



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
AUTOMOTRIZ**

**TEMA:**

**“ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES DE  
ENCENDIDO POR COMPRESIÓN PARA DETECTAR ANOMALÍAS,  
CON UN ENFOQUE EN LA HOLGURA DE LAS VÁLVULAS”**



**Línea de Investigación:** Producción Industrial y Energía Sostenible

**AUTOR:** Tugumbango Malte Andy Bladimir

**DIRECTOR:** Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.

Ibarra-Ecuador

2025



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**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:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100411418-5		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Tugumbango Malte Andy Bladimir		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Sector Parque Industrial Av. Rodrigo de Miño y Calle "C"		
<b>EMAIL:</b>	<a href="mailto:abtugumbangom@utn.edu.ec">abtugumbangom@utn.edu.ec</a> / <a href="mailto:vladimir.malte123@gmail.com">vladimir.malte123@gmail.com</a>		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	-	<b>TELF. MOVIL</b>	0968697732

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN PARA DETECTAR ANOMALÍAS, CON UN ENFOQUE EN LA HOLGURA DE SUS VÁLVULAS.
<b>AUTOR (ES):</b>	Tugumbango Malte Andy Bladimir
<b>FECHA: AAAA/MM/DD</b>	2025/09/22
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>CARRERA/PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Automotriz
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.




## 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 22 días, del mes de septiembre de 2025

**EL AUTOR:**

Firma  .....  
 Tugumbango Malte Andy Bladimir



## **CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 22 de septiembre de 2025

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.  
C.C.: 0401447826



## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “**Análisis de vibraciones mecánicas en motores de encendido por compresión para detectar anomalías, con un enfoque en la holgura de sus válvulas**” elaborado por Tugumbango Malte Andy Bladimir, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f): .....  
 Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.  
 C.C.: 0401447826

(f): .....  
 Ing. Hernández Rueda Erik Paúl MSc.  
 C.C.: 1002978060



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a dos personas muy importantes en mi vida. A mi querida madre, Rosa Malte, quien en los momentos buenos y en los difíciles siempre estuvo a mi lado, brindándome su apoyo incondicional incluso en lo cuesta arriba que las experiencias académicas se presentaban a lo largo de mi formación universitaria. A mi estimado padre, Ramiro Tugumbango, quien me ha ensañado a nunca desistir de mis objetivos profesionales, recordándome que no todo proceso es lineal y para eso debo empezar a labrar mis sueños y construir aquella cima de la cual no debo sucumbir. Extiendo también esta dedicatoria a mi hermano Leandro, confidente y a quién más amo en esta vida, testigo de las largas horas de desvelo que hoy se convierten en motivo de orgullo, pues gracias a su compañía y aliento encontré la motivación para continuar. Él ha sido mi motor y la razón que llena mis días de felicidad, dándome fuerza en cada paso de este camino. Asimismo, dedico este logro a mis abuelitos que desde el cielo me acompañan con sus bendiciones y, estoy seguro, se sentirían orgullosos de este triunfo. Finalmente, a toda mi familia, que comparte conmigo la felicidad de alcanzar esta meta, siendo parte esencial de mi motivación e impulso de alcanzar lo que anhelo.



## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Ingeniero Carlos Mafla, PhD, por su constante acompañamiento, paciencia y sabiduría durante todo el desarrollo de este trabajo de titulación; sin su guía, este logro no habría sido posible. Agradezco a la Universidad Técnica del Norte por abrirme sus puertas y a mi querida Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, cuyos docentes, con su profesionalismo y dedicación, han dejado una huella imborrable en mi formación.

Por otro lado, también agradezco mi hermana Lucía y a mi cuñado Nicolás, quienes me apoyaron incondicionalmente, tanto económica como emocionalmente; sus palabras motivadoras y su confianza en mí fueron un sostén fundamental en cada etapa de este camino. Por último, no puedo dejar de agradecer a mi amiga Madizon Dayna, quien me brindó su ayuda con materiales educativos para el ingreso a la universidad y compartió conmigo largas noches de estudio, poco después de haber egresado del colegio; gracias por tu amistad sincera, tu compañía y por creer en mí tanto como yo creo en ti. A todos ustedes, gracias de corazón por ser parte de este logro; cada apoyo, consejo y gesto de aliento ha hecho posible que hoy celebre esta meta alcanzada.



## RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio se fundamenta bajo la necesidad de diagnosticar de manera temprana las anomalías en motores de encendido por compresión, dadas por el estado de las válvulas de escape y admisión, tomando como referencia el motor 4JB1, con el objetivo de evaluar y diagnosticar dichas anomalías mediante el análisis de vibraciones mecánicas, aplicando evaluaciones armónicas y estadísticas, bajo el desarrollo de un aprendizaje automático. La metodología consideró tres estados de válvulas: nuevas (VN), con vida útil cumplida (VCVU) y con falla (VF). Las pruebas fueron censadas en dos puntos estratégicos: la parte anterior de la tapa válvulas (zona A) y la parte posterior inferior de la culata (zona B), donde las señales obtenidas fueron procesadas mediante la Transformada Rápida de Fourier para el análisis armónico, identificando la amplitud de los tres picos más representativos, y mediante un análisis estadístico basado en diez indicadores (RMS, varianza, curtosis, asimetría, desviación estándar, moda, mediana, máximos y mínimos). En total se procesaron más de 10 millones de datos provenientes de 200 pruebas, de las cuales 160 se usaron para el entrenamiento y 40 para la validación de los modelos. Los resultados mostraron que el análisis estadístico alcanzó un 100% de precisión en ambas zonas de medición, mientras que el análisis armónico obtuvo un 73,1% en la zona A y un 100% en la zona B, demostrando que la selección del punto de medición es determinante en la fiabilidad de los resultados; concluyéndose que metodología aplicada demuestra ser útil para llevar a cabo un el diagnóstico predictivo en MEC.

**Palabras clave:** Vibraciones Mecánicas, Zonas de Medición, Análisis de Armónicos, Análisis Estadístico, Aprendizaje Automático, Mantenimiento Predictivo.



## ABSTRACT

This study is based on the need for early diagnosis of anomalies in compression ignition engines, caused by the condition of the exhaust and intake valves, taking the 4JB1 engine as a reference, with the aim of evaluating and diagnosing these anomalies through the analysis of mechanical vibrations, applying harmonic and statistical evaluations, under the development of machine learning. The methodology considered three valve conditions: new (VN), end-of-life (VCVU), and faulty (VF). The tests were recorded at two strategic points: the front of the valve cover (zone A) and the rear lower part of the cylinder head (zone B), where the signals obtained were processed using the Fast Fourier Transform for harmonic analysis, identifying the amplitude of the three most representative peaks, and through a statistical analysis based on ten indicators (RMS, variance, kurtosis, asymmetry, standard deviation, mode, median, maximums, and minimums). In total, more than 10 million data points from 200 tests were processed, of which 160 were used for training and 40 for model validation. The results showed that statistical analysis achieved 100% accuracy in both measurement zones, while harmonic analysis achieved 73.1% in zone A and 100% in zone B, demonstrating that the selection of the measurement point is decisive in the reliability of the results; It was concluded that the methodology applied proves to be useful for carrying out predictive diagnostics in MEC.

**Keywords:** Mechanical Vibrations, Measurement Zones, Harmonic Analysis, Statistical Analysis, Machine Learning, Predictive Maintenance.



## **LISTA DE SIGLAS**

- MEC.** Motor de encendido por comprensión.
- AV.** Anomalías Vibratorias.
- FDD.** Detección y Diagnóstico de Fallas.
- FL.** Fallas Leves.
- FG.** Fallas Graves.
- FC.** Fallas Catastróficas.
- VE.** Válvula de Escape.
- VA.** Válvula de Admisión.
- ICP.** Circuito integrado piezoeléctrico.
- DAQ.** Adquisición de datos.
- IEPE.** Electrónica Integrada Piezoeléctrica.
- NI.** National Instruments.
- AE.** Análisis Estadístico.
- AA.** Análisis de Armónicos.
- VN.** Válvulas Nuevas
- VCUV.** Válvulas que Cumplieron su Vida Útil.
- VF.** Válvulas con Falla.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>21</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
1.1. Problema de investigación .....	21
1.2. Objetivos.....	22
1.2.1. Objetivo General.....	22
1.2.2. Objetivos Específicos.....	23
1.3. Alcance .....	23
1.4. Justificación .....	24
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>26</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>26</b>
2.1. Antecedentes .....	26
2.2. Motor Diésel .....	30
2.2.1. Principio de funcionamiento de los motores Diésel .....	31
2.2.1.1. Ciclo Termodinámico Teórico Diésel.....	31
2.2.1.2. Ciclo Termodinámico Real Diésel.....	32
2.2.2. Combustión en Motores Diésel.....	33
2.3. Válvulas del Motor Diésel .....	35
2.3.1. Concepto .....	35
2.3.2. Principio de Funcionamiento .....	35
2.3.3. Materiales utilizados en la fabricación de las válvulas de un MEC .....	36
2.3.4. Clasificación de las Válvulas de un motor Diésel .....	37
2.3.5. Mantenimiento de las Válvulas del Motor Diesel.....	38
2.3.5.1. Comprobación del estado de válvulas.....	38



2.3.5.2.	Regulación de la holgura de válvulas .....	39
2.3.6.	Desgaste de las válvulas.....	40
2.4.	Fallas del Motor Diésel respecto al Estado de las Válvulas .....	42
2.4.1.	Fallas leves.....	43
2.4.2.	Fallas Graves.....	44
2.4.3.	Fallas Catastróficas .....	44
2.5.	Mantenimiento Predictivo del Motor Diésel.....	45
2.5.1.	Técnicas de mantenimiento predictivo .....	45
2.5.2.	Aprendizaje Automático (Machine Learning) .....	46
2.5.2.1.	Algoritmos comunes .....	47
2.6.	Vibraciones en el Motor Diésel .....	48
2.6.1.	Vibración Mecánica .....	48
2.6.1.1.	Propiedades de las vibraciones mecánicas.....	49
2.6.1.2.	Representación gráfica de las vibraciones mecánicas .....	50
2.6.1.3.	Tipos de Vibraciones Mecánicas .....	50
2.6.2.	Transformada de Fourier.....	51
2.6.2.1.	Transformada Discreta de Fourier (TDF).....	52
2.6.2.2.	Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	52
2.7.	Norma ISO 10816-1.....	53
2.7.1.	Directrices generales de normativa ISO 10816-1 .....	53
2.7.2.	Condiciones para los ensayos de la Normativa ISO 10816-1.....	55
<b>CAPÍTULO III.....</b>		<b>56</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>		<b>56</b>
3.1.	<b>MATERIALES .....</b>	<b>56</b>



3.1.1. Motor Diésel Chevrolet Isuzu NHR .....	56
3.1.2. Válvulas del Motor Chevrolet Isuzu NHR.....	57
3.1.2.1. Partes de las válvulas del Motor Chevrolet Isuzu NHR .....	58
3.1.3. Juego de Galgas .....	59
3.1.4. Sensor de Vibración.....	59
3.1.4.1. Principio de funcionamiento del Sensor .....	61
3.1.5. Tarjeta de adquisición de datos.....	62
3.1.6. Software .....	64
3.1.6.1. LabVIEW.....	64
3.1.6.2. MATLAB.....	64
3.2. MÉTODOS .....	66
3.2.1. Enfoque y Tipo de Investigación .....	66
3.2.2. Mantenimiento del Motor Chevrolet Isuzu NHR .....	69
3.2.3. Preparación de los Estados de Válvulas.....	70
3.2.3.1. Válvulas Nuevas .....	71
3.2.3.2. Válvulas que culminaron su Vida útil.....	72
3.2.3.3. Válvulas con Falla.....	74
3.2.4. Preparación de la Culata .....	76
3.2.4.1. Procedimiento técnico para el desmontaje de la culata .....	76
3.2.4.2. Procedimiento técnico para el asentamiento de las válvulas del motor.....	77
3.2.4.3. Procedimiento técnico para el montaje de la culata.....	79
3.2.4.4. Holgura de las Válvulas para el Motor Chevrolet Isuzu NHR .....	80
3.2.4.5. Evaluación del montaje y desmontaje de la Culata .....	81
3.2.5. Desarrollo de la Interfaz en LabVIEW .....	82



3.2.6.	Instalación de los equipos .....	84
3.2.6.1.	Zonas de Medición.....	84
3.2.7.	Adquisición de datos vibratorios para los tres estados de válvulas .....	86
3.2.7.1.	Prueba I .....	87
3.2.7.2.	Prueba II Fallas Leves.....	89
3.2.7.3.	Prueba III Fallas Graves.....	90
3.2.8.	Aprendizaje Automático .....	91
3.2.8.1.	Preprocesamiento y Extracción de Características armónicas y estadísticas	92
3.2.8.2.	Elaboración de la matriz a entrenarse .....	93
3.2.8.3.	Entrenamiento con Classification Learner .....	93
3.2.8.4.	Evaluación de Modelos.....	94
3.2.8.5.	Validación con Nuevas Muestras.....	94
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>96</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>96</b>
4.1.	ANÁLISIS DE ARMÓNICOS .....	96
4.1.1.	Evaluación de Armónicos para la Zona de Medición A .....	98
4.1.1.1.	Presentación de Armónicos con válvulas nuevas (VN).....	98
4.1.1.2.	Presentación de Armónicos con válvulas que cumplieron su vida útil.....	99
4.1.1.3.	Presentación de Armónicos con válvulas desgastadas (VF).....	99
4.1.1.4.	Comparación de sus Amplitudes (Zona de Medición A).....	100
4.1.2.	Evaluación de Armónicos para la Zona de Medición B .....	102
4.1.2.1.	Presentación de Armónicos con válvulas nuevas (VN).....	102
4.1.2.2.	Presentación de Armónicos en válvulas que cumplieron su vida útil (VCUV). 103	
4.1.2.3.	Presentación de Armónicos con válvulas desgastadas (VF).....	104



4.1.2.4. Comparación de sus Amplitudes (Zona de Medición B).....	105
4.1.3. Análisis comparativo de Amplitud Armónica con respecto a su Zona de Medición	106
4.1.4. Aprendizaje Automático para el Análisis de Armónicos.....	107
4.1.4.1. Árbol de Decisión Aplicado en la Zona de Medición A.....	107
4.1.4.2. Entrenamiento de datos Armónicos para la Zona de Medición A .....	108
4.1.4.3. Árbol de Decisión aplicado en la Zona de Medición B .....	112
4.1.4.4. Entrenamiento de datos Armónicos para la Zona de Medición B .....	113
4.1.4.5. Comparación de los resultados del Análisis de Armónicos.....	116
4.2. ANÁLISIS DEL CÁLCULO ESTADÍSTICO DE DATOS VIBRATORIOS .....	117
4.2.1. Aprendizaje Automático en la Zona de Medición A .....	118
4.2.1.1. Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM .....	119
4.2.1.2. Matriz de confusión según el modelo Linear SVM .....	119
4.2.1.3. Curva Característica Operativa del Receptor según el modelo Linear SVM ....	120
4.2.2. Aprendizaje Automático en la Zona de Medición B .....	121
4.2.2.1. Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM .....	122
4.2.2.2. Matriz de Confusión según el modelo Linear SVM .....	123
4.2.2.3. Curva Característica Operativa del Receptor según el modelo Linear SVM ....	124
4.2.3. Árbol de Decisión para la zona de medición A y B.....	124
4.2.3.1. Aprendizaje automático según árbol de decisión aplicado en la Zona de Medición A.....	126
4.2.3.2. Aprendizaje automático según árbol de decisión aplicado en la Zona de Medición B.....	127
4.2.3.4. Comparación de los resultados del Análisis Estadístico .....	129
4.2.4. Comparación de los Modelos de Aprendizaje Automático .....	129



4.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	131
4.3.1. Validación de Armónicos en la Zona de Medición A.....	132
4.3.2. Validación de Armónicos en la Zona de Medición B.....	134
4.3.3. Validación del Análisis Estadístico en la Zona de Medición A.....	135
4.3.4. Validación del Análisis Estadístico en la Zona de Medición B.....	137
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>139</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>139</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	139
5.2. RECOMENDACIONES.....	141
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>149</b>
Anexo 1 .....	149
Anexo 2.....	149
Anexo 3.....	149
Anexo 4.....	150
Anexo 5.....	150
Anexo 6.....	151



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Materiales ocupados en la fabricación de las válvulas</i> .....	37
Tabla 2 <i>Clasificación de las válvulas del MEC</i> .....	37
Tabla 3 <i>Aspectos que influyen en el desgaste de las válvulas</i> .....	40
Tabla 4 <i>Fallas Leves en las Válvulas de un motor Diésel</i> .....	43
Tabla 5 <i>Fallas Graves en las Válvulas de un motor Diésel</i> .....	44
Tabla 6 <i>Fallas Catastróficas en las Válvulas de un motor Diésel</i> .....	45
Tabla 7 <i>Técnicas de mantenimiento preventivo enfocadas en MEC</i> .....	46
Tabla 8 <i>Tipos de Aprendizajes Automáticos en MEC</i> .....	47
Tabla 9 <i>Algoritmos usados en el mantenimiento predictivo de MEC</i> .....	47
Tabla 10 <i>Ecuaciones de las propiedades de las vibraciones mecánicas</i> .....	49
Tabla 11 <i>Especificaciones técnicas del motor Chevrolet Isuzu NHR</i> .....	56
Tabla 12 <i>Características de las válvulas que incorpora el motor Chevrolet Isuzu NHR</i> .....	58
Tabla 13 <i>Partes de las válvulas que incorpora el motor Chevrolet Isuzu NHR</i> .....	58
Tabla 14 <i>Características del sensor de vibración (Acelerómetro ICP603C01)</i> .....	60
Tabla 15 <i>Especificaciones técnicas de la tarjeta (DAQ NI-9250)</i> .....	63
Tabla 16 <i>Pruebas ejecutadas en el método de estudio.</i> .....	66
Tabla 17 <i>Revisión dado en el motor NHR</i> .....	69
Tabla 18 <i>Lista de repuestos en condiciones vulnerables y reemplazados</i> .....	70
Tabla 19 <i>Elemento reemplazados en la revisión del motor</i> .....	70
Tabla 20 <i>Especificaciones de las válvulas del Motor NHR</i> .....	72
Tabla 21 <i>Resultados de inspección</i> .....	73
Tabla 22 <i>Especificación de las válvulas a modificarse</i> .....	75
Tabla 23 <i>Procedimiento para el desmontaje de una culata</i> .....	76
Tabla 24 <i>Procedimiento para el montaje de la culata</i> .....	79
Tabla 25 <i>Evaluación de los diferentes estados de válvulas</i> .....	81
Tabla 26 <i>Zonas de medición para la toma de datos vibracionales</i> .....	85
Tabla 27 <i>Medidas Utilizadas para el Análisis Estadístico</i> .....	92
Tabla 28 <i>Descripción de Armónicos</i> .....	93
Tabla 29 <i>Especificación de los diferentes armónicos</i> .....	97
Tabla 30 <i>Especificación de los diferentes estados de válvulas</i> .....	97
Tabla 31 <i>Comparación de las Amplitudes Armónicas Obtenidas (Zona de Medición A)</i> .....	101
Tabla 32 <i>Comparación de la Amplitudes Armónicas Obtenidas (Zona de Medición B)</i> .....	105
Tabla 33 <i>Identificación Armónica para cada estado de Válvula</i> .....	106
Tabla 34 <i>Especificaciones y Resultados del modelo seleccionado (Armónico II-III)</i> .....	109
Tabla 35 <i>Especificaciones y Resultados del modelo seleccionado (Armónico I-III)</i> .....	113
Tabla 36 <i>Comparación de resultados de los modelos seleccionados</i> .....	117
Tabla 37 <i>Especificaciones y resultados del modelo electo para la Zona de Medición A</i> .....	118
Tabla 38 <i>Especificaciones y Resultados del modelo electo para la Zona de Medición B</i> .....	122
Tabla 39 <i>Especificaciones del Modelo Utilizado para la Zona de Medición A</i> .....	126
Tabla 40 <i>Especificaciones del Modelo Utilizado para Zona de Medición B</i> .....	128
Tabla 41 <i>Comparación de resultados de los modelos seleccionados</i> .....	129



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



Tabla 42 <i>Resumen de los Modelos Seleccionados en el Estudio</i> .....	130
Tabla 43 <i>Validación de Resultados Armónicos - Zona de Medición A</i> .....	132
Tabla 44 <i>Validación de Resultados Armónicos - Zona de Medición B</i> .....	134
Tabla 45 <i>Validación de Resultados para el Cálculo Estadístico - Zona de Medición A</i> .....	135
Tabla 46 <i>Validación de Resultados para el Cálculo Estadístico - Zona de Medición B</i> .....	137



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama del ciclo termodinámico teórico MEC</i> .....	31
Figura 2 <i>Diagrama del ciclo termodinámico real MEC</i> .....	32
Figura 3 <i>Proceso de la combustión en Motores Diésel</i> .....	34
Figura 4 <i>Sistema de Distribución</i> .....	36
Figura 5 <i>Clasificación de las válvulas respecto al diseño de su cabeza</i> .....	38
Figura 6 <i>Desfase entre el desplazamiento, velocidad y aceleración</i> .....	50
Figura 7 <i>Ecuación 1: Transformada Discreta de Fourier</i> .....	52
Figura 8 <i>Ecuación 2: Transformada Rápida de Fourier</i> .....	52
Figura 9 <i>Puntos de medición para maquinas reciprocantes</i> .....	54
Figura 10 <i>Zonas de evaluación</i> .....	55
Figura 11 <i>Motor modelo de estudio Isuzu NHR</i> .....	57
Figura 12 <i>Válvulas del Motor Isuzu NHR</i> .....	58
Figura 13 <i>Juego de galgas utilizado en el estudio</i> .....	59
Figura 14 <i>Sensor de Vibración (Acelerómetro ICP 603C01)</i> .....	60
Figura 15 <i>Componentes del sensor piezoeléctrico</i> .....	61
Figura 16 <i>Fijación del sensor en el motor Isuzu NHR</i> .....	62
Figura 17 <i>Tarjeta de adquisición de datos (DAQ NI-9250)</i> .....	63
Figura 18 <i>Logo de LabVIEW</i> .....	64
Figura 19 <i>Logo de MATLAB</i> .....	65
Figura 20 <i>Proceso Metodológico</i> .....	68
Figura 21 <i>Overhaul al motor NHR (material de estudio)</i> .....	69
Figura 22 <i>Válvulas Nuevas del motor NHR</i> .....	72
Figura 23 <i>Válvulas que cumplieron su vida útil</i> .....	72
Figura 24 <i>Válvulas modificadas (falla)</i> .....	74
Figura 25 <i>Válvulas desgastadas asentadas en la culata</i> .....	75
Figura 26 <i>Culata desmontada del bloque de cilindros</i> .....	76
Figura 27 <i>Asentamiento de válvula</i> .....	78
Figura 28 <i>Uso del vacuómetro para la comprobación de estanqueidad</i> .....	79
Figura 29 <i>Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones</i> .....	82
Figura 30 <i>Proceso para la instalación de los equipos</i> .....	84
Figura 31 <i>Parámetros iniciales para la adquisición de datos</i> .....	87
Figura 32 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (A)</i> .....	88
Figura 33 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (B)</i> .....	88
Figura 34 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (A)</i> .....	89
Figura 35 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (B)</i> .....	90
Figura 36 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (A)</i> .....	91
Figura 37 <i>Gráfica obtenida del punto de medición (B)</i> .....	91
Figura 38 <i>Proceso para la obtención de resultados</i> .....	92
Figura 39 <i>Código para exportar la función</i> .....	94
Figura 40 <i>Predicción de la función</i> .....	95
Figura 41 <i>Señal vibracional dada en la Parte anterior del motor con VN</i> .....	99



Figura 42 Señal del en Parte anterior con VCVU .....	99
Figura 43 Señal del en Parte anterior con VF .....	100
Figura 44 Señal del en Parte Posterior con VN.....	103
Figura 45 Señal del en Parte Posterior con VCVU .....	104
Figura 46 Señal del en Parte Posterior con VF .....	104
Figura 47 Código para la aplicación del Árbol de Decisión.....	107
Figura 48 Árbol de decisión correspondiente a la Zona de Medición A .....	108
Figura 49 Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II)...	110
Figura 50 Matriz de confusión correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II).....	111
Figura 51 Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II) .....	112
Figura 52 Árbol de decisión correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-II-III) .....	113
Figura 53 Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-III)..	114
Figura 54 Matriz de confusión correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-III) .....	115
Figura 55 Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-III) .....	116
Figura 56 Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición A.....	119
Figura 57 Matriz de Confusión correspondiente a la Zona de Medición A.....	120
Figura 58 Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición A .....	121
Figura 59 Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición B.....	123
Figura 60 Matriz de Confusión correspondiente a la Zona de Medición B.....	123
Figura 61 Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición B .....	124
Figura 62 Código para ejecutar el árbol decisión.....	125
Figura 63 Diagrama de dispersión RMS para la Zona de Medición A .....	126
Figura 64 Diagrama de dispersión RMS para la Zona de Medición B .....	128
Figura 65 Código para la obtención de la función general para la predicción de nuevas muestras .....	131
Figura 66 Distinción de los estados de válvulas .....	132
Figura 67 Mantenimiento Correctivo al motor 4JB1 .....	149
Figura 68 Adquisición e instalación del sensor .....	149
Figura 69 Código de Programación para la Obtención de Armónicos.....	149
Figura 70 Código de Programación para la Obtención de muestras Estadísticas .....	150
Figura 71 Código para la Obtención del Árbol de Decisión .....	150
Figura 72 Evaluación del asentamiento de los tres estados válvulas .....	151



## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Problema de investigación

A lo largo de la historia los motores de encendido por compresión (MEC) o también conocidos como motores diésel, han sido fundamentales en muchas industrias debido a su eficiencia, durabilidad y capacidad para generar un alto torque. Sin embargo, cuando este tipo de motor se encuentra sometido a una carga o está en constante funcionamiento, los niveles de ruido, vibraciones y otras emisiones acústicas se ven aumentadas conforme a la demanda de aceleración que se establezca en el motor [1]. Donde se ve alterando su funcionamiento, ocasionando pérdidas de torque, potencia y lo que se considera hoy un día como un problema principal, el desgaste prematuro de piezas móviles como lo son las válvulas de admisión y de escape ubicadas en la culata del motor.

El desgaste en el asiento de las válvulas ha sido la causa principal, por la cual, la intensidad de vibraciones emitidas por un motor que tiene este tipo de anomalías, genere ciertos tipos de ineficiencia y golpeteos en el funcionamiento del motor; puesto a que, un nivel excesivo de vibraciones donde el índice de su anomalía es el ruido, visto como un factor principal que de allí deriva a una inadecuada presencia de vibraciones en las válvulas del motor, se debe mantener en cuenta que si el desgaste del asiento de las válvulas es pronunciado, en el motor se provocan efectos que interfieren con la reducción de la potencia, el gas no se descargará a tiempo y el desgaste será continuo en la estructura de la válvula que puede llegar hasta romperse por el alto nivel de vibraciones que se emiten; mientras que si la asiento de la válvula, no excede un desgaste



pronunciado, pero lleva en ella índices de desgaste, lo que se ocasiona es que su sellamiento hermético no sea completo [2], lo que trae consigo el inicio de fugas y pérdida de potencia progresiva en un motor al que no se le ejecuta un correcto análisis de vibraciones, si a esta acción se la viese como uno más de los innumerables mantenimientos que existen para salvaguardar el funcionamiento del motor.

En el Ecuador la toma de datos vibracionales con respecto a las válvulas de un motor son vistos como resultados de diagnóstico exhaustivos, puesto a que, después de su adquisición el proceso de análisis resulta ser un tanto complejo, pero de vital importancia para el mantenimiento y diagnóstico de motores diésel, debido a que el análisis técnico de vibraciones con respecto al asiento de sus válvulas y de allí su efecto a la holgura de las mismas, podría reflejarse como un detalle experimental acerca de la operación del motor sometido a cargas de aceleración a fin de un correcto funcionamiento y por su parte que este sea amigable con el ambiente en lo que concierne a una contaminación acústica emitida por el parque motor y de allí en adelante la reducción parcial de averías en motores diésel rodantes (buses, camiones, etcétera); así como también, los motores diésel estacionarios (generadores eléctricos, motobombas y más).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar y diagnosticar las anomalías que se producen por las vibraciones mecánicas dados por el desgaste del asiento de las válvulas de un motor de encendido por compresión, para la detección de fallas.



### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las holguras ideales para las válvulas de escape y admisión en función del diseño y las especificaciones del fabricante del motor.
- Detectar desequilibrios en el motor al tener una des calibración de válvulas del motor de encendido por compresión.
- Medir vibraciones usando diferentes tipos de estados de válvulas de escape y admisión.
- Interpretar resultados obtenidos a fin de predecir anomalías más frecuentes por una mala calibración de válvulas en un motor de encendido por compresión.

### 1.3. Alcance

Este estudio se centrará en realizar pruebas de vibraciones provocadas por el desgaste del asiento de las válvulas en un motor de encendido por compresión (MEC), a fin de detectar anomalías que generan desgaste continuo en la culata y las piezas móviles del mismo. Culminándose en dar una detección técnica a las averías mecánicas que acortan la vida de los motores diésel.

Dicho de otro modo, se llevará a cabo un análisis de las vibraciones mecánicas presentes en un motor de encendido por compresión (MEC), considerando tres variables diferentes que responden al estado de las válvulas de admisión y escape, entre ellas, válvulas totalmente nuevas, válvulas que cumplieron su vida útil en kilometraje (km) y válvulas con un desgaste pronunciado en su asiento. Donde las pruebas que se ejecutaran, se las hará utilizando un sensor tipo acelerómetro y posteriormente el software LabVIEW en complemento de una tarjeta memoria se



encargará del registro de los mismos, para finalmente los datos adquiridos analizarlos de manera autónoma utilizando el software Matlab. Es de importancia mencionar que la toma de estos datos será ejecutada en un motor a manera de banco de pruebas MEC de la universidad Técnica del Norte y partiendo de los datos obtenidos se buscará determinar cuán importante es estudio con respecto al mantenimiento de motores diésel.

#### **1.4. Justificación**

La presente investigación resulta valiosa para motores diésel o también llamados motores de encendido por compresión (MEC) ya que pretende buscar un análisis técnico y detallado acerca de las vibraciones mecánicas producidas por el desgaste del asiento de las válvulas y de allí su influencia a la holgura de las mismas, siendo su propósito, la detección de anomalías o deficiencia en el funcionamiento de los motores de encendido por compresión (MEC).

El análisis de vibraciones mecánicas visto como un diagnóstico predictivo es de vital importancia en el transporte de carga, puesto a que, con estas pruebas, los propietarios de automotores Diésel evitaran la avería de su medio de transporte o trabajo, ya que una prueba de vibraciones permite detectar fallos en los componentes móviles del motor, en este caso las válvulas de admisión y escape ubicadas en la culata. De igual manera, con este estudio se pretende comenzar con la solución, acerca de lo que hoy en día es un problema común en lo que se refiere al desgaste prematuro de componentes del motor por el excesivo nivel de vibraciones que se emiten cuando un motor se encuentra en constante funcionamiento, es por ello que con la ayuda tecnológica el monitoreo de estas emisiones acústicas ofrecerá una solución efectiva en cuanto al mantenimiento preventivo de un MEC a razón de evitar una pérdida de potencia, problemas de combustión, ruido excesivo y también, lo que hoy en día ha sido un factor grave para la sociedad, la contaminación



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



auditiva; debido a que, un exceso de vibraciones resulta ser molesto para peatones y usuarios de los mismos automotores (choferes, pasajeros y mercancías).

