



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TEMA:

“DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADO EN ENCODERS ROTATORIOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero Automotriz

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible

AUTOR:

Vismar Gustavo Ramírez Burgos

DIRECTOR:

Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez PhD.

Ibarra – Ecuador 2026



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA
AUTORIZACIÓN DEL USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Ramírez Burgos Vismar Gustavo

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Diseño de un sistema de adquisición de datos basado en encoders rotatorios para la optimización de la combustión en motores de combustión interna.
AUTOR (ES):	Ramírez Burgos Vismar Gustavo
FECHA: AAAAMMDD	2026/05/19
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	GRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR / ASESOR:	Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD. Ing. Erik Paul Hernández Rueda MSc.



CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días, del mes de Mayo de 2026

EL AUTOR:

Ramírez Burgos Vismar Gustavo



CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 19 de Mayo de 2026

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.

NOMBRE DEL DIRECTOR

C.C.: 0401447826



APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diseño de un sistema de adquisición de datos basado en encoders rotatorios para la optimización de la combustión en motores de combustión interna” elaborado por Ramírez Burgos Vismar Gustavo, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.

NOMBRE DEL DIRECTOR

C.C.: 0401447826

Ing. Erik Paul Hernández Rueda MSc.

NOMBRE DEL ASESOR

C.C.: 1002978060



DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud, dedico este trabajo en primer lugar a mi madre, Carmita del Rosario Burgos Revelo, y a mi hija, Aylani Victoria Ramírez Veintimilla, quienes, aunque ya no se encuentran físicamente conmigo, siguen siendo la luz que guía cada uno de mis pasos. Su recuerdo vive en mi corazón y ha sido la fuerza que me ha impulsado a no rendirme, incluso en los momentos más difíciles.

A mi padre, Celso Adrián Ramírez Ortega, por su apoyo incondicional, su ejemplo de esfuerzo y por ser un pilar fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme el valor de la perseverancia y el trabajo honesto.

A mis hermanas, Paola y Lesly, a mis sobrinas, Lizeth y Adelyne, por su cariño, comprensión y por brindarme siempre palabras de aliento que me motivaron a seguir adelante en este camino.

Finalmente, a mi novia, Silvia Veintimilla, por su amor, paciencia y acompañamiento constante, por creer en mí incluso cuando las circunstancias parecían adversas, y por ser parte fundamental en la culminación de esta etapa tan importante de mi vida.



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por concederme la fortaleza, la sabiduría y la constancia necesarias para culminar satisfactoriamente esta etapa académica y personal. Expreso un reconocimiento especial a mi madre y a mi hija, cuya memoria constituye una fuente permanente de inspiración y motivación para alcanzar cada objetivo propuesto.

Manifiesto mi profundo agradecimiento a mi padre, por su apoyo incondicional, sus enseñanzas y por ser un referente de esfuerzo y perseverancia. De igual manera, a mis hermanas y sobrinas, por su respaldo, confianza y acompañamiento constante a lo largo de este proceso formativo. Extiendo también mi gratitud a mi novia, por su comprensión, paciencia y apoyo permanente, elementos fundamentales para la culminación de este trabajo.

De manera particular, expreso mi reconocimiento al director de tesis, Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD, y al asesor de tesis, Ing. Hernández Rueda Erik Paul MsC, por su orientación académica, acompañamiento permanente y valiosos aportes científicos durante el desarrollo de la presente investigación, cuya guía fue esencial para el cumplimiento de los objetivos establecidos.



RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se desarrolló con el objetivo de implementar un sistema de adquisición y procesamiento de señales vibratorias para la identificación de eventos de combustión en un banco experimental Mazda BT-50 diésel 2.5 L, mediante el uso de técnicas de análisis espectral y aprendizaje automático. La metodología consistió en la integración de un encoder rotativo de 14 bits, un acelerómetro MMA7361, una tarjeta sBRIO-9636 y el entorno de programación LabVIEW para la adquisición de señales angulares y vibratorias en tiempo real. Posteriormente, las señales fueron procesadas en MATLAB utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el promedio sincrónico temporal (TSA), permitiendo transformar las señales al dominio de la frecuencia y del ángulo para identificar patrones asociados al ciclo de combustión. Los resultados obtenidos permitieron identificar eventos característicos del motor, como preinyección, inyección principal, apertura y cierre de válvulas, presentando diferencias mínimas respecto a los datos teóricos del fabricante. Además, el análisis espectral permitió identificar armónicos representativos con valores promedio cercanos a $X1=4.6$, $X2=20.7$ y $X3=41.1$. A partir de estos parámetros se desarrolló un modelo de árbol de decisión, alcanzando una precisión de validación del 83.2% y un área bajo la curva ROC cercana a 0.92, evidenciando una alta capacidad de clasificación y discriminación entre estados del banco experimental. Finalmente, se concluye que la metodología implementada constituye una herramienta confiable para el análisis vibracional y diagnóstico de motores de combustión interna.

Palabras Clave: análisis vibracional, aprendizaje automático, Encoder, LabVIEW, banco experimental.



ABSTRACT

This research was conducted to implement a vibrational signal acquisition and processing system for identifying combustion events on a Mazda BT-50 2.5L diesel test bench, using spectral analysis and machine learning techniques. The methodology involved integrating a 14-bit rotary encoder, an MMA7361 accelerometer, an sbRIO-9636 board, and the LabVIEW programming environment for real-time acquisition of angular and vibrational signals. Subsequently, the signals were processed in MATLAB using the Fast Fourier Transform (FFT) and Time-Synchronous Average (TSA), allowing the signals to be transformed into the frequency and angle domains to identify patterns associated with the combustion cycle. The results obtained allowed for the identification of characteristic engine events, such as pre-injection, main injection, and valve opening and closing, showing minimal differences compared to the manufacturer's theoretical data. Furthermore, spectral analysis identified representative harmonics with average values close to $X1=4.6$, $X2=20.7$, and $X3=41.1$. Based on these parameters, a decision tree model was developed, achieving a validation accuracy of 83.2% and an area under the ROC curve close to 0.92, demonstrating a high capacity for classification and discrimination between states of the experimental bench. Finally, it is concluded that the implemented methodology constitutes a reliable tool for the vibrational analysis and diagnosis of internal combustion engines.

Keywords: vibrational analysis, machine learning, encoder, LabVIEW, experimental bench.



LISTA DE SIGLAS

- MCI.** Motores de Combustión Interna.
- SBC.** Single Board Computer
- FPGA.** Field-Programmable Gate Array
- ODS.** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- DAQ.** Adquisición de Datos.
- ECU.** Unidad de Control Electrónico.
- CCM.** Módulo de Control Central.
- ADC.** Convertidor Analógico-Digital.
- LabVIEW.** Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.
- MATLAB.** MATrix LABoratory.
- FFT.** Transformada Rápida de Fourier.
- CAD.** Dibujo Asistido por Computadora.
- PCB.** Printed Circuit Board.
- NI MAX.** NI Measurement & Automation Explorer.
- MSB.** Bit Mas Significativo.
- LSB.** Bit Menos Significativo.
- PMS.** Punto Muerto Superior.
- SVM.** Máquinas de Soporte Vectorial
- KNN.** Redes Neuronales
- BE.** Buen Estado



ME. Mal Estado

PPV. Valor Predictivo Positivo.

FDR. Tasa de Descubrimiento Falso.

ROC. Receiver Operating Characteristic

AUC: Área Bajo la Curva



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	21
1. INTRODUCCIÓN.....	21
1.1 Problemas de Investigación	21
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Objetivo General	21
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 Alcance	22
1.4 Justificación	22
CAPÍTULO II	26
2. MARCO TEÓRICO	26
2.1 Antecedentes	26
2.2 Motores de Combustión Interna.....	26
2.3 Componentes Electrónicos del Motor	28
2.3.1 Unidad de Control Electrónica (ECU)	28
2.3.2 Sistema de Inyección de Combustible de Alta Precisión	29
2.3.2.1 Inyectores Electrónicos	29
2.4 Principio de Funcionamiento	30
2.4.1 Ciclos Termodinámicos.....	30
2.4.2 Ciclo Termodinámico Real Diésel	31
2.4.3 Combustión en Motores Diésel.....	32



2.4.4	Optimización del Combustible.....	34
2.4.5	Importancia de la Sincronización en el Desempeño del Motor.	34
2.4.6	Vibraciones en el Motor Diésel.....	34
2.4.7	Vibración Mecánica	34
2.4.7.1	Propiedades de las Vibraciones Mecánicas.	35
2.4.7.2	Representación Gráfica de las Vibraciones	35
2.4.7.3	Tipos de Vibraciones Mecánicas.	36
2.5	Sistemas de Adquisición de Datos	37
2.6	Conceptos Fundamentales de Adquisición de Datos.....	37
2.6.1	Acondicionamiento de Señales	38
2.6.2	Convertidor Analógico-Digital (ADC).....	38
2.7	Encoder Rotatorios	39
2.8	Clasificación de Encoders.....	39
2.8.1	Encoders Absolutos.....	39
2.8.2	Encoders Incrementales.....	40
2.9	Transformada de Fourier	40
2.9.1	Tipos de Transformadas	41
-	La transformada de Fourier en función $f(t)$	41
-	Transformada inversa de Fourier.....	41
2.10	LabVIEW	41
2.11	MATLAB	42
CAPÍTULO III.....		43



3.	MATERIALES Y MÉTODOS	43
3.1	Materiales.....	43
3.1.1	Banco Experimental	43
3.1.2	Encoder Rotatorio	43
3.1.3	Placa PCB	44
3.1.4	Tarjeta sbRIO-9636.....	45
3.1.5	Acople Flexible Serie DD.....	45
3.1.6	Acelerómetro MMA 7361	46
3.2	Metodología	46
3.2.1	Diseño de Base del Encoder.	46
3.2.2	Construcción de la Base.....	47
3.2.3	Diseño del Eje y Acople Flexible.....	48
3.2.4	Diseño y Construcción de la PCB.....	49
3.2.5	Implementación del Acelerómetro MMA 7361.....	51
3.2.6	Procesamiento de Señales para el DAQ.	53
3.2.6.1	Configuración del Enlace de Comunicación LabVIEW- sbRIO.	53
3.2.6.2	Reconocimiento de Señales del Encoder.....	53
3.2.6.3	Programación del DAQ en LabVIEW.....	56
3.2.7	Análisis de Vibraciones del Banco Experimental Mediante FFT en MATLAB .59	
3.2.8	Desarrollo de Machine Learning.....	62
3.2.8.1	Reconocimiento Angular de Eventos de Combustión Mediante Análisis Vibracional y Comparación.	64



3.3	Comparación de Eventos	65
CAPITULO IV		67
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	67
4.1	Resultados del Diseño e Implementación del Sistema de Adquisición de Datos.	67
4.2	Resultados del Desarrollo de Algoritmos, Procesamiento y Visualización de Datos.	70
4.3	Análisis Espectral de Vibraciones y Caracterización de Eventos del Banco Experimental Mediante FFT.....	71
4.4	Análisis de los Armónicos	73
4.4.1	Aprendizaje Automático para el Análisis de Armónicos	77
4.4.2	Árbol de Decisión Aplicado a los Ciclos.....	78
4.4.3	Entrenamiento de Datos Armónicos para la Zona de Ciclos.	80
4.4.3.1	Diagrama de Dispersión Según el Modelo de Ciclos.....	81
4.4.4	Diagrama de Confusión de Modelo Ciclos.....	83
4.4.4.1	Análisis Curva ROC de Validación para el Modelo 2.9	85
4.4.5	Validación de Modelo de Aprendizaje	87
4.4.6	Análisis e Identificación Angular de las Vibraciones del Banco Experimental. .	89
4.5	Comparación de eventos entre el Banco Experimental y Teóricos.....	92
4.5.1	Comparación del Evento de Preinyección.....	93
4.5.2	Comparación del Evento de Inyección Principal.....	94
4.5.3	Comparación del Evento de Apertura de Válvulas.	95
4.5.4	Comparación del Evento de Cierre de Válvulas.	97
CAPÍTULO V		98



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....98

 5.1 Conclusiones98

 5.2 Recomendaciones 100

REFERENCIAS BIBLIOGRÀFICAS102

ANEXOS107



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Especificaciones detalladas del motor Mazda BT50 2.5 DIESEL.</i>	43
<i>Tabla 2. Especificaciones detalladas del Encoder PAT-14-G15E.</i>	44
<i>Tabla 3. Especificaciones de la placa PCB.</i>	44
<i>Tabla 4. Especificaciones detalladas de la SBRIO-9636.</i>	45
<i>Tabla 5. Especificaciones detalladas del acople flexible.</i>	45
<i>Tabla 6. Características detalladas del acelerómetro MMA 7361.</i>	46
<i>Tabla 7. Muestra de datos de trabajo del banco experimental.</i>	61
<i>Tabla 8. Datos de vibración con respecto al ángulo.</i>	69
<i>Tabla 9. Detalle de los diferentes armónicos.</i>	73
<i>Tabla 10. Ordenes en buen estado.</i>	75
<i>Tabla 11. Ordenes en mal estado.</i>	75
<i>Tabla 12. Datos de Longitud de ángulos de vibración en mal estado.</i>	76
<i>Tabla 13. Datos de Longitud de ángulos de vibración en buen estado.</i>	77
<i>Tabla 14 Resultados de entrenamiento respecto a ciclos.</i>	81
<i>Tabla. 15 Resultados de validación.</i>	89
<i>Tabla 16. Análisis angular de las vibraciones del banco experimental.</i>	92



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Motor de combustión interna.....</i>	27
<i>Figura 2. Inyector Electrónico.....</i>	29
<i>Figura 3. Diagrama del ciclo termodinámico teórico MEC.</i>	30
<i>Figura 4. Diagrama del ciclo termodinámico real MEC.....</i>	31
<i>Figura 5. Proceso de la combustión en Motores Diésel.</i>	33
<i>Figura 6. Desfase Entre el Desplazamiento, Velocidad y Aceleración.....</i>	36
<i>Figura 7. Esquema de adquisición de datos y registro DAQ.....</i>	37
<i>Figura 8. Diagrama de bloques de un convertidor analógico-digital.....</i>	38
Figura 9. Componentes básicos de un Encoder.....	39
<i>Figura 10. Encoder incremental.....</i>	40
<i>Figura 11. LabVIEW.....</i>	42
<i>Figura 12. Logo de MATLAB.....</i>	42
<i>Figura 13. Diseño de base en software CAD.....</i>	47
<i>Figura 14. Proceso de la base del Encoder.....</i>	47
<i>Figura 15. Diseño del eje en software CAD.....</i>	48
<i>Figura 16. Eje acoplado al volante de inercia.....</i>	48
<i>Figura 17. Acople flexible modelo DHI.....</i>	49
<i>Figura 18 Circuito de la PCB.....</i>	50
<i>Figura 19. PCB Impresa.....</i>	51
<i>Figura 20. Implementación del acelerómetro sobre la tapa válvulas.....</i>	52
<i>Figura 21. Configuración de canales digitales para la lectura del Encoder.....</i>	54
<i>Figura 22. Indicador de arreglo booleano.....</i>	55



<i>Figura 23. Interfaz gráfica de la posición del Encoder.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 24. Flujograma de la programación del sistema DAQ.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 25. Programación del sistema DAQ.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 26. Flujograma de procesamiento de señales de vibraciones mediante FFT en MATLAB.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 27. Flujograma de programación para MATLAB.....</i>	<i>62</i>
Figura 28. Representación gráfica de datos.	65
<i>Figura 29. Flujograma de comparación de Eventos.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30. Resultado de la implementación del hardware de la DAQ.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31. Indicador Analógico Circular.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 32. Decodificación de señales de los 14 bits.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 33. Interfaz de sistema de adquisición de datos.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 34. Código de programación de la FFT.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35 Análisis de la FFT.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 36. Código del árbol de decisiones.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 37. Árbol de decisión correspondiente a ciclos.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 38. Diagrama de dispersión.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 39. Diagrama de confusión sobre ciclos.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 40 Diagrama de la Curva ROC de Validación.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 41. Código de Validación de modelo de aprendizaje.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 42. Relación de ángulos y vibraciones del banco experimental.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 43. Posición angular del evento de preinyección entre Teórico (A) y Real (B).</i>	<i>94</i>
<i>Figura 44. Posición Angular del Evento Inyección Principal entre Teórico (A) y Real (B).</i>	<i>95</i>
<i>Figura 45. Posición angular del evento de apertura de válvulas entre Teórico (A) y Real (B).</i>	<i>96</i>



Figura 46. Posición angular del evento cierre de Válvulas entre Teórico (A) y Real (B). 97



CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemas de Investigación

En la actualidad la industria automotriz prioriza la eficiencia energética y la disminución de emisiones debido a la variación del cambio climático. A pesar de que los Motores de Combustión Interna (MCI) tienen un alto impacto de gases contaminantes como el CO_2 y NO_x , siguen siendo fundamentales en aplicaciones de alta potencia y largo alcance, por lo que optimizar su combustión sigue siendo un punto primordial.

La sincronización precisa de la inyección de combustible en función de la posición del cigüeñal es crucial para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones en los MCI. Sin embargo, medir la posición del cigüeñal en tiempo real presenta desafíos por las altas velocidades y condiciones extremas de operación de estos motores. Los sensores tradicionales utilizados en la adquisición de datos del cigüeñal tienen limitaciones en precisión y velocidad de respuesta, lo que afecta la optimización de la combustión y puede incrementar el consumo de combustible y las emisiones[1].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema de adquisición de datos altamente preciso y eficiente, utilizando Encoders rotatorios para medir la posición del cigüeñal, con el fin de optimizar los



parámetros de inyección de combustible y combustión para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el hardware para encoders, acondicionamiento de señales e interfase con microcontroladores.
- Desarrollar algoritmos de procesamiento de señales, interfaces gráficas para visualización de datos.
- Realizar pruebas en un motor para verificar la precisión y el impacto en el rendimiento del motor.

1.3 Alcance

Se utilizará un Encoder absoluto de 14 bits, capaz de proporcionar una resolución precisa para medir la posición angular del cigüeñal en el motor. El sistema estará soportado por un SBC (Single Board Computer) basado en FPGA, que permitirá realizar cálculos en tiempo real y gestionar datos con alta eficiencia. El software, desarrollado en LabVIEW, será intuitivo y estará diseñado para simplificar la programación y los ajustes necesarios en el sistema. La validación se llevará a cabo en un motor de 4 cilindros a diésel electrónico de combustión interna, optimizando la sincronización de la inyección de combustible y reduciendo las emisiones bajo condiciones reales de operación.

1.4 Justificación

El tema propuesto, "Diseño de un sistema de adquisición de datos basado en Encoders rotatorios para la optimización de la combustión en motores de combustión interna." Se destaca



por su relevancia en la optimización de la eficiencia energética y reducción de emisiones dentro de la industria automotriz, esta propuesta aborda problemas relacionados con el impacto ambiental de los motores de combustión interna.

La investigación se alinea con objetivos nacionales en Ecuador, como las políticas de infraestructura, energía y medio ambiente incluidas en el Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Las políticas 7.2 y 7.4 del eje "Infraestructura, Energía y Medio Ambiente" son relevantes para este proyecto por que promueven el uso de tecnologías sostenibles, así como la reducción de emisiones.

Política 7.2: Esta política busca el manejo eficiente de los recursos no renovables mediante tecnologías sostenibles para optimizar la producción de hidrocarburos y otras actividades del sector. La optimización de la combustión en los MCI, gracias al sistema de adquisición de datos con Encoders rotatorios, contribuirá a esta política mediante la reducción en el consumo de hidrocarburos y, por ende, de emisiones contaminantes. La implementación de esta tecnología avanzada promueve un uso más racional de los combustibles, lo cual se traduce en un beneficio ambiental directo y en una disminución de la huella de carbono del sector automotriz [2].

Política 7.4: Esta política enfatiza la conservación de los recursos naturales renovables y la adopción de modelos de desarrollo sostenibles, de bajas emisiones y resilientes al cambio climático. El sistema propuesto optimizará la combustión en motores, permitiendo una reducción notable de las emisiones de gases contaminantes. Esta mejora impactará positivamente en la calidad del aire y la mitigación del cambio climático, lo que fortalece la sostenibilidad ambiental y respalda los objetivos de esta política [2].



Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Este proyecto también contribuye al **ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura**, que busca fomentar la industrialización sostenible y la innovación tecnológica. El sistema de adquisición de datos en tiempo real permitirá un monitoreo preciso y mantenimientos predictivos, una innovación que elevará el estándar de eficiencia y sostenibilidad en el sector automotriz. Aportará así conocimientos prácticos para la ingeniería en cuanto a optimización de la combustión y gestión de datos en tiempo real, abriendo el camino para futuras aplicaciones en MCI y otros sectores que dependan de la eficiencia en el uso de recursos no renovables.

La investigación contribuirá al conocimiento académico e investigativo en la optimización de la combustión en MCI, desarrollando avances científicos y tecnológicos en la industria automotriz. Un factor principal es reducir los costos asociados al consumo de combustible, mejorando la eficiencia energética de los motores. Otro factor a tomar en cuenta es favorecer la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire mediante la reducción de emisiones contaminantes, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La precisión para captar datos en tiempo real en los 360° en un cigüeñal es un poco compleja, en un artículo basado en un Encoder rotativo digital de alta precisión basado en matriz de puntos y rejillas nos menciona que:

El Encoder rotatorio es un dispositivo de medición angular que se utilizan en muchas aplicaciones industriales, como por ejemplo para medir la velocidad y la posición de un motor rotatorio o para detectar el ángulo de dirección en vehículos. Ya sean incrementales o absolutos, rastrean la rotación de los ejes del motor para proporcionar información digital sobre el



movimiento y la rotación. Entre los codificadores convencionales, el tipo óptico se ha utilizado comúnmente para servomotores debido a sus capacidades de alta resolución y facilidad de procesamiento de señales [3].

El presente tema también contribuye a este artículo impacto del CO₂ en el cambio climático: Este artículo de UNAM Global explica cómo las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente el CO₂, afectan el clima y la salud global. Se destaca la importancia de adoptar fuentes de energía renovable y estrategias sostenibles para reducir estas emisiones, además de fomentar políticas gubernamentales para incentivar tecnologías limpias y opciones de transporte sostenible[4].



CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Los Motores de Combustión Interna (MCI) son dispositivos térmicos ampliamente utilizados en el transporte, generación de energía y maquinaria industrial. Operan bajo principios termodinámicos que convierten la energía química del combustible en trabajo mecánico. Sin embargo, a medida que las normativas ambientales se han vuelto más estrictas, se ha enfatizado la importancia de optimizar su funcionamiento para reducir emisiones y mejorar la eficiencia.

Los avances en la tecnología de motores dependen en gran medida de la capacidad de medir y analizar variables críticas como la presión en el cilindro, la temperatura y la posición angular del cigüeñal. Estas mediciones requieren sistemas de Adquisición de Datos (DAQ) precisos y confiables [5].

