



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

**INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

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

**“ANÁLISIS VIBRATORIO DE UN MOTOR DIÉSEL SOMETIDO A CARGA COMO  
HERRAMIENTA PARA DETECTAR VIDA ÚTIL DEL ACEITE DE MOTOR”**



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

**AUTOR:** Bolaños Paredes Anderson Miguel  
Domínguez Domínguez Kevin Alexander

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

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004727101		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Domínguez Domínguez Kevin Alexander		
DIRECCIÓN:	Atuntaqui, Barrio San José, Sector Santa rosa		
EMAIL:	<a href="mailto:kadominguezd@utn.edu.ec">kadominguezd@utn.edu.ec</a> /kevindominguez3035@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062620127	TELÉFONO MÓVIL:	0989362628

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1005035108		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Anderson Miguel Bolaños Paredes		
DIRECCIÓN:	Marco tulio nieto y Hugo Guzmán lara		
EMAIL:	<a href="mailto:Ambolanosp@utn.edu.ec">Ambolanosp@utn.edu.ec</a> / Bolaandy10@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062580040	TELÉFONO MÓVIL:	0994910368

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“ANÁLISIS VIBRATORIO DE UN MOTOR DIÉSEL SOMETIDO A CARGA COMO HERRAMIENTA PARA DETECTAR VIDA ÚTIL DEL ACEITE DE MOTOR”
AUTOR (ES):	Domínguez Domínguez Kevin Alexander Anderson Miguel Bolaños Paredes
FECHA: DD/MM/AAAA	14/05/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Carlos Mafla MSc.

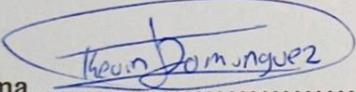


## **AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD**

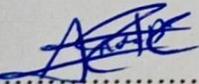
Nosotros, Domínguez Domínguez Kevin Alexander, Bolaños Paredes Anderson Miguel con cédula de identidad Nro 100472710-1, 100503510-8 respectivamente, en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 14 días del mes de mayo de 2025

### **LOS AUTORES:**

Firma.....  


Nombre: Domínguez Domínguez Kevin Alexander

Firma.....  


Nombre: Bolaños Paredes Anderson Miguel

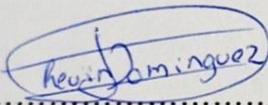


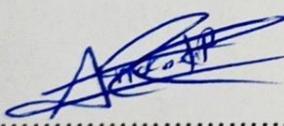
## CONSTANCIAS

Los autores manifiestan 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 son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de mayo de 2025

### LOS AUTORES:

  
Firma.....  
Nombre: Domínguez Domínguez Kevin Alexander

  
Firma.....  
Nombre: Bolaños Paredes Anderson Miguel



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

Ibarra, 14 de mayo de 2025

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc.  
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**CERTIFICA:**

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

(f) ..... 

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc.

C.C.: 0401447826



## RESUMEN

Ante la necesidad de optimizar el mantenimiento de motores diésel, esta investigación se enfoca en métodos de diagnóstico no intrusivos, enfocándose en la evaluación de la vida útil del aceite lubricante como herramienta predictiva de mantenimiento, dado que su deterioro impacta directamente en la dinámica del motor y puede generar fallas mecánicas críticas. El objetivo fue experimentar con un sistema de monitoreo avanzado, combinando análisis de vibraciones y de aceite. Se diseñó un software para adquirir datos vibratorios en tiempo real mediante sensores ICP y tarjetas de adquisición, aplicándose pruebas en un motor Isuzu Euro 3 a 0 km, 3000 km, 5500 km, 5800 km y 6000 km. Para cada estado de aceite se recopilaban 200 pruebas individuales, cada una de 54.500 datos, capturando información de amplitud, frecuencia y armónicos principales. Los datos se procesaron mediante técnicas de aprendizaje automático supervisado para clasificar los estados de desgaste del aceite, utilizando características extraídas de la Transformada de Fourier. La validación de los resultados se realizó mediante análisis estadístico de correlación y análisis de armónicos, obteniendo una precisión mayor al 90%. Los resultados más relevantes evidenciaron un incremento de amplitud en armónico 3 de 25.66 a 482.30 unidades y un deterioro del aceite con niveles de titanio de 112 ppm y oxidación de 12 UJM. Se concluye que existe una correlación directa entre el deterioro del aceite y el aumento de las vibraciones, validando el sistema propuesto como una herramienta confiable para mantenimiento predictivo.

**Palabras clave:** análisis de vibraciones, degradación del aceite, mantenimiento predictivo, motor diésel, aprendizaje automático, transformada de Fourier.