Por otro lado, este estudio visto como material de apoyo en la industria automotriz, será estrictamente técnico, debido a que puede ofrecerse como una herramienta para la predicción del estado de las válvulas, sustentándose en los resultados obtenidos del presente estudio. A fin de validar un correcto diagnóstico preventivo en reducción de costos al mantenimiento de motores de encendido por compresión.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

“El motor diésel no sólo tiene una estructura de fuselaje compleja y muchas piezas móviles, sino que también se encuentra en un entorno operativo peor que otras piezas”[3]. Siendo el desgaste en las válvulas una falla muy común en estos motores en lo que se refiere al sellado hermético con la culata, y la distancia de apertura que se debe tener entre el vástago de la válvula y el balancín o árbol de levas, donde el desgaste excesivo en el asiento de la misma a menudo es causado por el desgaste de los componentes en la estructura de distribución de gas del motor diésel o por el aflojamiento del tornillo que ajusta la holgura de las válvulas[4].

Actualmente existen innumerables estudios acerca de las vibraciones por holgura de válvulas en motores diésel como lo es por ejemplo el “Método inteligente de diagnóstico de fallas para una válvula de motor diésel basado en una frecuencia mejorada de paquetes wavelet-Mel y una red neuronal convolucional”[5]. Donde nos dice que las señales de vibración del motor diésel tienen las características de no estabilidad y no linealidad debido a su estructura compacta y compleja, fuerte ruido y condiciones de operación especialmente inestables, en la cual se propone un método basado en la frecuencia mejorada de paquetes de ondas Mel y Red neuronal convolucional (CNN) para extraer características y diagnosticar fallas de válvulas de motores diésel. En la cual aplican la transformada de paquetes wavelet con el propósito de descomponer la señal de vibración y reconstruir el coeficiente de cada paquete wavelet que posterior a ello, utilizan un método mejorado de cepstrum de frecuencia Mel para extraer características de las señales de



vibración reconstruidas. Estudio del cual se busca un diagnóstico preciso para las vibraciones que se emiten en un motor de encendido por compresión (MEC) con respecto a la holgura de válvulas visto como un factor que incide en el desgaste progresivo de los asientos de las mismas.

Con el paso del tiempo se han hecho estudios exhaustivos acerca del comportamiento de las válvulas de motores diésel como lo es [6] donde se propuso una técnica simple que combina el muestreo parcial con el promedio de características para la detección de holguras anormales de válvulas y fugas de gas de combustión, montando cuatro acelerómetros en la culata de un motor diésel de cuatro cilindros. Para la válvula de admisión del cilindro 1, cuyo juego normal es de 0,3 mm, indujeron fallas en el juego de válvulas de 0,15, 0,6, 0,9, 1,2 y 1,5 mm. presentando tablas de mediciones de características para los diferentes niveles de falla. Como también lo hizo [7] en la cual se investigó un método acústico de dos cargas para un motor diésel de cuatro cilindros con dos sensores de presión instalados en su sistema de escape. Fallas en el inyector de combustible y válvula de escape de uno de sus cilindros fueron detectado analizando las formas de onda de presión. El juego normal de válvulas era de 0,35 mm. Incluían resultados de detección de ejemplo para fallas de holgura inducidas de 0,7 mm y 1,7 mm.

En la actualidad, se busca la obtención de un diseño y construcción de un motor diésel altamente estable, económico y duradero. Si bien es cierto, la función del sistema de intercambio de aire del motor diésel es abrir o cerrar las válvulas de admisión y escape de acuerdo con el orden de funcionamiento de los cilindros del motor diésel a intervalos regulares para garantizar que los gases de escape se eliminen de los cilindros y se llene de aire fresco. La válvula de escape como parte clave de los componentes de la cámara de combustión de un motor diésel funciona en condiciones extremadamente malas, con una alta tasa de fallas y es propensa a fallas por fugas de



aire dadas por las cargas constantes que se tiene en la cámara de combustión y de allí el comienzo de la pérdida de propiedades físicas que la componen para su funcionamiento; dicho de otro modo, las fallas por fugas en las válvulas de escape de los motores diésel son causadas principalmente por el desgaste irregular, la corrosión y la ablación de la superficie de sellado y el asiento de la válvula. La válvula de escape golpeará y desgastará el asiento de la válvula al cerrarse [8]. Es por eso que el monitoreo de fallas de fuga en las válvulas del motor diésel es muy importante. Dado a que en la actualidad existen tres métodos principales para diagnosticar fallas de fuga en válvulas en un motor diésel sin desmontaje: parámetros térmicos, vibración y emisión acústica (AE).

En el artículo científico acerca del “Almacenamiento de señales de alta frecuencia orientado a la detección de anomalías para motores diésel marinos” se menciona que la detección de anomalías en motores diésel es muy importante para la seguridad de los mismos. La detección de anomalías en motores diésel requiere acceso a una gran cantidad de señales de alta frecuencia. Actualmente, rara vez se estudia cómo almacenar estas señales para admitir aplicaciones de detección de anomalías [9]. De igual manera, este artículo analiza el diseño de sistemas de almacenamiento de señales de alta frecuencia que brindan soporte de datos para sistemas inteligentes de detección de anomalías. Se centra principalmente en el diseño de sistemas de bases de datos y sistemas de archivos para los requisitos de almacenamiento de señales de alta frecuencia de los motores diésel. El funcionamiento real muestra que el sistema diseñado en este documento puede admitir el almacenamiento de señales de alta frecuencia y la implementación de aplicaciones de detección de anomalías.

La vibración y el ruido son indicadores importantes que reflejan el silencio y la fiabilidad de los motores diésel. Donde el seguimiento del estado de vibración y ruido, son ejecutados por



métodos de prueba tradicionales, en la que una vez dispuesto el sensor, los datos se extraen manualmente previos a analizarse. La información del estado acústico del motor diésel se obtiene a través de listas de datos, curvas de parámetros y ventanas numéricas, pero con la demanda cada vez más urgente de inteligencia y digitalización, los requisitos de las tareas para el monitoreo y la evaluación del estado acústico de los motores diésel, son cada vez mayores, y la demanda de una pantalla más eficiente, más intuitiva y más inmersiva es cada vez mayor, por lo que se ve necesario la implantación acerca de la fabricación inteligente y avances de la Industria 4.0, donde es vital el estudio de nuevos métodos inteligentes de visualización inmersiva a fin de que las personas pueden acceder a información de datos electrónicos de forma más natural e intuitiva, sin dejar de prestar atención al trabajo y la vida en el mundo real, en lo que concierne a la investigación sobre el estado acústico del motor diésel basado en realidad aumentada [10]. “El juego anormal de válvulas es una falla común del motor diésel, y la alerta temprana de juego anormal de válvula juega un papel importante en el mantenimiento basado en la condición del motor diésel” [11]. En la que el estudio [12] se centra en la detección de fallos mediante modelos de señales, incluyendo el análisis de las señales medidas para generar características pertinentes en la que una vez obtenidas aquellas características, se las puede utilizar para diagnosticar fallas, comenzado con la utilización de características generadas como entradas, a fin de comparar el rendimiento experimental de cinco clasificadores y finalmente, demostrar que el desarrollo de un sistema de detección y diagnóstico de fallas (FDD) produce resultados precisos utilizando un motor diésel instrumentado donde se concluye que las fallas se originaron en forma de resortes de válvula deformados, así como holguras anormales de válvulas. Donde de igual manera, el estudio [13] dice que una mala



calibración de válvulas genera irregularidades de las fuerzas de inercia del motor, afectando la velocidad, potencia y la eficiencia, debido a que se da inicio a la erosión continua de su asiento.

## 2.2. Motor Diésel

Un motor diésel se define como un motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión, donde la combustión de la mezcla se inicia por el autoencendido del combustible que, tras ser inyectado en la cámara de combustión, después de haber terminado la fase de compresión es evaporado y mezclado con el aire [14]. En otras palabras, la combustión en estos motores se produce sin la presencia de una chispa eléctrica la cual provoca la explosión de la mezcla aire combustible; puesto a que, su combustión se da bajo las condiciones de presión y temperatura a las que se somete el aire y el combustible para su compresión.

Si bien, los motores diésel no solo son conocidos por la particularidad de su combustible y la oportunidad de transporte, carga y comercio a diferentes ciudades que estos ofrecen al estar en marcha. Otra de las definiciones, la cual lo caracteriza se remonta a 1893 tras el recibimiento de la patente “Nuevo motor térmico racional” dada al ingeniero alemán Rudolf Diésel en Berlín, donde meses más tarde al entrar en convenio con la empresa Maschinenfabrik-Augsbusg hoy conocida como MAN, se dio a luz un motor mono cilíndrico, de cuatro tiempos y de enormes dimensiones [15], el cual revolucionó a la industria automotriz de aquella época.

Desde su aparición, el motor diésel, se ha orientado en la mantención de una contribución medio ambiental, y eso por eso, que en la actualidad al estar estos de la mano con la tecnología, han disminuido hasta en un 95% las emisiones de gases contaminantes y entre un 20% a 30% el consumo de combustible, si se lo comparase con un motor a gasolina. Siendo esto una notable



eficiencia, que se debe en gran parte a su relación de compresión que habitualmente oscila entre el 15:1 y 25:1 llegando hasta un 30:1 [16], lo que permite un mejor aprovechamiento de combustible y eficiencia térmica, impresos en un alto rendimiento.

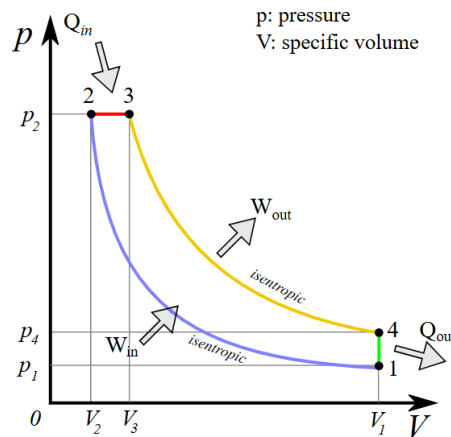
### 2.2.1. Principio de funcionamiento de los motores Diésel

#### 2.2.1.1. Ciclo Termodinámico Teórico Diésel

Un ciclo termodinámico se define como la serie de procesos que experimenta un sistema volviendo a su estado inicial, puesto a que la variación energética en un ciclo no aumenta ni disminuye [17], lo que hace posible la conversión de energía en trabajo sostenible.

En motores diésel o motores de encendido por compresión, el ciclo termodinámico teórico se representa mediante un diagrama de presión y volumen mostrado en la **Figura 1**, permite entender el funcionamiento del motor mediante un análisis acerca de los cambios químicos y físicos que experimenta el combustible al transformarse en energía mecánica [18], dado por la variación de la presión y el volumen en las cuatro etapas del ciclo diésel.

**Figura 1** Diagrama del ciclo termodinámico teórico MEC



Tomado de: DEMOTOR, Ciclo diésel teórico, 2025.



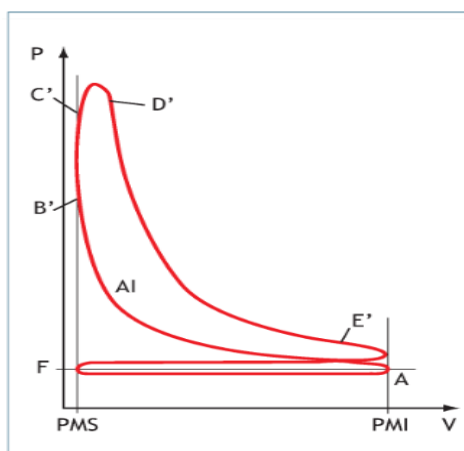
Dicho de otro modo, el ciclo teórico de un motor diésel, se completa en 4 tiempos o procesos, donde (1-2) y (3-4) responden a transformaciones adiabáticas, (2-3) a una transformación isobara y (4-1) a una transformación isocora [19]. Entendido de la siguiente manera:

- Proceso 1-2: compresión isentrópica (no existe pérdida de energía).
- Proceso 2-3: adición de calor a presión constante.
- Proceso 3-4: expansión isentrópica (no existe intercambio de calor).
- Proceso 4-1: rechazo de calor a volumen constante.

### 2.2.1.2. Ciclo Termodinámico Real Diésel

En este ciclo se reflejan condiciones de funcionamiento efectivas de un motor las cuales pueden ser alteradas conforme al funcionamiento o las variaciones de presión y volumen que se llegasen a experimentar en el interior de la cámara de combustión [20]. Al igual que un ciclo termodinámico teórico, este ciclo se representa por medio de un diagrama de presión y volumen el cual se muestra a continuación en la **Figura 2**.

**Figura 2** Diagrama del ciclo termodinámico real MEC



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



Al ponerse en marcha un motor de encendido por compresión, se producen pérdidas de energía a causa fricción interna, el intercambio de calor con la temperatura ambiente y la turbulencia dado por los gases en constante movimiento. Donde su diagrama se comprende por:

- Admisión (F–A): de manera parcial, el cilindro se llena de aire, pero no completamente, puesto a que el cierre y apertura de las válvulas es progresivo.
- Compresión del aire (A–B): al tener una deficiencia de llenado, el motor requiere de mayor esfuerzo, puesto a que, se parte de una presión muy inferior.
- Inyección y combustión: antes de que el pistón llegue al punto muerto superior (PMS) el inyector libera combustible, la mezcla no se quema en su totalidad, lo que genera que la combustión no sea uniforme ni en presión ni en volumen.
- Expansión del fluido (C–E): se produce pérdidas de calor en las paredes del cilindro, generándose un descenso débil del pistón a causa de una presión baja.
- Apertura del escape (E): la evacuación de los gases es progresiva, debido a un adelanto de apertura que se da en las válvulas de escape.
- Expulsión de los gases quemados (A–F): con el ascenso del pistón se pretende la expulsión de los gases, pero al abrir y cerrarse las válvulas gradualmente, la evacuación de los gases no se da en su totalidad.

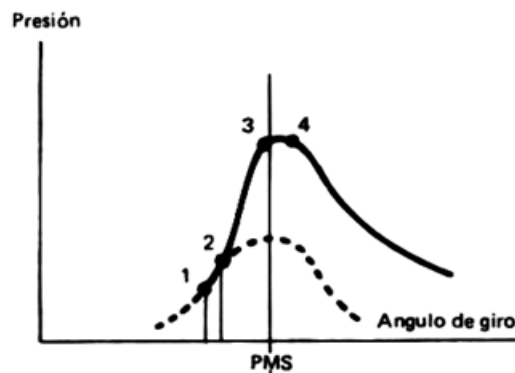
### **2.2.2. Combustión en Motores Diésel**

La combustión en un motor diésel se define como un proceso termoquímico donde se da la oxidación del combustible, desprendiendo un alto índice calor a razón de una elevada temperatura



de aire comprimido en el interior del cilindro [21]. Dicho de otro modo, la combustión en un motor de encendido por compresión se caracteriza como una reacción rápida entre el oxígeno del aire y el combustible, involucrando sus fases de funcionamiento y factores como la relación de compresión y la mezcla aire combustible, resultando en una liberación de energía en forma de calor y luz. Mostrado en el siguiente diagrama (**Figura 3**):

**Figura 3** *Proceso de la combustión en Motores Diésel*



Tomado de: Planas O, DeMotor, 2020.

Se puede resumir el proceso de combustión en los motores Diesel en 3 fases:

- 1 – Retardo a la inflamación (1-2)
- 2 – Combustión incontrolada (2-3)
- 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 una chispa, sino por aire comprimido en su interior, donde el sistema de inyección determina el tiempo, la presión y la cantidad de combustible



en el cilindro [22], permitiéndose así, la optimización del rendimiento del motor, reducción de gases contaminantes y consumo de combustible.

## 2.3. Válvulas del Motor Diésel

### 2.3.1. Concepto

En un motor diésel, las válvulas son piezas mecánicas que llevan una estrecha relación con el ciclo del motor, debido a que estas controlan el intercambio de gases de la combustión, regulando en determinados períodos la entrada de aire fresco y la salida de los gases emitidos por la compresión del combustible en los cilindros [23]; puesto a que, el diseño de su cabeza hace posible un cierre hermético con el orificio de la culata. La cabeza o platillo se mecaniza una superficie cónica, generalmente a  $45^\circ$  [24], que constituye la zona de apoyo contra el asiento.

### 2.3.2. Principio de Funcionamiento

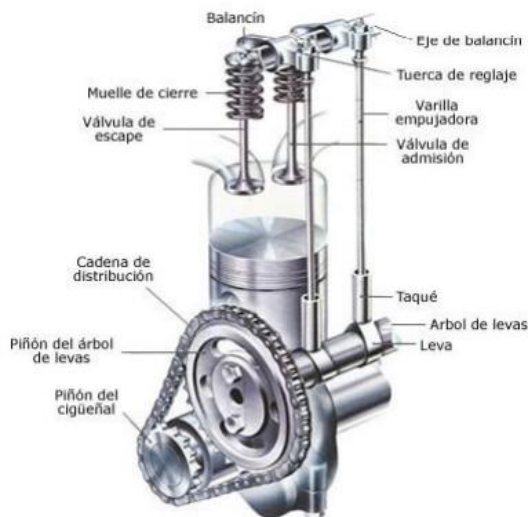
Las válvulas requieren de elementos o un sistema de distribución que genera un movimiento inicial para ponerse en funcionamiento, tal como se muestra en la **Figura 4**.

La apertura y cierre de las mismas, es iniciado por la fuerza que se trasmite del árbol de levas a las diferentes válvulas, a través de vástagos, taques, balancines y propulsores [25].

El árbol de levas genera su movimiento por medio del cigüeñal y tiene la cualidad de girar a la mitad de la velocidad que este, donde el perfil y posición de la leva determina la apertura de la válvula. Dándose el cierre a través de un muelle o resorte calibrado, que es lo suficientemente fuerte para cerrar y asegurar la hermeticidad [26].



**Figura 4** Sistema de Distribución



Tomado de: Gustavo D., Proyecto de motores, Sistema de distribución, 2019.

En motores de encendido por compresión, las válvulas regulan el flujo de aire y gases de escape durante el ciclo de cuatro tiempos [27]. Su funcionamiento parte en la fase de admisión, cuando las válvulas de abren a fin de permitirse el ingreso de aire, posteriormente en la fase de compresión tanto las válvulas de escape como de admisión permanecen netamente cerradas, generándose así una compresión en el interior del cilindro; mientras que, en la fase de combustión el combustible se inyecta y se comprime, generando energía, para finalmente en la fase de escape, se genere una apertura de las mismas para evacuar todos los gases quemados.

### 2.3.3. Materiales utilizados en la fabricación de las válvulas de un MEC

Los materiales que comúnmente son utilizados en las válvulas de un motor de encendido por compresión, se describen en la **Tabla 1**, la cual clasifica al tipo de válvula respecto a la cantidad de materiales utilizados para su fabricación.



Si bien, las válvulas tienen por objetivo resistir condiciones extremas de funcionamiento en el interior de la cámara de combustión, los materiales que las componen, deben caracterizarse por el cumplimiento de especificaciones químicas y metalúrgicas resistentes a la temperatura, presión y fricción [28] para las que fueron diseñadas.

**Tabla 1** *Materiales ocupados en la fabricación de las válvulas*

<b>Tipo de válvula</b>	<b>Descripción</b>
<b>Válvulas Mono metálicas</b>	Este tipo de válvulas son fabricadas a partir de un solo material, el cual puede ser acero al cromo-silicio o el molibdeno [29], cuyo objetivo es mantener en la resistencia y protección de elevadas temperaturas y corrosión química.
<b>Válvulas Bimetálicas</b>	La fabricación de este tipo de válvulas, se caracteriza en el uso de dos metales donde uno de ellos cumple con propiedades deslizantes para el vástago; mientras que, para la cabeza, se utiliza aleaciones de acero resistente a altas temperaturas [30], cuya unión de sus materiales se ejecuta mediante una soldadura en frío.
<b>Válvulas refrigeradas con sodio</b>	En motores de alto rendimiento se construyen válvulas de escape con el vástago hueco y se rellenan con sodio metálico o de sales de litio y de potasio para mejorar la refrigeración [31]. En una temperatura no superior a los 97.5 °C el sodio se derrite, disipando calor hacia el vástago logrando la reducir la temperatura hasta en más de 100 °C.

**Nota:** Las válvulas de un motor se caracterizan por la cantidad de materiales ocupados en su fabricación.

#### 2.3.4. Clasificación de las Válvulas de un motor Diésel

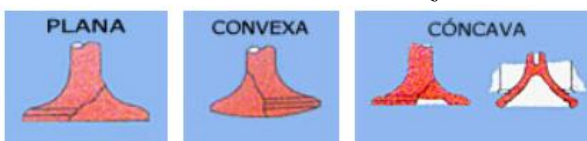
Las válvulas de los motores de encendido por compresión se clasifican según su tipo de funcionamiento y el diseño de su cabeza, tal como se especifica en la **Tabla 2** a continuación:

**Tabla 2** *Clasificación de las válvulas del MEC*

<b>a) Clasificación dada por su funcionamiento</b>	<b>b) Clasificación dada por el Tipo de su Cabeza</b>
<p>– <b>Válvula de admisión</b></p> <p>Conecta al múltiple de admisión con el cilindro dependiendo del tiempo de distribución a fin de que se dé un ingreso de mezcla aire-combustible procedente del sistema de inyección, bajo el objetivo de que se efectúe el ciclo de admisión [32].</p>	<p>Con respecto al diseño de la cabeza de las válvulas, existen tres tipos los cuales se muestran en la Figura 5, donde cada una de ellas responden a los requerimientos del motor.</p>



**Figura 5** Clasificación de las válvulas respecto al diseño de su cabeza



**Tomado de:** Solo Motores, funcionamiento de las válvulas de motor, 2012.

#### – Válvula de escape

Según el manual CEAC el funcionamiento de la válvula de escape se sincroniza con el tiempo de la distribución, manteniendo la particularidad de poner a los cilindros en contacto con el exterior por medio de los conductos de escape que se utilizan para la expulsión de gases generados por la combustión [33].

#### – Cabeza Plana

Usada en automóviles y vehículos comerciales de tamaño pequeño. Su diseño se centra la mantención de excelente resistencia a la apertura y cierre de válvulas, ya que al estar en funcionamiento se experimentan cambios bruscos de temperatura y excesivos desgastes por fricción en cada una de las válvulas.

#### – Cabeza Convexa

Su diseño depende de la resistencia que se establezca en motores industriales al encontrarse operando en plazos muy largos de trabajo.

#### – Cabeza Cóncava

En su diseño no se proporciona gran resistencia, pero si se hace paréntesis a su masa y la eficiente conductividad térmica. Comúnmente este tipo de válvulas, son utilizadas en motores que necesitan altas revoluciones por minuto

**Nota:** Elaboración propia con información tomada de [32], [33], [34].

### 2.3.5. Mantenimiento de las Válvulas del Motor Diesel

#### 2.3.5.1. Comprobación del estado de válvulas

La comprobación del estado de válvulas va de la mano con los daños que afectan principalmente la cabeza, el asiento y el vástago de la válvula. Donde estas deformaciones pueden ser causadas por compuestos químicos de la combustión, variaciones térmicas bruscas o fricción en la guía del vástago [33]. Por eso, al desmontar las válvulas de la culata, lo fundamental para la verificación de su estado es tener en cuenta que:



- Una vez retiradas, deben limpiarse cuidadosamente las cabezas, asientos y guías, eliminando residuos de carbonilla. Se revisa que las superficies estén lisas y sin señales de rayaduras o erosión. Si están en buen estado, se realiza un asentado con pasta abrasiva.
- Se debe verificar que el vástago esté recto y que la cabeza no esté deformada, usando un reloj comparador. Si hay desviaciones, la válvula debe ser reemplazada. El juego entre el vástago y la guía debe ser de aproximadamente 0,05 mm para válvulas de admisión y 0,07 mm para escape, aceptando un máximo de 0,12 mm.
- El rectificando se realiza solo si la erosión es leve, para mantener la geometría de la válvula.
- La superficie de asiento se trabaja con fresas de 45° o 30°, complementadas con conos de entrada y salida (20° y 75°) para lograr la altura adecuada, para finalmente, comprobar si su cierre es completamente hermético.

### ***2.3.5.2. Regulación de la holgura de válvulas***

Al mantenerse en funcionamiento el sistema de distribución, por efectos de temperaturas variables, se produce una serie de dilataciones conjugadas en válvulas y elementos de empuje que deben compensarse con una holgura que debe existir entre el balancín y el vástago de la válvula [35]. La holgura o reglaje depende del tipo de funcionamiento de válvulas, puesto a que si se trata de una válvula de escape se requiere de más espacio porque estas ejecutan su trabajo a mayor temperatura con respecto a las válvulas de admisión.

Por otro lado, para la calibración de las válvulas existen diferentes métodos, pero lo esencial en aquel proceso es tomar en consideración, que el reglaje de las válvulas variará según el tipo de motor; puesto a que, si se tratase de motores diésel livianos el reglaje que se debe dar



esta entre 0.20 mm para las válvulas de admisión y 0.35 mm para válvulas de escape; mientras que, si se trabaja en motores diésel más grandes su ajuste esta entre 0.30 y 0.50 mm [36].

### 2.3.6. Desgaste de las válvulas

El desgaste prematuro o a su vez el desgaste total de las válvulas del motor, puede deberse a diferentes factores, donde el sobrecalentamiento, escases de lubricación y el excedido número de revoluciones que el motor experimenta en su funcionamiento, pueden denominarse como las razones más comunes que inciden en su desgaste [37]. Así como la presencia de sellos desgastados, acumulación de carbón en el vástago, asiento o simplemente fracturas en las válvulas causados por la deficiencia de sus muelles.

Cuando el motor diésel está en marcha, las válvulas experimentan cambios bruscos de temperatura hasta poner fin al funcionamiento del motor, lo que genera que el desgaste en sus válvulas sea inevitable con el tiempo, debido a que estas trabajan en condiciones extremas, donde generalmente las válvulas de admisión experimentan desgastes más frecuentes [37], debido al deslizamiento continuo y la entrada de polvo o partículas metálicas a través del múltiple; mientras que las válvulas de escape tienden a desgastarse por la corrosión.

Como se mencionó anteriormente, el desgaste de las válvulas puede deberse a múltiples factores y no siempre está relacionado con las ineficiencias más comunes, ya que existen otros motivos importantes, como los erros de diseño, ineficiencia en la propiedad de sus materiales o simplemente fin de la vida útil de las misma mencionados en la **Tabla 3** [38].

---

**Tabla 3 Aspectos que influyen en el desgaste de las válvulas**

---

**Desgaste de las válvulas**

---



El gripaje es la adherencia del vástago el cual impide el movimiento eficiente de las válvulas.

### **Gripaje del vástago levanta válvulas**



Se forma un canal en el asiento de la válvula debido al desgaste que excesivo. Un desgaste incontrolado reduce las dimensiones de la válvula.

### **Desgaste del asiento de válvulas**



Se producen por la generación de golpes violentos a las válvulas dados por la deficiencia de su muelle.

### **Fracturas y roturas de las válvulas**



Se produce por causas térmicas, provenientes del excesivo roce de la válvula con el asiento de la culata.

### **Arrastre en la región del asiento de válvulas**





Se diferencia por el desprendimiento de la cabeza de la válvula a razón de la falta de lubricación, a diferentes temperaturas.

**Fractura en la región de la cabeza de la válvula**



Como se muestra en la figura a continuación, su desgaste es pronunciado debido a un mal asentamiento de la válvula.

**Desgaste generalizado en la cabeza de la válvula**



Se produce por los cambios térmicos, el desgaste se da en la región del asiento, extendiéndose hacia la región del radio.

**Asiento de válvulas quemado con desgaste localizado**



**Nota:** Elaboración propia. En la tabla se muestran los desgastes que ponen fin a la vida útil de la válvula en motor de encendido por compresión. Donde dicha información fue tomada de MAHLE. Componentes de motor y filtros: daños, causas y prevención [38].

**2.4. Fallas del Motor Diésel respecto al Estado de las Válvulas**

Las fallas en un motor diésel con respecto al estado de las válvulas se definen como cualquier condición anormal que interfiere con su operación eficiente, segura y confiable [39]. Estas fallas pueden originarse en componentes mecánicos y se manifiestan en forma de pérdida de potencia, consumo elevado, ruidos, vibraciones, humo anormal o incluso la detención total del motor. Cuando las válvulas (de admisión o escape) del motor se ven comprometidas, el proceso



de combustión se altera significativamente, lo que puede derivar en distintas categorías de fallas: leves, graves y catastróficas.

### 2.4.1. Fallas leves

Las fallas leves en las válvulas de un motor diésel son aquellas que no impiden el funcionamiento del motor, pero afectan su rendimiento, eficiencia o generan síntomas iniciales[38]. En la **Tabla 4** muestra algunas de estas fallas que se dan en un motor diésel y como está influye en el mismo si pasasen por desapercibidas.

**Tabla 4** *Fallas Leves en las Válvulas de un motor Diésel*

<b>Falla</b>	<b>Síntoma</b>	<b>Causa</b>	<b>Consecuencia</b>
<b>Desajuste del juego de válvulas</b>	Pérdida leve de potencia, ralentí inestable, consumo elevado	Juego excesivo o muy cerrado entre válvula y balancín	Entrada/salida de gases deficiente, menor eficiencia
<b>Válvulas carbonizadas</b>	Pérdida progresiva de potencia, detonación irregular	Acumulación de carbón en asientos de válvula	Fuga de compresión, mala combustión
<b>Taqués hidráulicos con aire o desgaste</b>	Ruido leve tipo cabeceo; así como pérdida progresiva de potencia	Aire en el taqué, desgaste interno	Apertura irregular de válvulas, golpeteo
<b>Resortes de válvula debilitados</b>	Vibraciones leves, fallos intermitentes a altas RPM	Fatiga del resorte	Cierre lento de válvulas, combustión incompleta
<b>Sellos de válvula desgastados</b>	Humo azul al arrancar, consumo poco notable de aceite	Desgaste o también daño del sello	Paso de aceite a la cámara, emisión de humo

**Nota:** Elaboración con información tomada de: Manual CEAC del Automóvil [33], MAHLE, Componentes de Motor y Filtros Daños, Causas y Prevención, sf. [38], CBC, Mecánico de motores diésel, 1977 [39].



### 2.4.2. Fallas Graves

Las fallas graves en las válvulas de un motor diésel afectan directamente el funcionamiento del motor, generando síntomas evidentes, como pérdida importante de potencia, humo excesivo, ruidos anormales y en casos extremos, riesgo de daños internos [38]. Alguna de estas fallas se muestra **Tabla 5**, donde se mantiene que dejar por desapercibido este tipo de anomalías compromete seriamente el rendimiento, la confiabilidad e incluso la vida útil del motor.

**Tabla 5** *Fallas Graves en las Válvulas de un motor Diésel*

<b>Falla</b>	<b>Síntoma</b>	<b>Causa</b>	<b>Consecuencia</b>
<b>Válvulas quemadas</b>	Pérdida severa de compresión, humo gris/blanco	Sobrecalentamiento, mal sellado	Fugas de gases, combustión incompleta
<b>Válvulas dobladas</b>	Golpeteo metálico fuerte, vibraciones	Falla en distribución, contacto pistón-válvula	Fallo de cilindro, posible daño a pistón
<b>Rotura del resorte de válvula</b>	Motor no mantiene el ralentí, sonido irregular	Fatiga del material	Válvula no cierra correctamente, fallo de combustión
<b>Guías de válvula desgastadas</b>	Humo azul, alto consumo de aceite	Desgaste por fricción	Movimiento lateral de válvula, baja compresión
<b>Válvulas atascadas</b>	Ralentí irregular, detención súbita	Carbonización, falta de lubricación	Válvula no se mueve, cilindro inoperante

**Nota:** Elaboración con información tomada de: Manual CEAC del Automóvil [33], MAHLE, Componentes de Motor y Filtros Daños, Causas y Prevención, sf. [38], CBC, Mecánico de motores diésel, 1977 [39].