La DAQ es esencial para recopilar y analizar información en tiempo real sobre el comportamiento de los motores de combustión interna. Los datos recopilados permiten ajustar parámetros clave como el tiempo de ignición, la relación aire-combustible y el control de la inyección de combustible.

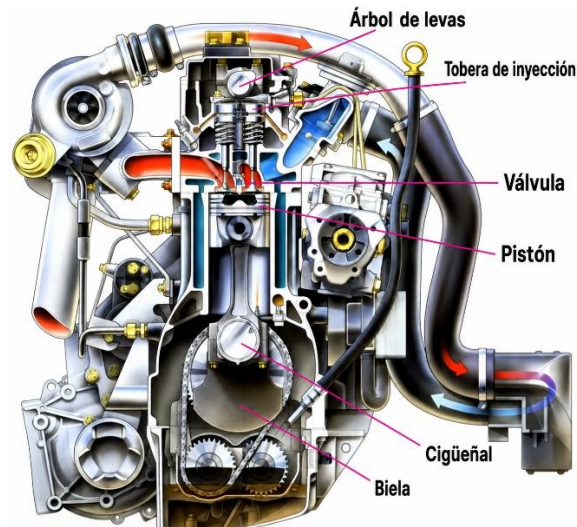
2.2 Motores de Combustión Interna

Un motor diésel se describe como un tipo de motor de combustión interna como se puede visualizar en **Figura 1**, que opera mediante encendido por compresión. En este sistema, el



combustible se prende de manera automática una vez que es inyectado en la cámara de combustión, después de haber completado la compresión, mezclándose y evaporándose con el aire [6].

Figura 1. Motor de combustión interna



Tomado de: Juan, Motores Diesel, 2022 [7].

La ignición en estos motores ocurre sin necesidad de una chispa eléctrica, que normalmente sería responsable de encender la mezcla de aire y combustible; ya que la combustión se da bajo ciertas condiciones de presión y temperatura que se generan durante el proceso de compresión. Además de su particularidad relacionada con el tipo de combustible, los motores diésel son reconocidos por su capacidad de facilitar el transporte, carga y comercio entre diferentes localidades mientras están operativos. En otra ocasión, se puede rastrear una definición clave de este motor a 1893, cuando se otorgó la patente para el “Nuevo motor térmico racional” al ingeniero alemán Rudolf Diésel en Berlín. Posteriormente, meses después, al asociarse con la empresa Maschinenfabrik-Augsburg, actualmente conocida como MAN, se desarrolló un motor mono



cilíndrico de cuatro tiempos de gran tamaño, que innovó la industria automovilística de aquella época [8].

Desde su creación, el motor diésel ha estado alineado con un compromiso con el medio ambiente, y por esta razón, hoy día, con el avance tecnológico, las emisiones de gases contaminantes han disminuido hasta en un 95%, y el uso de combustible se ha reducido entre un 20% y 30% en comparación con los motores de gasolina. Esta notable eficacia se atribuye, en gran medida, a su ratio de compresión que suele fluctuar entre 15:1 y 25:1, alcanzando incluso 30:1[9]. Lo que optimiza el uso del combustible y mejora la eficiencia térmica, resultando en un rendimiento superior.

2.3 Componentes Electrónicos del Motor

2.3.1 Unidad de Control Electrónica (ECU)

La ECU obtiene información de los sensores y modifica las operaciones para aumentar la eficiencia al máximo y reducir al mínimo las emisiones. Algunos tipos representativos de ECU son los módulos de control de la carrocería y los módulos de control del tren motriz. Las ECU incluyen el módulo de sincronización central, el módulo de control central (CCM), el módulo de control de frenos, el módulo de control de la transmisión, el módulo de control del tren motriz, el módulo de control del motor, el módulo de control de la suspensión, el módulo electrónico general y los módulos de control de la carrocería, además controla la sincronización del encendido, el control del turbocompresor y la inyección del combustible [10].

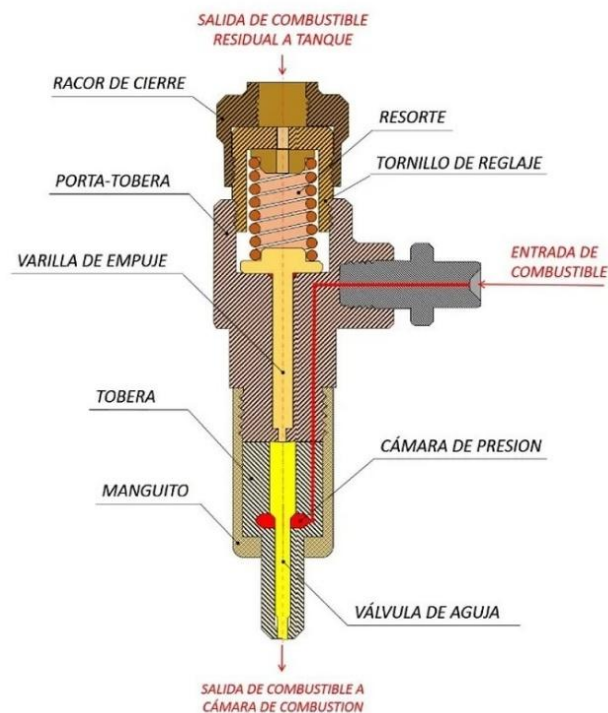


2.3.2 Sistema de Inyección de Combustible de Alta Precisión

2.3.2.1 Inyectores Electrónicos

Los inyectores electrónicos son los encargados de atomizar el combustible, guiarlo hasta la cámara de combustión y de manera uniforme el combustible atomizado, además controlan la apertura de inyector a través del desplazamiento de la aguja gracias a un magneto y un campo magnético producido en las bobinas por el paso de corriente eléctrica, como se puede observar en la **Figura 2** [11].

Figura 2. Inyector Electrónico



Tomado de: Reynasa, Partes y funcionamiento de inyectores, 2019.



2.4 Principio de Funcionamiento

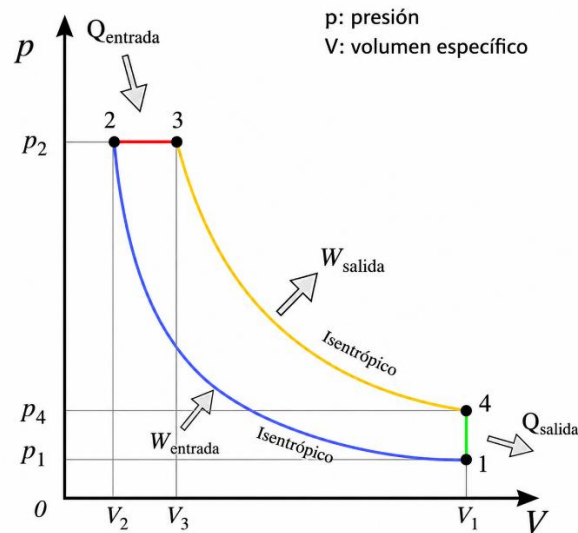
2.4.1 Ciclos Termodinámicos

Un ciclo termodinámico se refiere a la serie de procedimientos que atraviesa un sistema que regresa a su estado original, ya que la energía en el ciclo no aumenta ni disminuye [12]. Lo que permite transformar energía en trabajo sustentable.

En los motores diésel, el ciclo termodinámico ideal se ilustra mediante un diagrama de presión y volumen, como se muestra en la

Figura 3, lo que ayuda a entender cómo opera el motor a través del análisis de los cambios químicos y físicos que sufre el combustible al convertirse en energía mecánica [13], lo que ocurre por las variaciones de presión y volumen en las cuatro fases del ciclo diésel.

Figura 3. Diagrama del ciclo termodinámico teórico MEC.



Tomado de: DEMOTOR, Ciclo diésel teórico, 2025.



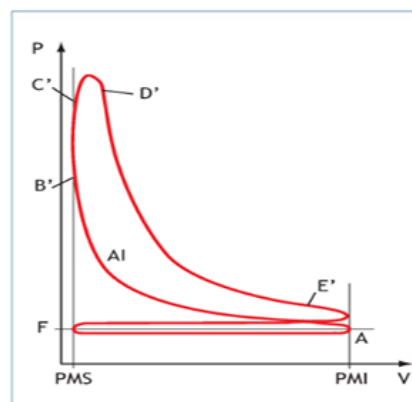
Es decir, el ciclo teórico de un motor diésel se completa en cuatro etapas o pasos, donde (1-2) y (3-4) son transformaciones adiabáticas, (2-3) corresponde a una transformación a presión constante, y (4-1) es una transformación a volumen constante [14]. De este modo, se entiende de la siguiente forma:

- Proceso 1-2: compresión isentrópica (sin pérdida de energía)
- Proceso 2-3: aporte de calor a presión constante.
- Proceso 3-4: expansión isentrópica (sin intercambio de calor).
- Proceso 4-1: expulsión de calor a volumen constante.

2.4.2 Ciclo Termodinámico Real Diésel

Este ciclo refleja las condiciones reales de funcionamiento de un motor, las cuales pueden ser modificadas de acuerdo con los cambios en la presión y volumen que puedan ocurrir dentro de la cámara de combustión [15]. Al igual que el ciclo termodinámico teórico, este ciclo también se ilustra mediante un diagrama de presión y volumen, como se puede ver en la **Figura 4**.

Figura 4. Diagrama del ciclo termodinámico real MEC.



Tomado de: Gonzales J, et al. Motores, 2024.



Al iniciar un motor de combustión por compresión, se produce una pérdida de energía debido a la fricción interna, el intercambio de calor con el ambiente y la turbulencia de los gases que se encuentran en movimiento constante. Su ciclo se divide en las siguientes etapas:

- *Admisión (F–A)*: el cilindro se llena parcialmente de aire, sin llegar a su máxima capacidad, dado que la apertura y cierre de las válvulas ocurre de manera gradual.
- *Compresión del aire (A–B)*: debido a la falta de llenado, el motor necesita realizar un esfuerzo adicional, ya que parte de una presión mucho más baja.
- *Inyección y combustión*: justo antes de que el pistón alcance el punto muerto superior (PMS), el inyector suelta el combustible, resultando en una mezcla que no se quema completamente, lo que provoca una combustión irregular en presión y volumen.
- *Expansión del fluido (C–E)*: se registran pérdidas de calor en las paredes del cilindro, lo que ocasiona un leve descenso del pistón debido a la baja presión.
- *Apertura del escape (E)*: la salida de los gases se realiza de forma gradual, gracias a que las válvulas de escape se abren anticipadamente.
- *Expulsión de los gases quemados (A–F)*: al ascender el pistón, se espera expulsar los gases, pero la apertura y cierre progresivo de las válvulas impide que se realice esta evacuación completamente.

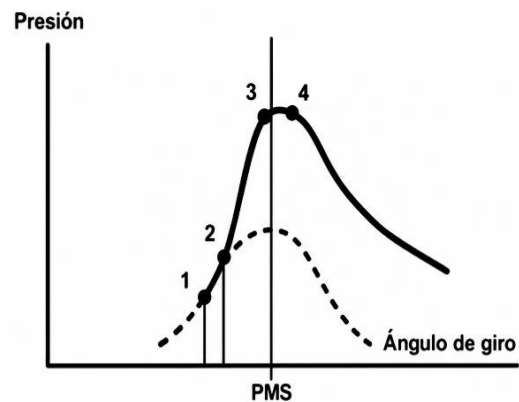
2.4.3 Combustión en Motores Diésel

La combustión en un motor diésel se describe como un proceso termoquímico que implica la oxidación del combustible, liberando una gran cantidad de calor debido a una alta temperatura del aire comprimido dentro del cilindro [16]. En otras palabras, la combustión en un motor de



encendido por compresión se define como una reacción rápida entre el oxígeno presente en el aire y el combustible, abarcando diferentes fases de operación y factores como la relación de compresión y la mezcla de aire con combustible, resultando en la liberación de energía en forma de calor y luz. Este proceso se puede visualizar en el diagrama siguiente **Figura 5**.

Figura 5. Proceso de la combustión en Motores Diésel.



Tomado de: Planas O, DeMotor, 2020.

La combustión en los motores diésel se puede dividir en tres etapas:

- Retardo en la ignición (1-2).
- Combustión descontrolada (2-3).
- Combustión controlada (3-4).

La combustión en gran parte es controlada por el sistema de inyección, puesto a que en motores diésel, el combustible no detona por medio de una chispa, si no por aire comprimido en su interior, donde el sistema de inyección determina el tiempo, la presión y la cantidad de combustible en el cilindro [17], permitiéndose así, la optimización del rendimiento del motor, reducción de gases contaminantes y consumo de combustible.



2.4.4 Optimización del Combustible

La operatividad de combustión en motores de combustión interna, especialmente en motores diésel, depende de distintos parámetros críticos que influyen en cómo se transforma la energía química del combustible en energía mecánica. Además, priorizan la relación aire-combustible, el sistema de encendido y los tiempos de inyección, los cuales priorizan el rendimiento y minimizan las emisiones contaminantes [18].

2.4.5 Importancia de la Sincronización en el Desempeño del Motor.

La sincronización es un elemento fundamental en el desempeño de un motor de combustión interna, implica la coordinación exacta entre los diversos componentes y procesos del motor, como el control de la apertura y cierre de las válvulas, la inyección de combustible y el encendido, una sincronización precisa asegura un funcionamiento eficiente del motor, optimizando el consumo de combustible, incrementado el rendimiento y disminuyendo las emisiones contaminantes [19].

2.4.6 Vibraciones en el Motor Diésel

En los motores de diésel, las vibraciones originan una serie de problemas que pueden llevar a aflojar los sujetadores de sus uniones y las conexiones entre distintos sistemas del motor, lo que podría resultar en un fallo completo si no son identificadas y corregidas a tiempo.

2.4.7 Vibración Mecánica

Esta se describe como los movimientos cíclicos de una parte o de una escritura física alrededor de un punto de equilibrio, donde el movimiento generado por el cuerpo se aparta y luego regresa a su posición inicial [20]. Dicho de otra forma una vibración mecánica es el efecto de una perturbación que causa movimiento oscilatorio, como un resorte que se estira y se relaja, o un



motor de automóvil que se enciende, donde las vibraciones que se producen tienden a oscilar hacia adelante y hacia atrás alrededor de su ubicación de origen.

2.4.7.1 Propiedades de las Vibraciones Mecánicas.

Las características de estas vibraciones están en relación con la frecuencia, el periodo, la amplitud y la frecuencia natural [21]. En este contexto:

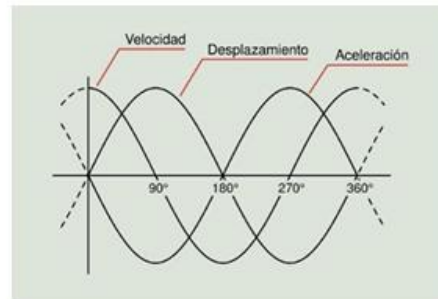
- *Frecuencia (Hertz, Hz):* indica cuántas veces se repite un ciclo de movimiento en un tiempo específico.
- *Período:* refleja la duración de un ciclo y se determina como el inverso de la frecuencia.
- *Amplitud:* cuantifica la máxima distancia alcanzada desde la posición de reposo durante el ciclo de movimiento.
- *Frecuencia natural:* representa la frecuencia a la que un sistema vibrará tras sufrir una perturbación y no esté afectado por fuerzas externas.

2.4.7.2 Representación Gráfica de las Vibraciones

Las vibraciones mecánicas pueden manifestarse como un movimiento rotatorio puro (angular), un desplazamiento lineal puro (movimiento recto) o un movimiento complicado [22], que incluye tanto rotación como desplazamiento, descrito mediante la aceleración de la velocidad o el desplazamiento efectivo de la masa involucrada [23]. Esto se ilustra en la **Figura 6**, que aparece a continuación.



Figura 6. Desfase Entre el Desplazamiento, Velocidad y Aceleración.



Tomado de: Carrasco N., Estudio de las vibraciones, 20216.

2.4.7.3 Tipos de Vibraciones Mecánicas.

a) Vibración libre

Se define como la capacidad de un cuerpo para regresar a su estado original después de ser impulsado, manteniendo su movimiento solo por las fuerzas de restauración propias del sistema, dependientes de la distribución de la masa, la rigidez y los grados de libertad [24].

Este tipo de vibración se presenta en diferentes conceptos que se especifica a continuación:

- **Vibración libre no amortiguada** ocurre en ausencia de fuerzas externas que influyan en el sistema, es decir, se presenta cuando no existe elemento alguno que absorba la energía de la vibración.
- **La vibración libre amortiguada** ocurre en sistemas que tienen componentes diseñados para absorber energía, conocidos como amortiguadores.

b) Vibración Forzada

Se caracteriza por ser una fuerza externa perturbadora que actúa sobre un sistema, provocando que este inicie un movimiento vibratorio. Este tipo de vibraciones se basa en dos conceptos:

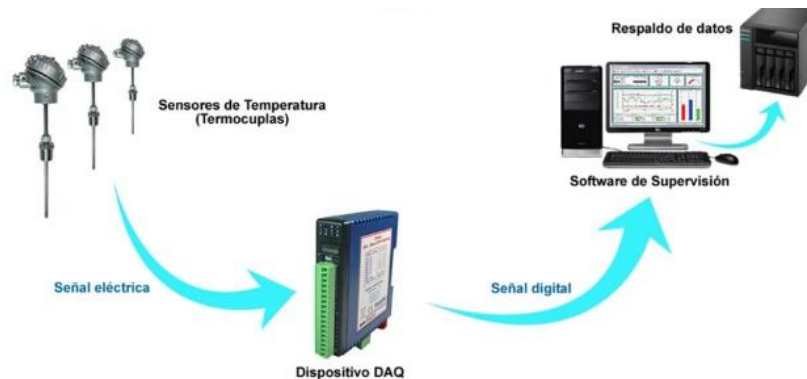


- **Vibración forzada no amortiguada**, se genera cuando un sistema es afectado por una fuerza externa perturbadora, resultando en vibraciones forzadas que coinciden en frecuencia con la fuerza externa, pero sin ningún tipo de amortiguación, ya que ninguno de los elementos absorbe energía.

2.5 Sistemas de Adquisición de Datos

Los sistemas de adquisición de datos son esenciales para capturar y analizar información precisa en tiempo real, permitiendo avances significativos en diversas industrias. Aunque enfrentan desafíos técnicos y económicos, la evolución de la tecnología sigue ampliando su capacidad y accesibilidad, consolidándolos como una herramienta clave para la innovación y el control de procesos, observar en la **Figura 7**.

Figura 7. Esquema de adquisición de datos y registro DAQ



Tomado de: Electro industria, Sistemas DAQ, 2018.

2.6 Conceptos Fundamentales de Adquisición de Datos.

Según Klavenes, algunos conceptos fundamentales de adquisición de datos giran en torno a un conjunto de principios que permiten capturar, procesar, y analizar información de manera eficiente y precisa para diversos fines industriales, científicos y tecnológicos. Estos conceptos son la base



de los sistemas modernos y proporcionan una estructura para entender y desarrollar soluciones en este campo. Los puntos clave incluyen [25]:

2.6.1 Acondicionamiento de Señales

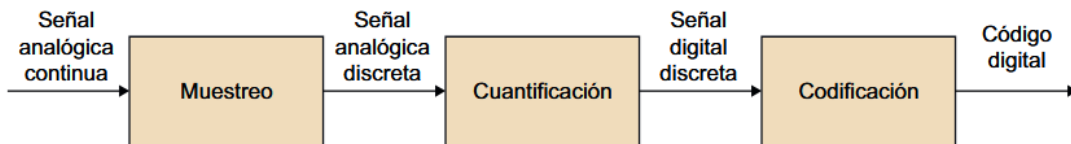
Una DAQ debe ser capaz de adquirir la mayor cantidad de señales provenientes de sensores los cuales nos entregan señales eléctricas ante la medición de cualquier fenómeno físico que este midiendo. Las señales de los sensores suelen ser ruidosas, el circuito de acondicionamiento de señales maneja una señal que sea compatible con la entrada a una DAQ, el circuito suele contener amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento [26].

2.6.2 Convertidor Analógico-Digital (ADC)

La conversión de analógico a digital (ADC) se describe como el proceso que compromete que un circuito muestree y conserve una señal analógica durante un cierto tiempo, posteriormente convertir su amplitud en un valor digital. El rendimiento del ADC se caracteriza por su tasa de conversión y resolución, que se determina por el número de bits [27], a continuación, se presenta el proceso de conversión de una señal analógica a una señal digital en la

Figura 8.

Figura 8. Diagrama de bloques de un convertidor analógico-digital



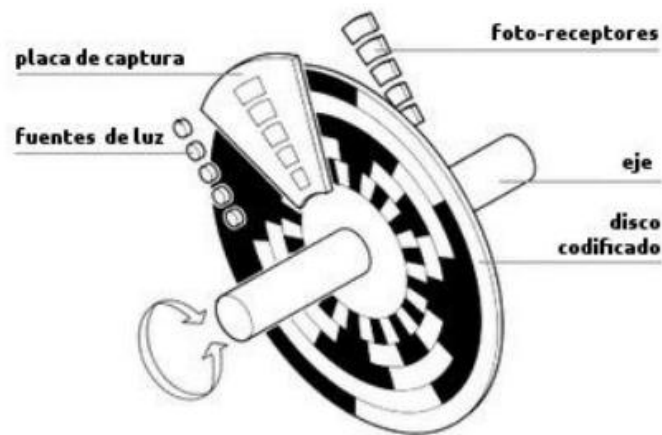
Tomado de: Francisco V, Conversion analogico-digital,sf,2024.



2.7 Encoder Rotatorios

Los Encoders también conocidos como codificador son esenciales para medir revoluciones en motores y sistemas giratorios, que convierte el movimiento mecánico en señales eléctricas. Para su funcionamiento se compone básicamente de un disco conectado a un eje giratorio, está construido de vidrio o plástico y se encuentra codificado con unas partes transparentes y otras opacas que bloquean el paso de la luz emitida por la fuente de luz típicamente emisores infrarrojo, se puede observar en la **Figura 9** [28].

Figura 9. Componentes básicos de un Encoder.



Tomado de: Gloria S, Integración de Encoders, 2015.

2.8 Clasificación de Encoders

2.8.1 Encoders Absolutos

Tienen la capacidad de enviar la información sobre la posición a la electrónica de análisis usando varios cables en paralelo o, como alternativa, usando protocolos e interfaces estandarizados en sistemas en serie. Además, para cada posición del eje, ofrecen un valor único y codificado [29].



2.8.2 Encoders Incrementales

Los Encoders incrementales la capacidad de indicar tanto la posición, como la dirección y la velocidad del movimiento se puede visualizar en la **Figura 10**, estos giran a velocidad constante, los pulsos de salida toman la forma de ondas cuadradas. En cuanto el codificador gira más rápido, la frecuencia de pulsos aumenta consecutivamente, esto debido que la relación entre la frecuencia de pulsos y la velocidad es lineal. Asimismo, los pulsos de salida se pueden convertir a unidades de velocidad midiendo su frecuencia y multiplicándola por un factor de escala adecuado [30].

