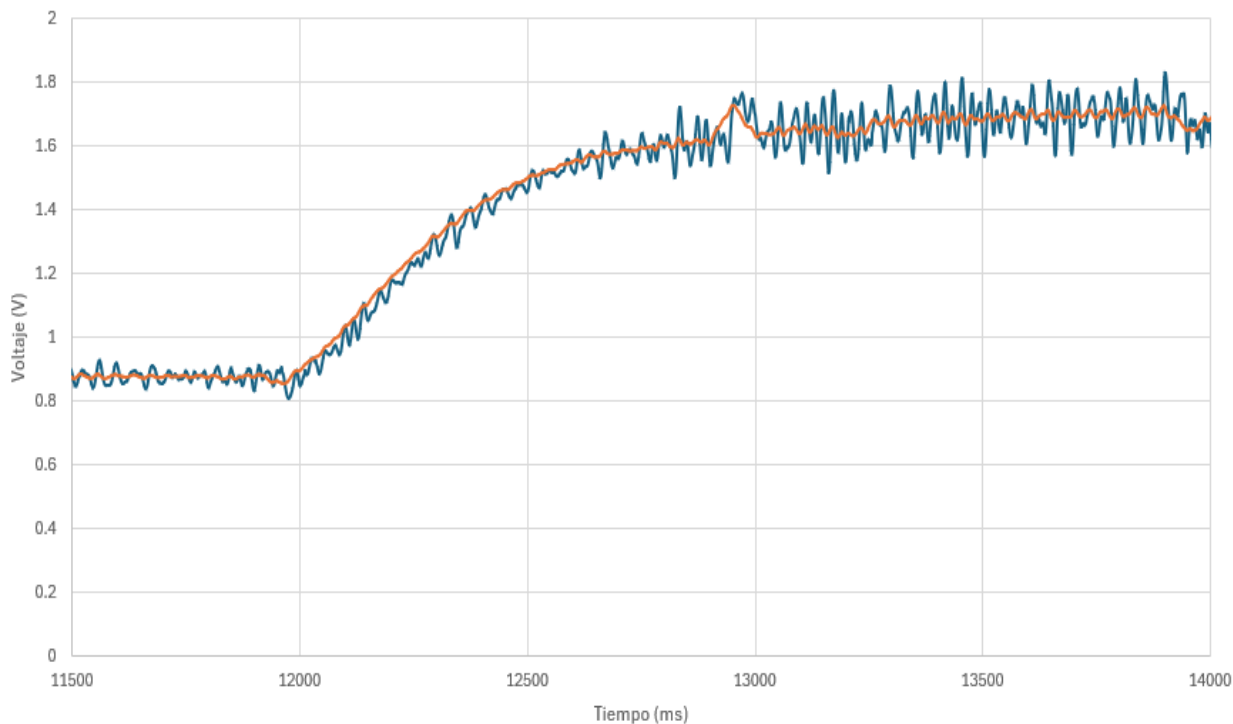


PIN	FUNCIÓN	COLOR
1	GND TPS	Verde
2	GND PPS	Verde
3	GND PPS	Verde
4	GND ECT	Verde
8	GND LAMBDA	Verde
9	Sensor IAT – 5V	Rojo
10	Sensor KS – 5V	Rojo
11	Alimentación 12V	Amarillo
12	Alimentación 12V	Amarillo
13	Sensor MAP	Rojo
14	Sensor TPS	Rojo
16	Entrada de voltaje analógica N° 7 (PPS2)	Rojo
17	Entrada de voltaje analógico N° 9 (PPS)	Rojo
21	Alimentación 5V	Rojo
22	Alimentación 5V	Rojo
23	GND	Verde
24	Sensor TPS	Rojo
29	GND	Verde
30	Sensor IAT	Verde
32	Alimentación 5V	Rojo
33	Alimentación 5V	Rojo
34	Sensor Knock 1	Negro
35	Sensor Knock 1	Negro