### 2.4.3. Fallas Catastróficas

Las fallas catastróficas son las más graves dentro del sistema de válvulas de un motor diésel. Se caracterizan porque el motor se detiene completamente y no puede volver a arrancar sin una reparación mayor o reconstrucción total [38]. Estas fallas (**Tabla 6**) suelen estar asociadas a daños mecánicos severos, ruptura de componentes o colisiones internas.



**Tabla 6 Fallas Catastróficas en las Válvulas de un motor Diésel**

<b>Falla</b>	<b>Síntoma</b>	<b>Causa</b>	<b>Consecuencia</b>
<b>Válvula rota</b>	Paro inmediato, golpeteo interno	Fatiga del material, golpe con pistón	Dstrucción de pistón, culata, cilindro
<b>Colisión pistón-válvula</b>	Paro brusco, motor no arranca	Rotura de correa/cadena de distribución	Interferencia mecánica, daño interno severo
<b>Desprendimiento del asiento de válvula</b>	Ruido metálico, pérdida de compresión	Fatiga térmica, sobrecalentamiento	Asiento cae al cilindro, daño crítico
<b>Desintegración del tren de válvulas</b>	Ruido extremo, motor detenido	Rotura de árbol de levas, chavetas o balancines	Válvulas no operan, interferencia destructiva

**Nota:** Elaboración con información tomada de: Manual CEAC del Automóvil [33], MAHLE, Componentes de Motor y Filtros Daños, Causas y Prevención, sf. [38], CBC, Mecánico de motores diésel, 1977 [39].

## 2.5. Mantenimiento Predictivo del Motor Diésel

El mantenimiento predictivo es una estrategia basada en la monitorización continua del estado del motor mediante sensores, análisis de datos y modelos computacionales para predecir fallos antes de que ocurran. Su objetivo es reducir costos de reparación, evitar paradas no planificadas y prolongar la vida útil del motor.

Según la norma ISO 17359, el mantenimiento predictivo utiliza indicadores como vibraciones, temperatura, presión, ruidos, emisiones, y consumo de energía, con el fin de anticiparse a problemas mediante técnicas de análisis de condición [40].

### 2.5.1. Técnicas de mantenimiento predictivo

Una técnica es un método específico utilizado para evaluar el estado operativo de un componente o sistema sin necesidad de desmontarlo, pudiendo con ello anticiparse una falla catastrófica[41]. En motores diésel, estas técnicas permiten la monitorización y diagnóstico en tiempo real de parámetros como vibraciones, temperatura, presión, lubricación o emisiones,



mediante sensores, instrumentos de medición o software especializado [42]. Estos parámetros se muestran en la **Tabla 7** la cual identifica el índice y aplicación para no agravar el estado de averías o índice de fallas en MEC.

**Tabla 7** *Técnicas de mantenimiento preventivo enfocadas en MEC*

<b>Técnica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación en motores diésel</b>
<b>Análisis de vibraciones</b>	Estudia las vibraciones del motor para detectar desequilibrios o desgastes.	Identifica desajustes en válvulas, cojinetes, árbol de levas.
<b>Termografía infrarroja</b>	Usa cámaras térmicas para detectar puntos calientes anómalos.	Detecta elevados índices de sobrecalentamiento dados en válvulas, inyectores, turbo, entre otros.
<b>Análisis de aceite lubricante</b>	Mide la viscosidad, presencia de partículas metálicas o contaminantes.	Determina desgaste interno (válvulas, cilindros, cojinetes, entre otros) y fallas de sellado.
<b>Análisis de gases de escape</b>	Evalúa las emisiones y la calidad de combustión.	Indica problemas de inyección, válvulas, EGR, y combustión incompleta.
<b>Ultrasonido</b>	Detecta ruidos de alta frecuencia generados por fugas o fricción anormal.	Identifica fugas de compresión, escape o fallas de sellos de válvula.
<b>Endoscopía de motor</b>	Inspección interna del motor mediante cámaras.	Visualiza desgaste, acumulación de carbón, daño en válvulas o pistones.

Nota: Elaboración propia con información tomada de: Lee J, Ni J, et al. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing, 2020 [42], Keith M, An introduction to predictive maintenace 2002 [43].

### 2.5.2. Aprendizaje Automático (Machine Learning)

El aprendizaje automático es una rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas informáticos aprender automáticamente a partir de datos, identificar patrones y tomar decisiones sin estar programados explícitamente para cada tarea [44]. Es decir, en lugar de seguir instrucciones fijas, los algoritmos de machine learning construyen modelos matemáticos que mejoran su rendimiento con la experiencia a medida que reciben más información.



En el contexto del mantenimiento predictivo de motores diésel, los tipos de aprendizajes automáticos mostrados en la **Tabla 8** se utilizan para analizar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores (como vibración, temperatura, presión, emisiones) y predecir el momento óptimo para realizar mantenimiento, identificar fallas incipientes o clasificar condiciones operativas del motor [43], a fin de reducir tiempos de inactividad, optimizar recursos y evitar fallas catastróficas que atenten con el funcionamiento prolongado del motor.

**Tabla 8** *Tipos de Aprendizajes Automáticos en MEC*

<b>Tipo de aprendizaje</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Aprendizaje supervisado</b>	Usa datos históricos con fallas etiquetadas para entrenar modelos.	Detectar fallas en válvulas según patrones de vibración/ruido.
<b>Aprendizaje no supervisado</b>	Encuentra patrones sin necesidad de etiquetar datos.	Detectar condiciones anómalas del motor sin conocer la falla exacta.
<b>Aprendizaje por refuerzo</b>	El sistema aprende mediante prueba y error en tiempo real.	Optimización dinámica del funcionamiento del motor en flotas conectadas.

Nota: Elaboración propia con información tomada de: Lee J, Ni J, et al. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing, 2020 [42], Keith M, An introduction to predictive maintenace 2002 [43].

### 2.5.2.1. Algoritmos comunes

Algunos de los algoritmos más comunes usados en mantenimiento predictivo de motores diésel se presentan en **Tabla 9**, misma que identifica y describe el indicio de funcionamiento que estos modelos cumplen tras llevar una estrecha relación con el mantenimiento de un motor en tiempo real.

**Tabla 9** *Algoritmos usados en el mantenimiento predictivo de MEC*

<b>Algoritmo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Árboles de decisión</b>	Modelo de ramificación que clasifica condiciones del motor	Detecta si una válvula está dentro del umbral de desgaste aceptable.



<b>Máquinas de vectores de soporte (SVM)</b>	según variables como temperatura o vibraciones. Clasifica datos separando fallas de condiciones normales mediante un hiperplano óptimo.	Clasifica señales de vibración que indican fallas en válvulas.
<b>Redes neuronales artificiales (ANN)</b>	Simula el funcionamiento del cerebro para identificar patrones complejos y predecir fallas.	Predice el desgaste de válvulas a partir de datos históricos.
<b>K-means</b>	Algoritmo de agrupamiento que detecta patrones similares sin necesidad de datos etiquetados.	Detecta comportamientos anómalos que indican fallas tempranas.

Nota: Elaboración propia con información tomada de: Lee J, Ni J, et al. Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing, 2020 [42], Keith M, An introduction to predictive maintenace 2002 [43].

## 2.6. Vibraciones en el Motor Diésel

En motores diésel, las vibraciones generan un sinnúmero de anomalías que pueden ocasionar pérdida de apriete en las sujeciones de sus juntas y las conexiones de diferentes sistemas del motor, las cuales podrían ocasionar un colapso del mismo, si antes no son diagnosticadas y corregidas.

### 2.6.1. Vibración Mecánica

Se define como aquellos movimientos repetitivos de una parte o estructura física alrededor de una posición de equilibrio, donde el movimiento emitido por el cuerpo se aleja y vuelven a su posición original [45]. En otras palabras, una vibración mecánica es el resultado de una perturbación que provoca el movimiento oscilante, como por ejemplo un resorte que se estira y se suelta, las cuerdas de una guitarra al ser entonadas, o un motor de un vehículo cuando se pone en marcha, donde las vibraciones emitidas tienden a moverse hacia delante y atrás, entorno a su posición inicial u origen.



### 2.6.1.1. Propiedades de las vibraciones mecánicas

Las propiedades de este tipo de vibraciones, van a acorde a la frecuencia, periodo, amplitud y frecuencia natural [46]. Donde:

- Frecuencia (Hertz, Hz): representa la cantidad de veces que ocurre un ciclo de movimiento en una unidad de tiempo.
- Período: indica la duración de un ciclo y se calcula como el inverso de la frecuencia
- Amplitud: mide la máxima distancia alcanzada respecto a la posición de reposo durante el ciclo de movimiento
- Frecuencia natural misma que representa la frecuencia a la cual un sistema vibrará cuando se le perturbe y no esté sujeto a fuerzas externas.

Dada la definición de sus propiedades, el conocimiento y entendimiento de sus ecuaciones mostradas en la **Tabla 10**, de igual manera son cruciales para su análisis ya que son la base que sustenta su representación gráfica.

**Tabla 10** *Ecuaciones de las propiedades de las vibraciones mecánicas*

Características	Ecuación	Unidades
Frecuencia	$f = \frac{1}{T} \text{ ó } \frac{\omega}{2 * \pi}$	Hertzio (Hz)
Periodo	$t = \frac{1}{f} \text{ ó } \frac{2\pi}{\omega}$	Segundo (s)
Velocidad angular	$\omega = 2 * \pi * f$	Rpm
Frecuencia angular	$f_n = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k}{m}}$	Hertzio (Hz)

Nota: Elaboración propia con información tomada de monografías, vibraciones mecánicas, sf.



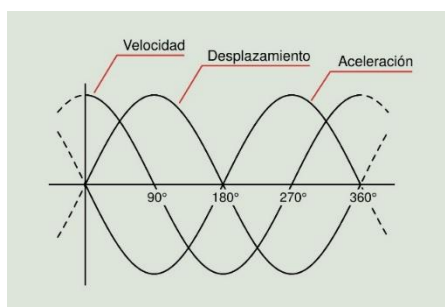
Donde la nomenclatura usada en sus fórmulas como (f, t, w, m y k), responden a:

- f:** frecuencia
- t:** tiempo
- w:** velocidad angular
- m:** masa
- k:** constante o rigidez del objeto

### 2.6.1.2. Representación gráfica de las vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas pueden ser un movimiento angular puro (rotación), un movimiento lineal puro (desplazamiento) o un movimiento complejo [47], en el que intervienen la rotación y el desplazamiento, que puede describirse mediante la aceleración de la velocidad o el desplazamiento real de la masa implicada [48]. Mostrada en la **Figura 6** a continuación:

**Figura 6** Desfase entre el desplazamiento, velocidad y aceleración



Tomado de: Fernández A., Estudio de las vibraciones, sf.

### 2.6.1.3. Tipos de Vibraciones Mecánicas

#### a) Vibración libre

Se define como la elasticidad de cualquier cuerpo a través de un impulso inicial en la cual se su movimiento se mantiene sólo por las fuerzas de restauración inherentes al sistema en función de la distribución de masas, la rigidez y los grados de libertad [49].

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



- **Vibración libre no amortiguada**, este tipo de vibración se produce cuando no hay fuerzas perturbadoras que actúen sobre el sistema, es decir, se da cuando no existe ningún elemento que absorba la energía de la vibración.
- **Vibración libre amortiguada**, esta clase de vibración se produce en sistemas con elementos de absorción de energía “c”, o también llamados amortiguadores.

#### **b) Vibración Forzada**

Se define como una fuerza aplicada perturbadora externa a un sistema, donde esta se ve obligado a vibrar [48]. Este tipo de vibraciones utiliza dos conceptos los cuales son:

- **Vibración forzada no amortiguada**, este tipo de vibración se produce cuando un sistema está sometido a una fuerza perturbadora externa, produciéndose vibraciones forzadas de la misma frecuencia que la fuerza externa, pero sin amortiguación, porque ninguno de los componentes absorbe energía.
- **Vibración forzada amortiguada**, se cuenta con elementos que absorben energía, en sistemas sometidos a fuerzas.

#### **2.6.2. Transformada de Fourier**

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que descompone una señal en sus frecuencias componentes, permitiendo analizar cómo se distribuye la energía de la señal en el dominio de la frecuencia [48].



### 2.6.2.1. Transformada Discreta de Fourier (TDF)

La Transformada Discreta de Fourier (DFT) es una herramienta matemática que convierte una señal discreta en el tiempo (es decir, una secuencia de datos tomados en intervalos) al dominio de la frecuencia.

**Figura 7** Ecuación 1: Transformada Discreta de Fourier

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)*k*n}$$

Donde:

- **X(n)**: señal en el tiempo.
- **X(k)**: contenido de la frecuencia.
- **n**: número total de muestras.
- **k**: índice de frecuencia.

### 2.6.2.2. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Es un algoritmo optimizado que calcula de manera eficiente la Transformada Discreta de Fourier (DFT), la cual descompone una señal en sus componentes de frecuencia [51]; y sirve para analizar, vibraciones, sonidos, imágenes y cualquier señal periódica, identificando qué frecuencias y amplitudes la componen.

**Figura 8** Ecuación 2: Transformada Rápida de Fourier

$$X_g(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt$$

Donde:

- **t**: tiempo.
- **f**: frecuencia.
- **x(t)**: señal de prueba.
- **e-j2ft**: Fasor de sondeo (Kernel Function)
- **x(f)**: espectro en función de la frecuencia f.



## 2.7. Norma ISO 10816-1

La normativa ISO establece criterios para evaluar las vibraciones mecánicas de máquinas en un rango de frecuencia de 0.5 a 150 Hz, aplicándose a una amplia variedad de equipos según su carga, tamaño y características operativas [52]. Dentro de esta normativa, especialmente en la ISO 10816, se definen los límites aceptables de vibración para distintos tipos de maquinaria (de entre 0.5 y 150 toneladas), considerando su función y dimensiones. Estas recomendaciones están orientadas a la medición y análisis de vibraciones, con el fin de detectar fallas que puedan afectar el rendimiento o acortar la vida útil del equipo.

Según la Organización Internacional de Normalización [53], estas normas también especifican los procedimientos generales para la evaluación de vibraciones en condiciones operativas reales, especialmente en partes no giratorias, con el objetivo de asegurar la confiabilidad del sistema a largo plazo. Una correcta instalación y calibración de los equipos de medición es fundamental para garantizar resultados fiables. Se recomienda trabajar en un rango amplio de frecuencia, entre 2 y 1000 Hz, utilizando valores RMS (Root Mean Square) de desplazamiento, velocidad y aceleración. La precisión esperada debe estar entre  $\pm 10\%$  en el rango de 10 a 1000 Hz y  $+10\%/-20\%$  en el rango de 2 a 10 Hz.

### 2.7.1. Directrices generales de normativa ISO 10816-1

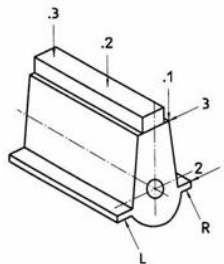
En esta sección de la norma ISO 10816, se establecen los parámetros generales y metodologías para la medición y evaluación de vibraciones mecánicas, con énfasis en partes no rotatorias de las máquinas. El objetivo principal es analizar las oscilaciones generadas por la propia maquinaria, sin considerar aquellas transmitidas desde fuentes externas [54].

A continuación, se detallan los principales parámetros de medición:



- Rango de frecuencias: Generalmente se trabaja entre 10 Hz y 1000 Hz, aunque el rango puede variar según el tipo de máquina.
- Parámetros a medir: Se incluyen desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración.
- Magnitud de la vibración: En mediciones de banda ancha, se suele utilizar la velocidad como indicador. No obstante, en investigaciones específicas puede preferirse la aceleración en lugar del valor RMS, aunque esto requiere criterios de evaluación alternativos.
- Severidad de la vibración: Se determina midiendo en distintas posiciones y direcciones. El valor seleccionado dependerá de la magnitud más representativa del tipo de maquinaria evaluada.
- Posiciones de medición: La norma indica que los sensores deben colocarse en puntos estructurales clave, capaces de reflejar de forma precisa las fuerzas dinámicas. Estas ubicaciones se ilustran en la siguiente figura, ya que son fundamentales para obtener datos fiables.

**Figura 9** *Puntos de medición para máquinas reciprocantes*



**Tomado de:** Normativa ISO 10816, 2005

**Nota:** En la figura se muestran los puntos de medición adaptados para un motor en línea.

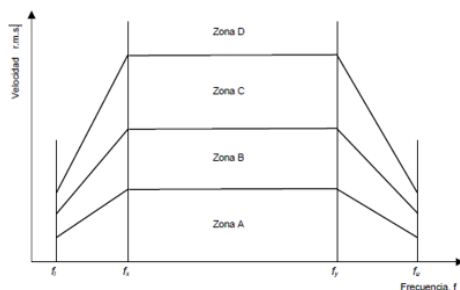


## 2.7.2. Condiciones para los ensayos de la Normativa ISO 10816-1

Para realizar ensayos, es fundamental contar con los equipos adecuados y recopilar información precisa dentro del marco de la investigación. Donde los aspectos principales a considerar son:

- a) Instalación del ensayo: se utilizan bancos de pruebas, la estructura que sostiene la máquina debe ser estable y evitar la confusión de sus muestras.
- b) Condiciones de funcionamiento: La adquisición de datos debe comenzar cuando la máquina alcanza su régimen normal de operación, aunque en ciertos estudios puede iniciarse en otras condiciones específicas.
- c) Criterios de evaluación: clasificar la maquinaria en distintas zonas según su estado operativo (Zona A: Máquinas recién instaladas, Zona B: Máquinas en operación continua sin restricciones y Zona C: Máquinas operando dentro de un límite aceptable)

**Figura 10 Zonas de evaluación**



**Tomado de:** Normativa ISO 10816, 2005

**Nota:** En la figura se muestra la forma general de criterio de aceptación de la velocidad de vibración.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. MATERIALES

##### 3.1.1. Motor Diésel Chevrolet Isuzu NHR

Para llevar a cabo el desarrollo del presente estudio, como uno de los materiales principales a utilizarse es el Motor Diésel Chevrolet Isuzu NHR (**Figura 11**). Este motor pertenece a la serie N de Isuzu la cual responde a una amplia variedad de automotores de mediana carga [55]. La configuración de sus cilindros se caracteriza por ser cuatro en línea, donde la geometría de su carrera tiende a ser prolongada a fin de generar un par ideal para el trabajo forzado a bajas RPM.

Con referencia al sistema de inyección, el motor presto como modelo de estudio para el presente trabajo, cuenta con una bomba rotativa de inyección directa [56] que junto con el árbol de levas hace posible que los puntos de inyección al igual que caudal lleven una estrecha relación con respecto al prestaciones que se requiere del motor. Por otro lado, otra de sus propiedades que hacen de este motor un objeto importante para este estudio es su culata fabricada con hierro fundido y en él ensamblarse solo dos válvulas para cada cilindro[57], característica peculiar que lo hace ideal para el desmontaje repetitivo que requiere este estudio. Si bien existen diferentes propiedades técnicas que definen a este motor, otras de sus particularidades citadas, pero no menos importantes se encuentran en la **Tabla 11** la cual define especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

**Tabla 11** *Especificaciones técnicas del motor Chevrolet Isuzu NHR*

<b>Detalle</b>	<b>Especificación</b>
Tipo de Motor	4JBI-TC DE 4 tiempos y 4L
Cilindraje	2.999 cc (3.0. litros)
Diámetro x Carrera	95.4 x 104.9 (mm)
Relación de compresión	18.5:1
Sistema de Inyección	Bomba rotativa tipo Denso



Orden de encendido	1-3-4-2
Potencia máxima	77 kW (106 PS) a 3200 rpm
Torque máximo	230 Nm a 1400-3200 rpm
Alimentación	Turboalimentado con intercooler
Masa	250 kg sin fluidos
Tipo de Aceite	15W-40
Sistema de lubricación	Lubricado por bomba de aceite
Sistema de refrigeración	Forzado por agua

**Nota:** Elaboración propia, de la cual sus datos fueron tomados de la Ficha técnica del fabricante [58].

**Figura 11** Motor modelo de estudio Isuzu NHR



Nota: Motor 4JB1, utilizado como material de investigación para el presente estudio.

### 3.1.2. Válvulas del Motor Chevrolet Isuzu NHR

Las válvulas que hacen posible los cuatro tiempos en el motor citado, no son más que piezas metálicas que apoyadas con los balancines y el árbol de levas hacen posible la entrada de la mezcla de aire combustible y la salida de los gases de la combustión [59]. Dicho de otro modo, las válvulas del Motor Isuzu NHR forman parte de un mecanismo, donde una de ellas denominada válvula de admisión regula la entrada de aire combustible; mientras que la segunda, denominada válvula de escape cumple con la función de descargar los gases generados en la cámara de combustión [60].



Algunas de las propiedades principales que caracterizan a este tipo de válvulas, se presentan en la **Tabla 12**, la cual muestra que estas válvulas no solo se diferencian por su geometría particular, sino que también por los diversos materiales que las forman.

**Tabla 12** Características de las válvulas que incorpora el motor Chevrolet Isuzu NHR

Propiedades	Válvula de Admisión	Válvula de Escape
Material	Mono metálica (Acero aleado)	Bimetálica (Acero aleado y Aleación de cromo)
Diseño de su cabeza	Convexa	Convexa
Diámetro de la cabeza	41.7 mm	35.7 mm
Diámetro del vástago	8 mm	8 mm
Longitud total	118 mm	118 mm

*Nota:* Elaboración propia. Características tomadas del objeto físico.

**Figura 12** Válvulas del Motor Isuzu NHR



### 3.1.2.1. Partes de las válvulas del Motor Chevrolet Isuzu NHR

En esta descripción no solo se hace énfasis a la estructura de la válvula, sino que también se resaltan los elementos que hacen posible su funcionamiento. Como lo muestra **Tabla 13**, la cual considera las mismas partes para válvulas de admisión y de escape.

**Tabla 13** Partes de las válvulas que incorpora el motor Chevrolet Isuzu NHR

Parte	Descripción
Cabeza	Sierra a los cilindros.
Vástago	Cuerpo de la válvula.
Asiento	Realiza un sellado hermético, apoyado por la superficie cónica de la culata.
Muelle	Asegura el cierre de la válvula cuando la leva deja de accionar.



Chaveta	Mantiene la unión de la válvula con el platillo del muelle.
Guía	Permiten la alineación de las válvulas

**Nota:** Elaboración propia. Descripción de las partes que caracterizan una válvula para su funcionamiento.

### 3.1.3. Juego de Galgas

Las láminas o galgas de espesor son un tipo de herramienta automotriz la cual garantiza un importante ajuste de separación entre el balancín y la válvula [61] a fin de que aquella distancia, se convierta en un punto estratégico para la apertura y cierre de las mismas.

Si bien, esta herramienta se caracteriza por llevar galgas que varían su espesor dependiendo la particularidad de su aplicación. En el caso del motor Isuzu NHR, según lo recomendado por el fabricante, el uso de la galga 0.40 mm (0.016 in) es ideal para el ajuste de las válvulas tanto de escape como de admisión.

A continuación, la **Figura 13** muestra el juego de galgas utilizadas:

**Figura 13** *Juego de galgas utilizado en el estudio*



### 3.1.4. Sensor de Vibración

Un sensor es un dispositivo que transforma una magnitud física (temperatura, presión, vibración, velocidad, entre otros) en una señal eléctrica o digital, donde cuyo interés parte en la medición, análisis o monitoreo de los datos obtenidos [62].



Para el contexto de este estudio, el uso del sensor acelerómetro piezoeléctrico ICP 603C01 mostrado en la **Figura 14**, fue fundamental para el análisis de vibraciones mecánicas a fin de detectar anomalías en las válvulas del Motor Isuzu NHR. Su diseño facilita la detección de aceleraciones dentro de un amplio rango de frecuencias (0.5 a 10,000 Hz), lo que lo hace efectivo para el estudio de los altos niveles vibratoriales emitidos por el motor evaluado.

**Figura 14** *Sensor de Vibración (Acelerómetro ICP 603C01)*



Al incorporar la tecnología ICP (Circuito Integrado Piezoeléctrico), este sensor entrega una señal eléctrica limpia, estable y de baja impedancia, gracias a las propiedades operativas que se muestran en la **Tabla 14**, donde dichas características, permiten que el sensor optimice la transmisión de datos hacia los sistemas de adquisición, incluso cuando se encuentra a cierta distancia del punto de medición.

**Tabla 14** *Características del sensor de vibración (Acelerómetro ICP603C01)*

<b>Propiedad</b>	<b>Operación</b>
Rango de Medición	50 g
Sensibilidad	100 mV/g
Rango de Frecuencia	0.5-10 000 Hz
Calibración de un punto	100 Hz
Toma de conexión	Dos polos en la parte superior

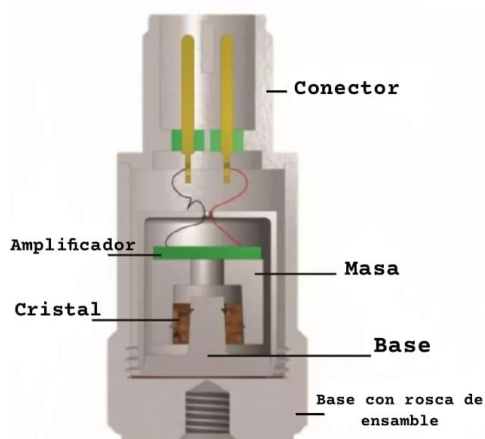
**Tomado de:** Direct Industry/Connect [63].



### 3.1.4.1. Principio de funcionamiento del Sensor

El funcionamiento de este tipo de sensor se sustenta bajo la segunda ley de Newton ( $F = m * a$ ), la cual establece que una masa en movimiento genera una fuerza. Donde dicha fuerza provoca la deformación de un cristal piezoeléctrico, produciendo una carga eléctrica proporcional a la aceleración aplicada [64]. Esta señal, posteriormente amplificada por medio de un circuito integrado, la cual se convierte en una salida eléctrica útil para el análisis vibracional dado por el accionamiento de todas sus partes [65], mostradas en la **Figura 15**:

**Figura 15** Componentes del sensor piezoeléctrico



**Tomado de:** Aroeira C. DMC, Tipos de acelerómetros, 2025 [65].

La amplificación interna de este sensor se basa en el sistema de dos hilos para la operación de este acelerómetro [65]. El primer hilo no solo suministra alimentación al sensor, sino que también, transporta la señal de salida; mientras que, el segundo hilo, actúa como retorno común (masa), utilizado para realimentación de circuito, permitiendo así, la mantención de estabilidad en la señal eléctrica.



Nota: Al tratarse de mediciones portátiles y en tiempo real, la instalación del sensor sobre el motor NHR se obtuvo por medio un imán, lo cual fue crucial ya que el acoplamiento magnético permitió una fijación rápida y estable, facilitando la adquisición de datos incluso ante variaciones de frecuencia y temperatura. A continuación, la **Figura 16** muestra la fijación del sensor en la parte anterior de la tapa válvulas del motor.

**Figura 16** Fijación del sensor en el motor Isuzu NHR



### 3.1.5. Tarjeta de adquisición de datos

El NI-9250 es un módulo de adquisición de datos (DAQ) de National Instruments diseñado para medir vibraciones y sonidos utilizando sensores piezoeléctricos [66]. Este dispositivo mostrado en la **Figura 17**, tiene dos canales de entrada para conectarse a acelerómetros o micrófonos, especialmente aquellos con tecnología IEPE (electrónica integrada piezoeléctrica), lo que permite obtener señales precisas de vibración. La señal del sensor se convierte en una señal de voltaje limpio y estable gracias a su tecnología ICP (Circuito Integrado Piezoeléctrico) [67].



**Figura 17** Tarjeta de adquisición de datos (DAQ NI-9250)



**Tomado de:** National Instruments, NI-9250, sf. [67].

Por otro lado, el NI-9250 tiene la capacidad de trabajar con TEDS (Transducer Electronic Data Sheet), que facilita la configuración automática del sensor. Este módulo tiene un rango de entrada de  $\pm 5$  V y puede muestrear datos hasta 102.4 kS/s (kilo-muestras por segundo) por canal, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo y análisis dinámico de vibraciones en diferentes sistemas mecánicos [68]. Donde la **Tabla 15** muestra otras de sus especificaciones técnicas dadas para la tarjeta de datos.

**Tabla 15** Especificaciones técnicas de la tarjeta (DAQ NI-9250)

<b>Aspecto</b>	<b>Especificación</b>
Numero de Canales	2 canales de entrada analógica
Resolución ADC	24 bits
Modo de muestreo	Simultáneo
Frecuencia	13.1072 Mhz
Exactitud	$\pm 100$ ppm máximo
Impedancia de entrada	$2\text{ M}\Omega \parallel 280\text{ pF}$
Rango de voltaje de entrada	$\pm 5.1\text{ Vpk}$
Condiciones de medición	Típica de $23\text{ }^\circ\text{C}$ , $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$

**Tomado de:** National Instruments, NI-9250 Specifications, sf. [69].



### 3.1.6. Software

#### 3.1.6.1. LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica que proporciona aceleradores de productividad únicos para el desarrollo de sistemas de pruebas, como un enfoque intuitivo para programación, conectividad con cualquier instrumento e interfaces de usuario completamente integradas [70]. Una de sus ventajas está en la posibilidad de desarrollar aplicaciones modulares y que estas sean reutilizables para bancos de prueba específicos.

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) [71] para análisis más profundo en plataformas como MATLAB.

**Figura 18** Logo de LabVIEW



**Tomado de:** Andrade H, Kovner S. Software synthesis from dataflow models for G and LabVIEW [72].

#### 3.1.6.2. MATLAB

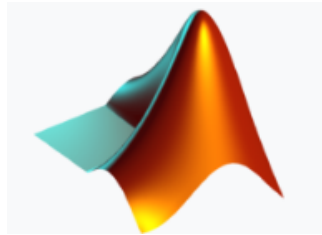
Matlab (MATrix LABoratory) es un entorno de programación especialmente diseñado para el análisis numérico, la simulación y la visualización de datos [73].

Por otro lado, una vez exportadas los datos obtenidos desde cualquier entorno de adquisición, MATLAB permite aplicar una amplia variedad de técnicas matemáticas y estadísticas



para el análisis. Por ejemplo, para el presente estudio, la utilización de herramientas como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) facilita mejor el tratamiento de los datos obtenidos, comenzando por la eliminación del ruido y de allí el respectivo análisis en detección de anomalías mecánicas.

**Figura 19** *Logo de MATLAB*



Tomado de: Chonacky N, Winch D. Reviews of Maple, Mathematica, and Matlab [74].



## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Enfoque y Tipo de Investigación

Las anomalías derivadas por las vibraciones mecánicas en motores de encendido por compresión representan un desequilibrio funcional con respecto a su rendimiento. Donde una de las múltiples razones se debe al desgaste del asiento de sus válvulas causado por una ineficiente holgura entre el balancín; puesto a que, la válvula no logra completar su sellado hermético, genera fugas de gases de combustión, sobrecalentamiento y erosión progresiva en su asiento si hablase de una holgura ajustada; mientras que, si existe una holgura excesiva las válvulas experimentan impactos o choques violentos, que no solo generan ruidos entre los diferentes componentes móviles; sino que también, este tipo de anomalías representan un desgaste acelerado particularmente en la culata y los asientos de las mismas.

Para el análisis detallado de este tipo de anomalías, este estudio adoptó un enfoque experimental sustentado en la recopilación de datos vibracionales obtenidos por un sensor instalado en el motor, donde se evaluó su funcionamiento bajo tres diferentes pruebas, consideradas como método de estudio. mostrados en la **Tabla 16**:

**Tabla 16 Pruebas ejecutadas en el método de estudio.**

Nro. de Prueba	Especificación
Primera prueba	Ejecutada con válvulas totalmente nuevas.
Segunda prueba	Ejecutada con válvulas que cumplieron su vida útil.
Tercera prueba	Ejecutada con válvulas parcialmente desgastadas (falla).