Figura 10. Encoder incremental



Tomado de: Oscar B, Encoder Incremental,2014.

2.9 Transformada de Fourier

Según Elorza, la transformada de Fourier es una herramienta matemática utilizada para descomponer una señal en sus componentes de frecuencia, permite transformar funciones en el dominio del tiempo a su representación en el dominio de la frecuencia, facilitando el análisis de señales periódicas y no periódicas [31].



2.9.1 Tipos de Transformadas

Existen varios tipos de Transformada de Fourier, cada una adaptada a diferentes tipos de señales y aplicaciones en el análisis de señales y sistemas, estas son:

- *La transformada de Fourier en función $f(t)$*

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

- *Transformada inversa de Fourier*

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

2.10 LabVIEW

Según Jiang LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un software desarrollado por National Instruments, como se puede visualizar en la **Figura 11**, que ofrece un entorno gráfico de programación diseñado para la automatización, la adquisición de datos y el control de sistemas. Su característica principal es el uso de un lenguaje visual basado en diagramas de bloques, lo que permite una integración sencilla de hardware y la creación de interfaces para la medición y el análisis de señales en tiempo real [32].

En estudios como el monitoreo de vibraciones en motores, LabVIEW permite capturar datos de aceleración con gran precisión, registrar eventos y generar informes automáticos, donde posteriormente, los datos adquiridos pueden ser exportados en formatos compatibles (como .txt o .csv) [33], para análisis más profundo en plataformas como MATLAB.



Figura 11. LabVIEW



Tomado de: Paladines, Labview, 2009.

2.11 MATLAB

El entorno de programación MATLAB (MATrix LABoratory) como se puede visualizar en la **Figura 12**, fue creado con el objetivo específico de analizar números, simular y visualizar datos [34]. Por otra parte, MATLAB posibilita la aplicación de un amplio rango de técnicas estadísticas y matemáticas para el análisis después de que se exportan los datos adquiridos desde cualquier entorno. Utilizar herramientas como la Transformada Rápida de Fourier (FFT), por ejemplo, mejora el manejo de los datos obtenidos en este estudio. Esto incluye la eliminación del ruido y, a partir de ahí, el análisis correspondiente para detectar anomalías mecánicas.

Figura 12. Logo de MATLAB



Tomado de: Chonacky N, Winch D. Reviews of Maple, Mathematica, and Matlab, 2021.



CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

En esta investigación, se detallan los materiales y equipos utilizados, junto con sus respectivas especificaciones y características técnicas.

3.1.1 Banco Experimental

El banco experimental 2.5 L diésel usado en la BT-50 es un bloque de 4 cilindros en línea, turboalimentado con intercooler, inyección common-rail, diseñado para aplicaciones utilitarias (pick-up) con buena entrega de par a bajas revoluciones, apropiado para trabajo y carga, otras de sus particularidades citadas, pero no menos importantes se encuentran en la Tabla 1 la cual define especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Tabla 1. Especificaciones detalladas del motor Mazda BT50 2.5 DIESEL.

Detalle	Especificación
Cilindrada	2 499 cc (2.5 L)
Numero de cilindros	4 en línea
Diámetro x Carrera	93.0 x 92.0
Relación de compresión	18.0:1
Potencia máxima	143 hp (\approx 105 kW) a \approx 3.500 rpm

3.1.2 Encoder Rotatorio

El PAT-14-G15E es un enconder rotatorio que proporciona una salida digital de alta resolución (14 bits) en un recorrido de 0 a 360°. Está diseñado para aplicaciones donde se requiere conocer la posición angular de manera precisa sin necesidad de referencia o “homing” cada vez



que se enciende. Si bien existen diferentes propiedades técnicas que definen a este sensor, como se muestran en la **Tabla 2** la cual define especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Tabla 2. Especificaciones detalladas del Encoder PAT-14-G15E.

Detalle	Especificación
Resolución	16384 pasos en todo el giro
Tipo de salida	Código binario
Alimentación	15 V
Temperatura de operación	0 °C a +50 °C

3.1.3 Placa PCB

La placa de componentes electrónicos del sistema DAQ permite la conexión del Encoder, sensores y SBRIO-9636, su esquema integra fases de acondicionamiento, protección y aislamiento eléctrico a través de optoacopladores permitiendo la protección tanto de las señales como del sistema respecto a interferencias y picos de voltaje propios del entorno del banco experimental, a continuación, se puede visualizar las especificaciones en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Especificaciones de la placa PCB.

Detalle	Especificación
Entradas digitales	14 líneas (B0-B13)
Entradas analógicas	4 canales (vibración y otros)
Comunicación	Conector para enlace a PC (LabVIEW)
Alimentación	Entrada DC conector de potencia
GND	Plano de tierra compartido
Resistencias	1K-560 Ohm.



3.1.4 Tarjeta sbRIO-9636

El sbRIO-9636 es un dispositivo integrado de alto desempeño diseñado para aplicaciones industriales de control, adquisición de datos y sistemas en tiempo real, otras de sus particularidades citadas, pero no menos importantes se encuentran en la **Tabla 4** la cual define especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Tabla 4. Especificaciones detalladas de la SBRIO-9636.

Detalle	Especificación
Procesador	400MHz
FPGA integrado	Xilinx Spartan-6 LX45
Canales de E/S analógica	16 entradas analógicas de 16 bits 4 salidas analógicas de 16 bits.
Canales de E/S digital	28 canales bidireccionales digitales
Alimentación	9-30 V DC

3.1.5 Acople Flexible Serie DD

Es un elemento mecánico esencial para conectar dos ejes rotativos, permitiendo transmitir torque mientras compensan desalineaciones axiales, radiales y angulares entre ellos, su función principal absorber vibraciones y choques, proteger componentes contra sobrecargas y facilitar la alineación, en la **Tabla 5** se puede visualizar características principales del acople.

Tabla 5. Especificaciones detalladas del acople flexible.

Detalles	Especificaciones
Velocidad máxima	Hasta 10 000 RPM
Capacidad de torque	20 a 500 Nm
Desalineación angular	1° a 1.5°
Desalineación radial	±0.25 a ±0.5 mm



3.1.6 Acelerómetro MMA 7361

Es un sensor analógico triaxial diseñado para medir aceleraciones en los ejes X, Y y Z. Su funcionamiento se basa en la variación de voltaje proporcional a la aceleración aplicada, lo que permite obtener información precisa sobre vibraciones. Este dispositivo cuenta con dos rangos de medición seleccionables $\pm 1.5 \text{ g}$ y $\pm 6 \text{ g}$, lo que facilita su adaptación a diferentes condiciones de operación, las características principales se pueden visualizar en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Características detalladas del acelerómetro MMA 7361.

DETALLES	ESPECIFICACIONES
Tipo de sensor	Acelerómetro analógico
Numero de ejes	(X, Y y Z)
Sensibilidad	800 mV/g / 206Mv/g
Voltaje de alimentación	2.2 V – 3.6V
Tipo de salida	Análogica (voltaje proporcional)

3.2 Metodología

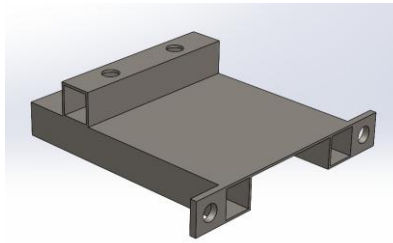
3.2.1 Diseño de Base del Encoder.

Para el diseño de la base de soporte del Encoder se aplicó un software de diseño asistido por computadora (CAD), tomando en cuenta las dimensiones geométricas y su método de acoplamiento al banco experimental. La base fue diseñada para fijarse mediante un sistema empernado asegurando un montaje estable y preciso, como se puede observar en la **Figura 13**.

Además, se seleccionó el material considerando la necesidad de minimizar la transmisión de vibraciones y garantizar que el sensor no esté expuesto a temperaturas elevadas, condiciones que podrían afectar su funcionamiento y la calidad de las mediciones.



Figura 13. Diseño de base en software CAD.



3.2.2 Construcción de la Base.

El proceso de fabricación se inició con el corte de los perfiles estructurales y de la misma manera de la base. Luego, los extremos de los perfiles destinados a la fijación con el banco experimental fueron doblados a 90° y perforados lo que permite una sujeción rígida y estable.

Los perfiles fueron unidos a través de soldadura, asegurando cordones continuos obteniendo una rigidez y estabilidad necesaria para la estructura. Por último, las uniones soldadas fueron desbastadas, con el fin de eliminar irregularidades superficiales.

En la parte superior de los perfiles se soldó una placa de acero que brinda como soporte directo del Encoder, previamente, la placa fue sometida a perforaciones alineadas con el patrón de montaje. Esto permitió asegurar una correcta posición geométrica del mismo con respecto al eje de giro del sistema, como se puede visualizar en la **Figura 14**.

Figura 14. Proceso de la base del Encoder.





3.2.3 Diseño del Eje y Acople Flexible

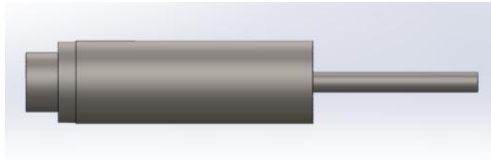
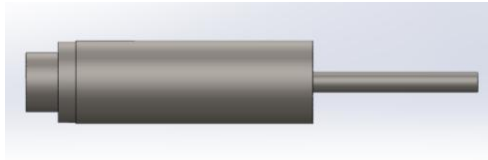
El eje de acoplamiento se desarrolló con la finalidad de transmitir el movimiento de giro desde la salida de la transmisión hasta el Encoder. Este componente permite que ambos sistemas trabajen de manera sincronizada, evitando pérdidas de señal o desfases durante la medición. Para su diseño se empleó un software de modelado CAD, el cual facilitó la visualización y ajuste de la geometría del eje, como se presenta en la . Lo que permitió definir con precisión las tolerancias funcionales y los puntos de unión con cada componente.

Figura 15. Diseño del eje en software CAD.




En el extremo que se conecta a la transmisión, el eje fue dimensionado para realizar un acople a presión, lo que garantiza una fijación rígida evitando cualquier tipo de deslizamiento durante las velocidades del motor, como se puede observar en la . e la referencia..

Figura 16. Eje acoplado al volante de inercia.





Este tipo de acople permite una transferencia directa del movimiento rotacional, sin necesidad de elementos adicionales de sujeción. En el extremo opuesto, destinado al Encoder, se incorporó un acople flexible diseñado con la tolerancia necesaria para asegurar una alineación axial precisa, como se puede observar en la ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~

Figura 17. Acople flexible modelo DH1.



Esta unión se complementa con un sistema emperrado, el cual mantiene el sistema fijo y evita desplazamientos que puedan generar excentricidades, vibraciones o errores en la lectura angular.

3.2.4 Diseño y Construcción de la PCB.

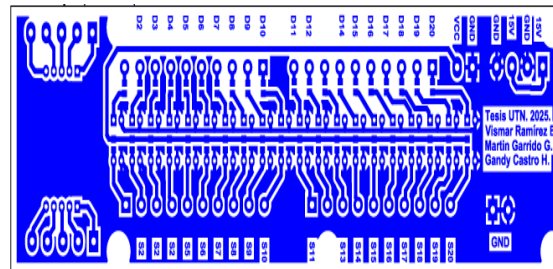
La necesidad de obtener señales digitales confiables provenientes del sensor conllevó el desarrollo de la placa electrónica, considerando que el sistema funciona en un ambiente con interferencias electromagnéticas, vibraciones mecánicas y fluctuaciones de voltaje, fue necesario implementar una protección entre el Encoder y el sistema de adquisición sbRIO.

Primero se llevó a cabo un estudio eléctrico del Encoder y de las entradas digitales del sbRIO para corroborar la compatibilidad de los niveles lógicos y evaluar los riesgos que conlleva una conexión directa y se vio necesario aplicar aislamiento galvánico debido que los transitorios



eléctricos podrían poner en peligro la integridad del sistema de adquisición o provocar errores al momento de la obtención de datos, teniendo en cuenta este diagnóstico, se diseñó el circuito eléctrico utilizando optoacopladores PC817 siendo el componente principal de aislamiento como podemos visualizar en la **Figura 18**.

Figura 18 Circuito de la PCB.



Las 14 salidas digitales se conectaron con una resistencia de 1 k Ω , con la finalidad de reducir la corriente que alimenta el LED interno del optoacoplador, esta configuración protege el dispositivo garantizando su operación dentro de los parámetros recomendados por el fabricante.

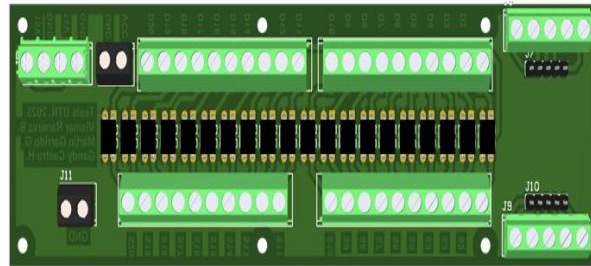
Para proteger al sistema DAQ se conectó el cátodo del LED a la tierra del Encoder y se activa el transistor interno cuando produce un nivel lógico alto en uno de sus bits, lo que a su vez energiza el LED interno del optoacoplador, en la fase de salida, el colector del transistor se une a la entrada digital correspondiente del sBRIO y el emisor, en cambio, se conecta a la tierra del sistema de adquisición, se usó una resistencia de 560 Ω en la salida con el fin de mantener la señal y asegurar un nivel lógico apropiado.

Después de establecer el diseño eléctrico, se utilizó un software CAD electrónico para crear el circuito impreso, organizando los componentes de manera ordenada y distinguiendo con claridad entre el lado de control y el lado de campo, luego se realizó la placa en material FR4, se



agregaron 6 agujeros pasantes para tornillo M3 para sujeción, se ensamblaron las 20 resistencias de 1 k Ω , las 20 de 560 Ω y los 20 optoacopladores como se puede observar en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y se corroboró la continuidad eléctrica y la polaridad adecuada.

Figura 19. PCB Impresa.



3.2.5 Implementación del Acelerómetro MMA 7361.

La implementación del sistema de medición de vibraciones inició con la selección del acelerómetro adecuado, considerando parámetros fundamentales como el rango de medición, la sensibilidad y la respuesta en frecuencia. Estos criterios son esenciales para garantizar que el sensor sea capaz de captar con precisión las vibraciones generadas por el ciclo de trabajo y al movimiento del tren de válvulas.

Posteriormente, se definió la ubicación del sensor, optando por la instalación directa sobre la tapa válvulas del banco experimental, esta zona fue seleccionada debido a que constituye un punto representativo donde convergen diferentes fuentes de vibración, tales como la combustión, la apertura y cierre de válvulas, y el movimiento de componentes mecánicos internos.

Para asegurar una adecuada transmisión de las vibraciones, la superficie fue previamente limpiada y el acelerómetro se fijó con un imán lo suficientemente fuerte donde se lo adherido a



una rodela donde esta fue pegada a la tapa válvulas garantizando una correcta adherencia y minimizando perdidas de señal, como se puede observar en la **Figura 20**.

Figura 20. Implementación del acelerómetro sobre la tapa válvulas.



Una vez instalado el sensor, se procedió al acondicionamiento de la señal, dado que el acelerómetro genera una señal analógica susceptible a las interferencias, fue necesario implementar un filtrado adecuado para eliminar ruido de alta frecuencia y estabilizar la señal, asimismo, se verificaron los niveles de alimentación del sensor y su compatibilidad con el sistema de adquisición de datos, asegurando el voltaje de salida se encuentre dentro del rango aceptable para su posterior procesamiento.

La conexión del acelerómetro se realizó a la NI sBRIO, utilizando sus entradas analógicas para la adquisición de datos, en este proceso, se establecieron las conexiones correspondientes entre la alimentación, tierra y la salida de señal del sensor hacia un canal analógico del dispositivo, se emplearon cables blindados con el fin de reducir la influencia de interferencia electromagnéticas externas, lo cual resulta fundamenta en entornos automotrices donde existen múltiples fuentes de ruido eléctrico.



3.2.6 Procesamiento de Señales para la DAQ.

3.2.6.1 Configuración del Enlace de Comunicación LabVIEW- sbRIO.

El proceso de integración entre LabVIEW y la tarjeta sbRIO se desarrolló de manera estructurada, con el objetivo de garantizar una comunicación estable, adecuada para la adquisición de señales digitales provenientes del Encoder rotatorio absoluto de 14 bits.

Lo primero que se realizó fue la configuración física del sistema conectando la sbRIO mediante cable Ethernet al computador de desarrollo, asegurando que ambos dispositivos pertenecieran a la misma red local, luego se energizó la tarjeta y se verificó su correcto reconocimiento en el software NI Measurement & Automation Explorer (NI MAX).

En esta etapa se confirmó la dirección IP asignada, el estado operativo del sistema en tiempo real y la disponibilidad del módulo FPGA permitiendo garantizar que la comunicación básica entre hardware y software estuviera correctamente establecida antes de iniciar la programación.

Una vez validada la conectividad se procedió a la creación de un nuevo proyecto en LabVIEW luego dentro del entorno de proyecto se añadió la sbRIO mediante la opción “Add Targets and Devices”, lo que permitió integrar tanto el procesador en tiempo real como el módulo FPGA dentro de la arquitectura del sistema siendo esta estructura fundamental para separar las tareas de adquisición determinística (FPGA) del procesamiento y visualización (Host).

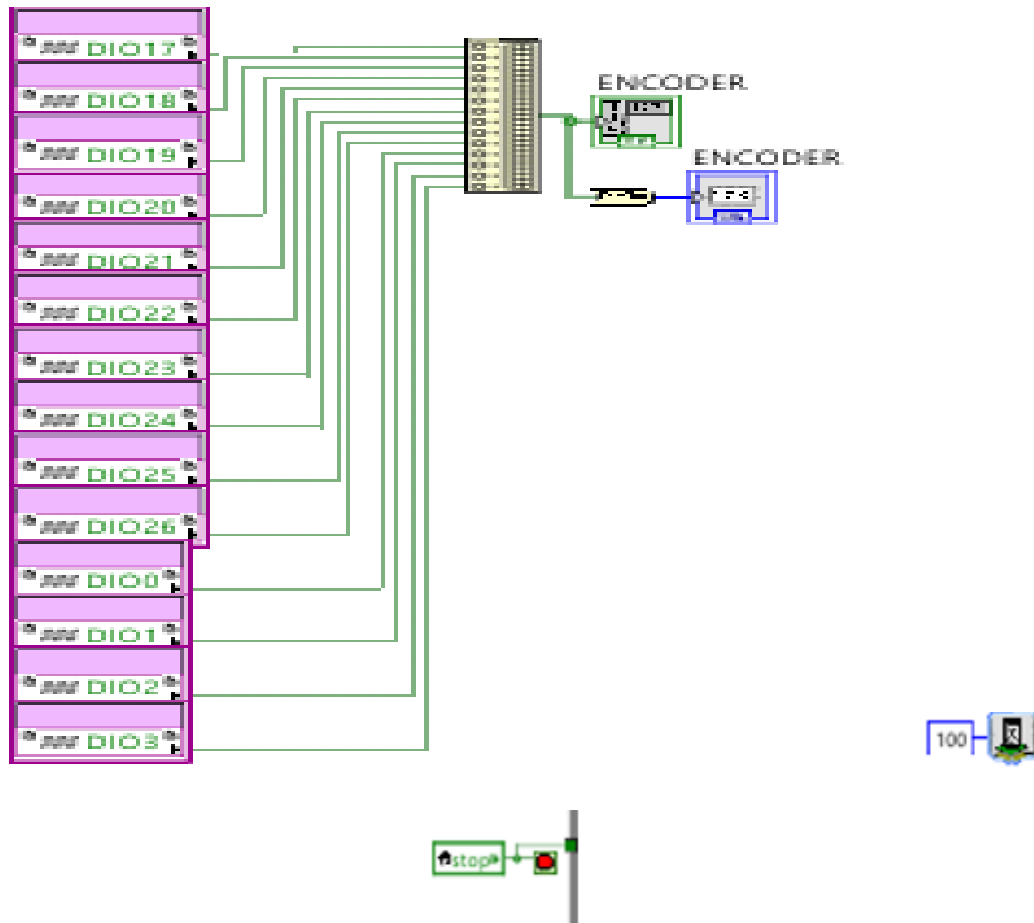
3.2.6.2 Reconocimiento de Señales del Encoder

Una vez implementada la PCB y establecido la comunicación entre la LabVIEW y la sbRIO, se desarrolló un proceso para reconocer las señales digitales, la recopilación de la



información se realizó en el software LabVIEW, lo primero que se realizó en el diagrama fue implementar los 14 canales digitales en la FPGA, cada uno de estos fue configurado como entrada digital, ya que son los 14 bits, cada uno de estos representa la palabra binaria, después estas fueron conectadas a un bloque de arreglo (Build Array) como se puede visualizar en la **Figura 21**, el cual fue configurado para generar una secuencia controlada de pulsos de reloj, en cada flanco activo del reloj se capturó el estado lógico de la línea de datos del Encoder, almacenando secuencialmente cada uno de los bits transmitidos.

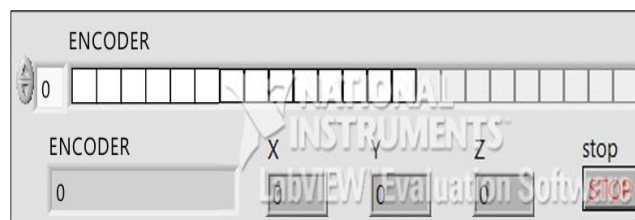
Figura 21.Configuración de canales digitales para la lectura del Encoder.





Este procedimiento se repitió hasta completar la lectura de los 14 bits correspondientes a una palabra digital, donde el primer bit recibido representa el Bit Más Significativo (MSB) y el último el Bit Menos Significativo (LSB). La información binaria obtenida se organizó en un arreglo booleano que se representa en la **Figura 22**, el valor absoluto de la posición angular instantánea del eje.

Figura 22. Indicador de arreglo booleano.