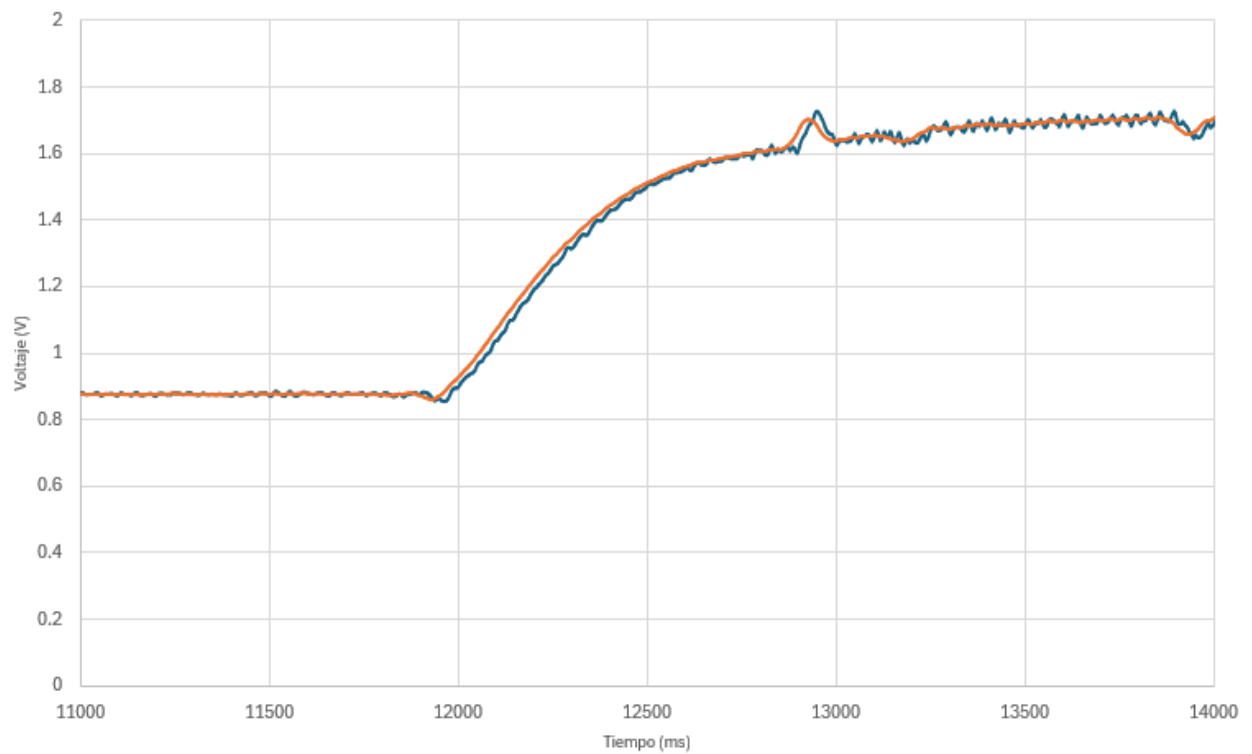
Anexo 16. Pines del socket C – Pin 20 Sensor ECT