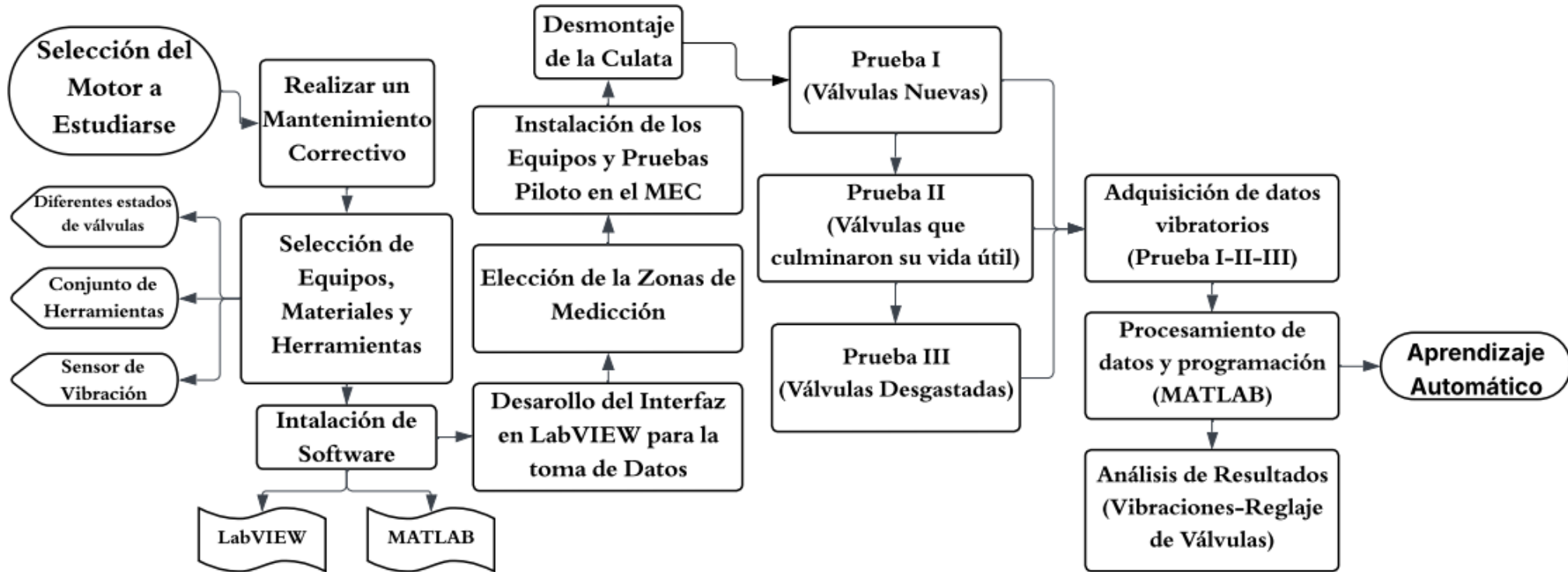
Es importante reconocer que el reglaje que utiliza este estudio para la configuración del tren de válvulas o también conocida como la holgura o espacio que debe tener la válvula frente al



balancín es aquella recomendada por el fabricante. Si bien existen diferentes maneras para analizar las anomalías dadas por la holgura de válvulas y de allí su influencia al desgaste del asiento de las mismas. Este presente trabajo se centró específicamente al análisis de vibraciones dadas por el problema mencionado y se justifica tras el cumplimiento de la siguiente metodología mostrada en la **Figura 20**, misma que da solución al problema planteado del estudio.



**Figura 20** *Proceso Metodológico*





### 3.2.2. Mantenimiento del Motor Chevrolet Isuzu NHR

De acuerdo con lo establecido en el alcance de este estudio, para asegurar la correcta recolección de datos vibracionales del motor Isuzu NHR, se llevó a cabo un plan de mantenimiento correctivo mostrado en la **Figura 21**. Dado que el motor no tenía un funcionamiento periódico, por lo que fue de necesario corregir todas sus deficiencias operacionales especificada en la **Tabla 17**, a fin de garantizar que sus componentes se mantuvieran en buen estado y así evitar que cualquier falla afectara la toma de mediciones.

**Figura 21** *Overhaul al motor NHR (material de estudio)*



El Mantenimiento correctivo del motor NHR incluyó la revisión y reparación de:

**Tabla 17** *Revisión dado en el motor NHR*

	<b>Detalle</b>
Sistema de refrigeración	Presencia de óxidos y liquido refrigerante en condiciones vulnerables de uso, lo que fue necesario el reemplazo del mismo.
Sistema de lubricación	No presentaba falla alguna, sin embargo, el aceite que en un inicio se incorporaba en él, fue cambiado por otro nuevo.
Sistema de inyección	La bomba junto, con lo inyectores mantenían el rango de presión (185-195 bar) lo que no fue necesario una calibración de los mismos. Su presión se



Distribución	<p>mantenía en el rango de trabajo para este tipo de motores.          Su piñonera mantenía un estado totalmente nuevo.</p>
Desgastes en las piezas internas (cojinetes, rines, bulones, entre otros)	<p>No fue necesario el reemplazo de estas piezas, puesto a que en ellas no se hacía visible el desgaste en sus materiales.</p>

Adicionalmente, al encontrarse este motor en desuso, la inspeccionaron de los asientos, guías y muelles de las válvulas, fue un paso fundamental para llevar a cabo el Overhaul del motor, ya que un mal asentamiento de las mismas alteraría el monitoreo de las vibraciones mecánicas.

Por otro lado, la fuga de sus fluidos tanto como de combustible, lubricante y refrigerante, eran presenciados con facilidad. Por esta razón, los elementos que se reemplazaron para corregir dichas anomalías que se detallan en la **Tabla 18** y **Tabla 19**:

**Tabla 18** *Lista de repuestos en condiciones vulnerables y reemplazados*

<b>Elemento Reemplazado</b>	<b>Causa</b>
Empaque del Carter	
Empaque de la tapa de distribución	Fuga de Aceite Lubricante
Retén de bancada	
Junta del sangrador del radiador	Fuga de Líquido refrigerante
Manguera de combustible	Fuga de Combustible

**Nota:** Con el reemplazo de estos elementos, se finalizó el Overhaul del motor.

Otros elementos reemplazados:

**Tabla 19** *Elemento reemplazados en la revisión del motor*

<b>Elemento Reemplazado</b>	<b>Especificación de su reemplazo</b>
Líquido refrigerante	Reemplazado por otra
Aceite lubricante	Reemplazado por lubricante nuevo

### 3.2.3. Preparación de los Estados de Válvulas

En este estudio el término “juego de válvulas” no responde a una calibración o regulación de las mismas; sino más bien, se definió como un conjunto completo de válvulas con características



diferentes prestas a ser estudiadas, después de ensamblarse en la culata del motor. Donde cabe mencionar que cada juego contine 8 válvulas diferentes de las cuales 4 son de admisión y las restantes de escape, utilizándose así 2 válvulas para cada cilindro.

A continuación, se detallan los diferentes procesos de preparación que obtuvieron los tres diferentes juegos de válvulas, que se utilizaron para desarrollo de este estudio:

### **3.2.3.1. Válvulas Nuevas**

La preparación que se dio para este juego válvulas, antes de su instalación en la culata, fue de carácter evaluativo. Donde se garantizó el cumplimiento de lo siguientes aspectos:

- a) Las mediciones del diámetro de su cabeza, el vástago y la altura de la válvula, debían coincidir con las especificaciones técnicas dadas por el fabricante del motor las cuales se muestran en la **Tabla 20**.
- b) La inspección visual debía detectar posibles defectos superficiales, como rayaduras o grietas, especialmente en el vástago y la cabeza de la misma.
- c) Verificación al asiento de la válvula para que esta sea uniforme y esté libre de imperfecciones, a fin garantizar un buen cierre hermético.
- d) Comprobación de la alineación de la válvula y su asentamiento adecuado, evitando fugas de compresión o gases de escape.



**Figura 22** *Válvulas Nuevas del motor NHR*



**Tabla 20** *Especificaciones de las válvulas del Motor NHR*

<b>Especificación</b>	<b>Válvula de Admisión</b>	<b>Válvula de Escape</b>
Material	Mono metálica (Acero aleado)	Bimetálica (Acero aleado y Aleación de cromo)
Diseño de su cabeza	Convexa	Convexa
Diámetro de la cabeza	41.7 mm	35.7 mm
Diámetro del vástago	8 mm	8 mm
Longitud total	118 mm	118 mm

**Nota:** No existió observaciones para este juego válvulas, puesto a que nunca antes habían sido utilizadas; sin embargo, una mala manipulación de las mismas podría generar desperfectos al momento de ensamblarlas.

**3.2.3.2. Válvulas que culminaron su Vida útil**

Para este juego de válvulas se consideró importante el acondicionamiento a un proceso de limpieza profunda a fin de eliminar de sus asientos restos de hollín, corrosión, aceite y combustible no quemado en la combustión, debido a que el exceso de carbonilla que se presentaba en su superficie, limitaba la manipulación y reconocimiento del estado de cada válvula.

**Figura 23** *Válvulas que cumplieron su vida útil*





– **Consideraciones para su preparación:**

- a) La inspección de su asiento fue un proceso clave para el reconocimiento de todo tipo de deformaciones, grietas, perforaciones y otros desgastes excesivos que tendiesen a influir en el cierre de las mismas, donde los resultados obtenidos tras una inspección detallada, para ambos tipos de válvulas, se muestra en la **Tabla 21**:

**Tabla 21 Resultados de inspección**

<b>Registro</b>	<b>Válvula de Admisión</b>	<b>Válvula de Escape</b>
<b>1</b>	Estable	Desgastada
<b>2</b>	Regular	Regular
<b>3</b>	Regular	Regular
<b>4</b>	Regular	Regular

**Nota:** La tabla anterior muestra la clasificación que se dio a las válvulas con respecto al desgaste de su asiento, donde (Estable) significa que el asiento de la válvula no presenta imperfecciones, (Regular) alude a que el asiento está en términos de uso, pero presenta desgaste progresivo y, por otro lado, el termino (Desgastada) se refiere a que la válvula presenta zonas de desgaste prolongado.

- b) Como otro factor clave para dar una preparación adecuada a este tipo de válvulas, fue que, a pesar de su desgaste estas puedan permitirse rotar libremente en el asiento de la culata, para garantizar su cierre hermético.

Tras el cumplimiento de las consideraciones dadas, el uso de lubricante en el vástago de las válvulas facilitó el ensamble en el cabezote. Dado que presentaban deterioros en sus extremidades, por lo que la lubricación fue un aspecto crucial, para lograr un asentamiento clave.



### 3.2.3.3. Válvulas con Falla

Otra de las pruebas que caracterizó la toma de datos vibracionales para presente estudio, fue la transformación que se le dio a un juego de válvulas que culminaron su vida útil a válvulas físicamente desechables por las condiciones críticas e inservibles con respecto al funcionamiento regular en un motor. La modificación de estas válvulas mostradas en la búsqueda la simulación de válvulas que a menudo son expuestas a sobrecalentamientos prolongados, impactos o fatiga por uso extremo.

**Figura 24** *Válvulas modificadas (falla)*



El uso de un esmeril fue la clave para llevar a cabo el desgaste extremo en el asiento de las válvulas. Donde cabe señalar que su modificación, no solo simulaba a las condiciones más desfavorables que experimentan las válvulas al estar en funcionamiento; sino que también, con los desgastes se permitió un análisis más a fondo sobre las anomalías que se suscitan en un motor, cuando este opera con válvulas defectuosas.

#### – Elección de las válvulas a desgastarse

La elección de las válvulas a modificarse tal como lo muestra la **Tabla 22** no debe pasar por desapercibido. No solo se evita el daño del juego completo de las válvulas, sino que, por un



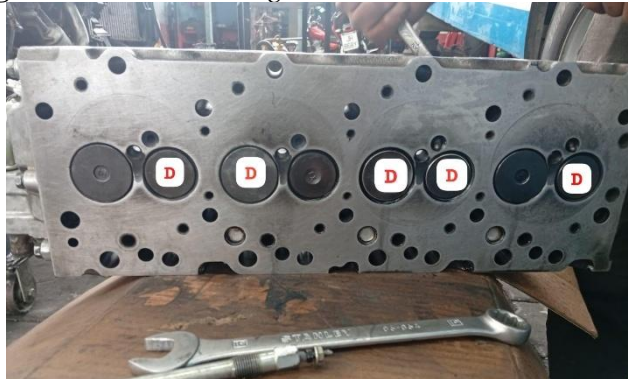
lado, al instalar un cabezote con este tipo válvulas defectuosas, se provocaría una pérdida significativa de compresión, lo que se ocasionaría un riesgo en la toma de datos. En casos severos, la falta de hermeticidad en la cámara combustión podría incluso impedir el encendido del motor.

**Tabla 22** *Especificación de las válvulas a modificarse*

Cilindros	Válvula de Admisión	Válvula de Escape
<b>1</b>	-	D
<b>2</b>	D	-
<b>3</b>	D	D
<b>4</b>	-	D

**Nota:** Como bien se conoce, el motor Isuzu NHR es caracterizado por tener 4 cilindros en línea y una culata que pone a disposición 2 válvulas para cada cilindro una de admisión y otra de escape. En la tabla anterior se muestra la configuración de ensamble que debe cumplir la culata previa a ser montada en el bloque de cilindros tal como se ve en la **Figura 25** . Donde la letra (D) responde a las válvulas modificadas; mientras que, el signo (-) mantiene que la válvula a asentarse no debe tener modificación alguna.

**Figura 25** *Válvulas desgastadas asentadas en la culata*

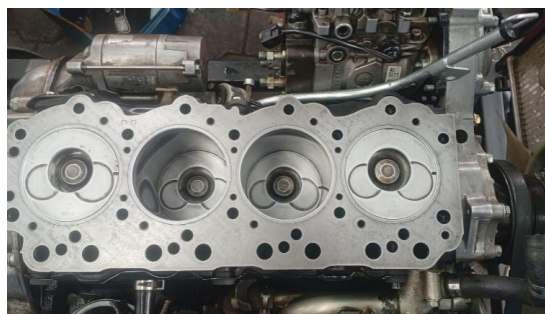




### 3.2.4. Preparación de la Culata

En este proceso, se ejecutó el desmontaje de la culata del motor Isuzu NHR, en tres ocasiones, cada una correspondiente a la instalación de distintos juegos de válvulas preparadas con anterioridad, buscándose en cada intervención lograr un asentamiento efectivo de las válvulas de escape y admisión. Permitiendo este proceso apreciar las diferencias en el sellado y la alineación con respecto sus guías, así como el comportamiento al ensamblarse en la culata como producto de las modificaciones que se dio previamente en cada uno de los juegos de válvulas.

**Figura 26** *Culata desmontada del bloque de cilindros*



#### 3.2.4.1. Procedimiento técnico para el desmontaje de la culata

Para llevar a cabo el desmontaje ordenado y seguro de la culata de motor Isuzu NHR se llevó a cabo el procedimiento mostrado en la **Tabla 23**, la cual asegura que la culata sea retirada con éxito del bloque de cilindros sin afectar los componentes periféricos que la rodean.

**Tabla 23** *Procedimiento para el desmontaje de una culata*

<b>Proceso</b>	<b>Descripción</b>
<b>1. Desconexión de la batería</b>	Se desconectó el borne negativo de la batería a razón de evitar cortocircuitos durante la intervención.
<b>2. Drenaje del líquido refrigerante del motor</b>	Drenar el líquido refrigerante del motor, evitó el ingreso del mismo al interior de los cilindros en el momento de desmontar la culata.



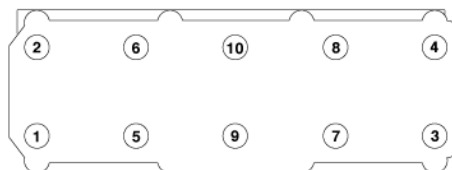
### 3. Retiro de los componentes periféricos

Se desmontó todos los elementos que están sujetos a la culata como lo son:

- Mangueras de líquido refrigerante.
- Cañerías de aceite
- Múltiplos (admisión y escape).
- Tapa válvulas
- Tren de balancines
- Pernos prisionero (medidor de aceite, abrazaderas y otros).

### 4. Aflojamiento y extracción de los pernos de la culata

Según [75] los pernos de la culata deben ser extraídos de forma inversa al par de apriete como lo muestra la siguiente figura:



### 5. Retiro de la culata

Asegurándose de que no existan elementos que influyan en el retiro de la culata, se desmontó la culata de manera cuidadosa sin poner en riesgo elementos internos o periféricos de la misma.

### 6. Inspección visual preliminar

Se verifico y se evidencio el estado de los pistones, junta, bloque de cilindros, y el asentamiento de las válvulas, en busca de deformaciones, desgaste o residuos que inferían en el análisis de vibraciones mecánicas.

**Nota:** Elaboración propia con información tomada de KOLHOSNIKI, Culata: desmontar y montar, sf. [75].

#### 3.2.4.2. Procedimiento técnico para el asentamiento de las válvulas del motor

El asentamiento de válvulas garantiza la hermeticidad entre la válvula y su asiento, condición esencial para una buena compresión y el rendimiento del motor [76].

Donde, el procedimiento que se ejecutó para el asentamiento de los tres juegos de válvulas, incluyó en la inspección, limpieza de las válvulas y sus asientos, aplicación de pasta abrasiva, y



asentamiento manual con herramienta de ventosa hasta lograr un contacto uniforme como se observa en la **Figura 27** la cual muestra el asentamiento de una válvula nueva tras la aplicación de ventosa y la ejecución de una alternación de giros con movimientos oscilantes que resultó en una superficie de contacto uniforme y mate tanto en la válvula como el asiento de la misma. Se debe aclarar que su asentamiento va de la mano con la preparación de las mismas. Un asiento de válvula desgastado, toma de mucho más tiempo hasta lograr un asentamiento uniforme.

**Figura 27** *Asentamiento de válvula*



Posteriormente, se retiraron los residuos abrasivos y se verificó la calidad del sellado mediante una prueba de estanqueidad con vacuómetro (**Figura 28**), herramienta que permitió medir la capacidad de vacío dentro de la cámara de combustión. Para validar un asentamiento correcto, se generó vacío en el cilindro correspondiente, observando que la aguja del vacuómetro se mantuviera estable entre 20 a 25 inHg durante al menos 10 a 30 segundos.



**Figura 28** *Uso del vacuómetro para la comprobación de estanqueidad*

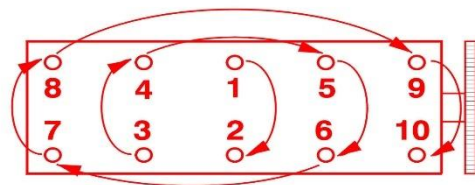


La estabilidad del vacío confirmó una adecuada hermeticidad entre la válvula y el asiento, asegurando así un sellado eficiente durante el ciclo de combustión.

**3.2.4.3. Procedimiento técnico para el montaje de la culata**

**Tabla 24** *Procedimiento para el montaje de la culata*

Proceso	Descripción
<b>1. Limpieza de Superficies</b>	Se eliminó restos de hollín, grasas y residuos que puedan afectar la estanqueidad entre bloque de cilindros con la culata.
<b>2. Preparación de la junta</b>	Se verificó que la junta no este condiciones deficientes para su funcionamiento. Posteriormente se le agrega Shellac para garantizar un sellado rápido y seguro en ambas superficies.
<b>3. Instalación de la junta</b>	La verificación de la planitud del bloque de cilindros, fue crucial para el asentamiento de la junta. Su instalación consistió en que esta se mantenga fija en el bloque moto, verificándose que ningún ducto de refrigeración y lubricación se tapone por su mala instalación.
<b>4. Montaje de la culata</b>	Asegurándose de que no existan elementos que influyan en el montaje de la culata, esta fue instalada de manera cuidadosa sin poner en riesgo elementos internos o periféricos de la misma.
<b>5. Ajuste de los pernos de la culata</b>	Al igual que el desapriete de sus pernos, estos deben ajustarse desde el centro hacia sus extremos como lo muestra la siguiente figura:



El ajuste en la secuencia determinada garantiza el cierre perfecto de la junta de la culata evitando baja compresión de motor y fugas [77]. De igual manera el uso de un taquímetro es ideal para su ajuste. En el caso del Motor Isuzu NHR el par de apriete utilizado fue de 30Nm inicialmente para el asentamiento de los pernos, para finalmente 60 Nm ser su apriete total.

#### 6. Conexiones de elementos periféricos

Se volvió a conectar todos los elementos que están sujetos a la culata como lo son:

- Mangueras de líquido refrigerante.
- Cañerías de aceite
- Múltiplos (admisión y escape).
- Tapa válvulas
- Tren de balancines
- Pernos prisionero (medidor de aceite, abrazaderas y otros).

#### 7. Calibración de válvulas

Según las especificaciones del fabricante la holgura que se utilizó para la calibración de las válvulas fue de 0.40 mm (0.016 in) para las válvulas de escape y admisión.

#### 8. Inspección de su funcionamiento

Tras haber completado la serie de pasos anteriores, después del encendido del motor, se verificó que no exista fuga de fluidos como refrigerantes o lubricantes que pongan en riesgo el funcionamiento del motor.

**Nota:** Elaboración propia con información tomada de INITRO, Ajuste de la culata, 2020.

#### 3.2.4.4. Holgura de las Válvulas para el Motor Chevrolet Isuzu NHR

Para la reducción del desgaste progresivo en el asiento de las válvulas tanto de admisión como de escape, es crucial la mantención de una buena holgura en las mismas, puesto a que esta acción definirá el funcionamiento adecuado del motor.



Con respecto a manuales técnicos y especificaciones dadas por el fabricante de este tipo de motores, se menciona que la holgura ideal para el motor Isuzu NHR debe ser de 0.40 mm (0.016 in) con el motor en frío y 0.37 mm (0.014 in) cuando el motor está caliente[78]. Donde se menciona que tanto como para válvulas de escape y de admisión la holgura ideal para ambos está en el mismo reglaje [79], sin olvidar que para una calibración fiable se debe seguir una serie de pasos donde el primero de ellos es coronar el primer pistón en el punto muerto superior (PMS) para la el inicio de la calibración y así por consiguiente hasta terminar el proceso.

**3.2.4.5. Evaluación del montaje y desmontaje de la Culata**

Tras la preparación y evaluación del estado físico de los distintos juegos de válvulas. Al culminar el proceso de desmontaje e instalación de la culata en tres ocasiones consecutivas, correspondientes a cada juego previamente acondicionado. La evaluación técnica realizada después de cada asentamiento se detalla en la **Tabla 25** en la cual se exponen las observaciones obtenidas después de haber ejecutado el monitoreo vibracional del motor.

**Tabla 25 Evaluación de los diferentes estados de válvulas**

Desmontaje de la Culata	Detalles Visibles
<p><b>1. Desmontaje con válvulas nuevas</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>	<p>Durante el primer desmontaje, con válvulas nuevas, se evidenció un contacto uniforme entre el asiento y la válvula, condición ideal para un buen cierre y compresión.</p>
<p><b>2. Desmontaje con válvulas que cumplieron su vida útil</b></p>	<p>Con válvulas que cumplieron su vida útil, se observó desgaste en los asientos y pérdida parcial de</p>



hermeticidad, lo cual comprometía la eficiencia del motor.

### 3. Desmontaje con válvulas desgastadas (falla)

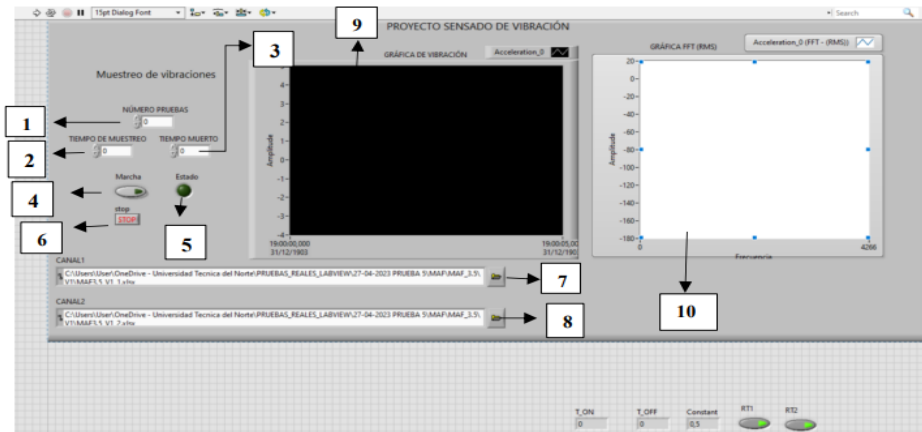


Se identificaron deformaciones e imperfecciones severas en las superficies de contacto, simulando fallas críticas por fatiga o sobrecalentamiento

### 3.2.5. Desarrollo de la Interfaz en LabVIEW

Para la toma de datos en el software, es fundamental establecer previamente los parámetros que guiarán su funcionamiento mismo que son identificados en la **Figura 29** con números para su definición.

**Figura 29** Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones



Tomado de: Toapanta M. et al, Estudio de vibraciones mecánicas en motores MEC para el mantenimiento predictivo, 2023 [80].



La interfaz utilizada para el control del proceso de adquisición incluye elementos gráficos, como la gráfica de vibraciones y la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permite verificar la calidad de los datos registrados.

A continuación, se especifican los aspectos clave a configurar en el Interfaz:

1. **Numero de pruebas:** En este cuadro se especifica el número de pruebas que va a realizar el sensor tanto vertical como horizontal respectivamente.
2. **Tiempo de muestreo:** Muestra el tiempo (s) por el cual los sensores van a estar activos, almacenando información de las vibraciones del motor.
3. **Tiempo muerto:** Muestra el tiempo (s) por el cual los sensores van a estar en reposo, es decir, no almacenan ningún dato en este tiempo específico.
4. **Marcha:** Es el botón que permite empezar a guardar la información de las vibraciones.
5. **Estado:** Es una especie de led que informa sobre el estado de lectura en la cual está el sensor.
6. **Stop:** Botón con el cual se para la lectura de datos y finaliza el programa.
7. **Canal 1:** Este canal es el encargado de almacenar la información del sensor horizontal, así mismo, se puede escoger la carpeta en la cual se va a almacenar la información.
8. **Canal 2:** Este canal es el encargado de almacenar la información del sensor vertical, así mismo, se puede escoger la carpeta en la cual se va a almacenar la información.
9. **Gráfica de vibración:** Cuadro donde se expresa la gráfica de vibración en tiempo real durante la prueba.
10. **Gráfica FFT:** Cuadro donde se expresa la gráfica de vibración de la transformada de Fourier en tiempo real



### 3.2.6. Instalación de los equipos

Para llevar a cabo la recolección de datos vibratoriales, fue necesario realizar la correcta instalación del acelerómetro piezoeléctrico ICP modelo 603C01 en el motor de estudio. Este sensor se conectó al sistema de adquisición de datos mediante un cable coaxial de dos hilos, cumpliendo con el protocolo de alimentación y transmisión de señal requerido como se detalla en la **Figura 30**. La fijación del sensor se realizó mediante un imán de alta adherencia, lo cual permitió una instalación portátil y segura, incluso ante variaciones de temperatura y frecuencia durante el funcionamiento del motor.

**Figura 30** *Proceso para la instalación de los equipos*



Tomado de: gordillo A, Espinoza A, Análisis de vibraciones en un motor electrónico, 2024.

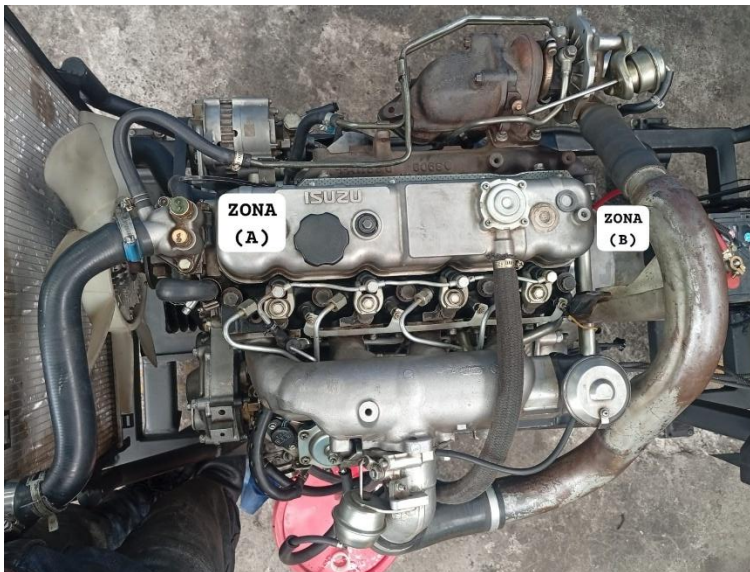
#### 3.2.6.1. Zonas de Medición

Para la adquisición de los datos vibratorios, el sensor fue instalado en dos puntos estratégicos del motor NHR, los cuales respondían el objetivo de monitorear en tiempo real las vibraciones emitidas por el tren de válvulas.

Los dos puntos de medición se detallan **Tabla 26** a continuación:



**Tabla 26 Zonas de medición para la toma de datos vibracionales**  
**Descripción de las Zonas de Medición**



#### **A. Parte anterior de la Tapa Válvulas**



Se estableció como zona de medición la parte anterior de la tapa de válvulas del motor Isuzu NHR, dado que este punto permite una lectura directa de las vibraciones originadas en el tren de válvulas. Lo que este punto resulta estratégico para captar las alteraciones producidas por un asentamiento inadecuado, defectos o desgaste en las válvulas de admisión y escape.

#### **B. Parte Posterior Inferior de la Culata**



La elección de este punto consistió en un análisis estratégico el cual consideró el ensamble de los diferentes juegos de válvulas, ya que es en la culata donde estas se incorporan, y por ende las vibraciones con mayor frecuencia se concentran en ella, lo que la convierte a esta zona en un área clave para la adquisición de datos.

### 3.2.7. Adquisición de datos vibratorios para los tres estados de válvulas

La adquisición de datos vibracionales, partió a través de un proceso de medición consistió en registrar la respuesta vibracional del motor bajo condiciones de operación estacionarias al ralentí, mediante el uso de un sensor acelerómetro piezoeléctrico ICP modelo 603C01, conectado a una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y controlado mediante el software LabVIEW, donde el registro de sus datos fue de manera automática en formato Excel.

Se registraron 200 pruebas correspondientes a tres configuraciones diferentes de estado de válvulas (VNS-VCVU-VF), con un tiempo de muestreo de 8 segundos y un tiempo muerto entre pruebas de 4 segundos, editados en el interfaz de LabVIEW (**Figura 31**), a fin de evitar la contaminación de datos por efectos transitorios.



**Figura 31** *Parámetros iniciales para la adquisición de datos*



La interpretación de los niveles de aceleración obtenidos se basó en los criterios establecidos por la norma ISO 10816-1, la cual clasifica las vibraciones en función de la severidad y el estado operativo de una maquina; para este caso el Motor NHR.

Por otro lado, la norma citada permite identificar niveles normales, de precaución y críticos, facilitando así la correlación entre el tipo de válvula y la condición vibracional del motor.

Mediante el uso de un sensor acelerómetro piezoeléctrico ICP modelo 603C01, conectado a una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y controlado mediante el software LabVIEW, se capturaron señales de vibración bajo distintas condiciones de operación mecánica, correspondientes a tres configuraciones diferentes de juego de válvulas (VNS-VCVU-VF).