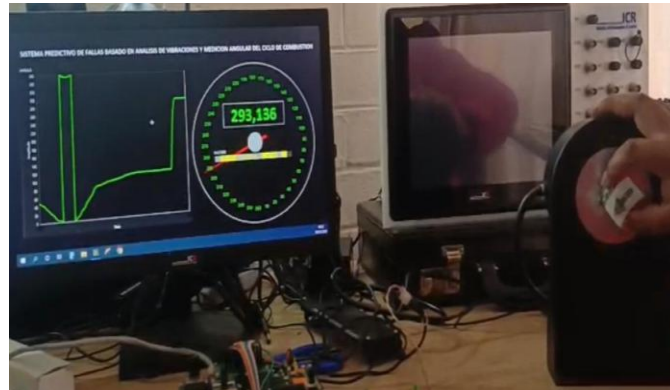
Posteriormente, el arreglo de bits fue convertido a un valor entero sin signo mediante las funciones nativas de LabVIEW, obteniendo un número decimal comprendido entre 0 y 16 383, este valor representa directamente la posición codificada por el Encoder dentro de una vuelta completa, a continuación, el valor entero fue escalado a unidades angulares mediante una relación lineal, calculando el ángulo absoluto del eje en grados a partir de la expresión: $\theta = (N / 16\ 383) \cdot 360^\circ$, donde N corresponde al valor decimal reconstruido a partir de los 14 bits leídos.

Con el fin de garantizar la correcta identificación de la palabra digital y la coherencia de los datos adquiridos, se realizaron pruebas de validación mediante el giro controlado del eje, verificando que la variación de los valores obtenidos fuese continua. Finalmente, se puede visualizar en la **Figura 23**, el ángulo calculado que fue visualizado en tiempo real dentro de la



interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW y almacenado para su posterior análisis. Este procedimiento permitió una adquisición confiable y repetible de la posición angular del sistema.

Figura 23. Interfaz gráfica de la posición del Encoder.



3.2.6.3 Programación del DAQ en LabVIEW

La **Figura 24**, presenta el flujograma del sistema de adquisición de datos, donde se describe de manera estructurada el proceso de integración del Encoder, el acelerómetro, la sbRIO y el procesamiento en entorno FPGA y tiempo real. A partir de esta base, en la

Figura 25, se muestra la implementación en LabVIEW de dicho flujograma, donde se materializa la arquitectura del sistema y su funcionamiento dentro del entorno de programación.

En la **Figura 25**, se observa un bloque de adquisición de datos, el cual permite capturar información adicional, como las señales de vibración en los ejes correspondientes. Estos datos son procesados y representados en gráficos, como el XY Graph, facilitando el análisis dinámico del banco experimental.

Asimismo, la programación incluye estructuras de control, como ciclos y condiciones lógicas, que permiten gestionar la ejecución del sistema, así como un control de parada que



garantiza una detención segura del proceso. La comunicación entre las distintas etapas asegura un flujo continuo de datos desde la adquisición hasta la visualización.

En conjunto, esta programación refleja la integración funcional del sistema descrito en el flujograma, evidenciando cómo la señal capturada es procesada y transformada en información útil para el análisis del comportamiento del motor en función de su posición angular.

Figura 24. Flujograma de la programación del sistema DAQ.

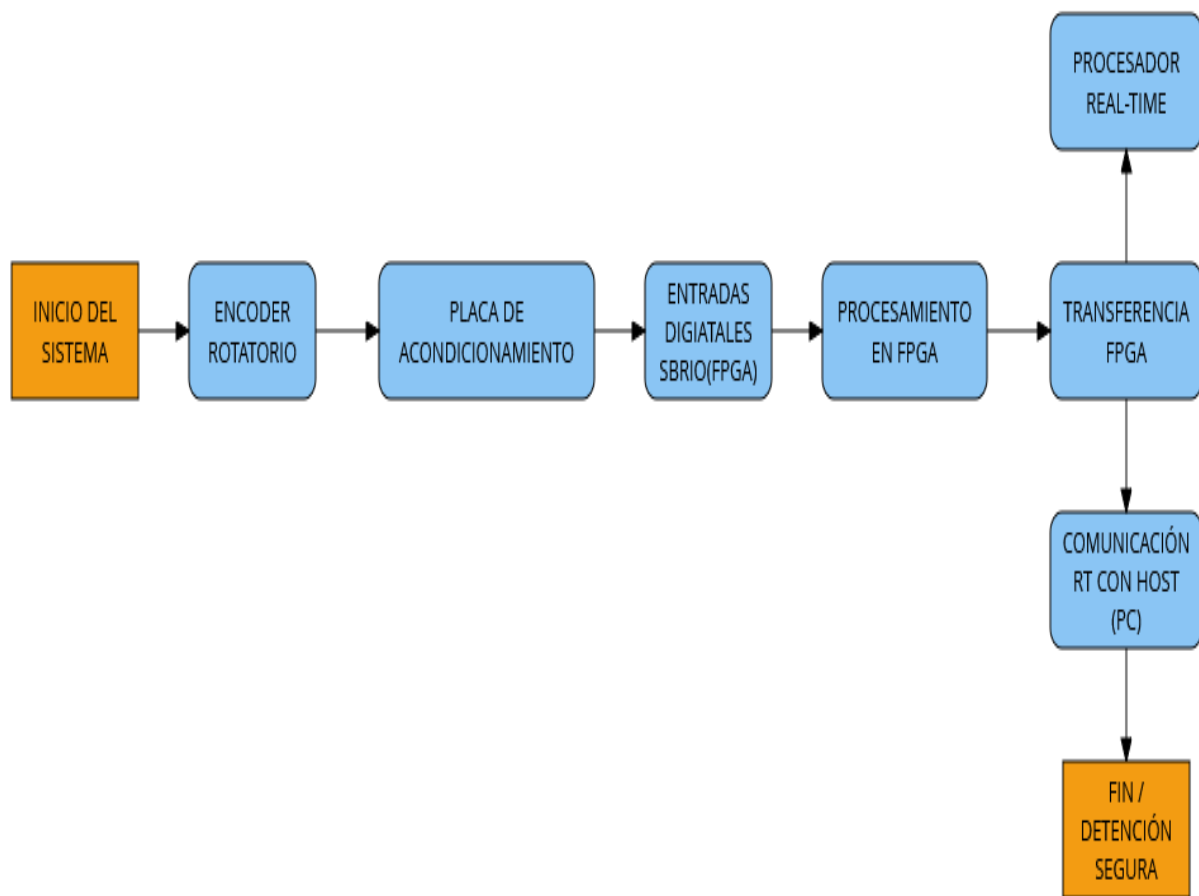
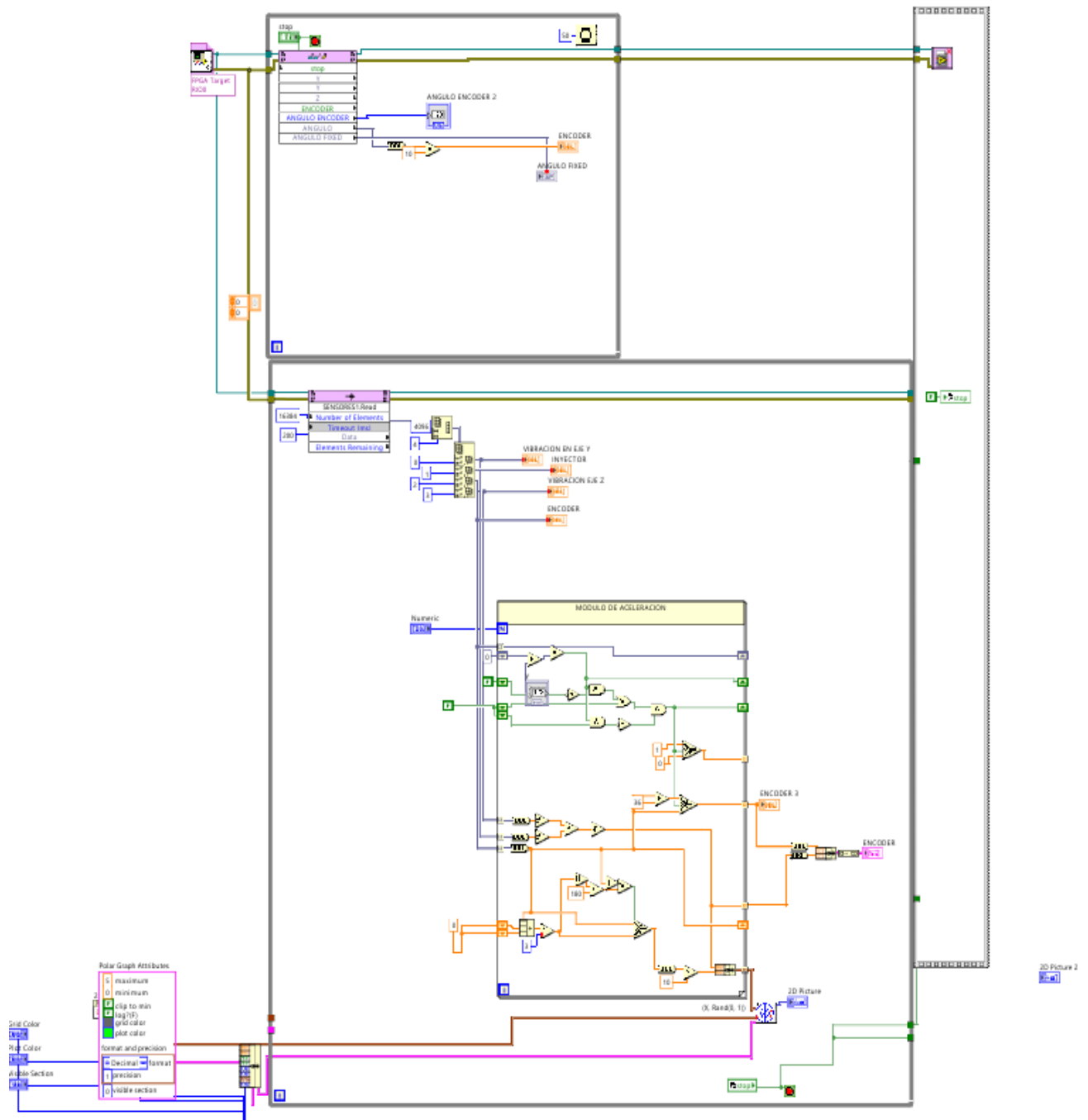


Figura 25. Programación del sistema DAQ.

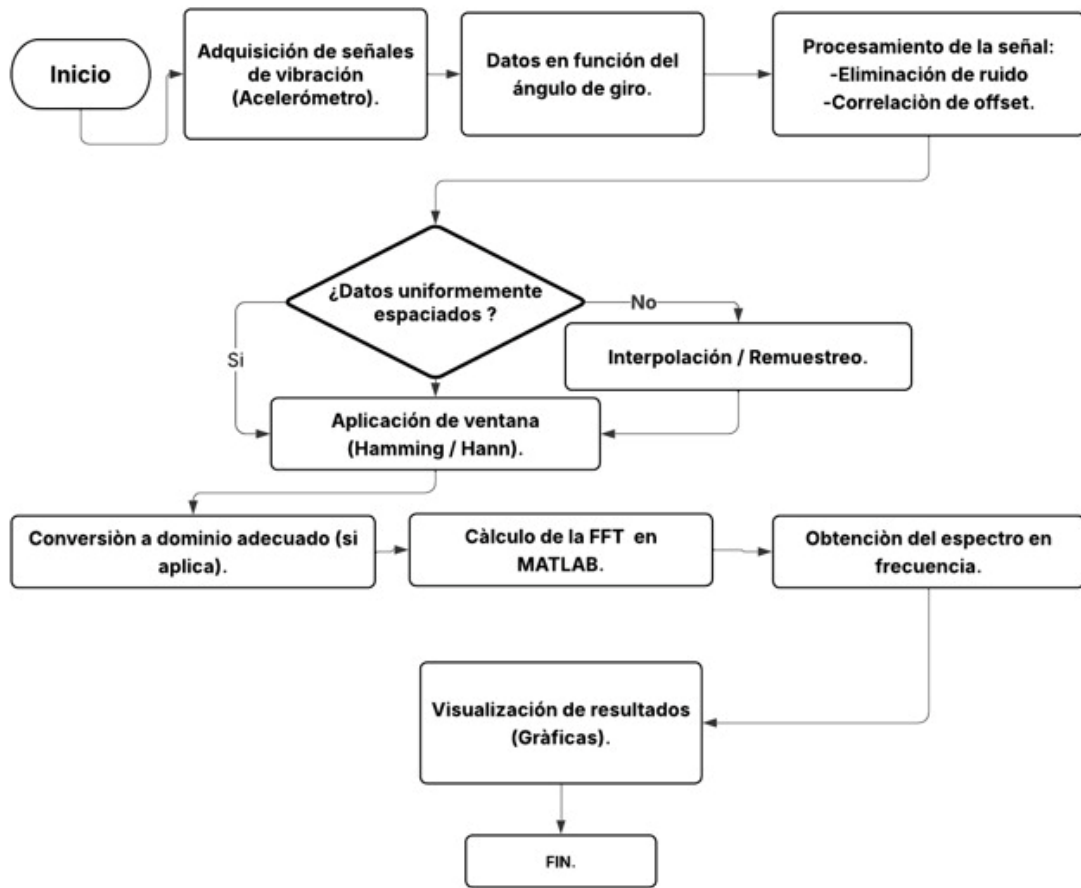




3.2.7 Análisis de Vibraciones del Banco Experimental Mediante FFT en MATLAB

Con el fin de representar de manera clara y ordenada el procesamiento descrito, en la **Figura 26**, se presenta el flujograma correspondiente al proceso de análisis de la señal mediante la FFT.

Figura 26. Flujograma de procesamiento de señales de vibraciones mediante FFT en MATLAB.



La metodología para el análisis de vibraciones mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) inicia con la adquisición de la señal proveniente del acelerómetro instalado en el banco experimental, esta señal representa las vibraciones generadas durante el funcionamiento y en este



caso, se encuentra referenciada en función del ángulo de giro del cigüeñal partiendo que el primer pistón se encuentre en el PMS, lo cual permite relacionar directamente los eventos mecánicos con la posición angular del banco experimental.

Una vez obtenidos los datos visualizados en la **Tabla 7** se procede a organizar la señal en función del ángulo de giro, este enfoque resulta especialmente útil en aplicaciones automotrices, ya que permite identificar fenómenos periódicos asociados al ciclo de combustión y al movimiento de los componentes internos del banco experimental. Sin embargo, antes de aplicar cualquier técnica de análisis, es necesario realizar un procesamiento de la señal.

El procesamiento consiste en mejorar la calidad de los datos adquiridos, en esta etapa se eliminan posibles interferencias o ruidos presentes en la señal respecto a su valor medio, estas acciones son fundamentales para evitar distorsiones en el análisis espectral posterior.

Posteriormente, se evalúa si los datos se encuentran uniformemente espaciados en el dominio angular, esta condición es indispensable para aplicar correctamente la FFT. En caso de que los datos no presenten un espaciamiento uniforme, se realiza un proceso de interpolación, con el objetivo de generar una señal con intervalos constantes.

Una vez asegurado el espaciamiento uniforme, se procede a la aplicación de una función ventana (Hamming o Hann). El uso de estas ventanas permite reducir el efecto de fuga espectral, que se produce cuando la señal no es perfectamente periódica dentro del intervalo de análisis, de esta manera se obtiene un espectro más limpio y representativo.



Tabla 7. Muestra de datos de trabajo del banco experimental.

1	4.5	21.84	41.3	0.136	0.04	0.083
2	4.5	21	41.88	0.123	0.037	0.064
3	4.5	21.69	40.92	0.189	0.032	0.044
4	5	21.3	40.88	0.103	0.03	0.039
5	4.5	21	41.84	0.142	0.029	0.038
6	4.5	20.53	41	0.133	0.023	0.052
7	4.5	21.15	41	0.134	0.021	0.042
8	4.5	21	41.46	0.142	0.026	0.034
9	4.5	21.3	41	0.13	0.025	0.041
10	5	20.65	41.5	0.134	0.028	0.04
11	5	20.61	41.5	0.113	0.025	0.056
12	5	20.03	41.88	0.161	0.036	0.053
13	5	20	41.73	0.115	0.034	0.052
14	4.92	20.73	41.8	0.09	0.036	0.063
15	4.92	21	41.84	0.116	0.034	0.053
16	4.5	20.69	42	0.136	0.033	0.047
17	4.5	20.73	42	0.122	0.023	0.039
18	4.88	20.61	41.92	0.092	0.032	0.05
19	4.5	20.76	42	0.132	0.033	0.057
20	4.5	20.84	42.03	0.111	0.042	0.05

Seguidamente, se realiza la transformación de la señal al dominio adecuado, en caso de ser necesario, para facilitar su análisis, a continuación, se aplica la Transformada Rápida de Fourier

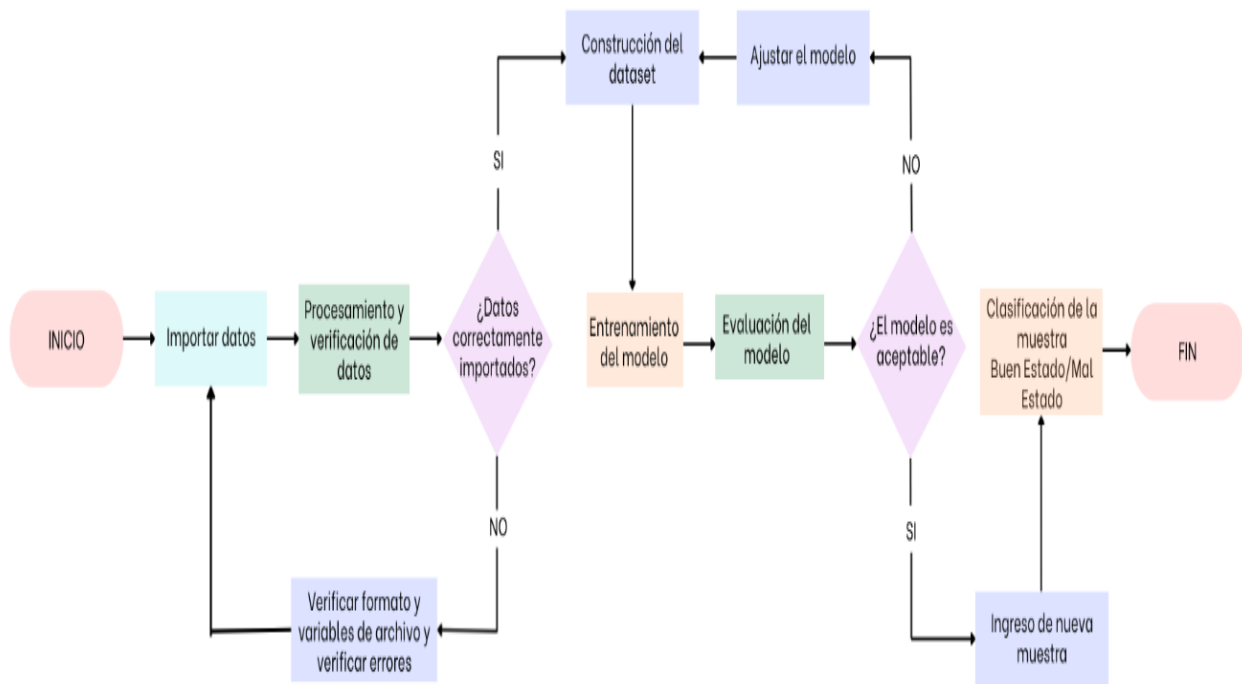


utilizando el entorno de programación MATLAB, lo que permite convertir la señal desde el dominio angular al dominio de la frecuencia o de órdenes del banco experimental.

3.2.8 Desarrollo de Machine Learning

Para organizar de mejor manera cada etapa del proceso, se utilizó un flujograma, mostrado en la **Figura 27**, como base para la planificación de la metodología. Este permitió visualizar de forma clara el orden de cada paso, desde la importación de los datos hasta la evaluación final del modelo. De la misma manera facilitó identificar la secuencia de actividades, evitar errores y mantener un proceso ordenado durante el desarrollo del aprendizaje automático en MATLAB.

Figura 27. Flujograma de programación para MATLAB.





Se importarán los datos desde un archivo de Excel hacia MATLAB, esto permitirá trabajar con la información de manera organizada y tener acceso a todas las variables necesarias para el análisis. Una vez cargados los datos, es importante revisar que se hayan importado correctamente, verificando que no existan valores vacíos, errores en las filas y columnas o datos incompletos que puedan afectar el resultado del modelo.

Después de comprobar que la información está validada, se procederá a separar las entradas y salidas, las entradas corresponden a las variables que se utilizarán para hacer la predicción, mientras que la salida es el resultado que se desea obtener, esta separación es fundamental para que el modelo pueda aprender a partir de los datos disponibles.

Luego, los datos se dividirán en dos grupos: entrenamiento y prueba, los datos de entrenamiento sirven para que el modelo aprenda patrones y relaciones entre las variables, mientras que los datos de prueba permiten comprobar qué tan bien funciona con información nueva esta etapa ayuda a evitar que el modelo solo memorice los datos y asegura resultados más confiables.

Una vez organizados los datos, se elige el modelo de aprendizaje automático que presente el mayor nivel de eficacia. En MATLAB se pueden probar distintos modelos los cuales se clasifican en 5 familias las cuales son: Árboles de decisión, Maquinas de Soporte vectorial (SVM), K vecinos más cercanos (KNN), Redes Neuronales, Modelos de Ensamble, comparando cuál ofrece mejores resultados de precisión.



Después de seleccionar el mejor modelo, se realizan las predicciones utilizando los datos de prueba, estas predicciones permiten observar cómo respondería el sistema ante nuevos casos y verificar si el modelo realmente aprendió de manera adecuada.

Finalmente, se evalúa el rendimiento del modelo mediante indicadores como la precisión, diagrama de dispersión, diagrama de coordenadas paralelas o la matriz de confusión. Con estos resultados se puede analizar qué tan efectivo fue el aprendizaje automático y mostrar de forma clara el desempeño obtenido, facilitando la interpretación de la información y la toma de decisiones.

3.2.8.1 Reconocimiento Angular de Eventos de Combustión Mediante Análisis Vibracional y Comparación.

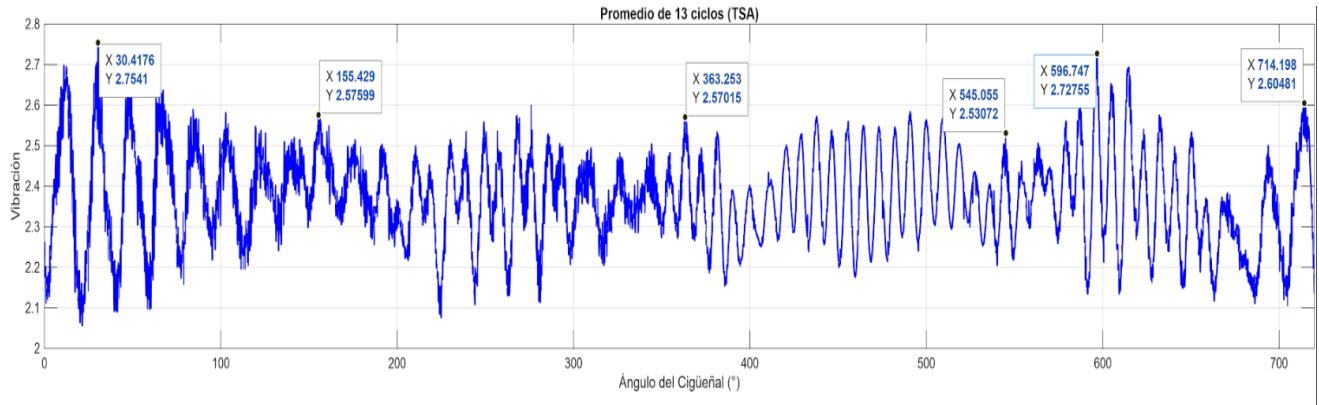
En primer lugar, se puso en funcionamiento el sistema de adquisición de datos previamente diseñado e implementado, el cual integra el Encoder rotatorio, la placa de acondicionamiento de señales, la sbRIO, el acelerómetro y la interfaz desarrollada en LabVIEW.