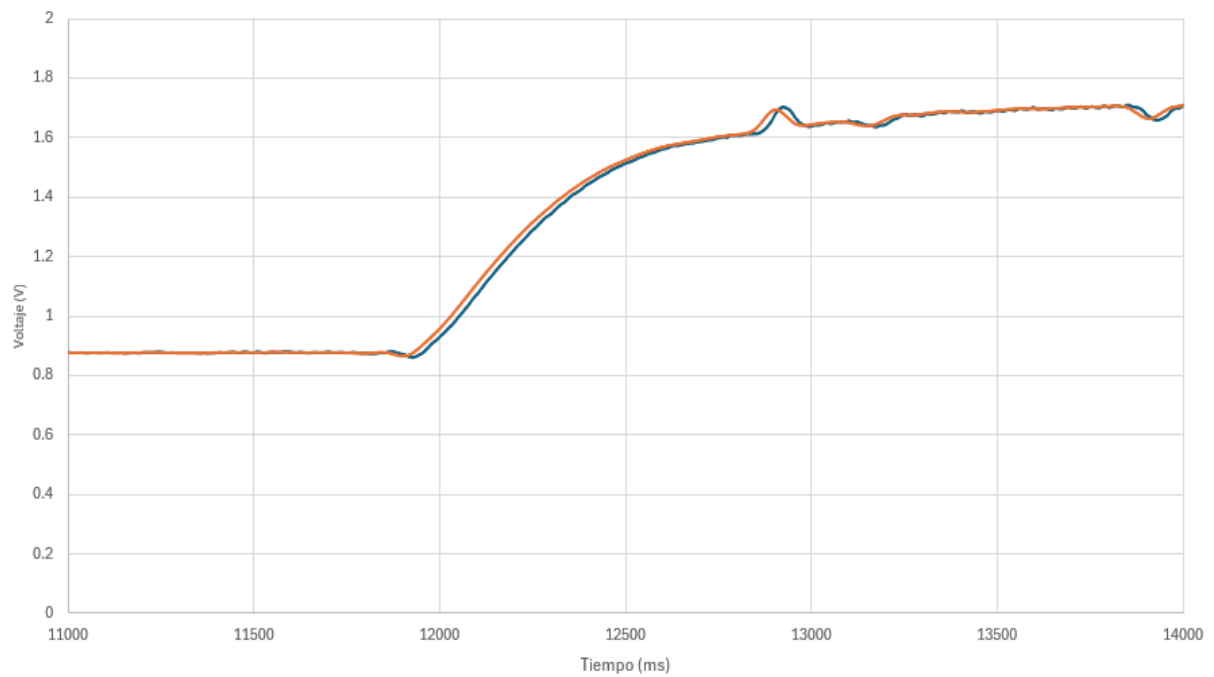
Anexo 17. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con filtro 1 y 2.



Anexo 18. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con filtro 2 y 3.



Anexo 19. Gráfica de voltaje vs tiempo inicial con filtro 3 y 4.



Anexo 20. Guía práctica para el uso del control PID del freno.


		FORMATO DE INFORME GUÍA DE PRÁCTICA	
CARRERA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ	ASIGNATURA:	
Nº DE PRÁCTICA:		TÍTULO PRÁCTICA:	Implementación De Un Sistema De Control Para El Freno Electromagnético Del Banco Dinamométrico Armfield Modelo Cm11, Mediante Técnicas De Control PID Y Simulación En LabVIEW
INTEGRANTES:	Katherine Recalde Loor Iván Rugel Palma		
1. OBJETIVOS.			
1.1. Objetivo General			
<ul style="list-style-type: none"> Implementar un sistema de control para el freno electromagnético del banco dinamométrico Armfield CM11, utilizando técnicas de control PID y herramientas de simulación LabVIEW. 			
1.2. Objetivos específicos			
<ul style="list-style-type: none"> Evaluar el estado actual del freno electromagnético y su sistema de control en el banco dinamométrico Armfield CM11, mediante inspecciones técnicas, para la identificación del estado inicial. Diseñar un sistema de control PID adaptado para el freno electromagnético, mediante modelado matemático y desarrollo de software para la optimización de la respuesta del sistema frente a variaciones de carga y velocidad. Integrar el sistema de control PID con el software LabVIEW, para una supervisión en tiempo real, facilitando el control del sistema. Validar el sistema diseñado mediante el análisis de los datos de salida del sistema de control respecto a los valores estándar previamente establecidos. 			
INSTRUCCIONES:	2. SUSTENTO TEORICO		
	<p>Los bancos dinamométricos son dispositivos utilizados para medir el rendimiento de motores y sistemas de transmisión, proporcionan datos precisos sobre emisiones, consumo específico de combustible, potencia y torque generados. [1] En el caso del banco dinamométrico Armfield CM11, presentado en la Figura 1, se trata de un modelo didáctico ampliamente utilizado en el ámbito académico y de investigación para la evaluación de motores de combustión interna y sistemas de control de frenado, ya que utiliza la corriente de Foucault capaz de dar una carga variable al motor permitiendo la generación de las curvas de potencia y torque. [2]</p>		
			