### **3.2.7.1. Prueba I**

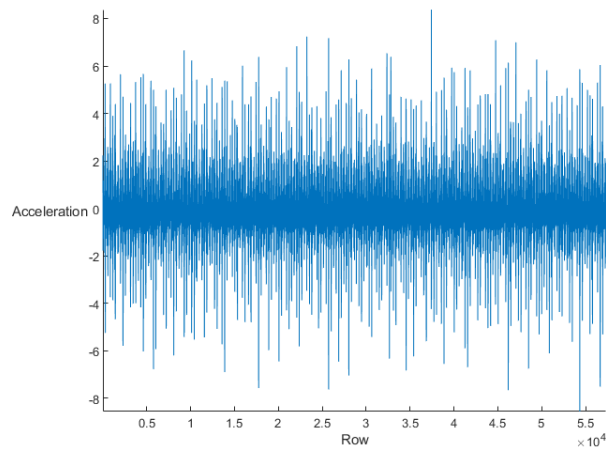
En esta primera prueba se utilizó un juego de válvulas nuevas, correctamente asentadas y calibradas según las especificaciones del fabricante. El objetivo fue establecer una referencia vibracional base correspondiente al comportamiento óptimo del sistema, sin presencia de desgaste ni defectos estructurales.

Como se mencionó antes, cada prueba fue tomada en dos diferentes puntos (A-B); es por eso que continuación, se muestran las gráficas de cerca de 64 mil datos dadas por el software



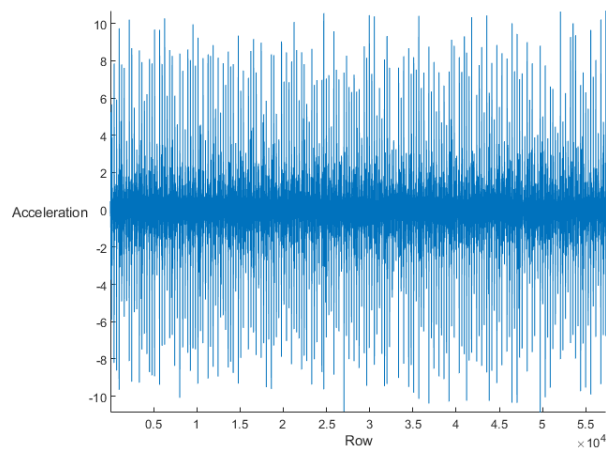
Matlab (**Figura 32-Figura 33**) obtenidas de una de las 200 pruebas adquiridas en cada punto de medición.

**Figura 32** *Gráfica obtenida del punto de medición (A)*



Nota: (A) responde a la zona de medición: Parte anterior de la tapa válvulas.

**Figura 33** *Gráfica obtenida del punto de medición (B)*



Nota: (B) responde a la zona de medición: Parte posterior de la culata.



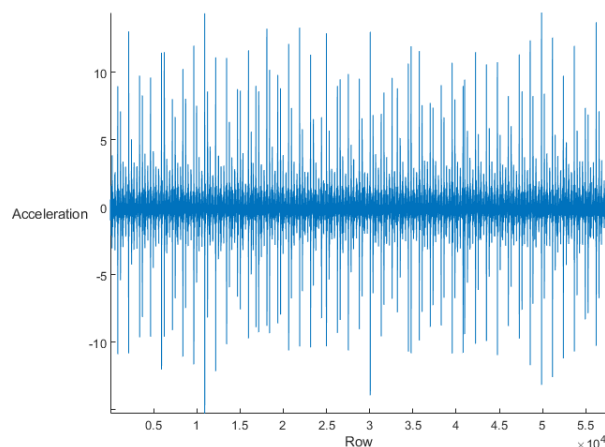
### 3.2.7.2. Prueba II Fallas Leves

Para su ejecución, se consideró válvulas que habían finalizado su vida útil, evidenciando desgaste en su asiento y posibles pérdidas de hermeticidad.

En esta prueba se analizó el incremento en la intensidad y frecuencia de las vibraciones, las cuales pueden asociarse a fugas de compresión, pérdida de alineación y deterioro mecánico del tren de válvulas; donde dichas irregularidades representan una falla leve que no impiden el funcionamiento del motor, pero afectan su rendimiento, eficiencia o en este caso la emisión de progresivos niveles vibratorios.

A continuación, las gráficas (**Figura 34-Figura 35**) muestran la señal obtenida para cada punto de medición y como estas varían respecto al primer juego de válvulas que se utilizaron para la ejecución de la primera prueba.

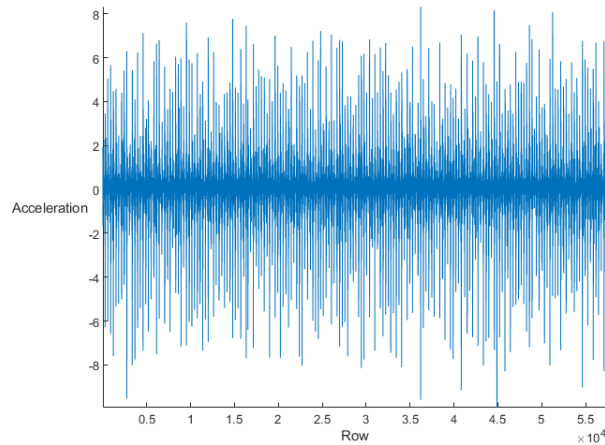
**Figura 34** Gráfica obtenida del punto de medición (A)



Nota: (A) responde a la zona de medición: Parte anterior de la tapa válvulas.



**Figura 35** Gráfica obtenida del punto de medición (B)



Nota: (B) responde a la zona de medición: Parte posterior de la culata.

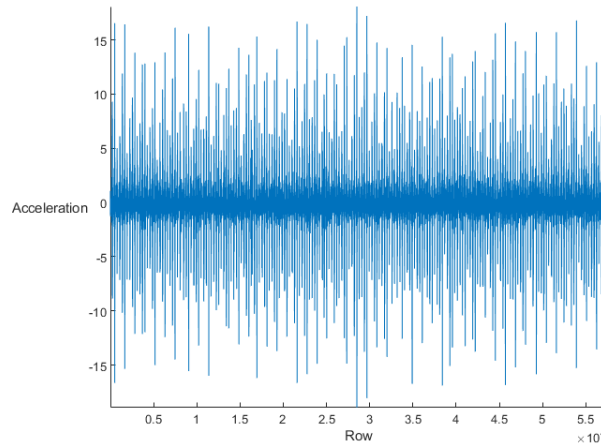
### 3.2.7.3. Prueba III Fallas Graves

Se evaluó con un conjunto de válvulas que cumplieron su vida útil, pero con un desgaste parcial que simulaba una falla por funcionamiento conocida como una falla grave. Estas irregularidades estructurales representan un caso crítico, ya que afectan significativamente el proceso de sellado y pueden generar vibraciones anómalas de mayor magnitud e inestabilidad en el funcionamiento del motor.

A continuación, las gráficas (**Figura 36-Figura 37**) muestran la señal obtenida en cada punto de medición y como estas varían respecto al primer juego y segundo juego de válvulas que fueron usada en este estudio.

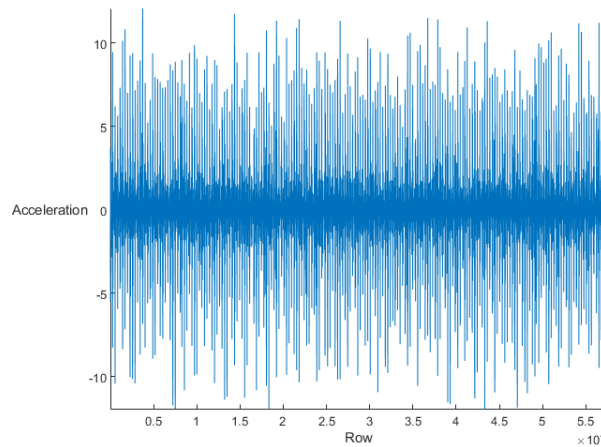


**Figura 36** *Gráfica obtenida del punto de medición (A)*



Nota: (A) responde a la zona de medición: Parte anterior de la tapa válvulas.

**Figura 37** *Gráfica obtenida del punto de medición (B)*



Nota: (B) responde a la zona de medición: Parte posterior de la culata.

### 3.2.8. Aprendizaje Automático

Con el fin de estructurar adecuadamente el tratamiento de los datos obtenidos a partir de las distintas pruebas experimentales dadas por los diferentes juegos de válvulas y puntos de medición, se estableció una secuencia metodológica la cual se detalla en la **Figura 38**; en ella, se



ilustra el procedimiento que se llevó a cabo para la validación, organización y análisis de muestras vibratorias del presente estudio.

**Figura 38** *Proceso para la obtención de resultados*



**3.2.8.1. Preprocesamiento y Extracción de Características armónicas y estadísticas**

Los datos adquiridos durante las 200 pruebas experimentales fueron importados al entorno de MATLAB para su posterior procesamiento.

Las medidas extraídas mediante el procesamiento estadístico se detallan en la **Tabla 27**; mientras que el análisis de armónicos se presenta en la **Tabla 28**.

**Tabla 27** *Medidas Utilizadas para el Análisis Estadístico*

<b>Medición</b>	<b>Descripción</b>
RMS	Energía general de la vibración
Varianza	Estabilidad o dispersión
Curtosis	Presencia de picos o impactos
Media	Promedio de la señal
Máximo/Mínimo	Picos extremos de la señal
Mediana	Valor central
Moda	Valor más común




---

Asimetría                      Desbalance o inclinación de la señal

---

Media cuadrática            Energía general de la vibración

---

Nota: el valor de la variable estadística dependerá del estado de las válvulas de admisión y escape; así como, la zona de medición de la cual fue extraída dicha muestra.

**Tabla 28** *Descripción de Armónicos*

N.º	Descripción
<b>Armónico</b>	
Armónico 1	Primer pico representativo del espectro de prueba.
Armónico 2	Segundo pico representativo del espectro de prueba.
Armónico 3	Tercer pico representativo del espectro de prueba.

La obtención de estas mediciones constituye una fase fundamental en la conformación del conjunto de características; puesto a que facilita la identificación de patrones y la clasificación de los diferentes estados de válvulas en el motor.

### **3.2.8.2. Elaboración de la matriz a entrenarse**

Inicialmente, con todas las mediciones obtenidas de cada una de las 200 pruebas experimentales, se elaboró una matriz en Microsoft Excel correspondiente a cada configuración de juego de válvulas analizadas. En la elaboración de la matriz, la primera fila contenía los valores de las distintas mediciones a estudiarse, seguido de los valores obtenidos en cada análisis.

Este procedimiento se replicó para ambos puntos de medición (A-B) empleados en el estudio, generando así dos conjuntos de datos independientes en formato Excel.

### **3.2.8.3. Entrenamiento con Classification Learner**

Se empleó la aplicación Classification Learner de MATLAB para importar las matrices previamente generadas en Excel. No sin antes asegurarse que para distinción de los juegos de válvulas la última columna el programa lo tome como nombre categórico.



Posteriormente, se evaluaron múltiples algoritmos de clasificación (All), entre ellos: árboles de decisión, máquinas de vectores de soporte (SVM), vecinos más cercanos (K-Nearest Neighbors, KNN), clasificadores lineales y cuadráticos, redes neuronales artificiales y modelos de ensamble (ensemble methods). La comparación entre estos modelos permitió identificar aquel con mayor precisión y menor tasa de error para el conjunto de datos para ambos puntos de evaluación.

#### 3.2.8.4. Evaluación de Modelos

La evaluación del rendimiento de los modelos entrenados se realizó de manera independiente para ambos análisis de datos y puntos de medición.

Entre estas se incluyeron: la precisión (accuracy), la matriz de confusión, la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), el área bajo la curva (AUC); lo que permitió cuantificar la capacidad de los modelos para distinguir correctamente entre las diferentes clases de válvulas, así como evaluar su desempeño general frente a datos no utilizados durante el entrenamiento.

#### 3.2.8.5. Validación con Nuevas Muestras

Tras exportar el código generado por el entrenamiento en Classification Learner mostrado en **Figura 39**. Se obtuvo la función dada en la **Figura 40**. Donde la variable “C” corresponde al modelo entrenado (trainedModel) y “T” a los datos de entrada.

**Figura 39** Código para exportar la función

```
function [model, acc] = trainClassifier(data)
% Entrena un clasificador SVM y devuelve el modelo y la exactitud

X = data(:, {'RMS', 'Varianza', 'Curtosis', 'Media', 'Mximo', 'Mnimo', 'Mediana', 'Moda', 'Mdc', 'Mediacuadratica'});
Y = data.Estado;

template = templateSVM('KernelFunction', 'linear', 'Standardize', true);
model = fitcecoc(X, Y, 'Learners', template, 'Coding', 'onevsone');

cv = crossval(model, 'KFold', 5);
acc = 1 - kfoldLoss(cv, 'LossFun', 'ClassifError');
end
```



Nota: La función exportada, permitió verificar la capacidad del modelo para predecir el estado de la válvula en pruebas nuevas o que no se usaron imprimiendo la categoría de distinción.

Finalmente, en este proceso se demostró la importancia del aprendizaje automático y como este podría ser utilizado para el diagnóstico o monitoreo de vibraciones mecánicas, en tiempo real, puesto a que un aprendizaje automático bien realizado categoriza al estado de las válvulas de manera autónoma y categorizada como lo muestra la **Figura 40**.

**Figura 40** *Predicción de la función*

```
yfit = c.predictFcn(T)
```

```
>> yfit = trainedModel.predictFcn(Tabla1)
```

```
yfit =
```

```
categorical categorical categorical
```

```
VN
```

```
VCVU
```

```
VF
```



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de vibraciones mecánicas en el motor de encendido por compresión NHR, con énfasis en la influencia del asiento de sus válvulas, donde los datos fueron adquiridos mediante un sensor acelerómetro ubicado en dos puntos estratégicos del motor (Zona A y B como se indica en la **Tabla 26** del subtema **3.2.6.1** del Capítulo III de este estudio). El procesamiento incluyó el análisis de armónicos enfocados en la amplitud de los tres picos más representativos de la señal dada por el motor; así como el análisis estadístico enfocado en la obtención de la RMS, media, varianza, curtosis, moda, valor máximo, mínimo y media cuadrática, con el objetivo de llevar a cabo un aprendizaje automático en MATLAB, en respuesta a la predicción de anomalías suscitadas por señales emitidas del motor.

Se debe aclarar que los resultados fueron validados tras la ejecución de pruebas en el motor con distintos juegos de válvulas, concluyéndose que un asiento de válvulas inadecuado, genera irregularidades en la combustión y pérdidas de compresión, traduciéndose para este estudio como señales vibratorias anómalas que inciden en el funcionamiento de un MEC.

#### 4.1. ANÁLISIS DE 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 29**, y sus valores fueron obtenidos en **dos zonas de medición (A y B)**, indicadas en la **Tabla 26** del **subtema 3.2.6.1** del Capítulo III, la cual describe a los puntos estratégicos de adquisición de datos vibratorios en el motor NHR.



**Tabla 29** *Especificación de los diferentes armónicos*

N.º	Descripción
<b>Armónico</b>	
<b>1</b>	Primer pico representativo del espectro de prueba.
<b>2</b>	Segundo pico representativo del espectro de prueba.
<b>3</b>	Tercer pico representativo del espectro de prueba.

**Nota:** El espectro de prueba responde, a la señal vibracional obtenida tras la evaluación de los datos que se usaron para su análisis.

El análisis de los tres armónicos antes mencionados, se ejecutó a partir de las muestras obtenidas desde la prueba número 20 hasta la número 180 de un total de 200 pruebas realizadas; lo que garantizó un estudio acertado para el estudio de los armónicos extraídos.

En total se consideraron 160 pruebas para cada estado de válvulas de admisión y escape descritos en la **Tabla 30**. Donde cada prueba, cuenta con aproximadamente 64000 datos, representando un total de 10240000 datos utilizados en el aprendizaje automático.

**Tabla 30** *Especificación de los diferentes estados de válvulas*

Estado de las Válvulas	Descripción
VN	Válvulas nuevas.
VCVU	Válvulas que cumplieron su vida útil, vistas como una falla leve (FL).
VF	Válvulas desgastadas o también vistas como una falla grave (FG).

Finalmente, tras la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para el análisis armónico. La señal obtenida se representa en una gráfica cartesiana, donde el **eje X** corresponde el rango de frecuencias analizadas (0 a 100 Hz), y el **eje Y** muestra la amplitud de la vibración que responde a la energía vibracional generada por el motor puesto en marcha. Dado que la frecuencia



del motor se mantiene estable, el estudio se centró en las variaciones que experimenta la amplitud bajo diferentes condiciones de prueba.

Del total de 30912000 datos procesados en una sola zona de medición, se extrajeron 1449 valores representativos correspondientes a los tres estados de válvulas, es decir 483 datos para cada estado de válvula; mismos que fueron utilizados como matriz de entrenamiento para los diferentes modelos de aprendizaje automático en MATLAB en ambas zonas de medición.

#### 4.1.1. Evaluación de Armónicos para la Zona de Medición A

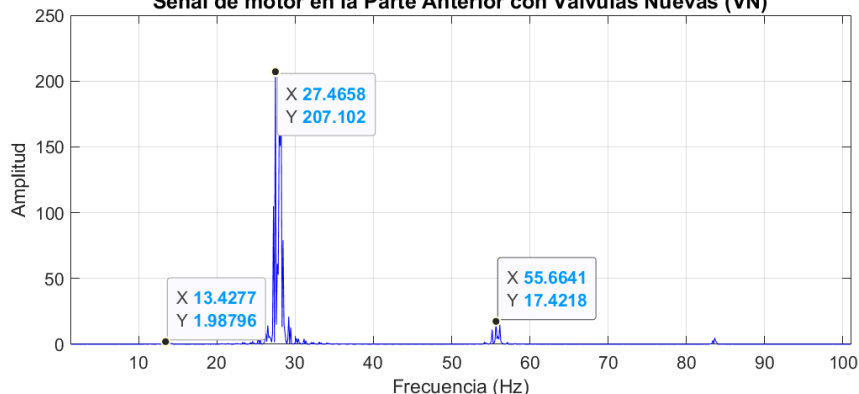
En las **Figura 41**, **Figura 42** y **Figura 43** se presenta a una señal vibracional correspondiente a la prueba número 70, capturada en la parte anterior de la tapa de válvulas del motor NHR. En la señal se identifican a los tres armónicos más representativos que evidencian al comportamiento vibracional correspondiente a los diferentes juegos de válvulas de admisión y escape utilizados en este estudio.

##### 4.1.1.1. Presentación de Armónicos con válvulas nuevas (VN)

En la **Figura 41**, se muestra la señal de prueba obtenida con válvulas de admisión y escape totalmente nuevas, donde: el armónico 1 con una frecuencia de 13.43 Hz y una amplitud de 1.99 podría relacionarse al ruido de los componentes alejados de la zona de medición; el armónico 2 con una frecuencia de 27.47 Hz y una amplitud de 207.10 corresponde al armónico dominante y, en teoría respondería a la señal de trabajo del motor; mientras que el armónico 3, con una frecuencia de 55.66 Hz y una amplitud de 17.42 el cual se convierte en el segundo dominante, se relacionaría con el funcionamiento integral de los componentes móviles de las válvulas.



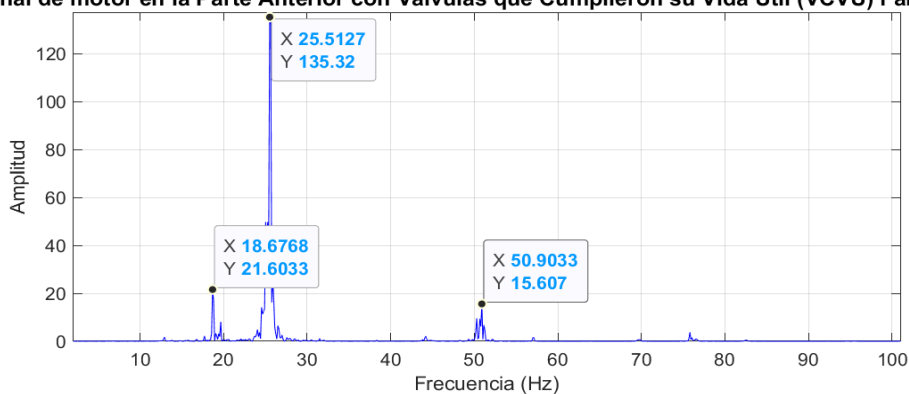
**Figura 41** Señal vibracional dada en la Parte anterior del motor con VN  
 Señal de motor en la Parte Anterior con Valvulas Nuevas (VN)



**4.1.1.2. Presentación de Armónicos con válvulas que cumplieron su vida útil**

En la **Figura 42**, se evidencia a una señal de prueba que se obtuvo tras la marcha del motor usando válvulas de admisión y escape que culminaron su vida útil (VCVU). El armónico 1 con una frecuencia de 18.68 Hz y una amplitud de 21.60 respondería al funcionamiento integrado del motor; el armónico 2 con una frecuencia de 25.51 Hz y una amplitud de 135.32 representaría la señal que diferencia al estado de las válvulas, para finalmente, el armónico 3 con una frecuencia de 55.90 Hz y una amplitud de 15.60 represente el ruido cerca de la zona de medición.

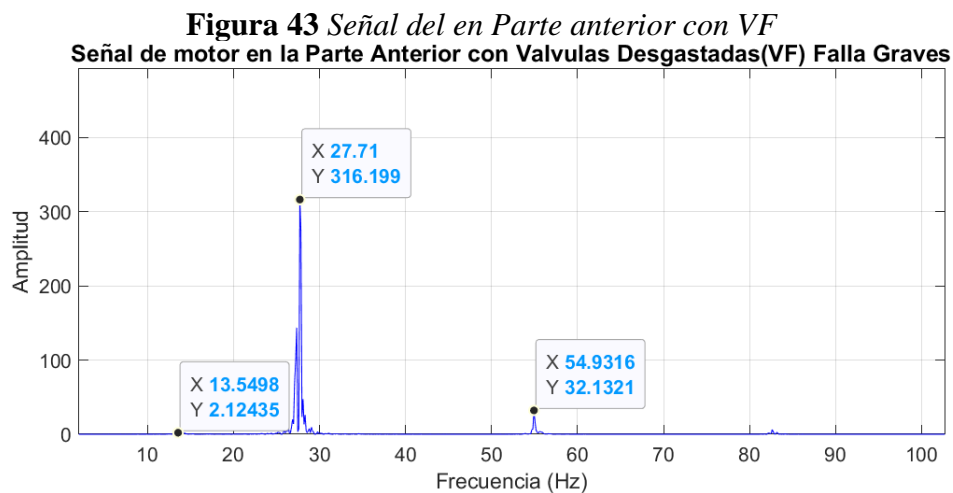
**Figura 42** Señal del en Parte anterior con VCVU  
 Señal de motor en la Parte Anterior con Valvulas que Cumplieron su Vida Util (VCVU) Falla Leves



**4.1.1.3. Presentación de Armónicos con válvulas desgastadas (VF)**



En la **Figura 43**, se presenta a una señal de prueba con válvulas de admisión y escape desgastadas. De ella se reconoce que el primero de sus armónicos con una frecuencia de 13.54 Hz y una amplitud de 2.12 es el más bajo respecto al armónico 2 con una frecuencia de 27.71 Hz y una amplitud dominante de 316.19 el cual representaría a la señal efectiva, para la predicción de anomalías; para finalmente, el armónico 3 con una frecuencia de 54.93 Hz y una amplitud de 32.13 posiblemente responda al ruido censado de componentes cercanos a la zona de medición.



#### 4.1.1.4. Comparación de sus Amplitudes (Zona de Medición A)

En la **Tabla 31** se presenta la comparación de las amplitudes armónicas obtenidas a partir del cálculo estadístico de 160 valores obtenidos para cada estado de válvulas: nuevas (VN), las cumplieron su vida útil (VCUV) y válvulas con falla (VF).

Para cada armónico se calculó la mediana y la desviación estándar de sus amplitudes, con el objetivo de caracterizar su comportamiento vibracional; puesto a que, el uso de la mediana permite establecer una tendencia central que discrimina a valores atípicos, como señales con posible ruido o fluctuaciones no deseadas; mientras que la desviación estándar marca un índice de dispersión en las amplitudes, permitiendo una identificación clara en la señal de prueba.



Los resultados presentados en la **Tabla 31**, muestran que el **Armónico 2** es el pico más dominante en todos los estados de válvula, destacando su mayor amplitud en el estado con falla (VF) cuando su mediana alcanza un valor de **295.833** y su desviación estándar un valor de **122.464** seguido del **Armónico 3**, cuando el valor la mediana de las válvulas que cumplieron su vida útil (VCVU) alcanzan una amplitud de **17.423** y una desviación estándar de **6.111** dejando por último al **Armónico 1** el cual representa a las amplitudes adquiridas en válvulas nuevas (VN) con valores en su mediana de **3.245** y su desviación estándar de **1.989** que lo convierten en el pico menos representativo con respecto a los tres estados de válvula.

**Tabla 31** Comparación de las Amplitudes Armónicas Obtenidas (Zona de Medición A)

	VN		VCVU		VF	
	Mediana	Desviación Estándar	Mediana	Desviación Estándar	Mediana	Desviación Estándar
<b>Armónico 1</b>	<b>3.245</b>	<b>1.989</b>	14.628	6.198	3.949	1.938
<b>Armónico 2</b>	283.670	119.797	145.330	56.588	<b>295.833</b>	<b>122.464</b>
<b>Armónico 3</b>	20.738	7.9166	<b>17.423</b>	<b>6.111</b>	25.327	8.606

**Nota:** Los valores que se obtuvieron responden al cálculo estadístico de cerca de 160 datos para cada armónico con respecto a los diferentes estados de válvulas.

En la adquisición de datos vibracionales y su posterior comparación, se evidenció una aparente contradicción en las muestras correspondientes a VF; puesto a que sus niveles de vibración resultaron ser inferiores en comparación con los otros dos estados analizados (VN y VCVU). La reducción de sus vibraciones se explicaría por el mal asentamiento generado en las válvulas ranuradas, lo que ocasiona acumulación de combustible no quemado en la cámara de combustión que junto con el aceite que desciende por las guías de válvula dado por el mal sellamiento hermético, en la cabeza de las válvulas se forma una película líquida, similar al



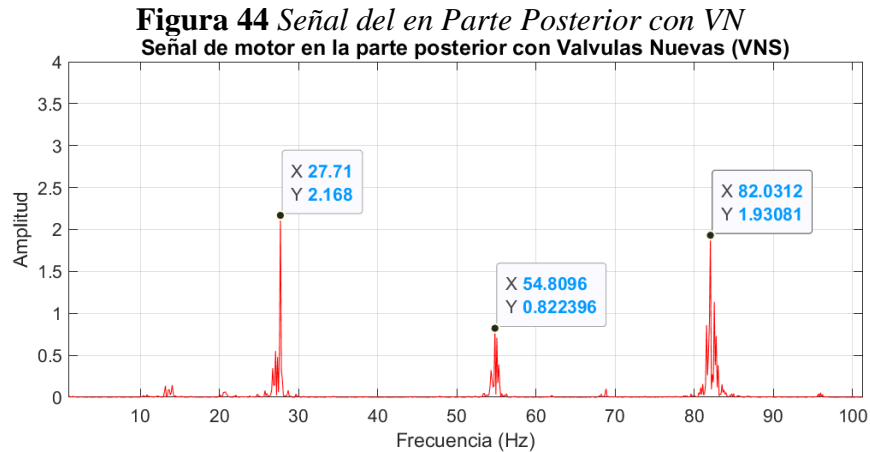
principio de un “colchón hidráulico” que amortigua las vibraciones transmitidas a la culata, limitando el funcionamiento de los muelles de válvula y en consecuencia, la energía vibracional registrada para este estado, no refleja índices elevados, sino más bien a valores que representan dicho efecto de amortiguación.

#### 4.1.2. Evaluación de Armónicos para la Zona de Medición B

En las **Figura 44**, **Figura 45** y **Figura 46** se muestra la señal de prueba número 85 tomada en la parte posterior de la tapa válvulas del motor NHR, correspondiente a los distintos juegos de válvulas descritos en la **Tabla 30**. A partir de las señales de prueba obtenidas, se identificaron y se cotó a los tres armónicos más representativos, con el objetivo de entender el comportamiento vibracional del motor bajo diferentes condiciones de prueba.

##### 4.1.2.1. Presentación de Armónicos con válvulas nuevas (VN)

En la **Figura 44** se identifican a lo tres armónicos más representativos de la señal de prueba dada por el funcionamiento del motor con el uso de válvulas de escape y admisión totalmente nuevas. El primer armónico, caracterizado por ser dominante, presenta una frecuencia de 27.71 Hz y una amplitud de 2.17 que podría corresponder a segmentaciones anómalas dadas por el funcionamiento del motor. El segundo armónico con una frecuencia de 54.81 Hz, y una amplitud de 0.82 se atribuye al ruido que se censa al tomar dichas mediciones; para finalmente, el tercer armónico que mantiene una frecuencia de 82.03 Hz, y una amplitud de 1.93 se relacione con los componentes mecánicos que hacen posible el funcionamiento de las válvulas.

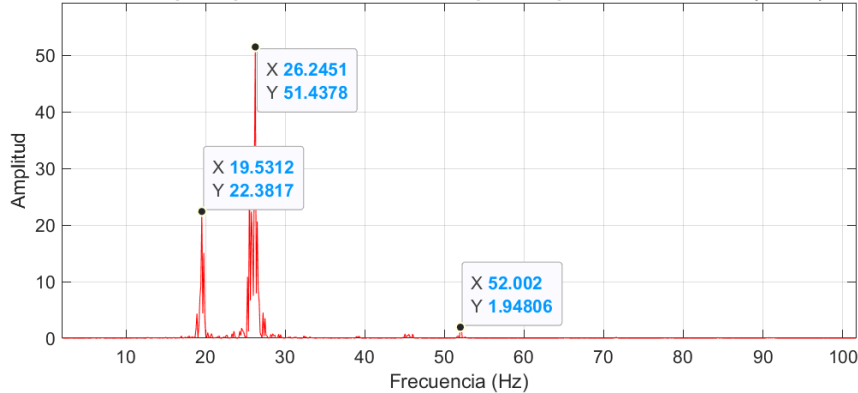


#### 4.1.2.2. Presentación de Armónicos en válvulas que cumplieron su vida útil (VCUV)

En la **Figura 45** se identifican los tres armónicos más representativos de la señal de prueba adquirida con válvulas de admisión y escape que cumplieron su vida útil. Donde: el segundo armónico, con una frecuencia de 26.25 Hz y una amplitud de 51.44 es el dominante, y se asocia al estado de desgaste de las válvulas. El primer armónico, con 19.53 Hz y una amplitud de 22.38 que actúa como el segundo más relevante y que estaría relacionado con el funcionamiento de los componentes móviles del motor; mientras que, el tercer armónico, con una frecuencia de 52.00 Hz y una amplitud de 1.94 probablemente corresponde al ruido que se registró durante la adquisición de la señal vibracional.



**Figura 45 Señal del en Parte Posterior con VCVU**  
 Señal de motor en la parte posterior con Valvulas que cumplieron su vida util (VCVU) Fallas Leves



**4.1.2.3. Presentación de Armónicos con válvulas desgastadas (VF)**

En la **Figura 46** se identifica a la señal de prueba del motor con válvulas parcialmente desgastadas El primer armónico cotado, lleva una frecuencia de 6.841 Hz y una amplitud de 0.79 siendo este el más dominante lo que hace que esté directamente relacionado con el estado de las válvulas. El segundo armónico a 27.71 Hz con una amplitud de 0.53 posiblemente relacionado con el funcionamiento integral del componente del motor; para finalmente el tercer armónico, con una frecuencia de 54.80 Hz con una amplitud de 0.36 se relacione con el ruido de los componentes cercanos a la zona de medición.