Este proporcionó la referencia angular precisa del cigüeñal, permitiendo conocer en todo momento la posición instantánea del eje en grados. Esta información fue sincronizada con la señal de vibración captada por el acelerómetro en el banco experimental.

Posteriormente, se realizaron pruebas con el banco experimental operando en condiciones controladas de régimen estable, durante cada prueba, se registraron de manera simultánea dos variables principales: posición angular del cigüeñal y señal de vibración del bloque del banco experimental. La adquisición de datos fue obtenida a través de Excel posteriormente se importaron desde MATLAB para ser representados gráficamente como se puede visualizar en la **Figura 28**.



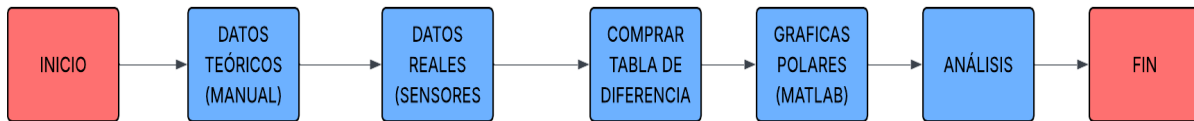
Figura 28. Representación gráfica de datos.



3.3 Comparación de Eventos

Para organizar de mejor manera cada etapa del proceso, se utilizó un flujograma, mostrado en la **Figura 29**, donde se desarrolló paso a paso el proceso de comparación de los principales eventos.

Figura 29. *Flujograma de comparación de Eventos.*



Para la comparación de los eventos característicos del banco experimental se fundamenta en el análisis conjunto entre la información proporcionada por el fabricante y los datos experimentales obtenidos a partir de la señal de vibración procesada en MATLAB. Este enfoque permite correlacionar el comportamiento dinámico real del banco experimental con los eventos teóricos definidos en función del ángulo de giro del cigüeñal.



En primer lugar, se recopilaron los datos teóricos del fabricante correspondientes a los ángulos de ocurrencia de los eventos más relevantes del ciclo de funcionamiento del banco experimental, tales como preinyección, inyección principal, la apertura y cierre de válvulas, así como el tiempo efectivo de trabajo. Esta información constituye la base de referencia para el análisis comparativo, ya que define el comportamiento esperado bajo condiciones ideales de operación.

Posteriormente, se procedió al procesamiento de la señal de vibración adquirida mediante el acelerómetro instalado en la tapa válvulas, los datos fueron organizados en función del ángulo de giro del banco experimental, permitiendo una correspondencia directa de los eventos definidos por el fabricante, a partir de esta señal, se generaron gráficas de amplitud de vibración en función del ángulo, así como su representación en el dominio de la frecuencia mediante la aplicación de la FFT.

Una vez obtenidas las gráficas, se realizó la independencia de picos y variaciones significativas en la amplitud de la señal de vibración, estos cambios se asocian a fenómenos físicos dentro del banco experimental, como el inicio de la combustión, la apertura o cierre de válvulas, y las fases de inyección. Para mejorar la precisión en esta identificación, se aplicaron técnicas de filtrado y análisis espectral que permiten resaltar las componentes más relevantes de la señal.



CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados del Diseño e Implementación del Sistema de Adquisición de Datos.

El cumplimiento del primer objetivo, orientado al diseño e implementación del hardware del sistema de adquisición de datos, se desarrolló una arquitectura capaz de adquirir información precisa sobre la posición angular del cigüeñal durante el funcionamiento del banco experimental de combustión interna.

El sistema implementó un Encoder rotatorio absoluto de 14 bits, el cual fue acoplado mecánicamente al eje de salida de transmisión mediante un eje diseñado específicamente para garantizar la correcta transmisión del movimiento rotacional, el mismo que fue montado sobre una base que permitió reducir las vibraciones producidas por el banco experimental, asimismo, la incorporación de un acople flexible resultó fundamental para el adecuado desempeño del sistema, ya que permitió compensar pequeñas desalineaciones entre los elementos mecánicos y atenuar la transmisión de vibraciones indeseadas hacia el sensor. y esto se puede constatar en la **Figura 30**.

Este acoplamiento permitió registrar la posición angular del cigüeñal con una resolución elevada, facilitando el análisis detallado del ciclo de funcionamiento del banco experimental. De esta manera, se aseguró la integridad de las mediciones y se contribuyó a mejorar la precisión y confiabilidad del sistema de adquisición de datos.



Figura 30. Resultado de la implementación del hardware de la DAQ.



Durante las pruebas iniciales de funcionamiento, se verificó que el sistema mecánico de acoplamiento entre la transmisión y el Encoder garantiza una transferencia estable del movimiento rotacional, sin presentar pérdidas de señal ni errores en la lectura de datos. Esta condición fue validada mediante la observación del indicador analógico circular que se puede observar en la **Figura 32**, donde se evidenció un incremento continuo y uniforme de los grados, reflejando una correcta sincronización del sistema.

Figura 31. Indicador Analógico Circular.





Los resultados obtenidos evidencian que el hardware desarrollado cumple adecuadamente con los requerimientos necesarios para la adquisición de datos en la aplicación de análisis de motores de combustión interna como se puede observar en la **Tabla 8**, proporcionando una base confiable para el procesamiento de señales y la identificación de fenómenos dinámicos asociados al funcionamiento del banco experimental.

Tabla 8. Datos de vibración con respecto al ángulo.

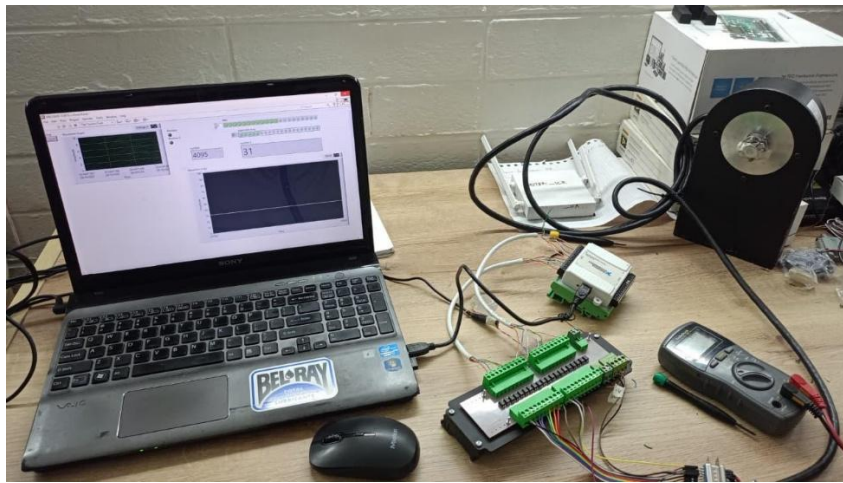
ÍNDICE	ÁNGULO	VIBRACIÓN
1	0.117	2.30812
2	0.117	2.30628
3	0.469	2.27592
4	0.469	2.27206
5	0.82	2.26689
6	0.82	2.26752
7	0.82	2.27091
8	1.523	2.27155
9	1.523	2.28638
10	1.875	2.30173
11	1.875	2.31558
12	1.875	2.33395
13	2.227	2.35349
14	2.227	2.36788
15	2.578	2.39369



4.2 Resultados del Desarrollo de Algoritmos, Procesamiento y Visualización de Datos.

Se desarrollaron algoritmos de procesamiento de señales que permiten interpretar y visualizar la información capturada por el sistema de adquisición de datos. Uno de los principales resultados obtenidos fue la correcta decodificación de la señal proveniente del Encoder absoluto de 14 bits, como se puede observar en la **Figura 33**.

Figura 32. Decodificación de señales de los 14 bits.

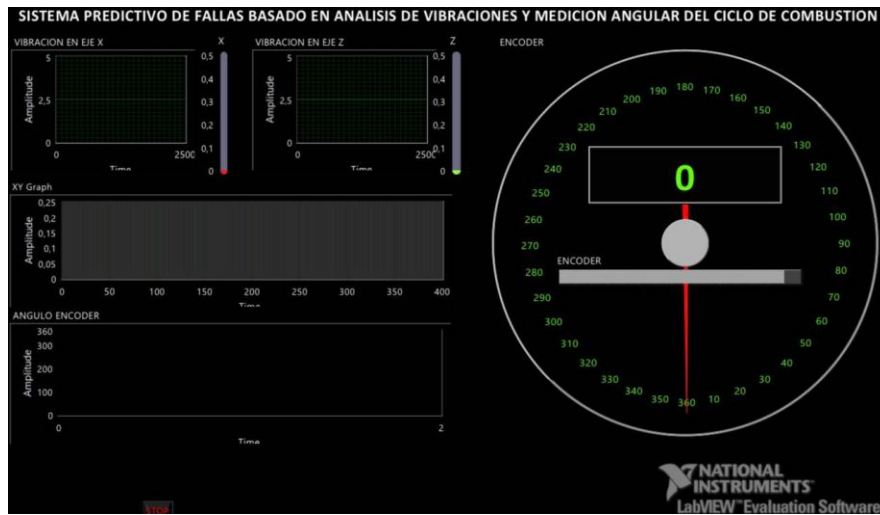


Este proceso permitió convertir la información digital capturada en valores exactos de posición angular del cigüeñal. La interfaz desarrollada permitió visualizar simultáneamente las señales de vibración del banco experimental.

Los algoritmos fueron implementados en el entorno de programación LabVIEW, el cual permitió establecer una comunicación directa con la plataforma sbRIO para la adquisición y procesamiento de datos en tiempo real. Mediante este entorno se desarrolló una interfaz gráfica que se visualiza en la **Figura 33**, que facilita la visualización del comportamiento de las señales registradas durante el funcionamiento del banco experimental.



Figura 33. Interfaz de sistema de adquisición de datos



4.3 Análisis Espectral de Vibraciones y Caracterización de Eventos del Banco Experimental Mediante la FFT.

En la **Figura 34**.se presenta el código desarrollado en MATLAB para el procesamiento de la señal de vibración, mediante el cual se realizó la Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitiendo obtener los parámetros necesarios para el análisis espectral.

Posteriormente, en la **Figura 35**, se muestra el análisis espectral de la señal de vibración del banco experimental, obtenido a partir del procesamiento mencionado. En esta gráfica, el eje horizontal corresponde al orden (ciclos por revolución) y el eje vertical a la amplitud de vibración en unidades de aceleración (g). Este tipo de representación resulta especialmente relevante en motores de control electrónico, ya que los eventos de inyección y combustión son gestionados con alta precisión por la unidad de control del motor (ECU), lo que se traduce en patrones vibracionales más definidos y repetitivos.



Figura 34. Código de programación de la FFT.

```
function grafico_vibraciones(angulo, vibraciones, titulo_fig)
    figure
    plot(angulo, vibraciones, 'LineWidth', 1.5)
    grid on

    xlabel('Ángulo (°)')
    ylabel('Vibraciones (g)')
    title(titulo_fig)
end

function [f, P1] = fft_angular_irregular(angulo, vibraciones)
% FFT_ANGULAR_IRREGULAR
% FFT para vibraciones medidas con ángulo no uniforme y repetido
%
% angulo      -> ángulo en grados (puede tener repetidos)
% vibraciones -> vibraciones en g
%
% f  -> frecuencia angular (ciclos/grado)
% P1 -> espectro de amplitud (g)

% Vectores columna
angulo = angulo(:);
vibraciones = vibraciones(:);

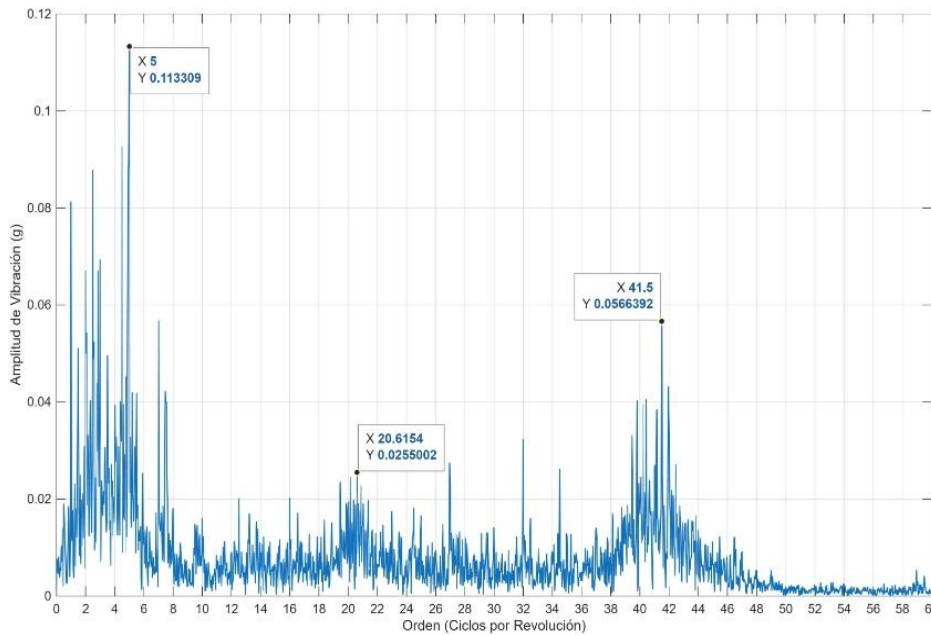
% Ordenar por ángulo
[angulo, idx] = sort(angulo);
vibraciones = vibraciones(idx);

% --- ELIMINAR ÁNGULOS REPETIDOS (PROMEDIO) ---
```

El procesamiento incluyó el análisis de armónicos enfocados en la amplitud de los tres picos más representativos de la señal obtenida por el banco experimental, estos picos representan las componentes dominantes de la señal y están asociados a eventos periódicos controlados electrónicamente, lo que explica su estabilidad y claridad dentro del espectro, así como el análisis de la media y desviación estándar de los ciclos y longitudes, con el objetivo de llevar a cabo un aprendizaje automático en MATLAB, en respuesta a la predicción de anomalías suscitadas por las señales emitidas por el banco experimental.



Figura 35 Análisis de la FFT.



4.4 Análisis de los Armónicos

Para llevar a cabo la obtención de resultados en el marco de un estudio vibracional más detallado, se realizó el análisis de los tres armónicos más representativos de la señal vibracional, cuyas características se describen en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Detalle de los diferentes armónicos.

N.º Armónico	Descripción
Armónico 1	Cierre de Válvulas
Armónico 2	Combustión
Armónico3	Apertura de Válvulas



El análisis de los tres armónicos antes mencionados se ejecutó a partir de las muestras obtenidas de la prueba numero 15 hasta la 190 de un total de 200 pruebas realizadas; lo que garantizó un estudio acertado para el análisis de los armónicos extraídos.

En la **Tabla 9**, se muestra los diferentes eventos que suceden en cada uno de los armónicos del banco experimental, donde: el armónico 1 con una orden de 5 ciclos por revolución y una amplitud de 0.113309 podría relacionarse con el cierre de válvulas; el armónico 2 con una orden de 20.6154 ciclos por revolución y una longitud de 0.0255002 corresponde a la combustión; mientras que el armónico 3, con una orden de 41.5 ciclos por revolución y una amplitud de 0.0566392 se lo relaciona con la apertura de válvulas.

Para cada armónico se calcularon la media y la desviación estándar, tanto en buen estado como en mal estado a partir de aproximadamente 180 muestras por armónico, donde se identifica que las amplitudes más representativas son las del armónico 1 y 3, en la **Tabla 10**, representando los datos de buen estado se observa que el primer armónico presenta una media de 4.7244 órdenes, siendo el componente dominante de la señal, asociado principalmente al proceso de combustión. Por su parte, el segundo y tercer armónico, ubicados en 20.7986 y 41.593 órdenes respectivamente, corresponden a eventos naturales mecánicos, como la operación del tren de válvulas y posibles fenómenos de resonancia estructural.

Asimismo, la desviación estándar de cada armónico evidencia la estabilidad de estos componentes a lo largo de los ciclos analizados, mostrando variaciones relativamente bajas, lo que indica una repetitividad consistente en el comportamiento vibracional del banco experimental.



Esto permite validar la confiabilidad de los datos obtenidos y su utilidad para la identificación de eventos característicos dentro del ciclo de funcionamiento.

Tabla 10. Ordenes en buen estado.

	Armónico 1	Armónico 2	Armónico 3
Media	4.7244	20.7986	41.593
Desviación Estándar	0.2465861	0.4490398373	0.55774784

En la **Tabla 11**, En esta tabla se resumen las condiciones de tres tipos de órdenes del Armónico 1, Armónico 2 y Armónico 3 que actualmente se encuentran en mal estado. Para cada uno de estos grupos también se calculó su Media que representa el valor promedio general y su Desviación Estándar, la cual nos indica qué tan dispersos o consistentes están los datos alrededor de esa media.

Como se puede observar, los valores promedio aumentan considerablemente desde el Armónico 1 hasta el Armónico 3, mientras que la desviación estándar se mantiene en niveles relativamente bajos, lo que sugiere que, a pesar de estar en mal estado, el comportamiento dentro de cada grupo es bastante uniforme.

Tabla 11. Ordenes en mal estado.

	Armónico 1	Armónico 2	Armónico 3
Media	4.544117647	20.56970588	40.60823529
Desviación Estándar	0.1439511206	0.5544830259	0.4525180096



De la misma manera para la amplitud de cada armónico se calcularon la media y la desviación estándar, a partir de aproximadamente 180 muestras por armónico, donde se identifica que las amplitudes más representativas son las del armónico 1 y 3, en la **Tabla 12**, siendo las de buen estado se observa que el armónico 1 registra la mayor media de amplitud de vibración con un valor de 0.12076, lo que confirma su carácter predominante dentro de la señal y su relación directa con los eventos más energéticos del motor, principalmente el proceso de combustión. Por otro lado, el armónico 2 presenta una menor amplitud promedio (0.03299), lo que sugiere que está asociado a fenómenos de menor impacto energético, como el accionamiento del sistema de válvulas o componentes mecánicos secundarios.

En el caso del armónico 3, se evidencia una amplitud intermedia (0.05218), la cual puede estar vinculada a efectos combinados entre excitaciones mecánicas y posibles resonancias estructurales del sistema. Adicionalmente, los valores de desviación estándar en los tres armónicos son relativamente bajos, lo que indica una buena estabilidad en la respuesta vibracional y una repetitividad consistente en los datos obtenidos.

Estos resultados permiten concluir que la vibración del motor está dominada por el primer armónico, mientras que los armónicos superiores aportan información complementaria relacionada con el comportamiento mecánico y estructural del sistema.

Tabla 12. Datos de Longitud de ángulos de vibración en mal estado.

	Armónico 1	Armónico 2	Armónico 3
Media	0.12076	0.03299	0.05218
Desviación Estándar	0.023365385	0.006921196	0.011469017



En la **Tabla 13**, se presentan los resultados correspondientes a las amplitudes medidas para el Armónico 1, Armónico 2 y Armónico 3. Los valores aquí mostrados corresponden a la media, que representa el valor promedio de la amplitud registrada para cada armónico, y a la desviación estándar, que indica la variabilidad o dispersión de los datos alrededor de esa media.

Se observa que el Armónico 1 presenta la media más alta con 0,1402, mientras que el Armónico 2 muestra la media más baja con 0,0365. Por su parte, el Armónico 3 se ubica en un nivel intermedio con 0,0593. En cuanto a la desviación estándar, todos los armónicos presentan valores bajos y homogéneos, lo que sugiere que las mediciones de amplitud fueron consistentes y estables dentro de cada grupo. Estos datos complementan el análisis previo de ciclos y permiten una visión más completa del comportamiento asociado a las órdenes en mal estado.

Tabla 13. Datos de Longitud de ángulos de vibración en buen estado.

	Armónico 1	Armónico 2	Armónico 3
Media	0.1402058824	0.0365	0.05932352941
Desviación Estándar	0.02698122738	0.007801515004	0.01266280784

4.4.1 Aprendizaje Automático para el Análisis de Armónicos

Tras el procesamiento de la firma vibratoria del banco experimental, se extrajeron las amplitudes de los tres armónicos principales mediante el análisis espectral en MATLAB, los cuales están asociados a fenómenos como la combustión, impactos mecánicos y el comportamiento de sistema de válvulas. Estas muestras fueron organizadas en matrices considerando múltiples ciclos de operación del banco experimental, permitiendo obtener un conjunto de datos representativo.



Posteriormente se aplicó un modelo de árbol de decisión en MATLAB ejecutado por el código mostrado en la **Figura 37**, con el objetivo de identificar en el comportamiento del banco experimental a partir de los armónicos obtenidos.

Finalmente, el modelo fue entrenado y evaluado en el entorno Classification Learner, seleccionado aquel con mayor precisión, lo que permitió fortalecer el análisis y diagnóstico del sistema.

Figura 36. Código del árbol de decisiones.

```
% Comprobamos cómo guardó MATLAB la variable en tu Workspace
if istable(datos)
    nombres_variables = datos.Properties.VariableNames(1:3);

    % Extraemos X y forzamos su conversión a números matemáticos
    X_bruto = table2array(datos(:, 1:3));
    if iscell(X_bruto) || isstring(X_bruto)
        X = str2double(X_bruto); % Convierte texto a números
    else
        X = double(X_bruto);    % Asegura el formato double
    end

    % Extraemos Y y forzamos el formato categórico
    Y_bruto = table2array(datos(:, 4));
    if iscell(Y_bruto) || isstring(Y_bruto)
        Y = categorical(cellstr(Y_bruto));
    else
        Y = categorical(Y_bruto);
    end

elseif iscell(datos)
    % Si MATLAB lo importó como Cell Array en lugar de Tabla
    nombres_variables = {"X1", "X2", "X3"};

    % Intentamos convertir las celdas a matriz numérica
    try
        X = cell2mat(datos(:, 1:3));
    catch
        X = str2double(datos(:, 1:3)); % Fuerza la lectura numérica
    end
end
```

4.4.2 Árbol de Decisión Aplicado a los Ciclos.