	<p>Figura 104. Banco dinamométrico Armfield CM11. [1]</p>		
	2.1. Motor Volkswagen		
	<p>Este motor de combustión interna incorpora un ciclo termodinámico Otto, el cual se complementa con un sistema de inyección electrónica de combustible, además, este sistema tiene la capacidad de modificar de manera dinámica los mapas de inyección de combustible y los tiempos de encendido, adaptándose así a una amplia gama de condiciones de carga y velocidades de funcionamiento. [3]</p>		

Tabla 1. *Propiedades del motor Volkswagen Polo.* [1][3]

Parámetro	Especificación
Tipo de motor	Gasolina, 4 cilindros en línea
Desplazamiento	1.6 litros
Sistema de encendido	Electrónico
Sistema de inyección	Electrónica programable
Ciclo de operación	Otto, 4 tiempos
Potencia estimada	~100 hp @ 5600 rpm
Torque estimado	~145 Nm @ 3800 rpm

2.2. Freno electromagnético:

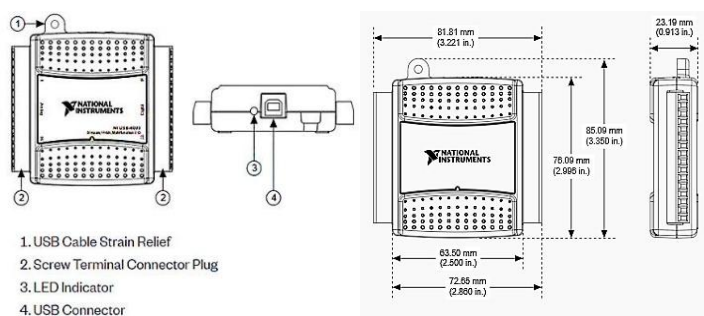
Un freno electromagnético está compuesto por un disco móvil, acoplado al eje del motor, su funcionamiento se basa en la inducción de corrientes parásitas en un disco conductor, lo que genera una fuerza de frenado proporcional a la corriente aplicada, es decir, se deslizan dos elementos rígidos que generan un par resistente, cuya magnitud es medida mediante una celda de carga. [4]

Tabla 2. *Características del freno electromagnético del banco Armfield CM11.* [5]

Parámetro	Especificación
Fabricante/Modelo	Klam/K40
Potencia Máxima	55 KW
Torque máximo	145 Nm
Voltaje	220 – 240 Voltios
Frecuencia	50 – 60 Hz
Tipo de freno	Electromagnético de corriente de Foucault
Modo de operación	Sin contacto, mediante inducción magnética
Tipo de control	Controlado electrónicamente mediante LabVIEW desde un ordenador
Velocidad máxima	6000 rpm

2.3. Sistema de adquisición de datos:

La recopilación de datos en ensayos realizados con bancos dinamométricos es fundamental para obtener información sobre el rendimiento de un motor bajo diferentes condiciones de operación. Estos datos permiten analizar variables como torque, potencia y velocidad, facilitando la evaluación de su eficiencia y comportamiento. Este sistema integra una tarjeta DAQ NI USB-6009, que se utiliza para la digitalización de señales analógicas provenientes de los sensores, posee 8 entradas analógicas y 2 salidas analógicas con un rango de voltaje de salida de 0 a 5 V. [6]

**Figura 2.** DAQ NI USB 6009. [6]

El control PID, abreviatura para Proporcional-Integral-Derivativo, es una forma de regulación usada en sistemas de control automático. Con respecto al freno electromagnético, el PID permite regular la corriente que se aplica al freno para mantener constante la carga sobre el motor que se está probando [8]. LabVIEW es una plataforma de programación gráfica ampliamente utilizada en la implementación de sistemas de control, fallas de un motor y adquisición de datos en entornos

industriales y de investigación. [9]

3. RECURSOS:

3.1. Herramientas y equipos:

- Motor Armfield CM11
- Multímetro
- Osciloscopio
- Computadora/laptop
- Cautín

3.2. Materiales e insumos:

- Cableado
- Cinta aislante
- Estaño
- Pasta para soldar
- Termo fundente
- Fuente de alimentación 24V

3.3. Material Didáctico.







- Ficha técnica freno electromagnético
- Ficha técnica celda de carga

4. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

4.1. Identificar las partes del banco dinamométrico CM11

Identifique y complete las casillas con el elemento y figura de los componentes más importantes del banco dinamométrico.