**Figura 46 Señal del en Parte Posterior con VF**  
 Señal de motor en la parte posterior con Valvulas Desgastadas (VF) Fallas Graves





#### 4.1.2.4. Comparación de sus Amplitudes (Zona de Medición B)

La **Tabla 32** presenta la comparación estadística de las amplitudes armónicas obtenidas en la Zona de Medición B, considerando los tres estados de válvulas evaluados.

Para cada armónico se calcularon la mediana y la desviación estándar, a partir de aproximadamente 160 muestras por armónicos, donde se identifica que las amplitudes más representativas se evidencian en las válvulas que cumplieron su vida útil (VCUV), especialmente en el **Armónico 2**, con una mediana de **52.927** y una desviación estándar de **20.734** identificándose como el pico más representativo con respecto al total de muestras de amplitud registradas en esta zona de medición; seguido del **Armónico 1** el cual representa a las válvulas nuevas (VN) con una mediana de **1.616** y una desviación estándar **0.634** muy diferente a los resultados de amplitud, obtenidos con válvulas desgastadas (VF) las cuales son representadas por el **Armónico 3** donde el valor de su mediana es de **0.393** y el valor de su desviaciones estándar de **0.154** lo que indica una señal de intensidad vibracional más estable dada por un efecto de tipo colchón hidráulico.

**Tabla 32** Comparación de la Amplitudes Armónicas Obtenidas (Zona de Medición B)

	VN		VCVU		VF	
	Mediana	Desviación Estándar	Mediana	Desviación Estándar	Mediana	Desviación Estándar
<b>Armónico 1</b>	<b>1.616</b>	<b>0.634</b>	20.721	8.467	0.861	0.302
<b>Armónico 2</b>	1.199	0.436	<b>52.927</b>	<b>20.734</b>	0.765	0.299
<b>Armónico 3</b>	2.506	0.7895	1.510	0.620	<b>0.393</b>	<b>0.154</b>

**Nota:** Los valores que se obtuvieron responden al cálculo estadístico de cerca de 160 datos para cada armónico con respecto a los diferentes estados de válvulas.

La amortiguación vibracional o el efecto de tipo “Colchón Hidráulico” dado en las válvulas con falla (VF), se atribuye que un mal asentamiento de las VF, favorece la acumulación de combustible no quemado y aceite proveniente de las guías en la cámara de combustión dando



inicio al principio de un “colchón hidráulico” que amortigua las vibraciones y limita el accionar de los muelles de válvula, por lo que la energía registrada no refleja una mayor severidad del daño, sino un efecto de amortiguación.

#### 4.1.3. Análisis comparativo de Amplitud Armónica con respecto a su Zona de Medición

En la **Tabla 33** se muestra una identificación de cada armónico con respecto a los diferentes estados de válvulas, donde en la **Zona de Medición A**, el Armónico 2 el cual identifica a las válvulas con Falla (VF), es el más representativo o dominante, seguido del Armónico 3 el cual identifica a la válvulas que cumplieron su vida útil (VCUV), donde finalmente, el Armónico 1, identifica las válvulas nuevas (VN) y se caracteriza por ser el pico menos representativo al tener sus amplitudes inferiores a la resto de armónicos; mientras que en la **Zona de Medición B** el Armónico 2, identificado como un armónico dominante por el valor de su amplitudes, representa a las válvulas que cumplieron su vida útil (VCUV), seguido del Armónico 1 el cual identifica a las válvulas nuevas (VN), y el Armónico 3 a las válvulas con falla (VF), el cual se categoriza por ser el menos representativo con respecto a los otros armónicos evaluados.

**Tabla 33** Identificación Armónica para cada estado de Válvula

<b>Zona A</b>			
	<b>Estado</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>Armónico 1</b>	VN	3.245	1.989
<b>Armónico 2</b>	VF	295.833	122.464
<b>Armónico 3</b>	VCUV	17.423	6.111
<b>Zona B</b>			
	<b>Estado</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desviación estándar</b>
<b>Armónico 1</b>	VN	1.616	0.634
<b>Armónico 2</b>	VCVU	52.927	20.734
<b>Armónico 3</b>	VF	0.393	0.154

**Nota:** Los valores mostrados en la tabla son aquellos resultantes de 160 pruebas seleccionadas, para cada uno de los estados de válvula con respecto a la zona de medición de donde fueron recolectados.



#### 4.1.4. Aprendizaje Automático para el Análisis de Armónicos

Tras la finalización del preprocesamiento de los datos vibracionales obtenidos del motor NHR, se recopilaron 480 muestras correspondientes a la amplitud de los tres armónicos más representativos por cada juego de válvula. Los datos fueron organizados en matrices y etiquetados según el estado de válvula utilizado en cada prueba, llegándose a tener un total 1440 muestras por zona de medición (A y B), que fueron utilizadas para la ejecución de un aprendizaje automático.

Para cada zona de medición, se aplicó de forma independiente un modelo de árbol de decisión ejecutado por el código mostrado en la **Figura 47**, a fin de identificar los distintos estados de válvulas, en función de una identificación dada por sus muestras armónicas; para finalmente, a partir de dicho proceso, ejecutarse un entrenamiento por separado en el entorno Classification Learner de MATLAB, con el objetivo de seleccionar al mejor modelo de predicción con respecto a su porcentaje de precisión.

**Figura 47** Código para la aplicación del Árbol de Decisión

```

arbol_desicion.m* x +
1   % Cargar datos
2   datos = readtable('ampl.xlsx');
3
4   % Preparar datos
5   X = table2array(datos(:,1:end-1));
6   Y = datos(:,end);
7
8   % Entrenar árbol de decisión
9   modelo = fitctree(X, Y);
10
11  % Visualizar árbol
12  view(modelo, 'Mode', 'graph');
```

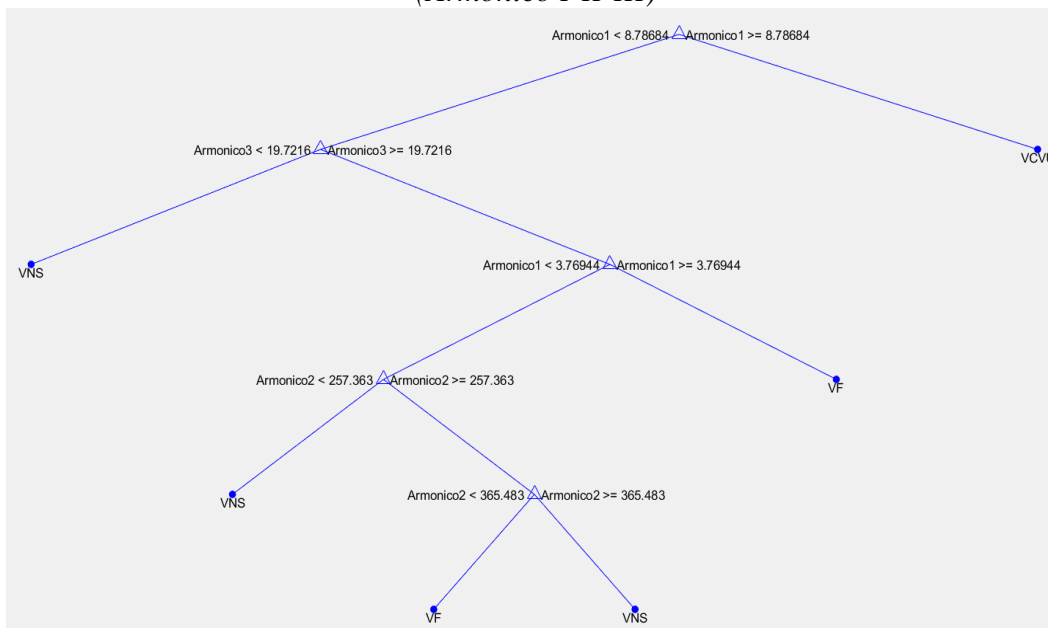
##### 4.1.4.1. Árbol de Decisión Aplicado en la Zona de Medición A

En la **Figura 48** se muestra un árbol de decisión que permite identificar las amplitudes armónicas más influyentes con respecto a la zona de medición A. En este caso, se evidencia que el armónico 2 es el más influyente, puesto a que nace como un nodo principal en la estructura del árbol y clasifica las muestras a partir de una amplitud igual 257.36 siendo periférica a valores



iguales o mayores que 365.83. El armónico 3, el segundo influyente se manifieste en ramas con amplitudes iguales o mayores a 19.72 para finalmente el armónico 1, aunque menos influyente, también forma parte de la clasificación con valores que inician en 3.77 y se extienden hasta amplitudes superiores a 8.79. Si bien su capacidad discriminativa es menor debido a su baja amplitud vibracional; este armónico, de igual manera, contribuye al proceso de clasificación de manera complementaria al armónico 2, el segundo influyente para esta zona de medición.

**Figura 48** *Árbol de decisión correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II-III)*



**Nota:** La clasificación de cada juego de válvula parte del nodo con mayor amplitud, dividiéndose según su relevancia armónica.

#### **4.1.4.2. Entrenamiento de datos Armónicos para la Zona de Medición A**

Con respecto al árbol de decisión aplicado en esta zona de medición (**Figura 48**), el armónico 2 y armónico 3 fueron los más representativos, lo que permitió un entrenamiento más efectivo para la predicción de anomalías suscitadas por vibraciones irregulares, puesto a que su elección fue fundamental, para la construcción del diagrama y matriz de confusión.



En la **Tabla 34**, se detalla las especificaciones y los principales resultados del modelo seleccionado tras el entrenamiento de las amplitudes armónicas en MATLAB.

El modelo seleccionado para la clasificación fue un Support Vector Machine con núcleo lineal (Linear SVM), entrenado con tres armónicos, alcanzando una precisión del 73.1%, sobresaliente de otros modelos evaluados, lo que evidencia su eficacia para la clasificación de los diferentes juegos de válvulas usados en la prueba.

**Tabla 34** *Especificaciones y Resultados del modelo seleccionado (Armónico II-III)*

<b>Tipo de Modelo</b>	
Preestablecido	Linear SVM
Función de Kernel	Lineal
Escala de Kernel	Automático
Método multiclasa	Uno contra uno
<b>Resultados del entrenamiento</b>	
Precisión (Validación)	73,1%
Costo total (Validación)	130
Velocidad de predicción	4700 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	3.9434 segundos

– **Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM**

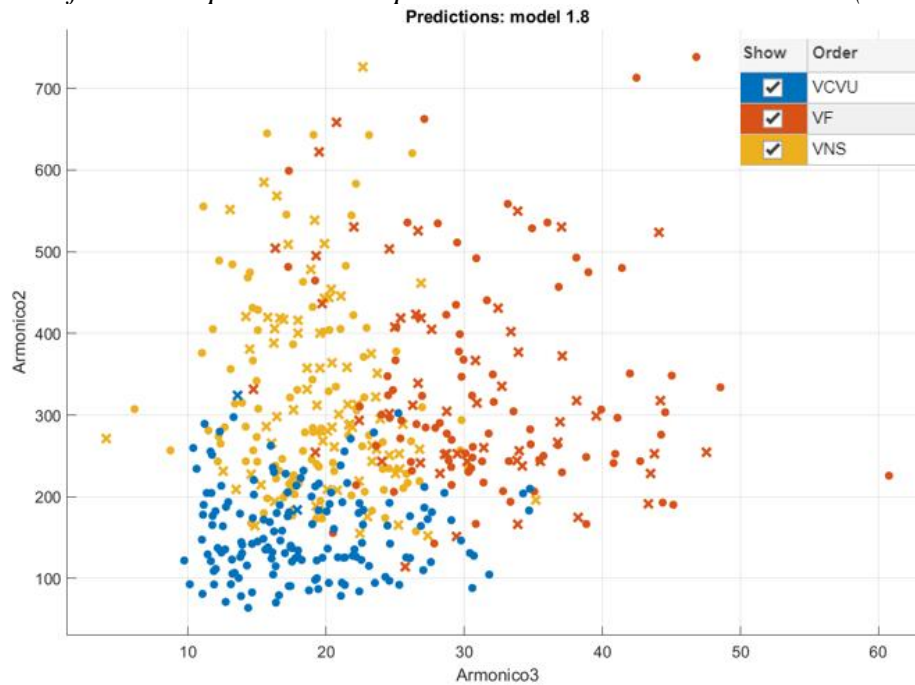
En la **Figura 49** se muestra que la dispersión de los datos reconoce a una clara diferenciación en las amplitudes de los armónicos 2 y 3, según el tipo de juego de válvulas (VNS, VF, VCVU). La agrupación de los puntos azules en la parte inferior indica que el juego de válvulas VCVU presenta menores niveles de amplitudes armónicas, lo cual se relacionaría con la estabilidad que presenta el motor al operar con dicho juego de válvulas. En cambio, las zonas



donde predominan los puntos rojos (VF) y naranjas (VNS) muestran mayores valores de amplitudes, que podrían ser vistos como vibraciones intensas, posiblemente debido a una mayor interacción mecánica.

La dispersión con respecto al espacio de las amplitudes indica que el modelo logra distinguir entre los diferentes juegos de válvulas, pero en ella, también se evidencia que existe una mezcla en sus muestras, que podrían poner en riesgo a su precisión de distinción.

**Figura 49** Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II)



**Nota:** En el diagrama las “x” representan la confusión de muestras entre los diferentes juegos de válvulas de admisión y escape.

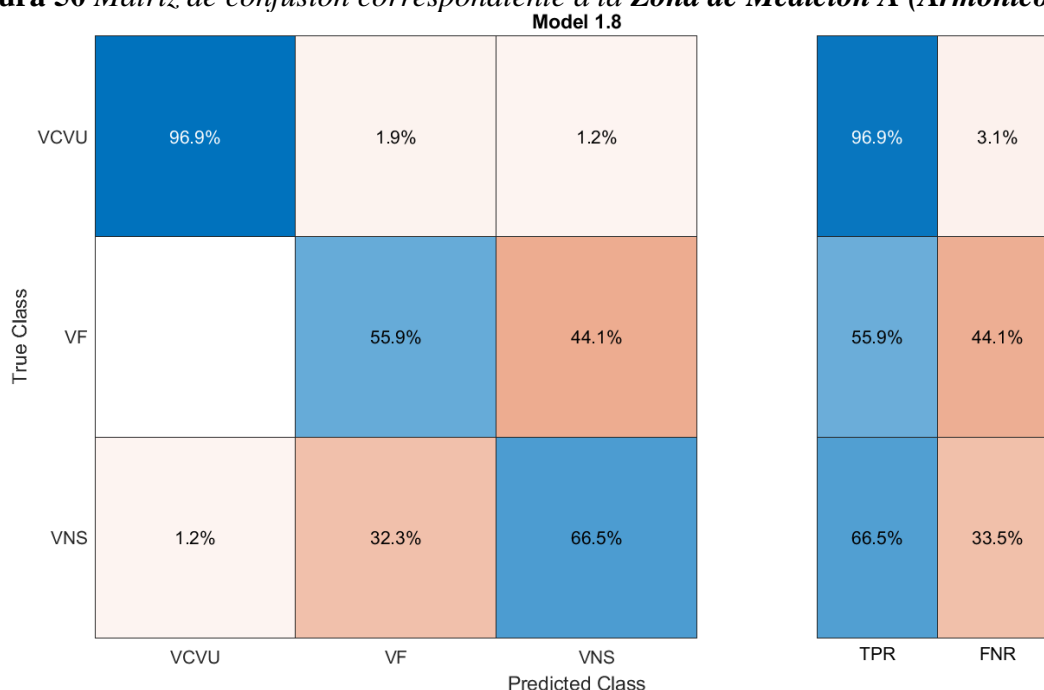
– **Matriz de Confusión según el modelo Linear SVM**

La **Figura 50** se presenta la matriz de confusión que muestra la precisión del modelo en la clasificación de los diferentes estados de válvula. En su diagonal principal, se indica alta precisión en la clasificación de VCVU (96.9%) y VNS (66.5%), mientras que VF alcanza solo un 55.9%,



que genera confusión con las muestras VNS y VCVU, lo que dificulta la identificación objetiva de cada uno de sus estados de válvula debido a su tasa de error. Las amplitudes vibracionales tienden a confundirse debido a las condiciones de prueba. En este caso, la confusión entre las clases se debe principalmente a un mal asentamiento para los dos tipos de válvulas desgastadas, lo que genera que sus muestras vibracionales sean similares.

**Figura 50** Matriz de confusión correspondiente a la **Zona de Medición A (Armónico I-II)**



**Nota:** La tasa de error mostrada en la parte derecha de la matriz refleja el porcentaje de confusión que las muestras experimentan en su clasificación.

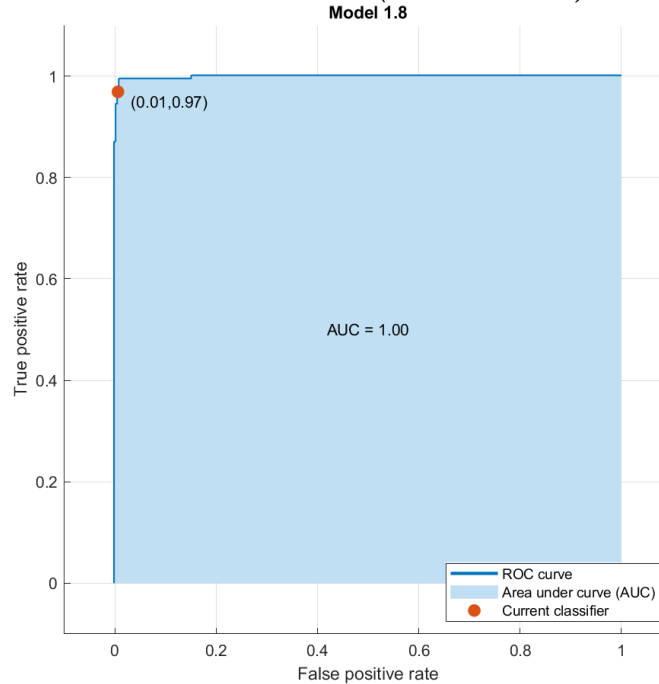
– **Curva Característica Operativa del Receptor según el modelo Linear SVM**

La Curva característica Operativa del Receptor (ROC con sus siglas en inglés Receiver Operating Characteristic) presentada en la **Figura 51** muestra la capacidad del modelo para distinguir entre clases. En este caso, el valor de Área Bajo la Curva (AUC) es 1.00, lo que indica un rendimiento perfecto sin falsos positivos ni falsos negativos. El punto (0.01, 0.97) señala un valor limite en el que se alcanza una sensibilidad del 97% con solo un 1% de falsos positivos, que



confirman que el modelo tiene una excelente capacidad discriminatoria, siendo altamente efectivo para identificar los diferentes estados vibratorios influenciados a los juegos de válvulas de admisión y escape usados en el estudio.

**Figura 51** Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición A (Armónico I-II)



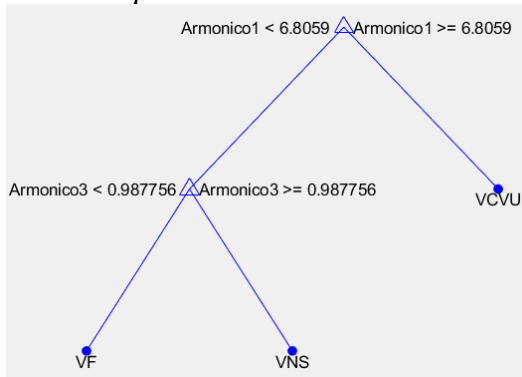
#### 4.1.4.3. Árbol de Decisión aplicado en la Zona de Medición B

En la **Figura 52** se presenta un árbol de decisión que permite identificar las amplitudes armónicas más influyentes para la clasificación de muestras en la zona de medición B. En este caso, el criterio principal de división está determinado por el armónico 1, que actúa como nodo raíz del árbol. Específicamente, con una amplitud de menor, igual y mayor a 6.8059 para la clasificación ordenada de los juegos de válvulas, superando en influencia a los demás armónicos que, en este contexto, no se presentan como nodos de decisión relevantes, pero si es continuado



por el armónico 3 el cual se presenta en el árbol como un nodo naciente en el margen de una amplitud de 0.99 para la clasificación de los estados de válvula en esta zona de medición.

**Figura 52** *Árbol de decisión correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-II-III)*



Nota: Aunque se evaluaron tres armónicos, el árbol solo muestra al armónico 1 como nodo raíz; los demás, por sus bajas amplitudes, quedan excluidos del modelo.

**4.1.4.4. Entrenamiento de datos Armónicos para la Zona de Medición B**

A continuación, en la **Tabla 35** se describe las especificaciones y resultados de la selección del modelo tras el entrenamiento de las amplitudes armónicas en MATLAB.

Su clasificación se asoció tras la implantación de un árbol de decisión binario, de donde únicamente los armónicos 1 y 3 fueron los más influyentes para la predicción de las condiciones de prueba.

**Tabla 35** *Especificaciones y Resultados del modelo seleccionado (Armónico I-III)*

<b>Tipo de Modelo</b>	
Prestablecido	Linear SVM
Función de Kernel	Lineal
Escala de Kernel	Automático
Método multiclase	Uno contra uno
<b>Resultados del entrenamiento</b>	
Precisión (Validación)	100%
Costo total (Validación)	0

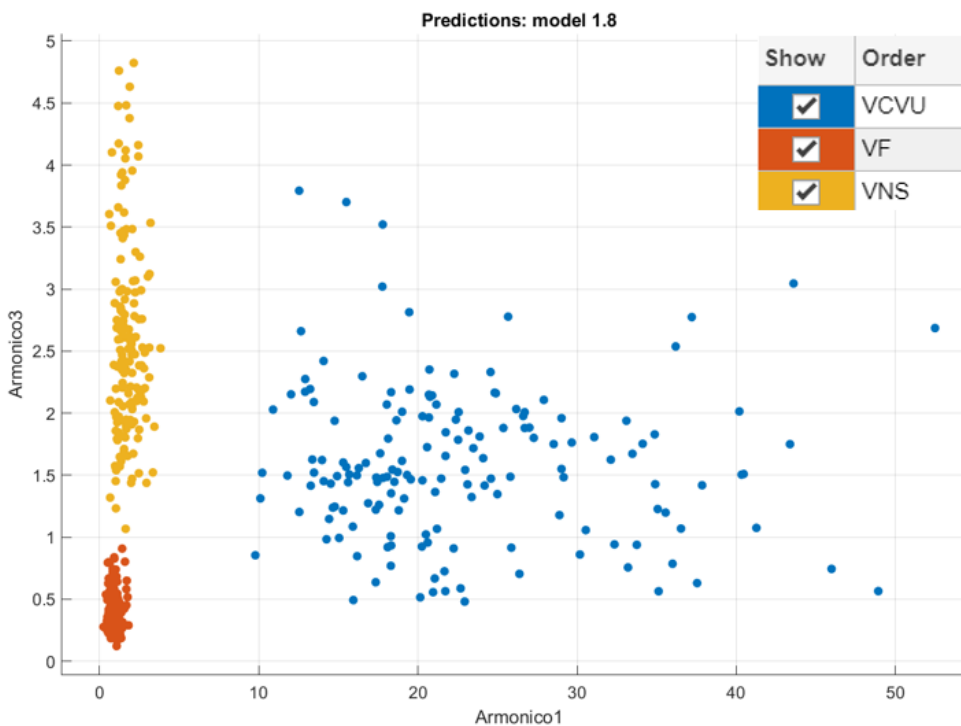


Velocidad de predicción	5000 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	3.7815 segundos

– **Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM**

EL gráfico de dispersión evidenciado en la **Figura 53**, muestra que la amplitud del armónico 1 permite una separación clara entre los tres juegos de válvulas, sin confusiones significativas; puesto a que, la muestras VCVU se agrupan dispersas en un rango de amplitud inferior a 4, las VF se sitúan entre 0.1 y 1. Las VNS superan a una amplitud de 4, lo que indica que esta distribución a mayor amplitud, se traduzca como una señal vibracional dominante, la cual está directamente relacionado con el tipo de juego de válvulas instalado, con el objetivo de predecir anomalías mecánicas suscitadas durante el funcionamiento de un MEC

**Figura 53** Gráfico de Dispersión correspondiente a la **Zona de Medición B (Armónico I-III)**

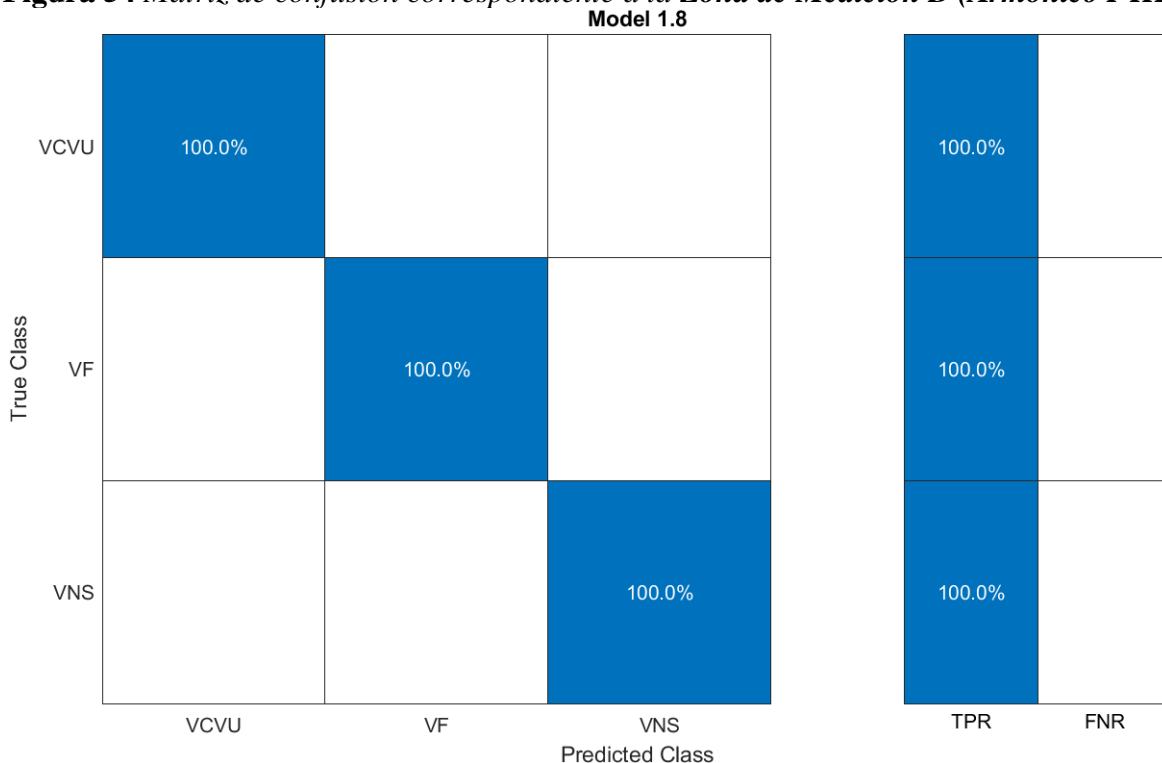




– **Matriz de Confusión según el modelo Linear SVM**

La matriz presentada en la **Figura 54** muestra que el modelo 1.8 clasificó con una precisión del 100 % los tres juegos de válvulas (VCVU, VF y VNS), sin cometer errores (TPR = 100 %, FNR = 0 %). Este rendimiento evidencia no solo la efectividad del modelo, sino también la adecuada selección de características vibracionales para la clasificación. Al no presentarse confusiones entre clases, el modelo demuestra ser altamente fiable para el diagnóstico de vibraciones mecánicas.

**Figura 54** Matriz de confusión correspondiente a la **Zona de Medición B (Armónico I-III)**



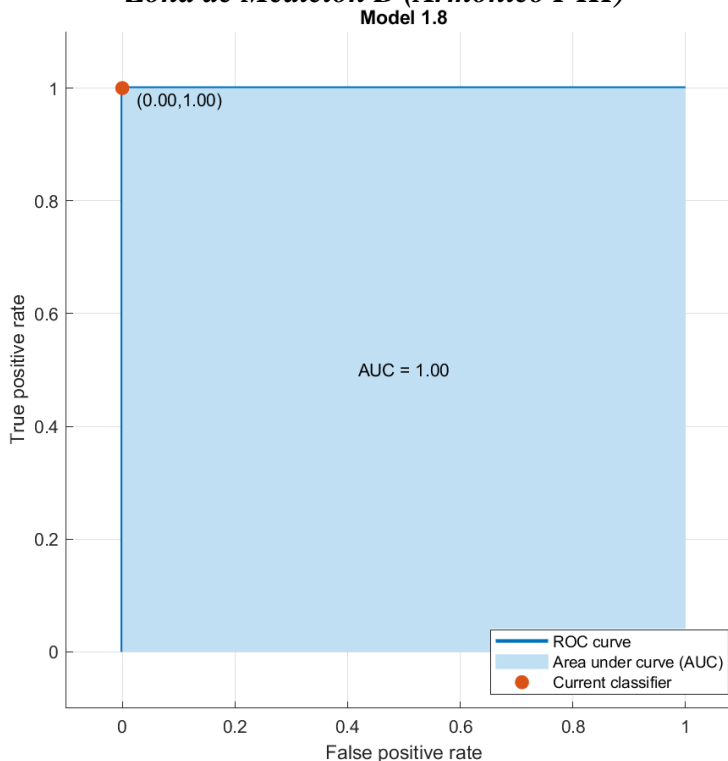
– **Curva Característica Operativa del Receptor (ROC) según el modelo Linear SVM**

El área bajo la curva ROC presentada **Figura 55** representa un valor total de 1.00, lo que indica que el modelo tiene un rendimiento perfecto al distinguir entre los diferentes juegos de válvulas, ya que el modelo identifica correctamente todas las muestras positivas (sensibilidad del



100 %) y al mismo tiempo evita clasificar falsamente muestras negativas (especificidad del 100 %). Esta combinación perfecta refleja que el modelo no solo es altamente preciso, sino también consistente, lo que lo convierte en una herramienta confiable para la detección de fallas vibracionales asociadas a los distintos juegos de válvulas analizados.

**Figura 55** Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición B (Armónico I-III)



**4.1.4.5. Comparación de los resultados del Análisis de Armónicos**

En referencia a la **Tabla 36**, se observa una clara diferencia en el desempeño del modelo Linear SVM aplicado en dos zonas de medición distintas. En la zona A, el modelo alcanzó una precisión del 73.1 %, lo que indica un nivel aceptable de clasificación, aunque con margen de error que podría deberse a mayor ruido, interferencias o menor diferenciación de las señales armónicas en esa zona. Por otro lado, en la zona B, el mismo modelo obtuvo una precisión del 100 %, lo que



evidencia un reconocimiento perfecto de las clases, probablemente a una menor confusión entre sus muestras o mayor fiabilidad a la zona de donde fueron adquiridas las mismas.

**Tabla 36** *Comparación de resultados de los modelos seleccionados*

<b>Zona de Medición</b>	<b>Modelo Utilizado</b>	<b>Precisión</b>
A	Linear SVM	73.1%
B	Linear SVM	100%

Nota: Para ambas zonas de medición se utilizó el mismo modelo (Linear SVM), ya que fue el que alcanzó la mayor puntuación porcentual en comparación con los demás modelos considerados.

Esta comparación destaca la importancia de la ubicación del sensor de medición en el análisis de armónicos, ya que influye directamente en la capacidad del modelo para la predicción de los juegos de válvulas y su influencia en la ejecución de cada una de las pruebas realizadas.

#### 4.2. ANÁLISIS DEL CÁLCULO ESTADÍSTICO DE DATOS VIBRATORIOS

Las zonas de medición A y B como lo indica la **Tabla 26**, corresponden a dos puntos estratégicos de adquisición de datos en el motor NHR.