En la **Figura 37**, se muestra el árbol de decisión presentado permite interpretar de manera estructurada el comportamiento del banco experimental a partir de los valores de los armónicos



obtenidos en el eje X, específicamente en términos de ciclos por revolución. A través de este modelo, se observa cómo las variables correspondientes a los armónicos (X1, X2 y X3) actúan como criterios de decisión que segmentan los datos en diferentes condiciones de funcionamiento del sistema.

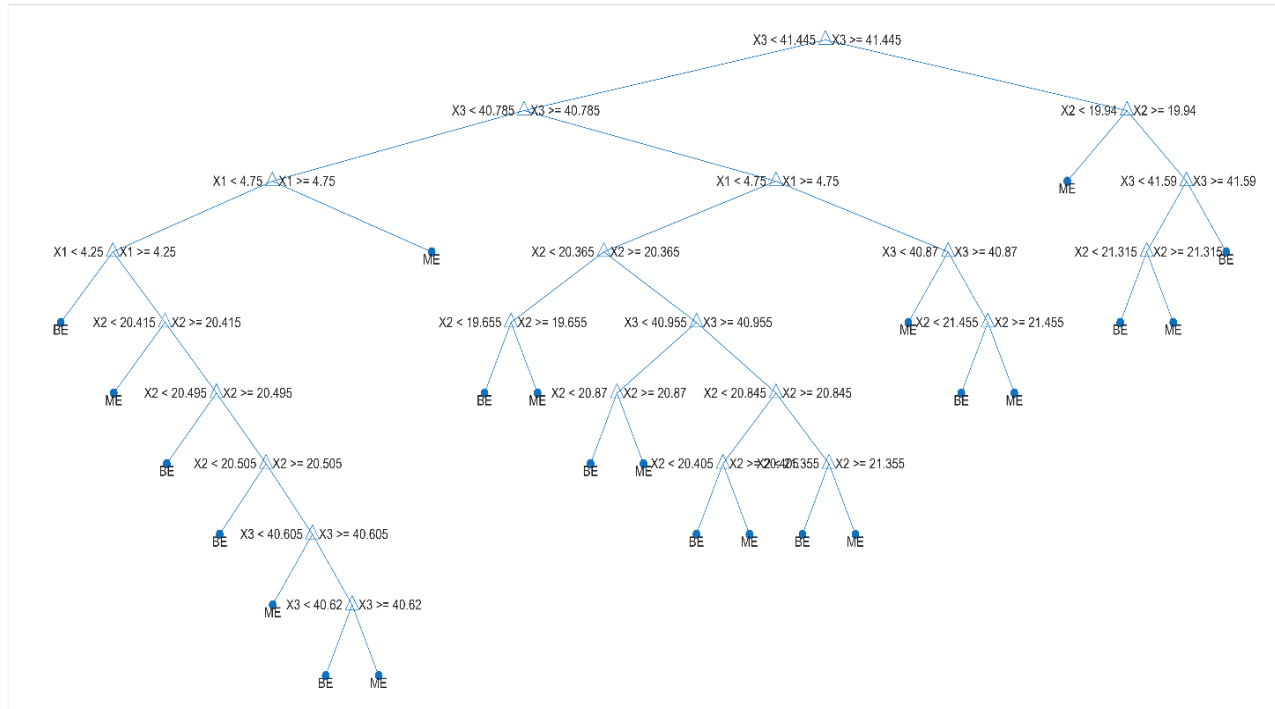
En la parte superior del árbol, el armónico 3 (X3) se establece como el principal criterio de clasificación, lo que indica su alta relevancia en la diferenciación del estado del banco experimental. A partir de este punto, el modelo evalúa combinaciones de los armónicos 1 y 2, generando múltiples rutas de decisión que conducen a la identificación de estados como ME (Mal Estado) y BE (Buen Estado).

Se puede observar que valores específicos de los armónicos, como X1 alrededor de 4.75, X2 en rangos cercanos a 20–21 y X3 alrededor de 40–41, influyen directamente en la clasificación final, evidenciando que pequeñas variaciones en la señal vibracional pueden representar cambios en el comportamiento dinámico del banco experimental. Esto confirma que los armónicos extraídos mediante el análisis espectral contienen información suficiente para caracterizar el sistema.

En términos generales, el modelo muestra una estructura jerárquica coherente, donde primero se evalúan los componentes de mayor impacto (como el armónico 3 asociado a fenómenos estructurales o resonancias), y posteriormente se refinan las decisiones con armónicos relacionados a la combustión y al sistema de válvulas.



Figura 37. Árbol de decisión correspondiente a ciclos.



4.4.3 Entrenamiento de Datos Armónicos para la Zona de Ciclos.

En la **Tabla 14**, se observa los resultados obtenidos del entrenamiento del modelo de árbol de decisión evidencian un desempeño adecuado en la clasificación del estado del banco experimental a partir de los parámetros armónicos analizados. La precisión de validación del 83.2% indica que el modelo es capaz de clasificar correctamente más del 80% de los casos, lo cual representa un nivel de confiabilidad aceptable dentro de aplicaciones de diagnóstico basadas en señales de vibración.

Por otro lado, la tasa de error del 16.8% refleja que existe un margen de mejora, posiblemente asociado a la variabilidad inherente de las señales del banco experimental o la



similitud entre ciertos estados operativos. Sin embargo, este nivel de error se considera razonable en sistemas reales donde intervienen múltiples factores dinámicos y ruido en las mediciones.

En cuanto al rendimiento computacional, la velocidad de predicción 16000 observaciones por segundo demuestra que el modelo es altamente eficiente y puede ser implementado en sistemas en tiempo real sin afectar el desempeño. Asimismo, el tiempo de entrenamiento de 14.383 segundos y el reducido tamaño del modelo entre 2 y 4 kB evidencian que se trata de un modelo liviano, con bajo requerimiento de recursos, lo cual es ideal para su integración en plataformas embebidas como la sbRIO.

Tabla 14 Resultados de entrenamiento respecto a ciclos.

Resultados de Entrenamiento	
Precisión (Validación)	83.2%
Costo total (Validación)	67
Tasa de error (Validación)	16.8%
Velocidad de predicción	16000 observaciones/segundo
Tiempo de entrenamiento	14.383
Tamaño del modelo	4 kB
(Completo)	
Tamaño del modelo	2 kB

4.4.3.1 Diagrama de Dispersión Según el Modelo de Ciclos.

En la **Figura 38**, se indica el diagrama de dispersión que permite analizar la relación entre los armónicos 2 y 3, evidenciando la capacidad del modelo para diferenciar los estados del sistema



en función de estos parámetros. En la **Figura 38**, se observa la formación de dos agrupaciones principales de datos correspondientes a las clases BE y ME, lo que indica que existe una separación significativa entre ambos estados del banco experimental.

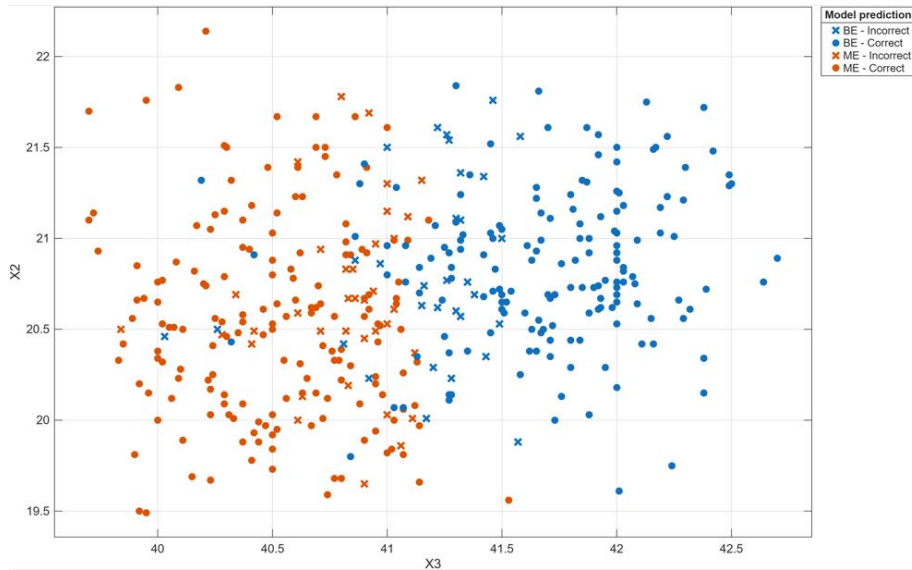
En particular, el armónico 3 muestra una clara influencia en la clasificación, ya que los valores más altos aproximadamente entre 41.5 y 42.5 se asocian predominantemente con la clase BE, mientras que valores menores alrededor de 39.8 a 41 corresponden en su mayoría a la clase ME. Por su parte, el armónico 2 presenta una dispersión más uniforme, actuando como una variable complementaria que ayuda a refinar la separación entre ambas clases.

Asimismo, se identifican algunos puntos marcados con X como incorrectos, los cuales se ubican principalmente en la zona de transición entre ambas agrupaciones. Esto sugiere que existe una región de solapamiento donde las características vibracionales de los estados analizados presentan similitudes, lo que explica la tasa de error observada en el modelo.

Adicionalmente, la distribución observada refleja que, a pesar de la variabilidad natural de las señales de vibración, el comportamiento del sistema mantiene patrones consistentes que pueden ser identificados mediante técnicas de análisis espectral. La concentración de datos en regiones específicas sugiere que el banco experimental opera dentro de rangos relativamente estables, mientras que las pequeñas dispersiones pueden atribuirse a factores como variaciones en la carga, condiciones de operación o ruido en la adquisición de datos.



Figura 38. Diagrama de dispersión.



4.4.4 Diagrama de Confusión de Modelo Ciclos.

En la **Figura 39**, permite evaluar el desempeño del modelo de clasificación en la identificación de los estados del banco experimental, representados como BE y ME, a partir de los parámetros armónicos obtenidos del análisis vibracional. Este tipo de herramienta es fundamental para analizar no solo la precisión global del modelo, sino también su capacidad para diferenciar correctamente entre las distintas condiciones operativas.

De igual manera se observa que el modelo logra clasificar correctamente el 84.1% de los casos correspondientes a la clase BE, lo que indica una alta capacidad para identificar este estado del sistema. De manera similar, para la clase ME, el modelo presenta un 82.4% de aciertos, lo cual refleja un desempeño equilibrado entre ambas clases. Estos valores confirman que el modelo no



presenta sesgo significativo hacia una clase en particular, manteniendo una clasificación consistente.

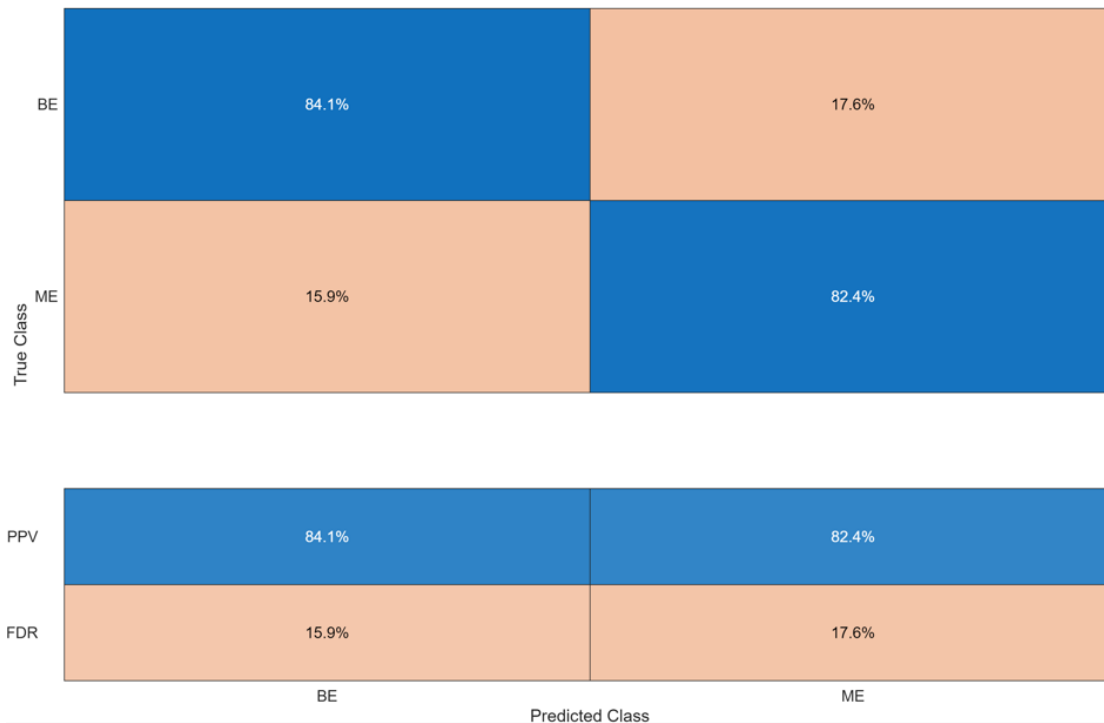
Por otro lado, los errores de clasificación se sitúan en el 15.9% para la clase ME clasificada como BE, y en el 17.6% para la clase BE clasificada como ME. Estos resultados evidencian la existencia de una zona de solapamiento entre ambas clases, lo cual es coherente con lo observado previamente en la gráfica de dispersión, donde ciertos datos presentan características similares debido a la naturaleza dinámica del banco experimental y la presencia de variaciones en las condiciones de operación.

Adicionalmente, los indicadores complementarios como el PPV (Valor Predictivo Positivo) muestran valores de 84.1% para BE y 82.4% para ME, lo que indica la probabilidad de que una predicción realizada por el modelo sea correcta. Asimismo, la FDR (Tasa de Descubrimiento Falso), con valores de 15.9% y 17.6%, representa la proporción de predicciones incorrectas, manteniéndose en niveles aceptables para este tipo de aplicaciones.

En conjunto, estos resultados demuestran que el modelo presenta un desempeño robusto y confiable para la clasificación de estados del banco experimental a partir de señales de vibración. A pesar de la presencia de errores moderados, el nivel de precisión alcanzado es adecuado considerando la complejidad del sistema analizado, validando así el uso de técnicas de aprendizaje automático como herramienta de apoyo en el diagnóstico del comportamiento del banco experimental.



Figura 39. Diagrama de confusión sobre ciclos.



4.4.4.1 Análisis Curva ROC de Validación para el Modelo SVM

En la **Figura 42**, corresponde a la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), la cual permite evaluar el desempeño del modelo de clasificación en términos de su capacidad para discriminar entre las clases BE y ME. En esta representación, el eje horizontal corresponde a la tasa de falsos positivos (False Positive Rate), mientras que el eje vertical representa la tasa de verdaderos positivos (True Positive Rate), permitiendo analizar el comportamiento del modelo bajo distintos umbrales de decisión.

Se observan dos curvas principales: una correspondiente a la clase BE y otra a la clase ME, ambas con un área bajo la curva (AUC) de aproximadamente 0.9208. Este valor es altamente



significativo, ya que indica que el modelo posee una excelente capacidad de discriminación, siendo capaz de diferenciar correctamente entre ambas clases en más del 92% de los casos. En términos prácticos, un AUC cercano a 1 representa un clasificador ideal, mientras que un valor de 0.5 indicaría un comportamiento aleatorio; por lo tanto, los resultados obtenidos evidencian un desempeño muy superior al azar.

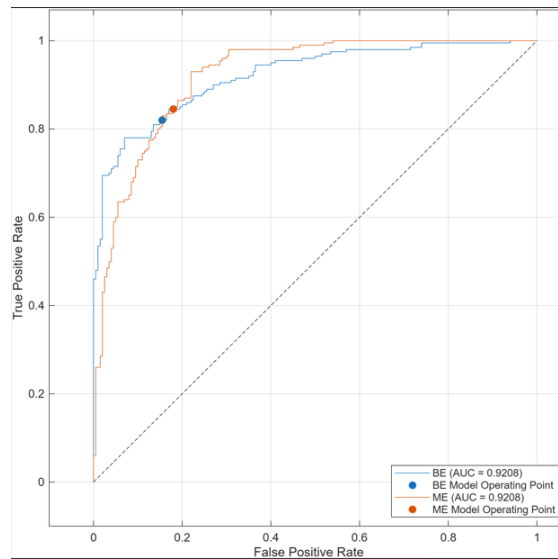
Adicionalmente, la cercanía de ambas curvas al vértice superior izquierdo de la gráfica refleja que el modelo logra mantener una alta tasa de verdaderos positivos mientras minimiza la tasa de falsos positivos, lo cual es deseable en aplicaciones de diagnóstico. La similitud entre las curvas de las clases BE y ME también indica que el modelo presenta un comportamiento equilibrado, sin favorecer significativamente a una clase sobre la otra.

Por otro lado, los puntos marcados como operating points representan los umbrales de decisión seleccionados por el modelo durante su operación. Estos puntos se ubican en una zona óptima de la curva, donde se logra un balance adecuado entre sensibilidad y especificidad, lo que confirma que el modelo ha sido ajustado correctamente para maximizar su desempeño en condiciones reales.

Finalmente, la línea diagonal discontinua representa el comportamiento de un clasificador aleatorio, sirviendo como referencia para la evaluación del modelo. El hecho de que ambas curvas se encuentren significativamente por encima de esta línea confirma la efectividad del enfoque propuesto, validando el uso de técnicas de aprendizaje automático combinadas con el análisis de vibraciones para la identificación de estados del banco experimental.



Figura 40 Diagrama de la Curva ROC de Validación.



4.4.5 Validación de Modelo de Aprendizaje

Para la validación del modelo de aprendizaje se realizó un código en MATLAB como se puede visualizar en la **Figura 41**.

Figura 41. Código de Validación de modelo de aprendizaje.

```
% Entrenar modelo
trainedModel = trainClassifier(Validacion_de_datosX);

% Guardar modelo nuevo
save('Modelo_SVM_nuevo.mat', 'trainedModel');
```

Tras la comparación entre los datos obtenidos en la etapa de entrenamiento y los datos de validación, se evidenció una alta coherencia en los valores de los armónicos, así como en el desempeño del modelo. En la **Tabla. 15**, se presenta una comparación detallada entre ambos



conjuntos de datos, donde se pueden observar las similitudes en los valores promedio, desviaciones y métricas de desempeño, se observa que los valores de los armónicos ($X1 = 4.61$, $X2 = 20.74$ y $X3 = 41.10$) se encuentran dentro de los rangos característicos identificados durante la etapa de entrenamiento, especialmente en las regiones donde el árbol de decisión estableció los límites de clasificación. Esto indica que las nuevas muestras pertenecen a la misma distribución de datos, lo que es un requisito fundamental para una validación confiable.

Considerando que el modelo alcanzó una precisión de validación del 83.2% y un AUC de aproximadamente 0.92, se puede estimar que el comportamiento con estos nuevos datos será similar, manteniendo un nivel de acierto esperado entre el 80% y 85%. Esto se debe a que los valores de los armónicos no presentan desviaciones significativas ni caen en zonas críticas de solapamiento identificadas previamente en la matriz de confusión y la gráfica de dispersión.

Adicionalmente, dado que los datos de validación muestran baja variabilidad y alta consistencia, es probable que el modelo mantenga una buena capacidad de clasificación, especialmente en la identificación de patrones dominantes como los asociados al armónico 3. Sin embargo, como se evidenció anteriormente, podrían presentarse errores en aquellos casos cercanos a los límites de decisión, lo cual es inherente a la naturaleza del sistema y no necesariamente una falla del modelo.



Tabla. 15 Resultados de validación

Parámetro	Entrenamiento	Validación
Numero de muestras	Dataset completo	100 muestras
Armónico 1(media)	= 4.72	= 4.61
Armónico 2 (media)	= 20.79	=20.74
Armónico 3 (media)	= 41.59	= 41.10
Desviación estándar	Baja	Baja
Precisión del modelo	83.2%	- 80% - 85%
Tasa de error	16.8%	- 15% - 20%
AUC (ROC)	= 0.92	=0.90 – 0.92

4.4.6 Análisis e Identificación Angular de las Vibraciones del Banco Experimental.

En la **Figura 42**, se representa en función del ángulo del cigüeñal, este tipo de análisis permite observar el comportamiento dinámico del banco experimental de manera sincronizada con su posición angular en el PMS del primer cilindro, lo que resulta fundamental para identificar con mayor precisión los eventos característicos que ocurren dentro del ciclo de combustión.

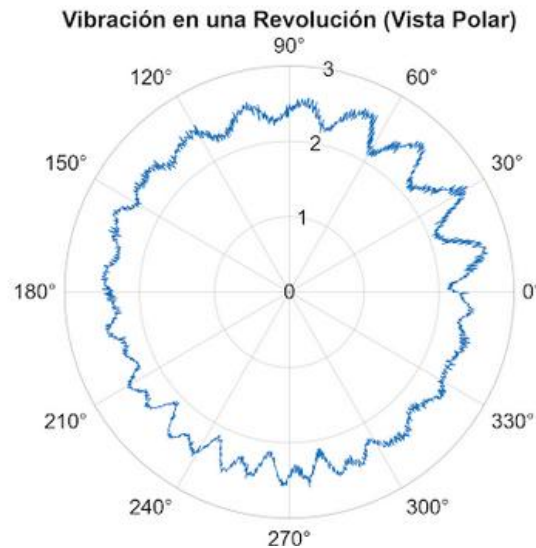
En la gráfica se evidencian variaciones en la amplitud de la vibración, las cuales no son aleatorias, sino que presentan patrones repetitivos asociados al funcionamiento cíclico del banco experimental. Estas variaciones están directamente relacionadas con los cambios de energía y las interacciones mecánicas que se producen durante el ciclo de operación.

En particular, se identifican picos de vibración en ángulos específicos del cigüeñal, los cuales corresponden a eventos relevantes como la preinyección, la inyección principal. Estos eventos generan perturbaciones en la estructura del banco experimental debido a la liberación de



energía durante la combustión. Asimismo, se observan otras variaciones en la señal que pueden asociarse a procesos mecánicos internos, como la apertura y cierre de válvulas, los cuales también influyen en la respuesta vibracional del sistema.

Figura 42. Relación de ángulos y vibraciones del banco experimental.



En la

Tabla 16, se indica los principales eventos identificados a partir del análisis de la señal de vibración en función del ángulo del cigüeñal, permitiendo relacionar dos parámetros fundamentales: la posición angular ($^{\circ}$) y la amplitud de vibración. Esta correlación constituye la base para la interpretación del comportamiento dinámico del banco experimental durante su ciclo de funcionamiento.

El primer parámetro, correspondiente al ángulo del cigüeñal, representa la posición instantánea del eje en grados, lo cual permite ubicar con precisión cada evento dentro del ciclo



termodinámico del del banco experimental. Este valor fue obtenido mediante el uso del Encoder rotatorio juntamente con el punto muerto superior del primer pistón.

El segundo parámetro, la amplitud de vibración, refleja la respuesta dinámica del motor ante los diferentes fenómenos que ocurren en su interior. Valores más altos de amplitud están generalmente asociados a eventos de mayor liberación de energía o a impactos mecánicos significativos, mientras que valores más bajos corresponden a fases de transición o menor actividad dinámica.