Tabla 4. Identificación de los componentes del banco dinamométrico CM11.

Elemento	Figura	Elemento	Figura
Motor Volkswagen		Gabinete	
Freno electromagnético		Panel de control	
Celda de Carga		Cuerpo de aceleración TPS	

4.2. Guía de Uso de la Interfaz de LabVIEW para Control PID del Freno Electromagnético

Se describe el modo de operación del software LabVIEW para el sistema de control PID del freno electromagnético para el Banco dinamométrico Armfield CM11.

4.2.1. Procedimiento de alimentación y conexión de banco dinamométrico.

- a) Trasladar el banco a una zona externa o abierta (patio del laboratorio de motores) con buena ventilación, asegurando que el área esté despejada y exista puntos de conexión cerca.



Figura 3. Ubicación del banco dinamométrico en el patio posterior.

- b) Utilizar una batería en buen estado y cargada. Identifica los terminales de alimentación DC (rojo = positivo, negro = negativo)



Figura 4. Identificación de terminales de la batería.

- c) Localizar el cable correspondiente a la alimentación AC del gabinete del banco dinamométrico, el cual, se debe conectar a uno de los tomacorrientes de 110V ubicados a los costados del patio posterior.



Figura 5. Cable de conexión AC 110V.

- d) Una vez confirmado que lo antes mencionado esté conectado de forma correcta, procederemos a la puesta en marcha y operación del banco dinamométrico.
- e) En el panel del banco, levantar el seguro del switch y cambiar a posición ON.



Figura 6. Panel y Switch.

- f) Se presiona el botón de arranque que se encuentra también en el panel. Una vez accionado el botón de encendido, el motor procederá a entrar en estado de funcionamiento.
- g) Se debe confirmar que no exista vibraciones so ruidos extraños que puedan indicar fallas en el sistema.

4.2.2. Procedimiento operacional del programa.

- a) Se identifica el cable USB que conecta la tarjeta DAQ a la computadora, este cable se localiza visualmente en el interior del gabinete y debe ser manipulado con cuidado, se puede acceder al cable por medio de una abertura de acceso.



Figura 7. Conexión USB de la DAQ hacia la computadora.

- b) La computadora se coloca en una posición cercana al gabinete para evitar tensiones en el cable y facilitar el acceso al panel de control físico del banco. Se recomienda que la pantalla esté orientada de manera que el operador pueda supervisar tanto el software como el equipo durante la prueba.



Figura 8. Ubicación de la computadora con el banco dinamométrico.

- c) Con todo conectado, se abre el programa LabVIEW, desde la interfaz principal, se busca y selecciona el archivo correspondiente al sistema de control del freno electromagnético, previamente desarrollado para este banco.

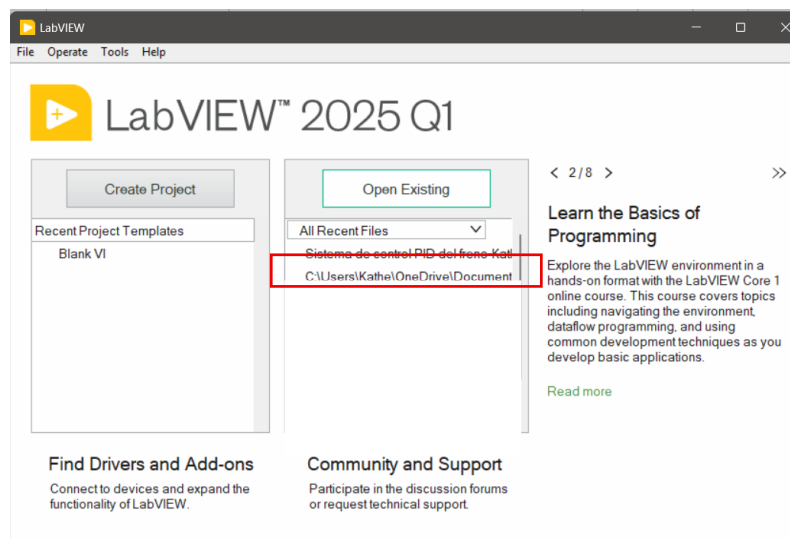


Figura 9. Ventana principal de LabVIEW.