Para este análisis, se elaboró dos matrices para el entrenamiento de datos en Microsoft Excel con resultados obtenidos del cálculo estadístico aplicado a las señales de vibración correspondientes a las diferentes zonas de medición que consolidaron los principales indicadores estadísticos, tales como RMS, varianza, curtosis, media, mediana, desviación estándar, media cuadrática, moda, máximo/mínimo y asimetría para cada estado de válvula.

De 200 pruebas adquiridas para cada estado de válvula, se utilizaron 180 pruebas, donde cada una de ellas llevaba cerca de 64 mil muestras lo que hace un total de 11520000 datos a



procesarse en la obtención de 10 indicadores estadísticos resultados en 1800 datos independientes, utilizados en el desarrollo del aprendizaje automático.

#### 4.2.1. Aprendizaje Automático en la Zona de Medición A

A continuación, en la **Tabla 37** se resume la elección de modelo utilizado tras el análisis de entrenamiento de datos en MATLAB, así como los principales resultados obtenidos, los cuales permiten evaluar el desempeño del modelo utilizado. Mencionándose que el modelo electo, responde al valor de precisión más alto acertado en el proceso de entrenamiento.

**Tabla 37** Especificaciones y resultados del modelo electo para la **Zona de Medición A**

<b>Tipo de Modelo</b>	
Preestablecido	Linear SVM
Función de Kernel	Linear
Escala de Kernel	Automático
Método multiclase	Uno contra uno
<b>Resultados del entrenamiento</b>	
Precisión (Validación)	100%
Costo total (Validación)	0
Velocidad de predicción	4100 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	4.3865 segundos

Como se indica en la **Tabla 37**, el modelo seleccionado para la clasificación fue un Support vector machine con núcleo lineal (Linear SVM), entrenado con 10 características estadísticas. Este modelo alcanzó una precisión del 100%, lo que demuestra un excelente desempeño predictivo en esta zona estudio y lo que lo convierte en una herramienta confiable y adecuada para clasificación de los diferentes juegos de válvulas evaluados.

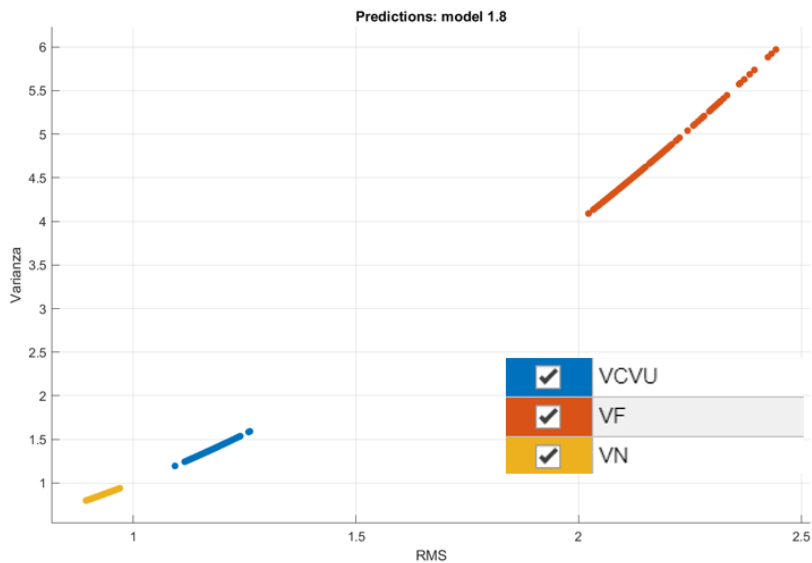


**4.2.1.1. Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM**

En la **Figura 56** se presenta un gráfico de dispersión que compara dos características clave: Raíz Cuadrada Media (RMS) y Varianza en relación a los diferentes estados de válvula.

El análisis alcanzó una precisión del 100%, lo que permitió evaluar de manera fiable los distintos juegos de válvulas, y en él, las muestras correspondientes al juego de válvulas VCVU (azul) se agrupan en la parte inferior izquierda, mientras que las muestras VF (rojo) y VN (amarillo) se distribuyen en regiones distintas, lo que refleja una buena distinción entre los diferentes estados de válvulas.

**Figura 56** Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición A



**4.2.1.2. Matriz de confusión según el modelo Linear SVM**

La

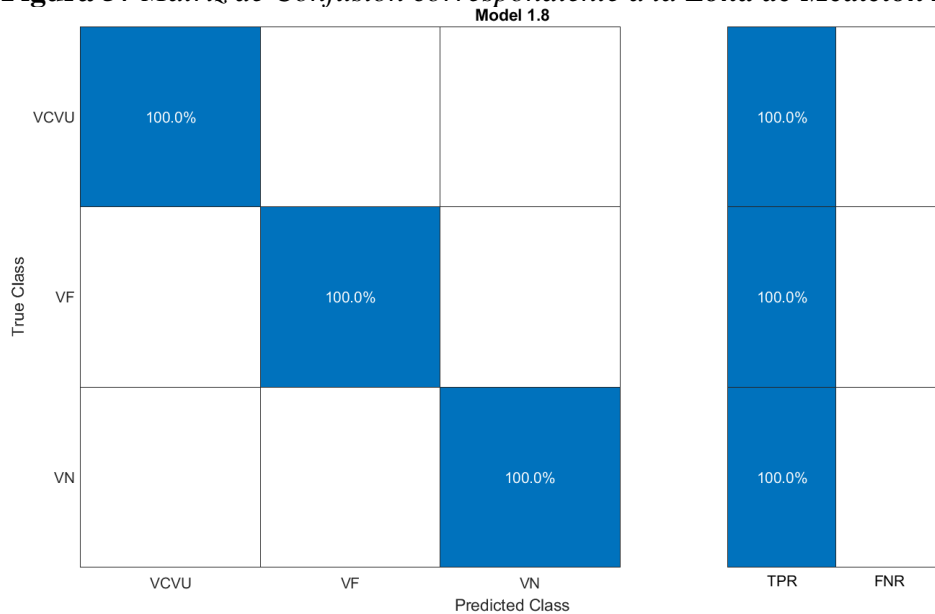
**Figura 57** presenta una matriz de confusión que proporciona una visión detallada del desempeño del modelo SVM en términos de clasificación correcta e incorrecta de las muestras. El modelo alcanzó una precisión del 100% mediante validación cruzada de 5 pliegues, es decir,



dividiendo el conjunto de datos en cinco partes iguales y utilizando cada una de ellas como subconjunto de validación en distintas iteraciones hasta completar el proceso de evaluación.

En la matriz de confusión no se presentan falsos negativos, lo que indica que el modelo no cometió errores de clasificación. Este resultado refleja una alta capacidad de generalización y precisión del modelo utilizado

**Figura 57** Matriz de Confusión correspondiente a la **Zona de Medición A**

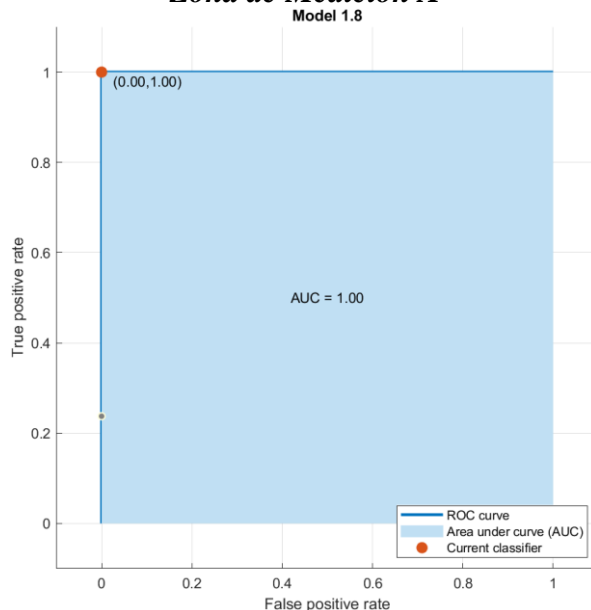


**4.2.1.3. Curva Característica Operativa del Receptor según el modelo Linear SVM**

En la **Figura 58** se presenta la curva ROC del modelo, con un Área bajo la Curva (AUC) de 1.0, lo cual es el valor máximo posible por alcanzar, indicando que el modelo tiene una capacidad óptima sin incluir errores de clasificación al equilibrar perfectamente la tasa de verdaderos positivos y la tasa de falsos positivos, con respecto a la distinción de los diferentes juegos de válvulas usadas para el presente estudio.



**Figura 58** Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la Zona de Medición A



#### 4.2.2. Aprendizaje Automático en la Zona de Medición B

Para establecer una relación más precisa entre las diferentes zonas de medición (A y B) y realizar el entrenamiento de datos, se seleccionó el modelo Linear SVM (Support Vector Machine) identificado como el Modelo 1.8 en el entorno de MATLAB, sin olvidar, que su elección, se fundamentó por su alto puntaje de precisión.

A continuación, las **Tabla 38** se detalla las especificaciones y los resultados obtenidos tras aplicar dicho modelo en la zona de medición B. Cabe destacar que ambos puntos (A y B) lograron un rendimiento idéntico en cuanto a precisión, lo cual indica que, en este caso particular, ambas ubicaciones fueron igualmente efectivas para la detección de anomalías bajo las mismas consideraciones de funcionamiento del motor NHR; en otras palabras, el modelo entrenado para esta zona de estudio alcanza una precisión del 99.8%, obtenido en la zona de medición A. Convirtiéndose así en modelo adecuado, confiable y eficaz para la distinción de los diferentes



estados de válvulas; así como, la detección de anomalías a causa de vibraciones fuera de lugar en el un motor de encendido por compresión.

**Tabla 38** *Especificaciones y Resultados del modelo electo para la Zona de Medición B*

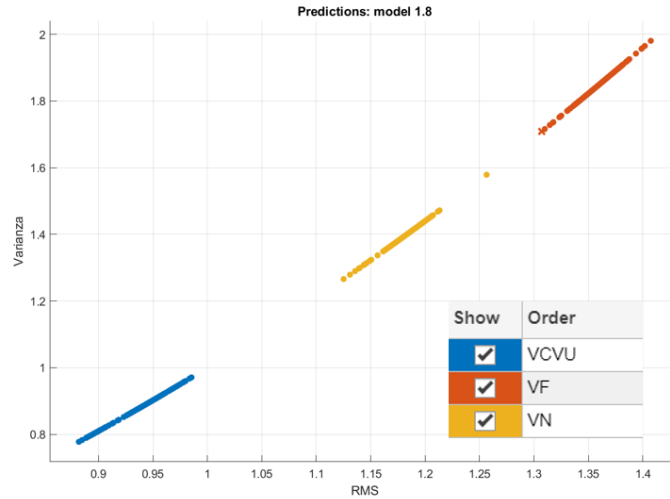
<b>Tipo de Modelo</b>	
Preestablecido	Linear SVM
Función de Kernel	Linear
Escala de Kernel	Automático
Método multiclase	Uno contra uno
<b>Resultados del entrenamiento</b>	
Precisión (Validación)	99.8%
Costo total (Validación)	1
Velocidad de predicción	4700 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	3.4893 segundos

#### **4.2.2.1. Diagrama de Dispersión según el modelo Linear SVM**

En la **Figura 59** se presenta un gráfico de dispersión basado en las características RMS y Varianza con respecto a diferentes juegos de válvulas de admisión y escape usados en el estudio. El modelo electo, alcanzó una precisión del 99.8%, con una intachable agrupación de las muestras VCVU (azul). Sin embargo, las muestras VF (rojo) y VN (amarillo) distribuidas en regiones distintas, se presentan algunos puntos fuera de su diagonal principal los cuales indican predicciones incorrectas que pueden deberse a una superposición en el espacio del cálculo estadístico.



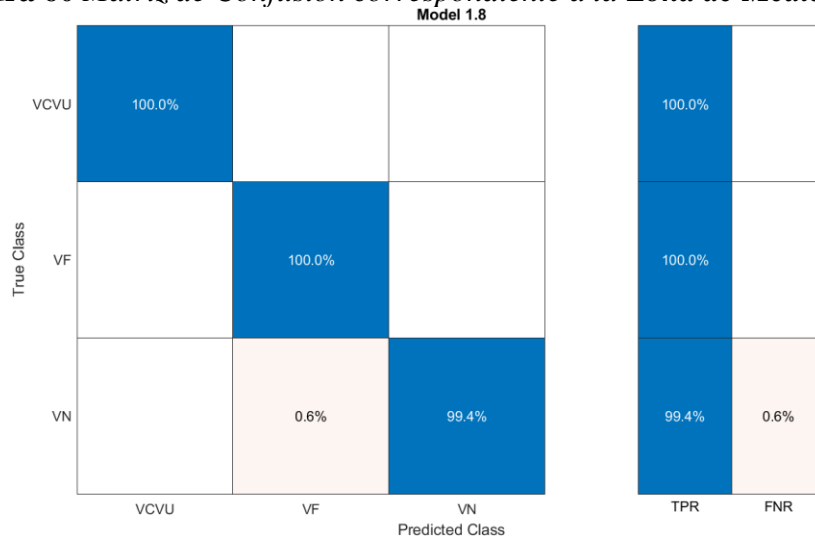
**Figura 59** Gráfico de Dispersión correspondiente a la Zona de Medición B



**4.2.2.2. Matriz de Confusión según el modelo Linear SVM**

La **Figura 60** presenta una matriz de confusión la cual alcanzó una precisión del 99.8%, donde los juegos de válvulas VVCU y VF fueron clasificadas sin errores, mientras que el juego de válvulas VN presentó una leve confusión con las muestras de desgastadas VF (0.6%), causada por similitudes en sus características vibracionales. A pesar de no completar una precisión al máximo, el modelo es fiable para la predicción de anomalías vibracionales.

**Figura 60** Matriz de Confusión correspondiente a la Zona de Medición B

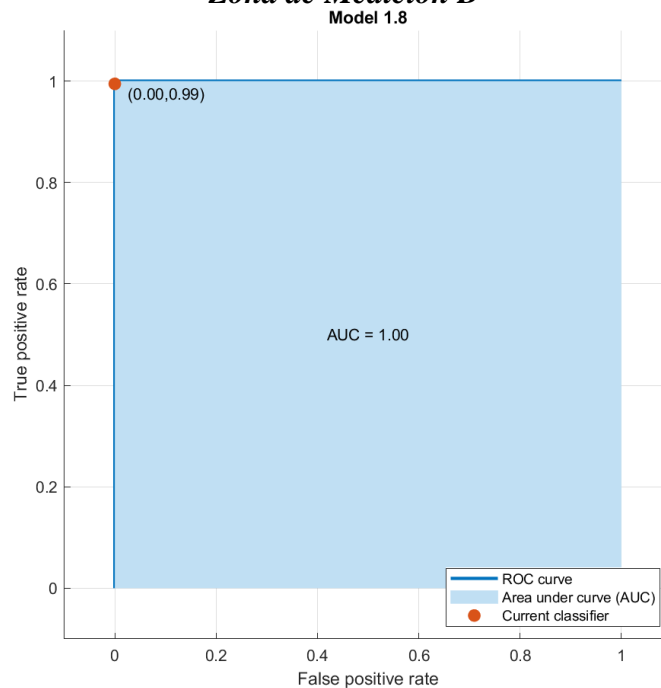




#### 4.2.2.3. Curva Característica Operativa del Receptor según el modelo Linear SVM

En la **Figura 61** se muestra una curva ROC, donde el AUC para el juego de válvulas VN es de 0.99, lo que significa que el modelo tiene una capacidad muy alta para distinguir entre las predicciones correctas e incorrectas. Sin embargo, no alcanza el 1.00 que se obtiene para los juegos de válvulas VCVU y VF; ya que probablemente existen algunos datos estadísticos que el modelo no puede clasificar correctamente, a pesar de su gran precisión con las otras muestras.

**Figura 61** Curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor) correspondiente a la **Zona de Medición B**



#### 4.2.3. Árbol de Decisión para la zona de medición A y B

Tanto para la zona de medición A (parte anterior de la tapa válvulas) como para la zona de medición B (parte posterior de la tapa válvulas) del motor NHR, se utilizó un árbol de decisión que permitió la clasificación aún más precisa de los diferentes juegos de válvulas en función de los datos vibracionales adquiridos para ambas zonas.



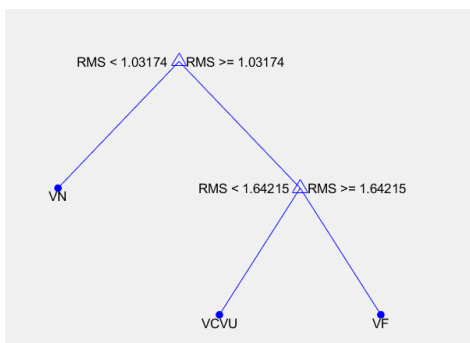
A partir del uso del código que se muestra en la **Figura 62** se generó el árbol de decisión y se identificó que la medida estadística RMS (Raíz Cuadrática Media) era la variable más relevante para la clasificación; puesto a que apareció como un nodo principal para ambas zonas de medición lo que indica que su valor tiene un mayor poder discriminante frente a otras características estadísticas como la media, varianza o curtosis.

**Figura 62** Código para ejecutar el árbol de decisión

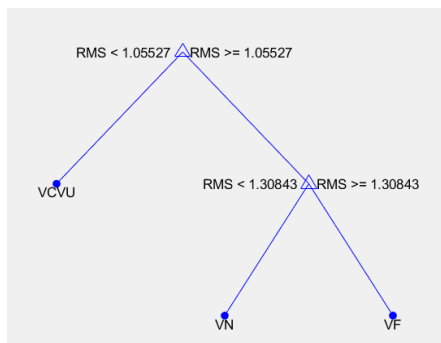
```

1  % Cargar datos
2  - datos = readtable('ampl.xlsx');
3
4  % Preparar datos
5  - X = table2array(datos(:,1:end-1));
6  - Y = datos(:,end);
7
8  % Entrenar árbol de decisión
9  - modelo = fitctree(X, Y);
10
11 % Visualizar árbol
12 - view(modelo, 'Mode', 'graph');
    
```

*Aplicación del árbol de decisión para la Zona de Medición A*



*Aplicación del árbol de decisión para la Zona de Medición B*

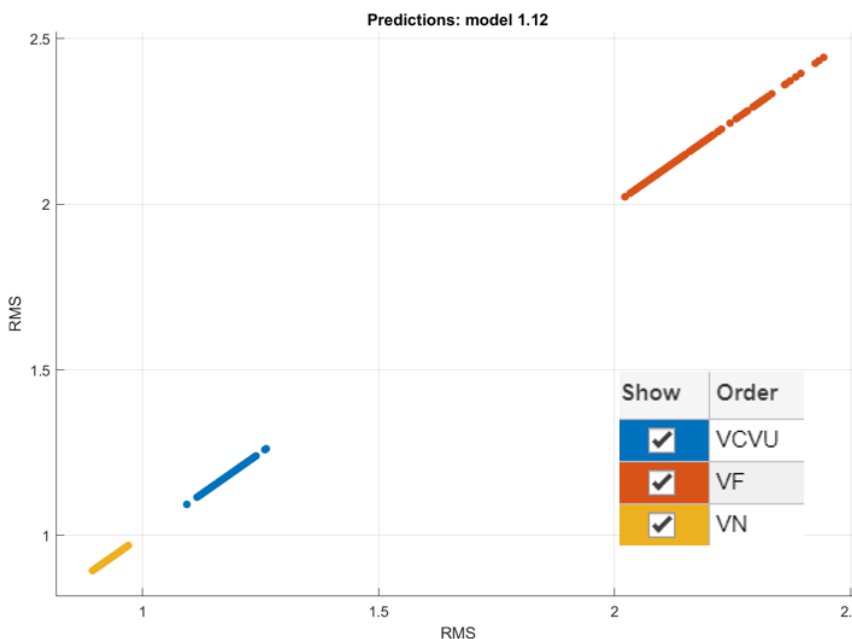




**4.2.3.1. Aprendizaje automático según árbol de decisión aplicado en la Zona de Medición A**

Debido a que la variable estadística RMS indica su alto poder discriminatorio, se entrenó un nuevo modelo de datos utilizando únicamente dicha variable. Obtenido como resultados a las **Figura 63 y Figura 64**, las cuales representan el comportamiento vibracional del motor NHR en función de los diferentes juegos de válvulas usados en este estudio.

**Figura 63** Diagrama de dispersión RMS para la Zona de Medición A



– **Resultados del entrenamiento**

**Tabla 39** Especificaciones del Modelo Utilizado para la Zona de Medición A

Tipo de Modelo	
Preestablecido	SVM
Función de Kernel	Medium Gaussian
Escala de Kernel	Gaussian
Método multiclase	1
	Uno contra uno
Resultados del entrenamiento	
Precisión (Validación)	100%
Costo total	0



(Validación)	
Velocidad de predicción	8600 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	1.3376 segundos

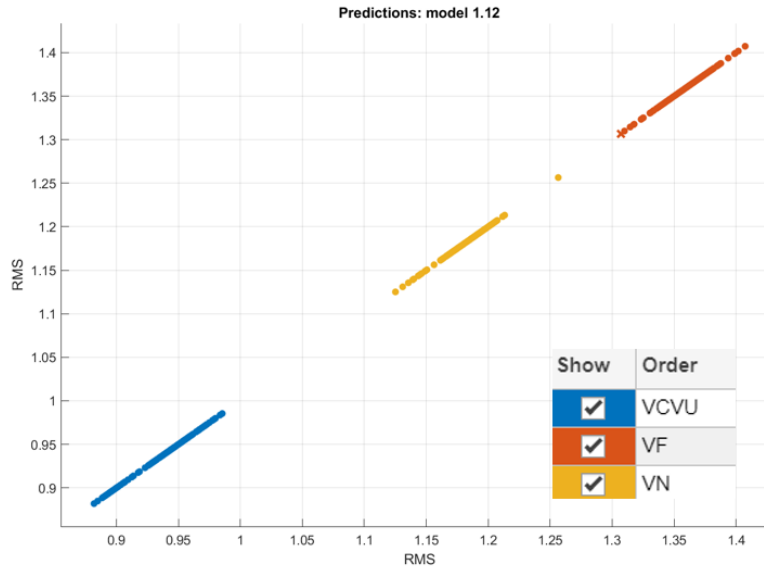
Tras la aplicación del árbol de decisión y el entrenamiento de datos en esta zona de medición. Se seleccionó el modelo SVM con Kernel gaussiano medio, el cual logró una precisión del 100 %, siendo similar al que se obtuvo con las múltiples variables estadísticas. Su resultado se representa en la **Figura 63** y de ella se deduce que la toma de datos y su procesamiento se convierten en una herramienta que facilita la predicción, distinción y validación de anomalías vibracionales en motores de encendido por comprensión, con respecto a las condiciones de las válvulas de admisión y escape en el motor.

#### ***4.2.3.2. Aprendizaje automático según árbol de decisión aplicado en la Zona de Medición B***

Al igual que en la zona anterior, se seleccionó el modelo SVM con Kernel gaussiano medio, pero en este caso el modelo alcanzó una precisión del 99.8% siendo similar al que se obtuvo con las múltiples variables estadísticas con respecto a esta zona de medición. Lo que de igual se convierte en un modelo útil para la predicción de anomalías representado en la **Figura 64**.



**Figura 64** Diagrama de dispersión RMS para la Zona de Medición B



– **Resultados del entrenamiento**

**Tabla 40** Especificaciones del Modelo Utilizado para Zona de Medición B

<b>Tipo de Modelo</b>	
Preestablecido	SVM
Función de Kernel	Medium Gaussian
Escala de Kernel	Gaussian
Método multiclase	1
	Uno contra uno
<b>Resultados del entrenamiento</b>	
Precisión (Validación)	99.8%
Costo total (Validación)	1
Velocidad de predicción	8300 observaciones/segundos
Tiempo de entrenamiento	2.0464 segundos

Al igual que en la zona anterior, se seleccionó el modelo SVM con Kernel gaussiano medio, pero en este caso el modelo alcanzó una precisión del 99.8% siendo similar al que se obtuvo con



las múltiples variables estadísticas con respecto a esta zona de medición. Lo que de igual se convierte en un modelo útil para la predicción de anomalías representado en la **Figura 64**.

#### 4.2.3.4. Comparación de los resultados del Análisis Estadístico

**Tabla 41** Comparación de resultados de los modelos seleccionados

Zona de Medición	Modelo Utilizado	Precisión
A	Linear SVM	100%
B	Linear SVM	99.8%
Árbol de decisión A	SVM	100%
	Medium Gaussian	
Árbol de decisión B	SVM	99.8%
	Medium Gaussian	

En la **Tabla 41** se muestra la comparación de los modelos aplicados tras la finalización del proceso de aprendizaje automático en ambos casos tanto con el modelo SVM lineal como con el SVM con Kernel gaussiano medio y su aplicación del árbol de decisión para elevar el índice de predicción, el valor máximo de precisión fue del 100%. Lo que demuestra que ambos enfoques son adecuados para la predicción del estado de las válvulas; permitiendo así, que las estimaciones que se generan para las detecciones averías vibratorias con respecto al desgaste del asiento de las válvulas en un motor de encendido por compresión sean fiables y respaldadas.

#### 4.2.4. Comparación de los Modelos de Aprendizaje Automático

En la **Tabla 42**, se muestra el resumen de todos los modelos seleccionados para la predicción de anomalías vibratorias suscitadas por un asentamiento inadecuado dado por diferentes estados de válvulas de escape y admisión, utilizados en la metodología de este estudio. Tras el Análisis de Armónicos, se evidenció que en la Zona de Medición A la precisión alcanzada es de



73.1% mientras que en la Zona de Medición B, la precisión alcanzada es del 100%. En el Análisis Estadístico la precisión alcanzada en el Zona de Medición A es del 100% y en la Zona de Medición B un valor de precisión de 99.8%.

Se debe considerar que en ambos análisis el modelo que mayor porcentaje de precisión alcanzó, fue el Linear SVM confirmando su utilidad para la distinción de los diferentes estados de válvulas. Por otro lado, la aplicación de un árbol de decisión en el Análisis Estadístico, generó una discriminación total de todos los indicadores estadísticos antes calculados, lo que evidenció el porcentaje de precisión alcanzado en ambas zonas de medición.

**Tabla 42** *Resumen de los Modelos Seleccionados en el Estudio*

<b>Zona de Medición</b>	<b>Modelo Utilizado</b>	<b>Precisión</b>
Análisis de Armónicos Zona A	Linear SVM	73.1%
Análisis de Armónicos Zona B	Linear SVM	100%
Análisis Estadístico Zona A	Linear SVM	100%
Análisis Estadístico Zona B	Linear SVM	99.8%
Árbol de decisión aplicado en función del (AE) Zona A	SVM Medium Gaussian	100%
Árbol de decisión en función del (AE) Zona B	SVM Medium Gaussian	99.8%

Nota: Las Siglas AE responden al Análisis Estadístico al cual se le aplicó un árbol de decisión para validar de forma más acertada la distinción de los diferentes estados de válvulas.

Con respecto a la tabla anterior, aunque la Zona de Medición B es preferible para análisis armónicos, el Análisis Estadístico se consolida como el método más confiable y consistente para diagnosticar fallas, independientemente del punto de medición, puesto a que cada uno alcanza una predicción del 100% lo que garantiza la identificación temprana de anomalías sin necesidad de detener o desmontar el motor.



### 4.3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Para la validación de resultados del presente estudio se dejaron 40 pruebas correspondientes a cada estado de válvula, que no fueron utilizadas en ningún análisis de datos ni tampoco en el entrenamiento de muestras procesadas.

Al igual que en entrenamientos anteriores, se implementó un procedimiento en MATLAB, fundamentado bajo la práctica de aprendizaje automático correspondiente al análisis de armónicos y al análisis estadístico evaluados bajo distintos modelos de clasificación.

A partir de la elección del modelo resultante con mayor puntaje de desempeño, respecto a al entrenamiento de muestras, se exportó el modelo entrenado y al igual que el código de programación mostrado en la **Figura 65**, el cual imprimía a una función de predicción utilizada como una herramienta de validación de resultados, capaz de predecir los diferentes estados de válvulas (VN, VCUV y VF), sin olvidar, el enfoque de su análisis y la zona de medición A y B de donde partió la recolección de sus muestras.

**Figura 65** Código para la obtención de la función general para la predicción de nuevas muestras

```
function [model, acc] = trainClassifier(data)
% Entrena un clasificador SVM y devuelve el modelo y la exactitud

X = data(:, {'RMS', 'Varianza', 'Curtosis', 'Media', 'Mximo', 'Mnimo', 'Mediana', 'Moda', 'Mdc', 'Mediacuadratica'});
Y = data.Estado;

template = templateSVM('KernelFunction', 'linear', 'Standardize', true);
model = fitcecoc(X, Y, 'Learners', template, 'Coding', 'onesvsone');

cv = crossval(model, 'KFold', 5);
acc = 1 - kfoldLoss(cv, 'LossFun', 'ClassifError');
end
```

`yfit = c.predictFcn(T)`

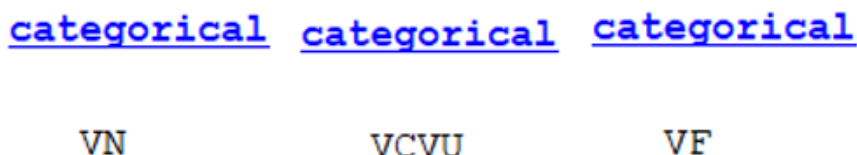
**Nota:** Para la aplicación práctica de la función generada, es importante señalar que, se requiere de la sustitución de las variables genéricas dadas automáticamente por MATLAB.



**Donde:**

- **C:** es el nombre de la variable que estructura el modelo entrenado, de manera genérica «trainedModel» o el nombre que se empleó para su distinguir dicho entrenamiento.
- **T:** es la matriz de las muestras o datos a predecirse para su validación, imprimiéndose en su distinción categórica como lo muestra la **Figura 66**.

**Figura 66** *Distinción de los estados de válvulas*



**4.3.1. Validación de Armónicos en la Zona de Medición A**

Con respecto a la selección del modelo Linear SVM especificado en la **Tabla 34** del **subtema 4.1.4.2.** del presente capítulo, se generó la función que se utilizó para la validación de sus resultados a través del reconocimiento de los diferentes estados de válvula.

La **Tabla 43** muestra la validación de sus resultados exaltando con (SÍ) a las pruebas que se distinguieron y con la condición (NO) a aquellas pruebas que fueron confundidas con otros estados de válvulas.

Cabe destacar que el entrenamiento respecto a esta zona de medición alcanzó un promedio del 73.1% lo que hace que su evaluación sea menos eficiente en el momento de la predicción de nuevas muestras.

**Tabla 43** *Validación de Resultados Armónicos - Zona de Medición A*

Nro. Prueba	Estados de Válvulas		
	Válvulas Nuevas (VN)	Válvulas que Cumplieron su Vida Útil (VCVU)	Válvulas Desgastadas (VF)
<b>Prueba 2</b>	SÍ	NO	NO



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



Prueba 3	NO	NO	SÍ
Prueba 4	SÍ	NO	NO
Prueba 5	SÍ	NO	NO
Prueba 6	SÍ	SÍ	NO
Prueba 7	NO	SÍ	SÍ
Prueba 8	NO	SÍ	SÍ
Prueba 9	NO	SÍ	NO
Prueba 10	NO	SÍ	NO
Prueba 11	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 12	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 13	SÍ	SÍ	NO
Prueba 14	SÍ	SÍ	NO
Prueba 15	SÍ	SÍ	NO
Prueba 16	SÍ	SÍ	NO
Prueba 17	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 18	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 19	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 20	SÍ	SÍ	NO
Prueba 180	SÍ	SÍ	NO
Prueba 181	SÍ	SÍ	NO
Prueba 182	NO	SÍ	NO
Prueba 183	NO	SÍ	NO
Prueba 184	SÍ	SÍ	NO
Prueba 185	SÍ	NO	NO
Prueba 186	NO	SÍ	SÍ
Prueba 187	NO	SÍ	SÍ
Prueba 188	NO	SÍ	SÍ
Prueba 189	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 190	SÍ	NO	SÍ
Prueba 191	SÍ	NO	SÍ
Prueba 192	SÍ	NO	SÍ
Prueba 193	SÍ	NO	NO
Prueba 194	NO	NO	SÍ
Prueba 195	SÍ	NO	NO
Prueba 196	SÍ	NO	NO
Prueba 197	NO	NO	SÍ
Prueba 198	SÍ	NO	NO
Prueba 199	SÍ	NO	SÍ
Prueba 200	SÍ	NO	SÍ



#### 4.3.2. Validación de Armónicos en la Zona de Medición B

Con respecto a la selección del modelo Linear SVM especificado en la **Tabla 35** del **subtema 4.1.4.4.** del presente capítulo, se generó la función que se utilizó para la validación de sus resultados a través del reconocimiento de los diferentes estados de válvula.