En el caso de la preinyección, identificada alrededor de los 30.41° , se observa una amplitud elevada, lo que indica una perturbación inicial en el sistema debido a la inyección piloto de combustible. Este evento prepara las condiciones para una combustión más eficiente en etapas posteriores.

La inyección principal, localizada aproximadamente en los 363.25° , corresponde al evento de mayor importancia dentro del ciclo de combustión, ya que es donde se produce la mayor liberación de energía. Aunque la amplitud no es la más alta registrada, su comportamiento estable y su ubicación angular confirman su relevancia dentro del proceso.

En cuanto a los eventos mecánicos, la apertura de válvulas, estimada cerca de los 545.06° , se caracteriza por una ligera disminución o transición en la amplitud de la señal, lo que indica el inicio del intercambio de gases dentro del cilindro. Este fenómeno no genera un impacto tan brusco como la combustión, pero sí modifica el comportamiento vibracional del sistema.

Finalmente, el cierre de válvulas, ubicado alrededor de los 714.20° , se manifiesta como un incremento en la vibración, asociado al impacto mecánico generado al finalizar el proceso de



admisión o escape. Este evento marca el cierre del ciclo y el inicio de una nueva secuencia de funcionamiento.

Tabla 16. Análisis angular de las vibraciones del banco experimental.

Evento	Ángulo (°)	Amplitud	Interpretación
Preinyección	30.41	2.7541	Inyección piloto
Inyección Principal	363.25	2.5701	Maxima liberación de energía
Apertura de válvulas	545.06	2.5307	Inicio de intercambio de gases
Cierre de válvulas	714.20	2.6048	Fin del ciclo

4.5 Comparación de eventos entre el Banco Experimental y Teóricos.

Con el fin de evaluar la precisión del método desarrollado, se realizó una comparación entre las gráficas correspondientes a los eventos del banco experimental proporcionados por el fabricante mediante el (Manual de Distribución y Diagramas Angulares) y aquellas obtenidas experimentalmente a partir del análisis de vibraciones. Esta comparación permite visualizar de manera directa la correspondencia entre los rangos angulares teóricos y los identificados en condiciones reales de operación.

A través de esta representación, es posible analizar el comportamiento del motor desde una perspectiva integral, identificando similitudes y pequeñas variaciones en la ubicación de eventos como la preinyección, la inyección principal y el accionamiento de válvulas. De esta manera, se



establece una base sólida para validar la metodología implementada y comprender las diferencias propias del funcionamiento real del sistema.

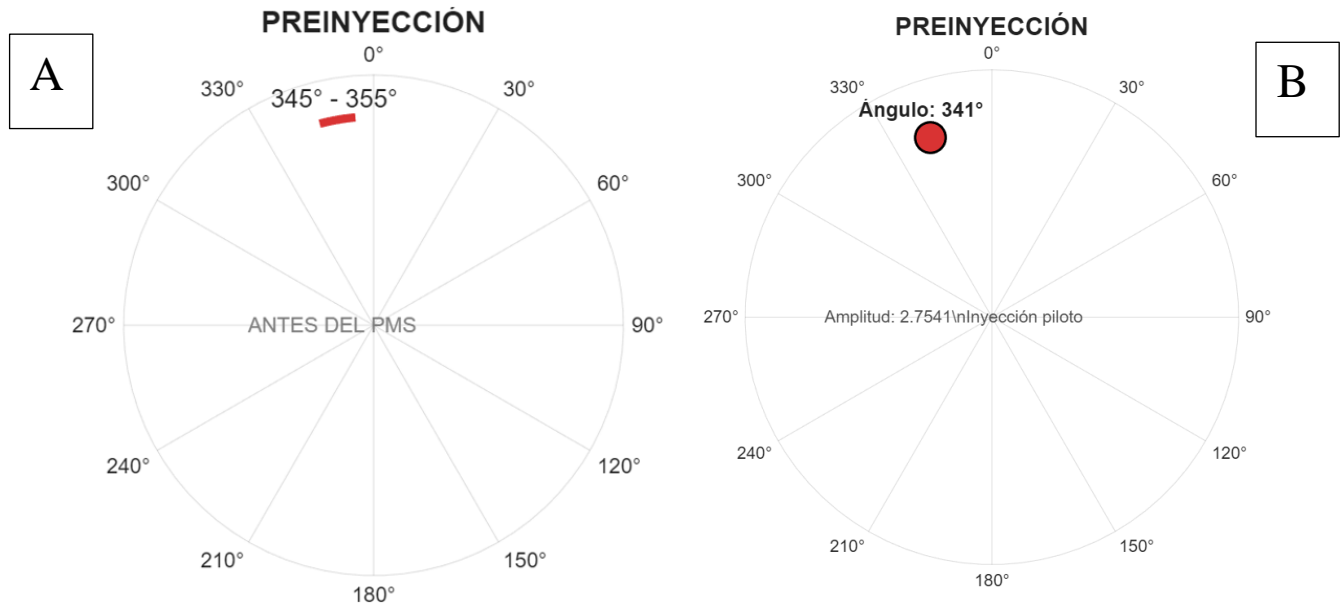
4.5.1 Comparación del Evento de Preinyección.

La preinyección, de acuerdo con el fabricante, se desarrolla en un rango angular comprendido entre 345° y 355° , es decir, en una fase previa al punto muerto superior ($PMS = 0^\circ$), donde el pistón se encuentra en la etapa final de compresión. En los resultados experimentales obtenidos en el banco, este evento fue identificado entre 348° y 358° , evidenciando un desplazamiento aproximado de $+3^\circ$ respecto al valor teórico, como se puede visualizar en la **Figura 43**.

Desde el punto de vista físico, la preinyección corresponde a una pequeña dosificación de combustible cuya finalidad es preparar las condiciones dentro de la cámara de combustión, reduciendo el retardo de ignición y mejorando la eficiencia del proceso principal. Sin embargo, debido a la baja cantidad de combustible inyectado, la energía liberada en esta fase es limitada, lo que genera una respuesta vibracional de menor amplitud y, por tanto, más difícil de identificar con precisión. A esto se suma el hecho de que la señal registrada no corresponde directamente al instante de inyección, sino al efecto dinámico que este genera en la estructura del motor, lo que introduce un desfase asociado tanto al tiempo de combustión inicial como a la propagación de la onda vibracional. En este contexto, la diferencia observada es coherente con la naturaleza del fenómeno y valida la sensibilidad del método empleado.



Figura 43. Posición angular del evento de preinyección entre Teórico (A) y Real (B).



4.5.2 Comparación del Evento de Inyección Principal.

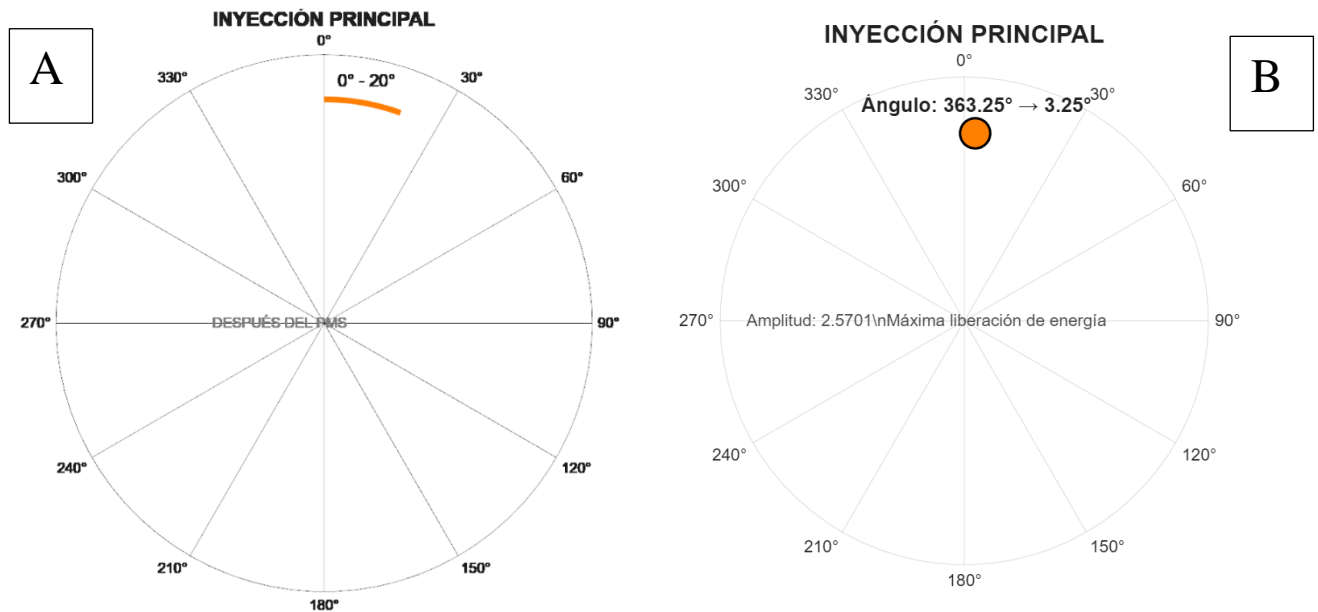
En el caso de la inyección principal, el fabricante establece su ocurrencia dentro del intervalo de 0° a 20°, es decir, en torno al punto muerto superior, donde se alcanza la máxima compresión del aire dentro del cilindro. Experimentalmente, este evento fue identificado en un rango de 2° a 22°, lo que representa un desplazamiento cercano a +2°, como se puede visualizar en la **Figura 44**.

Este evento es el más relevante dentro del ciclo de combustión, ya que en él se libera la mayor cantidad de energía, generando un incremento significativo de presión que se traduce en una señal vibracional claramente detectable. No obstante, es importante considerar que el instante en el que



se inyecta el combustible no coincide exactamente con el inicio de la combustión, debido al retardo de ignición, el cual depende de variables como la temperatura, la presión y la calidad de la mezcla aire-combustible. Además, la unidad de control electrónico (ECU) ajusta dinámicamente el momento de inyección en función de las condiciones de operación del motor, lo que puede generar ligeras variaciones respecto a los valores nominales del fabricante. En consecuencia, la pequeña diferencia observada refleja el comportamiento real del sistema y no una imprecisión del método.

Figura 44. Posición Angular del Evento Inyección Principal entre Teórico (A) y Real (B).



4.5.3 Comparación del Evento de Apertura de Válvulas.

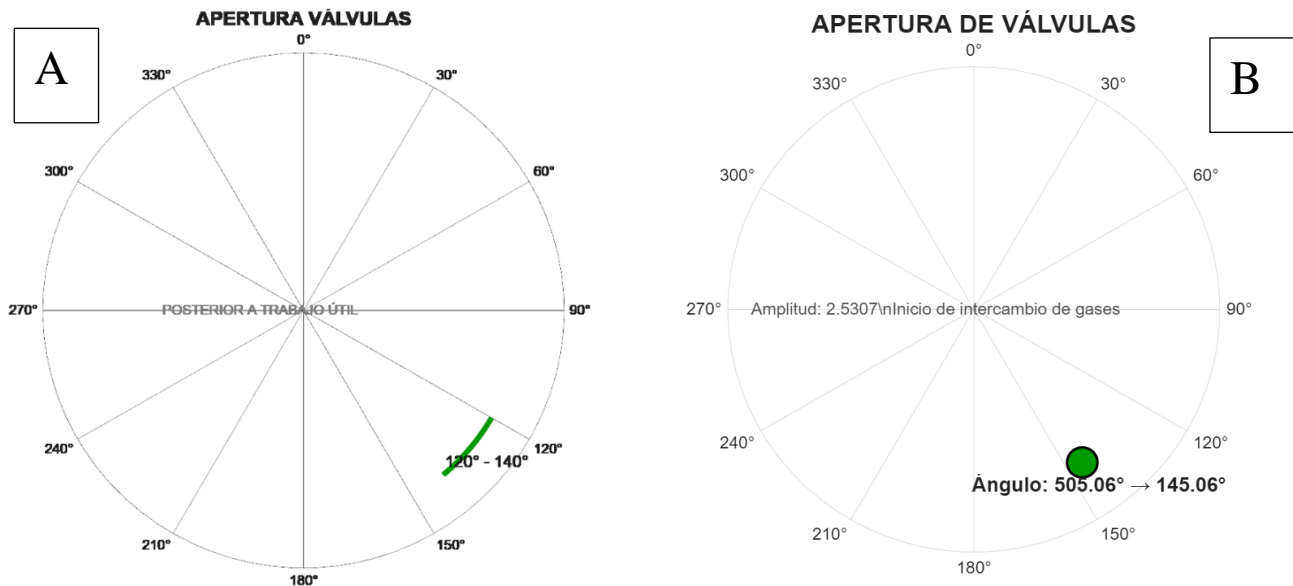
En el caso de la apertura de las válvulas, el fabricante establece su ocurrencia entre 120° y 140°, mientras que experimentalmente se determinó entre 125° y 145°, mostrando un desplazamiento



cercano a $+5^\circ$, como se puede observar en la **Figura 45**, este evento ocurre al final de la expansión, cuando aún existe presión dentro del cilindro, permitiendo la expulsión de los gases de combustión.

Desde el punto de vista físico, este proceso implica una liberación brusca de gases, lo que genera una respuesta vibracional significativa. Sin embargo, la magnitud y el momento exacto de esta respuesta dependen de la presión residual, la temperatura de los gases y las condiciones de operación del motor. Además, la transmisión de la vibración a través de la estructura introduce un retardo que se refleja en el desplazamiento angular observado. Por tanto, la diferencia detectada es consistente con la naturaleza dinámica del proceso de escape.

Figura 45. Posición angular del evento de apertura de válvulas entre Teórico (A) y Real (B).



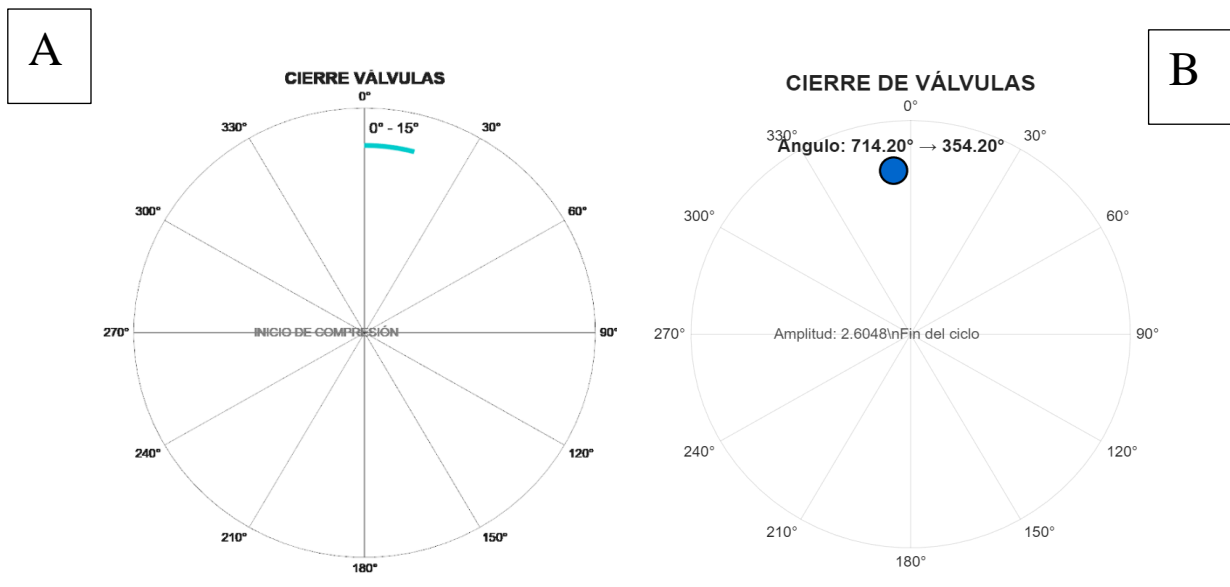


4.5.4 Comparación del Evento de Cierre de Válvulas.

Finalmente, el cierre de la válvula de escape ocurre, según el fabricante, entre 0° y 15°, mientras que los resultados experimentales lo sitúan entre 3° y 18°, evidenciando una diferencia aproximada de +3°, como se puede observar en la **Figura 46**, este evento se desarrolla en una zona crítica del ciclo, donde coincide con el inicio de la admisión, generando el fenómeno conocido como cruce de válvulas.

En esta fase, la coexistencia de múltiples eventos produce un entorno vibracional complejo, donde las señales pueden superponerse y dificultar la identificación precisa de cada fenómeno. Además, factores como el amortiguamiento estructural y la resolución del sistema de adquisición influyen en la detección del instante exacto de cierre. En consecuencia, la variación observada es completamente esperada y refleja la interacción simultánea de procesos mecánicos y termodinámicos.

Figura 46. Posición angular del evento cierre de Válvulas entre Teórico (A) y Real (B).





CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El estudio logró implementar un sistema de adquisición de datos mediante la integración del encoder rotativo de 14 bits, el acelerómetro MMA7361, la tarjeta sbRIO y el entorno de programación LabVIEW, permitiendo obtener señales angulares y vibratorias del banco experimental en tiempo real. La resolución del encoder posibilitó una lectura precisa de la posición angular del cigüeñal en los 360° de rotación, garantizando una adecuada sincronización con los eventos dinámicos del motor. El procesamiento en FPGA y tiempo real permitió adquirir y visualizar las señales de manera continua y estable, mientras que el uso del acople flexible ayudó a reducir desalineaciones y vibraciones parásitas, mejorando la calidad de la señal adquirida. Asimismo, la integración del acelerómetro permitió registrar las vibraciones generadas durante el funcionamiento del motor, obteniéndose señales aptas para su posterior análisis en MATLAB. La sincronización entre la señal vibracional y la posición angular constituyó un aspecto fundamental del sistema desarrollado, ya que permitió identificar eventos característicos del motor dentro del ciclo



de trabajo, estableciendo una plataforma confiable para el análisis y diagnóstico vibracional.

- El procesamiento de las señales vibratoriales en MATLAB permitió caracterizar de manera efectiva el comportamiento dinámico del banco experimental, mediante la FFT. A través de estas técnicas, se logró transformar las señales en el dominio del tiempo hacia el dominio de la frecuencia y del ángulo, facilitando la identificación de patrones repetitivos asociados al ciclo de combustión, en particular, el análisis espectral permitió identificar los armónicos más representativos, destacándose principalmente el segundo y tercer armónico como variables clave para la caracterización del sistema. Estos parámetros mostraron una distribución consistente, con valores promedio cercanos a $X_1=4.6$, $X_2=20.7$ y $X_3=41.1$, lo que evidencia estabilidad en las mediciones y repetitividad en el comportamiento del banco experimental. A partir de 13 ciclos permitió reducir significativamente el ruido presente en la señal, mejorando la relación señal-ruido y facilitando la identificación de eventos específicos dentro del ciclo. El modelo alcanzó una precisión de clasificación del 83.2%, con valores de 84.1% para BE y 82.4% para ME, y un área bajo la curva ROC (AUC = 0.92), lo que evidencia una excelente capacidad de discriminación.
- Se logró identificar los eventos característicos del banco experimental mediante el análisis sincronizado de la señal vibracional con el ángulo del cigüeñal. Se determinaron los rangos de ocurrencia de la preinyección = 348° – 358° , la inyección principal = 2° – 22° , así como los eventos de apertura y cierre de válvulas, los cuales mostraron una alta correspondencia con



los valores proporcionados por el fabricante 345° – 355° , 0° – 20° . Las diferencias observadas entre los datos reales y teóricos se mantuvieron dentro de un margen máximo de $\pm 5^{\circ}$, lo cual es completamente aceptable considerando que las mediciones se realizaron en condiciones reales de operación y mediante un método indirecto basado en vibraciones. Estas variaciones fueron justificadas a partir de fenómenos físicos como el retardo de ignición, la dinámica del sistema de válvulas y la propagación de ondas vibratorias.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda mejorar la precisión del sistema de adquisición angular mediante la implementación de Encoders de mayor resolución o con mejores características de reducción al ruido, con el fin de optimizar la lectura del ángulo del cigüeñal y reducir posibles errores en la sincronización de eventos. Asimismo, es aconsejable reforzar el acondicionamiento de señal mediante técnicas de filtrado digital y aislamiento electromagnético, lo que permitiría minimizar interferencias externas que puedan afectar la calidad de la señal. Adicionalmente, se sugiere optimizar el diseño del acople mecánico, asegurando una alineación más precisa entre la transmisión y el sensor, con el objetivo de reducir vibraciones parásitas que puedan influir en la medición angular.
- Se recomienda profundizar en la implementación de técnicas avanzadas de procesamiento de señales, tales como filtros adaptativos o transformadas tiempo-frecuencia como wavelets, que permitan mejorar la identificación de eventos de baja energía, especialmente la preinyección. Asimismo, sería conveniente incrementar el número de ciclos utilizados



en el TSA, con el fin de mejorar la relación señal-ruido y obtener patrones más definidos y consistentes. También se sugiere optimizar la selección de características relevantes, particularmente en el análisis de armónicos, mediante métodos automáticos que permitan identificar las componentes más representativas del sistema.