- d) Al abrir el archivo, se presenta el panel frontal del sistema la cual está dividido en 3 secciones. El primero muestra indicadores como las RPM del motor, temperatura del motor (sensor ECT) y el torque medido por la celda de carga. La segunda muestra el control PID del freno donde se ingresará el valor deseado de carga del freno y la última sección que muestra la vista principal del motor con sus indicadores y en una segunda pestaña los gráficos.

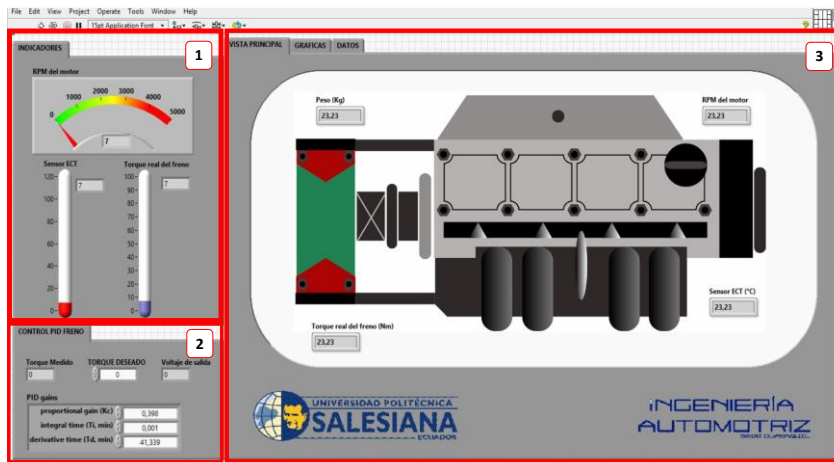


Figura 10. Clasificación del panel principal.

- e) Para iniciar el control, el operador presiona el botón Run en LabVIEW. Desde este momento, el software comienza a recibir datos en tiempo real desde los sensores y a ejecutar las acciones de control sobre el freno electromagnético.

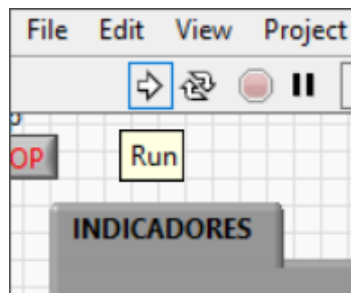


Figura 11. Inicio de la simulación con el botón Run.

- f) En la sección del panel frontal identificada como Control PID freno, el operador puede visualizar el torque real medido y de acuerdo con esto, introducir el valor de torque deseado. Este valor será la referencia que el sistema intentará mantener, ajustando la señal de control al freno en función de los parámetros PID configurados, también se puede visualizar el voltaje de salida de DAQ hacia el control. Es importante aclarar que se debe trabajar a 2500RPM e ir aumentando de 5 a 10 Nm.

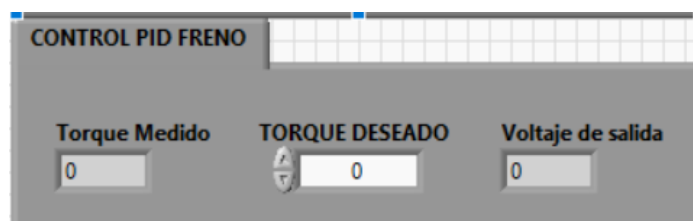


Figura 12. Ajuste de parámetros del PID.