El resultado obtenido del modelo fue del 100%, es por ello que la predicción de las muestras, reconocen con facilidad a los diferentes estados de válvula, tal como se muestra en la siguiente **Tabla 44**, la cual valida el reconocimiento de nuevas muestras a través de la condición (SÍ), a todas las muestras que no fueron confundidas con otros estados.

**Tabla 44** Validación de Resultados Armónicos - Zona de Medición B

Nro. Prueba	Estados de Válvulas		
	Válvulas Nuevas (VN)	Válvulas que Cumplieron su Vida Útil (VCVU)	Válvulas Desgastadas (VF)
Prueba 2	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 3	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 4	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 5	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 6	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 7	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 8	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 9	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 10	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 11	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 12	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 13	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 14	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 15	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 16	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 17	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 18	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 19	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 20	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 180	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 181	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 182	SÍ	SÍ	SÍ



Prueba 183	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 184	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 185	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 186	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 187	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 188	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 189	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 190	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 191	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 192	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 193	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 194	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 195	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 196	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 197	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 198	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 199	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 200	SÍ	SÍ	SÍ

**4.3.3. Validación del Análisis Estadístico en la Zona de Medición A**

Con respecto a la selección del modelo Linear SVM especificado en la **Tabla 37** del **subtema 4.2.1.** del presente capítulo, se generó la función que se utilizó para la validación de sus resultados a través del reconocimiento de los diferentes estados de válvula.

El modelo seleccionado para su validación alcanzó un promedio del 100% lo que no genera confusión para la validación de sus resultados, mostrados en la **Tabla 45** la cual condiciona con (SÍ) a todas las muestras que no fueron confundidas con otros estados.

**Tabla 45** *Validación de Resultados para el Cálculo Estadístico - Zona de Medición A*

Nro. Prueba	Estados de Válvulas		
	Válvulas Nuevas (VN)	Válvulas que Cumplieron su Vida Útil (VCVU)	Válvulas Desgastadas (VF)
Prueba 2	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 3	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 4	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 5	SÍ	SÍ	SÍ



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



Prueba 6	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 7	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 8	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 9	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 10	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 11	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 12	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 13	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 14	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 15	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 16	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 17	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 18	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 19	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 20	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 180	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 181	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 182	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 183	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 184	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 185	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 186	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 187	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 188	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 189	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 190	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 191	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 192	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 193	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 194	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 195	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 196	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 197	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 198	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 199	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 200	SÍ	SÍ	SÍ



#### 4.3.4. Validación del Análisis Estadístico en la Zona de Medición B

Con respecto a la selección del modelo Linear SVM especificado en la **Tabla 38** del **subtema 4.2.2.** del presente capítulo, se generó la función que se utilizó para la validación de sus resultados a través del reconocimiento de los diferentes estados de válvula.

El modelo estudiado concluyó un promedio de 99.8% mismo que generó ciertas confusiones en el momento de predecir los estados de válvulas mostrados en la **Tabla 46.**

**Tabla 46** Validación de Resultados para el Cálculo Estadístico - Zona de Medición B

Nro. Prueba	Estados de Válvulas		
	Válvulas Nuevas (VN)	Válvulas que Cumplieron su Vida Útil (VCVU)	Válvulas Desgastadas (VF)
Prueba 2	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 3	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 4	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 5	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 6	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 7	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 8	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 9	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 10	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 11	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 12	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 13	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 14	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 15	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 16	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 17	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 18	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 19	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 20	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 180	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 181	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 182	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 183	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 184	SÍ	SÍ	SÍ
Prueba 185	SÍ	SÍ	SÍ



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



<b>Prueba 186</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 187</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 188</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 189</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 190</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 191</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 192</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 193</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 194</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 195</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 196</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 197</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 198</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 199</b>	SÍ	SÍ	SÍ
<b>Prueba 200</b>	SÍ	SÍ	SÍ



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- El estudio confirma que el análisis vibracional se presenta como una técnica viable para evaluación de componentes internos de un MEC, sin afectar su funcionamiento ni requerir desmontarlo para diagnosticar sus anomalías; puesto a que la elección de un punto estratégico de medición, resulta fundamental, porque de ello depende la fiabilidad y coherencia de los resultados obtenidos. En este sentido, las Zonas de Medición A y B utilizadas para adquisición de datos del presente estudio, fue la Parte Anterior de la Tapa Válvulas (Zona de Medición A), directamente relacionada con el funcionamiento de sus muelles y varillas de empuje que dan inicio a la apertura y cierre de las válvulas; permitió captar con claridad las vibraciones generadas en dicho proceso; mientras que la Parte Posterior Inferior de la Culata (Zona de Medición B), directamente relacionada con el sellamiento hermético de las válvulas, proporcionó información sobre el comportamiento motor; confirmando así que ambos puntos de medición son estratégicos y cada uno aporta información relevante respecto a la distinción de anomalías mecánicas suscitadas por el estado de sus válvulas.
- El desarrollo de un **Análisis de Armónicos** aplicado a más de 10 millones de datos, producto de 160 pruebas donde cada una llevaba cerca de 64 mil registros cada una, consideró únicamente a los tres primeros armónicos más representativos obtenidos mediante Transformada Rápida de Fourier en cada Zona de Medición, de la cual se evaluó



como primera instancia a su amplitud vibracional dado que la frecuencia del motor se mantuvo constante en 1500 rpm (ralentí). Al ser su amplitud variable, en la **Zona de Medición A**, el Armónico 2 identificó las Válvulas con Falla (VF) como un armónico dominante, seguido del Armónico 3 el cual distinguió las Válvulas que Cumplieron su Vida Útil (VCVU); para finalmente, las Válvulas Nuevas (VN), identificadas por el Armónico 1, el menos representativo; muy diferente de la **Zona de Medición B**, donde las VCVU presentaron mayor amplitud dominante y se identificaron por el Armónico 2 seguido del Armónico 1 el cual identifica las VN y por ultimo el Armónico 3 el cual identifica a VF. Lo que demuestra que estos resultados confirman que la evaluación de armónicos se constituye como una herramienta eficaz para diferenciar los distintos estados de las válvulas, considerando su amplitud como criterio de dominancia.

- El desarrollo del análisis estadístico que integró más de 10 millones de datos producto de 200 pruebas con alrededor de 64 mil registros cada una, permitió no solo caracterizar patrones de comportamiento normal y anómalo del motor, sino también validar la efectividad del método aplicado, donde el entrenamiento de las muestras procesadas alcanzó una precisión de predicción del 100% en la **Zona de Medición A** y del 99,8% en la **Zona de Medición B**, resultados que evidencian la consistencia y fiabilidad de la metodología aplicada en este estudio; puesto a que dichos resultados obtenidos confirman que el entrenamiento de grandes volúmenes de datos, no solo refuerza la validez de los resultados, sino que garantiza la fiabilidad de su aplicación enfocada al mantenimiento predictivo y monitoreo continuo de condiciones operativas de cualquier MEC.



- El estudio demuestra que la predicción de anomalías en motores diésel mediante análisis de vibraciones es altamente efectiva, aunque la precisión depende del tipo de análisis y la zona de medición. **El Análisis Estadístico** que integra cálculos de RMS, varianza, curtosis, media, mediana, desviación estándar, media cuadrática, moda, máximo/mínimo y asimetría, alcanzó una precisión del 100% en ambas zonas de medición, mostrando su robustez frente a variaciones locales o amortiguaciones de señal; mientras que por su parte, el **Análisis Armónico** mostró diferencias entre sus zona de medición donde la Zona B alcanzó 100% de precisión, diferente de la Zona A que solo alcanzó una precisión de 73.1%, debido a la superposición de características entre VN y VF, dado por un efecto de “Colchón Hidráulico” en la adquisición de sus muestras.
- Se demostró que la Zona de medición B es idónea para fundamentar la práctica de un mantenimiento predictivo con respecto al desarrollo de un Análisis de Armónicos; puesto a que en esta zona la precisión de su entrenamiento alcanzó un 100%, lo que la convierte un punto clave para el diagnóstico de temprano de anomalías mecánicas; mientras que si requiere del desarrollo de un Análisis Estadístico, ambas Zonas de Medición A y B consideradas en este estudio son confiables y consistentes para el diagnóstico de fallas; puesto a que en su entrenamiento las dos alcanzaron una predicción del 100% lo que garantiza la identificación temprana de anomalías vibratorias sin necesidad de poner fin al funcionamiento del motor de encendido por compresión.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Aplicar esta metodología de Análisis de Armónicos y Análisis Estadístico en motores de encendido por compresión de flotas comerciales o de transporte publico urbana e



interprovincial, a fin anticipar fallas mecánicas críticas y reducir los costos operativos derivados de mantenimientos correctivos o paradas imprevistas.

- Ampliar el estudio hacia otras partes del motor que también generen muestras vibracionales relacionadas con el estado de sus válvulas como lo pueden ser: el árbol de levas, múltiplos de escape y de admisión, balancines, bomba de agua y bomba de aceite; a fin de ejecutar, un análisis multivariable que permita diagnosticar de manera simultánea el funcionamiento del MEC con respecto al estado de sus válvulas.
- Desarrollar una interfaz práctica que integre el modelo de clasificación entrenado, permitiendo que técnicos o personal de mantenimiento puedan interpretar los resultados automáticamente sin requerir conocimientos avanzados de MATLAB.
- Optimizar el volumen de datos utilizados en futuras aplicaciones mediante técnicas de selección de características, la cual permita un procesamiento más ágil y ejecutable en dispositivos portátiles que no cuentan con programas de entrenamiento, pero sí con herramientas de cálculo como lo es Microsoft Excel.
- Incorporar métodos avanzados de análisis de señales o algoritmos de aprendizaje profundo, para mejorar la sensibilidad del diagnóstico en condiciones de ruido o en casos donde las fallas tiendan a confundirse con otras muestras o sean difíciles de detectar con Transformada Rápida de Fourier (FFT) e indicadores estadísticos (RMS, varianza, curtosis, media, mediana, desviación estándar, media cuadrática, moda, máximo/mínimo y asimetría) usados para la obtención de resultados en este estudio.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Wang, L. Wang, Y. Wen, F. Ha, J. Lu, y W. Jiao, «Intelligent Diesel Engine Fault Diagnosis Method Based on Time-Frequency-Nonconvex Robust Principal Component Analysis», *2022 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)*, pp. 1-5, nov. 2022, doi: 10.1109/ICSMD57530.2022.10058265.
- [2] K. Sotoodeh, «Valve sealing and packing», *Prevention of Valve Fugitive Emissions in the Oil and Gas Industry*, pp. 67-91, ene. 2021, doi: 10.1016/B978-0-323-91862-6.00001-0.
- [3] H. Zhao, Z. Mao, K. Chen, y Z. Jiang, «An intelligent fault diagnosis method for a diesel engine valve based on improved wavelet packet-Mel frequency and convolutional neural network», *Proceedings - 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, SDPC 2019*. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.1109/sdpc.2019.00071>
- [4] Y. Liu, W. Chang, S. Zhang, y S. Zhou, «Fault Diagnosis and Prediction Method for Valve Clearance of Diesel Engine Based on Linear Regression», en *2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, ene. 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/RAMS48030.2020.9153697.
- [5] K. Chen, Z. Mao, H. Zhao, y J. Zhang, «Valve fault diagnosis of internal combustion engine based on an improved stacked autoencoder», *Proceedings - 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, SDPC 2019*, pp. 295-300, ago. 2019, doi: 10.1109/SDPC.2019.00060.
- [6] L. Shiyuan, G. Fengshou, y A. Ball, «Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544070JAUTO90>
- [7] J. Jiang, F. Gu, R. Gennish, D. J. Moore, G. Harris, y A. D. Ball, «Monitoring of diesel engine combustions based on the acoustic source characterisation of the exhaust system», *Mech Syst Signal Process*, vol. 22, n.º 6, pp. 1465-1480, ago. 2008, doi: 10.1016/J.YMSSP.2007.12.003.
- [8] J. Hu, Y. Yu, J. Yang, y H. Jia, «Research on the generalisation method of diesel engine exhaust valve leakage fault diagnosis based on acoustic emission», *Measurement*, vol. 210, p. 112560, mar. 2023, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.112560.
- [9] H. Huang, B. Xu, H. Luo, H. Zhuang, X. Liu, y L. Ma, «Anomaly Detection-Oriented High-Frequency Signal Storage for Diesel Engines», *2021 IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Engineering Technology, CCET 2021*, pp. 360-363, ago. 2021, doi: 10.1109/CCET52649.2021.9544306.
- [10] B. Feng, Z. Wang, H. Wu, Z. Zhu, J. Wang, y G. Wang, «Research on the Visualization Technology of Diesel Engine Acoustic State Based on Augmented Reality», *2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications, ICPECA 2023*, pp. 408-412, 2023, doi: 10.1109/ICPECA56706.2023.10075965.
- [11] Z. Jiang, Y. Lai, Z. Wang, y J. Zhang, «A fault diagnosis method for valve train of diesel engine considering incomplete feature set», *Proceedings - 2019 International Conference*



- on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control, SDPC 2019*, pp. 845-850, ago. 2019, doi: 10.1109/SDPC.2019.00161.
- [12] J. Flett y G. M. Bone, «Fault detection and diagnosis of diesel engine valve trains», *Mech Syst Signal Process*, vol. 72-73, pp. 316-327, may 2016, doi: 10.1016/J.YMSSP.2015.10.024.
- [13] K. Jafarian, M. Mobin, R. Jafari-Marandi, y E. Rabiei, «Misfire and valve clearance faults detection in the combustion engines based on a multi-sensor vibration signal monitoring», *Measurement*, vol. 128, pp. 527-536, nov. 2018, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.062.
- [14] Calle Castillejo Alejandro, «Sistemas de Inyección en Motores Diesel», 2014.
- [15] H. I. Patricio Moreno Montalvo, D. I. Patricio Pineda Maigua, y L. Alberto Santos Correa III, «Evolución e historia de los motores diesel Evolution and history of diesel engines Evolução e história dos motores diesel Ciencias Técnicas y Aplicadas Artículo de Investigación», vol. 7, pp. 744-760, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i10.
- [16] S. Automotrices, A. Rodolfo, G. Antamba, M. Alexander, y P. Clavón, «ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE CICLO DIESEL, USANDO COMBUSTIBLE MICROEMULSIONADO CON AGUA TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER (MSc) EN», 2011.
- [17] «Ciclos Termodinámicos». Accedido: 20 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.teachy.app/es/resumenes/educacion-media/media-superior-2-grado/fisica-a-espanol/ciclos-termodinamicos-conceptos-y-aplicaciones-71b69>
- [18] «Ciclo teórico de un motor diésel | Diagrama PV y rendimiento». Accedido: 20 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-diesel/ciclos-diesel-teorico>
- [19] D. A. Morales, B. Andrés, y H. R. Orti, «ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESCUELA DE INGENIERÍA DIMENSIONAMIENTO DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE MOTORES A DIESEL PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO».
- [20] L. Draghi Roberto Filgueira, «MOTORES DIESEL: CICLO IDEAL Y DIAGRAMA INDICADO», 2015.
- [21] Criollo Jadan Olger Rodrigo y Matute Bravo Héctor Marcelo, «Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones», Universidad Politécnica Saleciana, Cuenca, 2014.
- [22] M. Yolanda, R. Morales, y A. H. Guzmán, «CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE».
- [23] auditores flota, «Análisis de las valvulas de motor». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/18155286/Analisis\\_de\\_las\\_valvulas\\_de\\_motor](https://www.academia.edu/18155286/Analisis_de_las_valvulas_de_motor)
- [24] I. D. Gustavo Saralegui Ing Gastón Pary Sr Mariano Marconi, «Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ingeniería Proyecto de Motores Apunte de cátedra-Parámetros de Semejanza en MCIA», 2019.



- [25] «Válvulas de admisión y escape: qué son, cómo funcionan y cuáles son sus diferencias». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.motor.es/que-es/valvula-admision-escape>
- [26] «El sistema del accionamiento de válvulas», Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [www.repxpert.com](http://www.repxpert.com)
- [27] «¿Cómo funcionan los 4 tiempos de un motor diésel? | Mobil México». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mobil.com.mx/es-mx/gasolina/blog-industrial/como-funcionan-los-4-tiempos-de-un-motor-diesel>
- [28] «Válvulas de motor - Fabricante de válvulas de admisión y de escape, India». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.atracparts.com/es/engine-valves.php>
- [29] «¿Qué son las válvulas de Admisión y Escape? | RentingFinders». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://rentingfinders.com/glosario/valvulas-admision-escape/>
- [30] «Motores Diesel composición de las valvulas». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://maquinasdebarcos.wordpress.com/2009/04/16/motores-diesel-hablemos-de-las-valvulas-de-aspiracion-y-escape/>
- [31] «Motores 2022 - Santiago Sanz Acebes - Google Libros». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=c5FzEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gsbs\\_vpt\\_read#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=c5FzEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gsbs_vpt_read#v=onepage&q&f=false)
- [32] J. González, S. Escudero, y J. L. Rivas, *Motores*. Macmillan Iberia, S.A., 2024. Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/267612?page=27>
- [33] Ediciones Ceac., *Manual CEAC del automóvil*. Ediciones CEAC, 2004.
- [34] «Funcionamiento de válvulas, sello aceite, escape competición.» Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.solomotores.cl/valvulas\\_carrera.htm](https://www.solomotores.cl/valvulas_carrera.htm)
- [35] «IMPORTANCIA DE LA CALIBRACION DE VALVULAS DEL MOTOR – Servintegrales SAS». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://servintegralessas.com/importancia-de-la-calibracion-de-valvulas-del-motor/>
- [36] «REGLAJE DE VÁLVULAS». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://supertenere.foroactivo.com/t4968-reglaje-de-valvulas>
- [37] A. Cardona, «Estudio de Desgaste en Válvulas de Motores de Combustión Interna mediante el Método de los Elementos Finitos y Ensayos Experimentales», *Mecánica Computacional*, ene. 2014, Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/109468896/Estudio\\_de\\_Desgaste\\_en\\_V%C3%A1lvulas\\_de\\_Motores\\_de\\_Combusti%C3%B3n\\_Interna\\_mediante\\_el\\_M%C3%A9todo\\_de\\_los\\_Elementos\\_Finitos\\_y\\_Ensayos\\_Experimentales](https://www.academia.edu/109468896/Estudio_de_Desgaste_en_V%C3%A1lvulas_de_Motores_de_Combusti%C3%B3n_Interna_mediante_el_M%C3%A9todo_de_los_Elementos_Finitos_y_Ensayos_Experimentales)
- [38] MAHLE, «Componentes de Motor y Filtros Daños, Causas y Prevención». Accedido: 21 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/58229338/Averias-en-Partes-de-Motor>
- [39] CBC Colecciones básica Cinterfor, «Mecánico de Motores diesel», 1977. Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/cbc\\_mecanicodiesel.pdf](https://www.oitcinterfor.org/sites/default/files/cbc_mecanicodiesel.pdf)



- [40] Jonny Chirinos, «Bajo la Norma ISO 17359:2018 cómo optimizar el plan de monitoreo de condición». Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaimg.com/como-optimizar-el-plan-de-monitoreo-de-condicion-bajo-la-norma-iso-173592018/>
- [41] Ana María Sánchez Gómez, «TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. METODOLOGIA DE APLICACIÓN EN LAS ORGANIZACIONES», 2017. Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/151749409.pdf>
- [42] J. Lee, J. Ni, J. Singh, B. Jiang, M. Azamfar, y J. Feng, «Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing», *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 142, n.º 11, nov. 2020, doi: 10.1115/1.4047856.
- [43] R. Keith Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance | ScienceDirect*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7531-4.X5000-3>, 2002. Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780750675314/an-introduction-to-predictive-maintenance>
- [44] Douglas da Silva, «¿Qué es el aprendizaje automático o Machine Learning?» Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.zendesk.com.mx/blog/aprendizaje-automatico-machine-learning-que-es/>
- [45] D. J. Inman *et al.*, *Engineering Vibration Fourth Edition international Editions contributions by*. 2014. Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780273785217\\_A24571595/preview-9780273785217\\_A24571595.pdf](https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780273785217_A24571595/preview-9780273785217_A24571595.pdf)
- [46] N. S. Ahirrao, S. P. Bhosle, y D. V. Nehete, «Dynamics and Vibration Measurements in Engines», *Procedia Manuf*, vol. 20, pp. 434-439, ene. 2018, doi: 10.1016/J.PROMFG.2018.02.063.
- [47] «Vibraciones Mecánicas (página 2)». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos81/vibraciones-mecanicas/vibraciones-mecanicas2>
- [48] «Estudio de las vibraciones | Power-MI». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>
- [49] Valdivia Pedro, *ONDAS FISICA COMUN CAPÍTULO II*.
- [50] P. G. White, «Introducción al Análisis de Vibraciones», 1990, Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [www.AzimaDLI.com](http://www.AzimaDLI.com)
- [51] H. E. Rojas, C. A. Cortés, y D. F. Ramírez, «Implementación Computacional de la Transformada Fraccional de Fourier Discreta», *Información tecnológica*, vol. 25, n.º 6, pp. 143-156, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000600017.
- [52] A. Karla Calle Lazo, «Propuesta de integración del análisis de vibraciones al plan de mantenimiento, predictivo de los rodillos de las prensas 1 y 2 en el molino de Cartopel S.A.I.».
- [53] «Norma ISO 10816».
- [54] «Norma Cubana NC ISO 10816-1: 2005». Accedido: 23 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es/document/instituto-de-educacion-secundaria-audiovisual-de-vigo/ciencias-de-la-tierra-y-del-medio-ambiente/nc-iso-10816-1-a2005-26p-rwp/94204490>



- [55] «Isuzu Serie N - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Isuzu\\_Serie\\_N](https://es.wikipedia.org/wiki/Isuzu_Serie_N)
- [56] «Isuzu N-Series Light Duty Truck | Isuzu Philippines». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.isuzuphil.com/trucks/n-series>
- [57] «Isuzu 4JA1T(L), 4JA1TC, 4JH1-T, 4JH1-TC Manuals, Engine Specs, Bolt Torques». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://barringtondieselclub.co.za/isuzu/isuzu-4ja1-4jh1-tc.html>
- [58] «diesel\_specs». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.isuzucv.com/es/app/site/pdf?file=diesel\\_specs.pdf](https://www.isuzucv.com/es/app/site/pdf?file=diesel_specs.pdf)
- [59] «¿Qué son las válvulas del motor y para qué sirven?» Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://alcazabamotor.es/blog/2020/03/06/que-son-las-valvulas-del-motor-y-para-que-sirven/>
- [60] «Válvulas de admisión y escape: qué son, cómo funcionan y cuáles son sus diferencias». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.motor.es/que-es/valvula-admision-escape>
- [61] «Galgas De Espesores | Juego | RS». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/c/herramientas-manuales/medicion-y-marcaje/galgas-de-medicion-de-espesor/>
- [62] «Sensores». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/sistemas/sensores.htm>
- [63] «Sensor de aceleración ICP - 603C01 - PCB Piezotronics GmbH - IEPE / industrial». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/pcb-piezotronics-gmbh/product-111589-2541278.html>
- [64] «Piezoelectricidad - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricidad>
- [65] «Tipos de acelerómetros - DMC». Accedido: 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dmc.pt/es/tipos-de-acelerometros/>
- [66] «NI 9250 | VIacústica». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://viacoustics.com/products/ni-9250/>
- [67] «NI-9250 - NI». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/shop/model/ni-9250.html>
- [68] «NI-9250 C Series | In Stock Ships Today!» Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.apexwaves.com/modular-systems/national-instruments/c-series/NI-9250>
- [69] «NI-9250 Specifications - NI». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9250-specs/page/specs.html>
- [70] «¿Qué es NI LabVIEW? Programación gráfica para pruebas y medidas - NI». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.ni.com/es/shop/labview.html?srsltid=AfmBOopKu18Ztw5YPbOZFhPjCIbPS TcH9aMCgxqgN\\_tVYMxXZfIHWYod](https://www.ni.com/es/shop/labview.html?srsltid=AfmBOopKu18Ztw5YPbOZFhPjCIbPS TcH9aMCgxqgN_tVYMxXZfIHWYod)
- [71] «Automatice el almacenamiento y la generación de informes de datos con LabVIEW - NI». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA03q000000x1k3CAA&l=es-EC>



- [72] H. A. Andrade y S. Kovner, *Software synthesis from dataflow models for G and LabVIEW*, vol. 2. 1998. doi: 10.1109/ACSSC.1998.751616.
- [73] «¿Qué es Matlab y para qué sirve? - Formadores IT». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://formadoresit.es/que-es-matlab-y-para-que-sirve/>
- [74] N. Chonacky y D. Winch, «Reviews of Maple, Mathematica, and Matlab: Coming Soon to a Publication Near You», *Comput Sci Eng*, vol. 7, n.º 2, pp. 9-10, mar. 2005, doi: 10.1109/mcse.2005.39.
- [75] «Elsa online. ElsaWin. ElsaWeb. VW trucksMotopropulsorMotor diesel de 4 cil. (bomba distribuidora)Motor culata, accionamiento valvulasCulataCulata: desmontar y montar». Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.kolhosniki.ru/elsaonline&dir=rl&marke=N&elsalang=es-ES&ver=150204&file=N.es-ES.K00500967.wi\\_\\_27017673.xml\\_xsl--3](https://www.kolhosniki.ru/elsaonline&dir=rl&marke=N&elsalang=es-ES&ver=150204&file=N.es-ES.K00500967.wi__27017673.xml_xsl--3)
- [76] M. Ocupacional y M. De Gasolina, «SEN4 DIHECCION GENERAL SUBDIRECCION TECNfCO-PEDAGOGICA COMPROBACION DE CULATAS, VALVULAS Y ASIENOS».
- [77] «Nitro.pe - ¿De qué forma se ajusta una culata?» Accedido: 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.nitro.pe/mecanico-nitro/de-que-forma-se-ajusta-una-culata.html>
- [78] «que numero de galgas utilizo para calibrar las valvulas de un motor isuzu chevrolet npr es camion | VALVULITA». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.valvulita.com/preguntas/que-numero-de-galgas-utilizo-para-calibrar-las-valvulas-de-un-motor-isuzu-chevrolet-npr-es>
- [79] «Manual de Taller Isuzu NPR-NKR-NHR PDF | PDF | Inyección de combustible | Bomba». Accedido: 4 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/476653563/Manual-De-Taller-Isuzu-Npr-nkr-nhr-pdf>
- [80] T. Mugmal, A. Jeanpierre, P. Flores, y K. Hernan, «UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ ESTUDIO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES MEC PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO AUTORES».



## ANEXOS

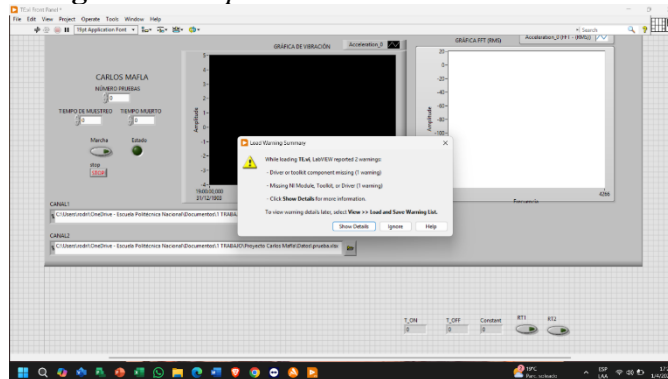
### Anexo 1

**Figura 67** *Mantenimiento Correctivo al motor 4JB1*



### Anexo 2

**Figura 68** *Adquisición e instalación del sensor*



### Anexo 3

**Figura 69** *Código de Programación para la Obtención de Armónicos*

```
function [f, P] = calc_PSD(signal, Fsample)

    ndata=length(signal);
    nn = 2^nextpow2(ndata);
    Y= fft(signal,nn);
    P2=Y.*conj(Y)/nn;
    P=P2(1:nn/2);
    f = Fsample*(0:(nn/2-1))/nn;

end
```



```
% Señales motor válvulas
Fs=8000;
x1=xlsread('Prueba_VNS_2.xlsx');
x2=xlsread('Prueba_VNS_3.xlsx');
[f1,P1]=Hcalc_PSD(x1(1:45000),Fs);
[f2,P2]=Hcalc_PSD(x2(1:45000),Fs);

figure;
plot(f1(2:12000),P1(2:12000),'b',f2(2:12000),P2(2:12000),'r'); grid on;
xlabel('Frecuencia (Hz)'); ylabel('Amplitud');
legend('Desgastadas','Nuevas');
title('Comparación espectral válvulas');
```

#### Anexo 4

**Figura 70** Código de Programación para la Obtención de muestras Estadísticas

```
clc; clear;
% Procesamiento estadístico de vibraciones
X = xlsread("VCVU_192.xlsx");

T = table(rms(X), var(X), kurtosis(X), mean(X), max(X), min(X), ...
          median(X), mode(X), mean(X.^2), rms(X));
T.Properties.VariableNames = {'RMS','Varianza','Curtosis','Media',...
                              'Maximo','Minimo','Mediana','Moda','MDC','MedCuadratica'};

disp("Procesamiento de valores"); disp(T);
```

#### Anexo 5

**Figura 71** Código para la Obtención del Árbol de Decisión

```
% Árbol de decisión desde Excel
nombreArchivo = 'amplpost.xlsx';
datos = readtable(nombreArchivo);

X = table2array(datos(:,1:end-1));
Y = datos.end;

modeloArbol = fitctree(X,Y, ...
                      'PredictorNames',datos.Properties.VariableNames(1:end-1), ...
                      'ResponseName',datos.Properties.VariableNames{end});

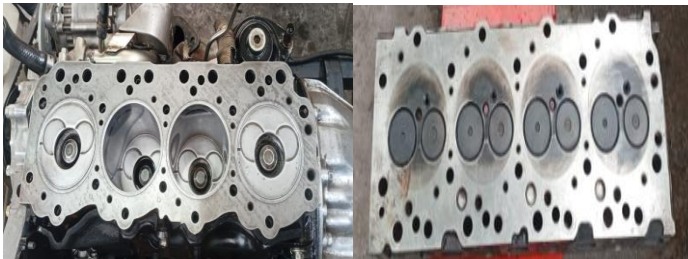
view(modeloArbol,'Mode','graph');
```



## Anexo 6

**Figura 72** Evaluación del asentamiento de los tres estados válvulas

### 1. Desmontaje con válvulas nuevas



Durante el primer desmontaje, con válvulas nuevas, se evidenció un contacto uniforme entre el asiento y la válvula, condición ideal para un buen cierre y compresión.

### 2. Desmontaje con válvulas que cumplieron su vida útil



Con válvulas que cumplieron su vida útil, se observó desgaste en los asientos y pérdida parcial de hermeticidad, lo cual comprometía la eficiencia del motor.

### 3. Desmontaje con válvulas desgastadas (falla)



Se identificaron deformaciones e imperfecciones severas en las superficies de contacto, simulando fallas críticas por fatiga o sobrecalentamiento