- Se recomienda complementar el análisis vibracional con señales adicionales del banco experimental, como la señal del inyector o sensores de presión en el cilindro, lo que permitiría validar de manera directa la ubicación de los eventos. Asimismo, se sugiere evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación del motor, variando parámetros como la carga, la velocidad y la temperatura.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Proyecto financiado por la Comisión Europea, “MINNOX Project: Reducción de emisiones contaminantes en motores de combustión interna,” vol. 2, pp. 45–52, 2004.
- [2] “Plan de Desarrollo para el Nuevo Ecuador 2024-2025.”
- [3] Yi-Cheng Chen; Chi-Hung Lee; Ming-Jie Chou; Sheng-Chih Shen, “ High-precision Digital Rotary Encoder Based on Dot-matrix Gratings,” *Article*, vol. 10, no. 2, p. 13, 2018.
- [4] Redacción UNAM Global, “Impacto del CO₂ en el cambio climático,” May 2018.
- [5] T. , S. H. , & M. J. Wiebe, ““Rotary Encoders in Combustion Analysis: Enhancing Precision.,”” *Journal of Engine Research*, pp. 45–58, 2018.
- [6] Alejandro Castillejo Calle, “Sistemas de Inyección en Motores Diesel,” Universidad de Sevilla, Sevilla, 2014.
- [7] “Motores diésel, cómo funciona, ventajas y desventajas.” Accessed: Jan. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.ro-des.com/mecanica/motores-diesel/>
- [8] H. I. Patricio Moreno Montalvo, D. I. Patricio Pineda Maigua, and L. Alberto Santos Correa, *Evolución e historia de los Motores Diesel Evolution and history of diesel engines Evolução e história dos motores diesel*, vol. 7. 2022.
- [9] S. Automotrices, A. Rodolfo, G. Antamba, M. Alexander, and P. Clavón, “Estudio de las emisiones de gases contaminantes de un motor de ciclo diesel, usando combustible microemulsionado con agua,” 2012, Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7788>



- [10] K. Kim, J. S. Kim, S. Jeong, J. H. Park, and H. K. Kim, “Cybersecurity for autonomous vehicles: Review of attacks and defense,” *Comput. Secur.*, vol. 103, p. 102150, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.COSE.2020.102150.
- [11] M. Barrera-Martínez, M. Ángel-García, L. F. Rua-Mujica, O. A. De La Garza, and S. Martínez-Martínez, “Influencia de las estrategias de inyección múltiple en la caracterización del chorro diésel empleando inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctrico”.
- [12] “ Ciclos Termodinámicos.” Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://teachy.ai/es/resumenes/educacion-media/media-superior-2-grado/fisica-ingles/ciclos-termodinamicos-conceptos-y-aplicaciones-71b69>
- [13] “Ciclo teórico de un motor diésel | Diagrama PV y rendimiento.” Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-diesel/ciclos-diesel-teorico>
- [14] D. A. Morales, B. Andrés, and H. R. Orti, “Dimensionamiento de un banco para pruebas de motores a diesel,” 2007, Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/579>
- [15] Laura Draghi and Roberto Filgueira, *MOTORES DIESEL: CICLO IDEAL Y DIAGRAMA INDICADO* . 2015. Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-tlalnepantla/manufactura-asistida-por-computadors/unidad-3-ciclo-ideal-y-real-indicado/22582779>



- [16] O. R. Criollo Jadán and H. M. Matute Bravo, “Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones,” 2014, Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6288>
- [17] M. Yolanda, R. Morales, and A. H. Guzmán, “CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE”.
- [18] Y. Wang, G. Wang, G. Yao, and L. Shen, “Research on the Characteristics of Operating Non-Uniformity of a High-Pressure Common-Rail Diesel Engine Based on Crankshaft Segment Signals,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64906–64917, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075963.
- [19] H. Li, L. Dong, Y. Peng, Z. Dai, Y. Jiang, and J. Zhang, “Transfer Diagnosis Model of Internal Combustion Engine With Embedded Vibration Signal Impact Decomposition,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 62779–62792, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3392768.
- [20] D. J. Inman *et al.*, “Engineering Vibration Fourth Edition international Editions contributions by,” 2014, Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: www.pearsoninternationaleditions.com
- [21] N. S. Ahirrao, S. P. Bhosle, and D. V. Nehete, “Dynamics and Vibration Measurements in Engines,” *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 434–439, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROMFG.2018.02.063.
- [22] “Vibraciones Mecánicas (página 2).” Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos81/vibraciones-mecanicas/vibraciones-mecanicas2>



- [23] “Estudio de las vibraciones | Power-MI.” Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>
- [24] Pedro de Valdivia, *Fisica Comun*. Santiago de Chile, 2019. Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/571598037/PDV-Fisica-Comun>
- [25] A. K. Berg *et al.*, “Evaluation of SmartNIC Devices for Use in Trigger and Data Acquisition Systems,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, pp. 1–1, 2024, doi: 10.1109/TNS.2024.3488282.
- [26] C. Reyes and J. Wladimir, “Diseño y construcción de una tarjeta de control y adquisición de datos EGM DAQ con múltiples periféricos de entradas, salidas, de comunicación e información,” Apr. 2018, Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19352>
- [27] J. A. Cadwell and R. A. Villarreal, “Electrophysiologic Equipment and Electrical Safety,” *Aminoff’s Electrodiagnosis in Clinical Neurology*, pp. 15–34, Mar. 2012, doi: 10.1016/B978-1-4557-0308-1.00002-9.
- [28] Gloria Sepulveda García, “Integracion de encoders absolutos en el control distribuido de Manfred 3,” Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2015.
- [29] L. Iafolla, M. Filipozzi, S. Freund, A. Zam, G. Rauter, and P. C. Cattin, “Proof of concept of a novel absolute rotary encoder,” *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 312, p. 112100, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SNA.2020.112100.
- [30] A. A. Pop, “Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS,” *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 14, p. 5127, Jul. 2022, doi: 10.3390/S22145127.



- [31] A. Elorza, X. Benavides, J. Ceberio, L. Hernando, and J. A. Lozano, “Transforming Combinatorial Optimization Problems in Fourier Space: Consequences and Uses,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, pp. 1–1, 2024, doi: 10.1109/TEVC.2024.3457268.
- [32] “¿Qué es NI LabVIEW? Programación gráfica para pruebas y medidas - NI.” Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: <https://www.ni.com/es/shop/labview.html?srsltid=AfmBOopKu18Ztw5YPbOZFhPjCIbpS>
- [33] “Automatice el almacenamiento y la generación de informes de datos con LabVIEW - NI.” Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x1k3CAA&l=es-EC>
- [34] “¿Qué es Matlab y para qué sirve? - Formadores IT.” Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: <https://formadoresit.es/que-es-matlab-y-para-que-sirve/>



ANEXOS

1. Anexo. Código de Programación del Árbol de Decisión

```

% =====
% Árbol de Decisión para Diagnóstico de Fallos por Vibraciones
% Conversión Forzada a Matriz Numérica
% =====

% Limpiamos todo EXCEPTO la tabla importada
%clearvars esta_b;
%clc; close all;

=====
%% 1. Lectura y Conversión Forzada de Datos
datos = Aprend_Ciclos;

% Comprobamos cómo guardó MATLAB la variable en tu Workspace
if istable(datos)
    nombres_variables = datos.Properties.VariableNames(1:3);

    % Extraemos X y forzamos su conversión a números matemáticos
    X_bruto = table2array(datos(:, 1:3));
    if iscell(X_bruto) || isstring(X_bruto)
        X = str2double(X_bruto); % Convierte texto a números
    else
        X = double(X_bruto);    % Asegura el formato double
    end

    % Extraemos Y y forzamos el formato categórico
    Y_bruto = table2array(datos(:, 4));
    if iscell(Y_bruto) || isstring(Y_bruto)
        Y = categorical(cellstr(Y_bruto));
    else
        Y = categorical(Y_bruto);
    end

elseif iscell(datos)
    % Si MATLAB lo importó como Cell Array en lugar de Tabla
    nombres_variables = {"X1","X2","X3"};

    % Intentamos convertir las celdas a matriz numérica
    try
        X = cell2mat(datos(:, 1:3));
    catch
        X = str2double(datos(:, 1:3)); % Fuerza la lectura numérica
    end

    Y = categorical(cellstr(datos(:, 4)));
else
    error('El formato de los datos no es compatible. Revisa el Workspace.');
```

```

end

% Validación estricta final: Si X tiene valores "NaN" (Not a Number),
% significa que hay letras o comas decimales mezcladas con los números.
if any(isnan(X(:)))
    error('Existen valores no numéricos (NaN) en los armónicos. Revisa si tu
end

=====
%% 2. División de Datos (Entrenamiento y Prueba)
rng(42);
cv = cvpartition(Y, 'HoldOut', 0.3);

X_train = X(training(cv), :);
Y_train = Y(training(cv), :);
X_test = X(test(cv), :);
Y_test = Y(test(cv), :);

```



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



```

%% 3. Entrenamiento del Árbol de Decisión
modelo_arbol = fitctree(X_train, Y_train, ...
  'PredictorNames', nombres_variables, ...
  'SplitCriterion', 'gdi', ...
  'MaxNumSplits', 100);

%% 4. Evaluación del Modelo
Y_pred = predict(modelo_arbol, X_test);
precision = sum(Y_pred == Y_test) / length(Y_test);

fprintf('\n--- RESULTADOS DEL ENTRENAMIENTO ---\n');
fprintf('La precisión del árbol de decisión es: %.2f%%\n\n', precision * 100);

%% 5. Visualización de Resultados
figure('Name', 'Evaluación del Diagnóstico', 'Color', 'w', 'Position', [100, 100, 900, 400]);

% Subplot A: Matriz de Confusión
subplot(1, 2, 1);
matriz_confusion = confusionchart(Y_test, Y_pred);
matriz_confusion.Title = 'Matriz de Confusión';
matriz_confusion.RowSummary = 'row-normalized';
matriz_confusion.ColumnSummary = 'column-normalized';

% Subplot B: Importancia de los Armónicos
subplot(1, 2, 2);
importancia = predictorImportance(modelo_arbol);
bar(importancia, 'FaceColor', [0.2 0.6 0.8]);
set(gca, 'XTick', 1:8, 'XTickLabel', nombres_variables, 'XTickLabelRotation', 45);
title('Importancia de cada Armónico');
ylabel('Puntuación de Importancia');
  
```



2. Anexo. Validación

Muestra 1 -> Estado: BE Confianza: 96.83%
Muestra 2 -> Estado: BE Confianza: 90.09%
Muestra 3 -> Estado: BE Confianza: 98.95%
Muestra 4 -> Estado: BE Confianza: 98.43%
Muestra 5 -> Estado: BE Confianza: 55.73%
Muestra 6 -> Estado: BE Confianza: 78.09%
Muestra 7 -> Estado: BE Confianza: 95.65%
Muestra 8 -> Estado: BE Confianza: 90.97%
Muestra 9 -> Estado: BE Confianza: 91.39%
Muestra 10 -> Estado: BE Confianza: 99.67%
Muestra 11 -> Estado: BE Confianza: 98.80%
Muestra 12 -> Estado: BE Confianza: 91.64%
Muestra 13 -> Estado: BE Confianza: 99.25%
Muestra 14 -> Estado: BE Confianza: 95.02%
Muestra 15 -> Estado: ME Confianza: 70.08%
Muestra 16 -> Estado: BE Confianza: 99.56%
Muestra 17 -> Estado: BE Confianza: 97.83%
Muestra 18 -> Estado: BE Confianza: 90.34%
Muestra 19 -> Estado: BE Confianza: 59.74%
Muestra 20 -> Estado: ME Confianza: 56.20%
Muestra 21 -> Estado: BE Confianza: 94.20%
Muestra 22 -> Estado: BE Confianza: 99.23%
Muestra 23 -> Estado: BE Confianza: 98.94%
Muestra 24 -> Estado: ME Confianza: 97.90%
Muestra 25 -> Estado: BE Confianza: 85.14%
Muestra 26 -> Estado: BE Confianza: 98.23%
Muestra 27 -> Estado: BE Confianza: 95.16%
Muestra 28 -> Estado: BE Confianza: 71.51%
Muestra 29 -> Estado: BE Confianza: 75.05%
Muestra 30 -> Estado: BE Confianza: 96.50%
Muestra 31 -> Estado: BE Confianza: 93.84%



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Muestra 32 -> Estado: BE Confianza: 92.19%
Muestra 33 -> Estado: BE Confianza: 93.25%
Muestra 34 -> Estado: ME Confianza: 54.46%
Muestra 35 -> Estado: BE Confianza: 81.04%
Muestra 36 -> Estado: BE Confianza: 95.79%
Muestra 37 -> Estado: ME Confianza: 93.77%
Muestra 38 -> Estado: ME Confianza: 96.56%
Muestra 39 -> Estado: ME Confianza: 87.55%
Muestra 40 -> Estado: BE Confianza: 98.50%
Muestra 41 -> Estado: ME Confianza: 73.92%
Muestra 42 -> Estado: BE Confianza: 97.66%
Muestra 43 -> Estado: BE Confianza: 66.83%
Muestra 44 -> Estado: BE Confianza: 99.70%
Muestra 45 -> Estado: ME Confianza: 61.58%
Muestra 46 -> Estado: ME Confianza: 80.92%
Muestra 47 -> Estado: BE Confianza: 78.86%
Muestra 48 -> Estado: BE Confianza: 97.53%
Muestra 49 -> Estado: BE Confianza: 97.57%
Muestra 50 -> Estado: BE Confianza: 92.75%
Muestra 51 -> Estado: ME Confianza: 99.63%
Muestra 52 -> Estado: ME Confianza: 98.26%
Muestra 53 -> Estado: BE Confianza: 94.86%
Muestra 54 -> Estado: ME Confianza: 96.46%
Muestra 55 -> Estado: ME Confianza: 79.83%
Muestra 56 -> Estado: BE Confianza: 93.85%
Muestra 57 -> Estado: ME Confianza: 97.06%
Muestra 58 -> Estado: ME Confianza: 98.11%
Muestra 59 -> Estado: ME Confianza: 99.28%
Muestra 60 -> Estado: ME Confianza: 56.98%
Muestra 61 -> Estado: BE Confianza: 96.74%
Muestra 62 -> Estado: ME Confianza: 99.23%
Muestra 63 -> Estado: ME Confianza: 99.67%



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



Muestra 68 -> Estado: BE Confianza: 55.10%
Muestra 69 -> Estado: ME Confianza: 53.71%
Muestra 70 -> Estado: ME Confianza: 97.78%
Muestra 71 -> Estado: ME Confianza: 99.24%
Muestra 72 -> Estado: ME Confianza: 96.92%
Muestra 73 -> Estado: ME Confianza: 97.66%
Muestra 74 -> Estado: ME Confianza: 96.18%
Muestra 75 -> Estado: ME Confianza: 93.26%
Muestra 76 -> Estado: ME Confianza: 99.60%
Muestra 77 -> Estado: ME Confianza: 99.36%
Muestra 78 -> Estado: ME Confianza: 98.04%
Muestra 79 -> Estado: ME Confianza: 98.50%
Muestra 80 -> Estado: ME Confianza: 93.82%
Muestra 81 -> Estado: ME Confianza: 97.68%
Muestra 82 -> Estado: ME Confianza: 96.69%
Muestra 83 -> Estado: ME Confianza: 98.82%
Muestra 84 -> Estado: ME Confianza: 99.51%
Muestra 85 -> Estado: ME Confianza: 89.71%
Muestra 86 -> Estado: BE Confianza: 81.58%
Muestra 87 -> Estado: ME Confianza: 92.38%
Muestra 88 -> Estado: ME Confianza: 99.26%
Muestra 89 -> Estado: ME Confianza: 95.81%
Muestra 90 -> Estado: ME Confianza: 96.75%
Muestra 91 -> Estado: ME Confianza: 99.55%
Muestra 92 -> Estado: ME Confianza: 99.11%
Muestra 93 -> Estado: ME Confianza: 82.76%
Muestra 94 -> Estado: ME Confianza: 99.25%
Muestra 95 -> Estado: BE Confianza: 94.70%
Muestra 96 -> Estado: ME Confianza: 95.58%
Muestra 97 -> Estado: ME Confianza: 93.49%
Muestra 98 -> Estado: ME Confianza: 94.65%
Muestra 99 -> Estado: ME Confianza: 98.73%
Muestra 100 -> Estado: BE Confianza: 70.71%



3. Anexo Resultados de Validación

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6
Session: Aprendizaje_Ciclos					
Training Data: Aprend_Ciclos Observations: 400					
Predictors: 3 Predictor Names: X1, X2, X3					
Response Name: Estado Response Classes: 2 Response Class Names: BE, ME					
Validation: 5-fold cross-validation					
Favorite	Model Number	Model Type	Status	Accuracy%(Validation)	Total Cost (Validation)
0	1	Tree	Trained	80,75	77
0	2.1	Tree	Trained	80,75	77
0	2.2	Tree	Trained	82,25	71
0	2.3	Tree	Trained	81,25	75
0	2.4	Discriminant	Trained	83,25	67
0	2.5	Discriminant	Trained	83	68
0	2.6	Binary GLM Logistic Regression	Trained	83,25	67
0	2.7	Efficient Logistic Regression	Trained	83,25	67
0	2.8	Efficient Linear SVM	Trained	68,5	126
0	2.9	Naive Bayes	Trained	83,25	67
0	2.10	Naive Bayes	Trained	83	68
0	2.11	SVM	Trained	82,75	69
0	2.12	SVM	Trained	82	72
0	2.13	SVM	Trained	82,5	70
0	2.14	SVM	Trained	81,5	74
1	2.15	SVM	Trained	83,25	67
0	2.16	SVM	Trained	83,25	67
0	2.17	KNN	Trained	77,25	91
0	2.18	KNN	Trained	83	68
0	2.19	KNN	Trained	83,25	67
0	2.20	KNN	Trained	82,75	69
0	2.21	KNN	Trained	82,5	70
0	2.22	KNN	Trained	80,5	78
0	2.23	Ensemble	Trained	79	84
0	2.24	Ensemble	Trained	80,5	78
0	2.25	Ensemble	Trained	83,25	67
0	2.26	Ensemble	Trained	78,5	86
0	2.27	Ensemble	Trained	81,75	73
0	2.28	Neural Network	Trained	80,5	78
0	2.29	Neural Network	Trained	75,25	99
0	2.30	Neural Network	Trained	77,75	89
0	2.31	Neural Network	Trained	79	84
0	2.32	Neural Network	Trained	79,25	83
0	2.33	Kernel	Trained	67	132
0	2.34	Kernel	Trained	66,25	135



4. Programación de las Gráficas de Eventos

```

% =====
% DIAGRAMAS POLARES INDIVIDUALES POR EVENTO - CORREGIDO
% Cada evento en su propia figura
% =====

clear; close all; clc;

% ===== CONFIGURACIÓN GENERAL =====
angulo_cero = 'top';
direccion = 'clockwise';

% ===== 1. PREINYECCIÓN (345° - 355°) =====
figure('Name', 'Preinyección', 'Position', [100 100 500 500]);
ax1 = polaraxes;
hold(ax1, 'on');

theta_pre = deg2rad(345:0.5:355);
r_pre = ones(size(theta_pre));
polarplot(ax1, theta_pre, r_pre, 'r-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0.85 0.2 0.2]);

ax1.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax1.ThetaDir = direccion;
ax1.RTick = [];
ax1.RLim = [0 1.2];
title(ax1, 'PREINYECCIÓN', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax1, deg2rad(350), 1.1, '345° - 355°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax1, deg2rad(270), 0.2, 'ANTES DEL PMS', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
saveas(gcf, 'evento_preinyeccion.png');

% ===== 2. INYECCIÓN PRINCIPAL (0° - 20°) =====
figure('Name', 'Inyección principal', 'Position', [650 100 500 500]);
ax2 = polaraxes;
hold(ax2, 'on');

theta_princ = deg2rad(0:0.5:20);
r_princ = ones(size(theta_princ));
polarplot(ax2, theta_princ, r_princ, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [1 0.5 0]);

ax2.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax2.ThetaDir = direccion;
ax2.RTick = [];
ax2.RLim = [0 1.2];
title(ax2, 'INYECCIÓN PRINCIPAL', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax2, deg2rad(10), 1.1, '0° - 20°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax2, deg2rad(270), 0.2, 'DESPUÉS DEL PMS', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
saveas(gcf, 'evento_inyeccion_principal.png');

% ===== 3. APERTURA VÁLVULA ESCAPE (120° - 140°) =====
figure('Name', 'Apertura escape', 'Position', [100 650 500 500]);
ax3 = polaraxes;
hold(ax3, 'on');

theta_ae = deg2rad(120:0.5:140);
r_ae = ones(size(theta_ae));
polarplot(ax3, theta_ae, r_ae, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0 0.6 0]);

ax3.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax3.ThetaDir = direccion;
ax3.RTick = [];
ax3.RLim = [0 1.2];
title(ax3, 'APERTURA VÁLVULA ESCAPE', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax3, deg2rad(130), 1.1, '120° - 140°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax3, deg2rad(270), 0.2, 'POSTERIOR A TRABAJO ÚTIL', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
saveas(gcf, 'evento_apertura_escape.png');

% ===== 4. CIERRE VÁLVULA ESCAPE (0° - 15°) =====
figure('Name', 'Cierre escape', 'Position', [650 650 500 500]);

```



```

figure('Name', 'Cierre escape', 'Position', [650 650 500 500]);
ax4 = polaraxes;
hold(ax4, 'on');

theta_ce = deg2rad(0:0.5:15);
r_ce = ones(size(theta_ce));
polarplot(ax4, theta_ce, r_ce, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0 0.8 0.8]);

ax4.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax4.ThetaDir = direccion;
ax4.RTick = [];
ax4.RLim = [0 1.2];
title(ax4, 'CIERRE VÁLVULA ESCAPE', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax4, deg2rad(8), 1.1, '0° - 15°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax4, deg2rad(270), 0.2, 'INICIO DE COMPRESIÓN', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
saveas(gcf, 'evento_cierre_escape.png');

% ===== 5. APERTURA VÁLVULA ADMISIÓN (340° - 350°) =====
figure('Name', 'Apertura admisión', 'Position', [100 1200 500 500]);
ax5 = polaraxes;
hold(ax5, 'on');

theta_aa = deg2rad(340:0.5:350);
r_aa = ones(size(theta_aa));
polarplot(ax5, theta_aa, r_aa, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0.2 0.6 1]);

ax5.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax5.ThetaDir = direccion;
ax5.RTick = [];
ax5.RLim = [0 1.2];
title(ax5, 'APERTURA VÁLVULA ADMISIÓN', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax5, deg2rad(345), 1.1, '340° - 350°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax5, deg2rad(270), 0.2, 'FINAL DE ESCAPE', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);

saveas(gcf, 'evento_apertura_admision.png');

% ===== 6. CIERRE VÁLVULA ADMISIÓN (30° - 50°) =====
figure('Name', 'Cierre admisión', 'Position', [650 1200 500 500]);
ax6 = polaraxes;
hold(ax6, 'on');

theta_ca = deg2rad(30:0.5:50);
r_ca = ones(size(theta_ca));
polarplot(ax6, theta_ca, r_ca, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0 0.4 0.8]);

ax6.ThetaZeroLocation = angulo_cero;
ax6.ThetaDir = direccion;
ax6.RTick = [];
ax6.RLim = [0 1.2];
title(ax6, 'CIERRE VÁLVULA ADMISIÓN', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold');
text(ax6, deg2rad(40), 1.1, '30° - 50°', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 12);
text(ax6, deg2rad(270), 0.2, 'DURANTE COMPRESIÓN', 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'Color', [0.5 0.5 0.5]);
saveas(gcf, 'evento_cierre_admision.png');

% ===== 7. CRUCE DE VÁLVULAS (340° - 20°) =====
figure('Name', 'Cruce de válvulas', 'Position', [350 1700 500 500]);
ax7 = polaraxes;
hold(ax7, 'on');

theta_cruce1 = deg2rad(340:0.5:359);
theta_cruce2 = deg2rad(0:0.5:20);
r_cruce1 = ones(size(theta_cruce1));
r_cruce2 = ones(size(theta_cruce2));
polarplot(ax7, theta_cruce1, r_cruce1, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0.6 0.2 0.8]);
polarplot(ax7, theta_cruce2, r_cruce2, '-', 'LineWidth', 4, 'Color', [0.6 0.2 0.8]);

ax7.ThetaZeroLocation = angulo_cero;

```