- g) Mientras el programa se ejecuta, el operador monitorea en tiempo real las RPM, la temperatura y el torque, asegurándose de que las condiciones se mantengan dentro de los límites establecidos para la prueba.
- h) Se procede a la toma de datos mediante el registro de las revoluciones por minuto, torque y potencia generados por el motor bajo diferentes condiciones de carga. Estos parámetros serán capturados a través del sistema de adquisición de datos del banco dinamométrico, asegurando que se mantengan las condiciones controladas y constantes durante cada medición con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Posteriormente, la información registrada será exportada a un archivo de Excel, donde se organizará y procesará para su posterior análisis.

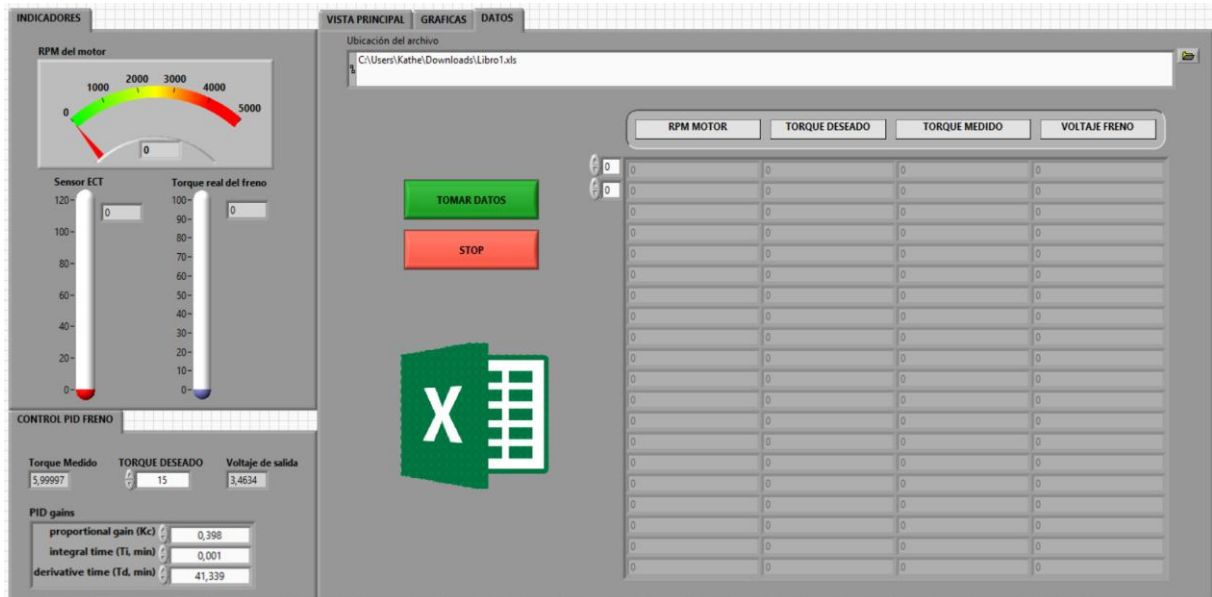


Figura 13. Datos para ensayos.

4.2.3. Aplicación de carga progresiva para ensayos

- Arrancar motor y mantener 1500–2000 rpm por 2–3 min para calentamiento inicial.
 - Llevar a 2500 rpm sin carga y/o freno desactivado.
 - Iniciar registro y tomar 10 – 15 s de línea base.
 - Usar escalones de torque crecientes en pasos de 5Nm hasta donde lo permita el conjunto a 2500 rpm.
 - Tiempo mínimo por escalón: mantener hasta estabilizar de 5 a 15 s de observación.
 - Descanso entre escalones: 10 a 20 s a torque del escalón (no a cero), y registrar datos en la tabla X. apuntando las Rpm, torque medido, torque deseado, Voltaje de salida, tiempo de estabilización del torque medido en relación al deseado. Todos estos datos están representados en los indicadores del “Control PID Freno”.
 - Volver gradualmente a baja carga y luego a sin carga.
 - Desactivar freno, bajar a ralentí y apagar motor, hasta recibir nueva instrucción.
- Nota: si a cierto escalón el motor no sostiene 2500 rpm dentro de ± 350 rpm, no continúes aumentando carga; registra como límite operativo.**
- También se puede realizar otros ensayos como:
 - Repetir la barrida 3 veces con los mismos PID para estadística (promedio y desviación).
 - Barrida decreciente (histéresis térmica y del freno).

5. RESULTADO (S) OBTENIDOS (S):

En la Tabla 5 se deberá registrar de manera ordenada toda la información obtenida durante la simulación del control del freno. Este registro incluirá los valores medidos o calculados en cada etapa de la prueba, permitiendo llevar un seguimiento preciso del comportamiento del sistema. El llenado de la tabla se realizará conforme se vayan obteniendo los resultados, garantizando así que la información quede documentada y lista para su posterior análisis.

Tabla 5. Registro de datos de ensayo.

RPM	Torque deseado	Torque medido	Voltaje Salida
2500	10	10	
	15		
	20		
	25		
	30		

6. CONCLUSIONES:

El software de control implementado para el freno electromagnético permite una regulación precisa y estable del torque aplicado, lo cual es fundamental para asegurar que las pruebas en el banco dinamométrico sean reproducibles y confiables. Esta capacidad contribuye a obtener datos exactos que son esenciales para el análisis del comportamiento del motor bajo diferentes cargas.

La interfaz gráfica y las funcionalidades del software facilitan la interacción del usuario con el sistema, permitiendo monitorear en tiempo real variables críticas como torque, velocidad y corriente. Esta accesibilidad mejora la experiencia del usuario y minimiza la probabilidad de errores durante la ejecución de ensayos, optimizando así el proceso experimental. La integración efectiva entre el software y el hardware del freno electromagnético automatiza el control de frenado, lo que reduce la intervención manual y disminuye el riesgo de inconsistencias en las pruebas. Esta automatización contribuye a una mayor eficiencia operativa y asegura la repetitividad necesaria para análisis comparativos y validación de modelos.

7. RECOMENDACIONES:

Se recomienda implementar un plan integral de mantenimiento preventivo y actualización continua del sistema, que abarque tanto el hardware como el software del freno electromagnético. Esto permitirá garantizar la precisión y confiabilidad del equipo a lo largo del tiempo, además de incorporar mejoras tecnológicas que amplíen las funcionalidades y mantengan la compatibilidad con nuevas metodologías y requerimientos de ensayo.

8. REFERENCIAS:

[1] Armfield, Internal Combustion Engines CM11, 2020.

[2] S. Arango Salazar y J. Idárraga Vargas, «Freno Electromagnético: Prototipo para Experimentación,» 2013. [En línea]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1131/Informe%20final_Prototipo%20Freno%20electromagnetico%20o%20de%20EDDY_.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[3] L. A. Aguirre Bajaña y M. W. Rivera Alvarado, «Repotenciación Avanzada del Sistema de Inyección Electrónica del Motor de Encendido Provocado en el Dinamómetro Armfield CM11 mediante Reprogramación de Módulos de Control Electrónico,» 2025. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29974/1/UPS-GT006126.pdf>.

[4] A. Bragadeshwaran, K. Chidambaram, K. Chellapan, S. Pemmaredy, V. Rajasekar, D. Sathiascelan, E. Mohamed y N. Tharun , «Model Based Integrated Control Strategy for Effective Brake Energy Recovery to Extend Battery Longevity in Electric Two Wheelers,» 2024. [En línea].

[5] A. Doroudi, A. Namnabat y H. Nazifi, A Comparative Study of Foucault Brake System to Consider the Effect of Disc Shape and Material for Increasing Eddy Current Loss and Braking Torque, Iran: International Conference on Electrical Machines and Drives (ICEMD), 2023.

[6] National Instrument, «Especificaciones de la DAQ USB 6009,» Emerson, 2025.

[7] OMEGA, Force Transducer LCEC Series, 2020.

[8] National Instrument, Funciones Avanzadas en el Ajuste PID, 2025.

[9] T. Koc, D. Karayel, B. Boru, V. Ayhan, I. Cesur y A. Parlak, Design and Implementation of the Control System of an Internal Combustion Engine Test Unit, Istanbul: Hindawi Publishing Corporation, 2014.

[10] Wikipedia, «Controlador PID,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID.

Realizado por:**Revisado Por:****Aprobado por:**