## **ABSTRACT**

Faced with the need to optimize diesel engine maintenance, this research focuses on non-intrusive diagnostic methods, specifically evaluating the useful life of lubricating oil as a predictive maintenance tool, since its degradation directly impacts engine dynamics and can lead to critical mechanical failures. The objective was to experiment with an advanced monitoring system by combining vibration and oil analysis. A software was developed to acquire real-time vibration data using ICP sensors and acquisition cards, with tests conducted on an Isuzu Euro 3 engine at 0 km, 3000 km, 5500 km, 5800 km, and 6000 km. For each oil condition, 200 individual tests were performed, each containing 54,500 data points, capturing amplitude, frequency, and main harmonic information. The data were processed using supervised machine learning techniques to classify oil wear states, based on features extracted from the Fourier Transform. Results were validated through harmonic analysis and statistical correlation, achieving an accuracy greater than 90%. The most relevant results showed an increase in harmonic 3 amplitude from 25.66 to 482.30 units, and significant oil deterioration, with titanium levels of 112 ppm and oxidation values of 12 UJM. It is concluded that there is a direct correlation between oil degradation and the increase in engine vibrations, validating the proposed system as a reliable predictive maintenance tool.

**Keywords:** vibration analysis, oil degradation, predictive maintenance, diesel engine, machine learning, Fourier transform.



## LISTA DE SIGLAS

**MCI.** Motores de Combustión Interna  
**HDI.** Alta Inyección Diesel  
**CR.** Riel Común  
**CRDi.** Inyección Directa de Riel Común  
**TF.** Transformada de Fourier  
**API.** Americano de Petróleo  
**ACEA.** Asociación de Constructores Europeos de Automóviles  
**SAE.** Sociedad de Ingenieros Automotrices  
**ASTMS.** Sociedad Americana para Pruebas y Materiales  
**TAN.** Contenido de Ácido Total de un Lubricante  
**TBN.** Reserva alcalina total de un lubricante  
**IASA.** Instituto Agropecuario Superior Andino



## ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Problema de investigación.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	1
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	1
1.3 Alcance .....	2
1.4 Justificación .....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Funcionamiento del motor diésel.....	4
2.1.1. <i>Combustión en motores diésel</i> .....	5
2.2. Sistemas del motor diésel.....	6
2.2.1 <i>Sistema de inyección</i> .....	6
2.2.1.1 Zonas del sistema CRDi.....	6
2.2.2. <i>Sistema de refrigeración</i> .....	7
2.2.3. <i>Sistema de lubricación</i> .....	8
2.2.3.1. Diagrama de lubricación de aceite.....	9
2.3. Tipos de mantenimientos en motores diésel .....	10
2.3.1. <i>Mantenimiento predictivo</i> .....	10
2.3.1.1. Análisis de aceite. ....	11
2.3.1.3. Análisis de vibraciones. ....	12
2.3.2. <i>Mantenimiento preventivo</i> .....	13
2.3.2.1. Servicio de aceite. ....	14
2.3.2.2. Filtros. ....	14
2.4. Propiedades fisicoquímicas del aceite .....	14
2.4.1. <i>Propiedades del aceite</i> .....	15
2.4.1.1. Propiedades físicas de los aceites lubricantes.....	15
2.4.1.2 Propiedades térmicas de los aceites lubricantes.....	16
2.4.1.3 Propiedades químicas de los aceites lubricantes.....	17



2.5. Normativa de aceite .....	18
2.5.1 Niveles de calidad ACEA .....	18
2.5.2 Niveles de calidad API.....	22
2.6. Fundamentos del análisis vibratorio .....	25
2.6.1 Clasificación de las señales .....	26
2.7 Transformada de Fourier aplicada en vibraciones .....	26
2.7.1. Transformada de Fourier en tiempos cortos .....	27
2.8. Normativa de vibraciones .....	28
2.8.1. Normativa internacional de vibraciones .....	28
CAPÍTULO III.....	31
3. MATERIALES Y MÉTODO .....	31
3.1. MATERIALES .....	31
3.1.1 Selección del motor diésel .....	31
3.1.2 Equipo para diagnóstico de vibraciones .....	32
3.1.2.1 Sensor de vibraciones. ....	32
3.1.2.2 Tarjeta de adquisición de datos.....	33
3.1.2.3 LabVIEW.....	35
3.1.2.4 Matlab.....	36
3.2 METODOLOGÍA.....	37
3.2.1 Ciclos de carga .....	37
3.2.2.1 Ruta Otavalo-Cajas.....	38
3.2.2.2 Opciones de prueba.....	39
3.2.2 Preparación de motor.....	40
3.2.2.1 Aceite de motor.....	42
3.2.3 Instalación de equipos .....	43
3.2.3.1 Ubicación de sensor .....	43
3.2.4 Adquisición de datos .....	43
3.2.4.1 Programa en LabVIEW.....	46
3.2.5 Procesamiento de datos .....	47
3.2.6 Pruebas piloto .....	50
3.2.6.1 Prueba 5000-6000 km.....	50
3.2.7 Recopilación de Datos .....	54



3.2.8 Aprendizaje automático .....	56
3.2.9. Análisis de aceite .....	57
3.2.9.1 Niveles de desgaste .....	58
3.2.9.2 Contaminación .....	59
3.2.9.3 Limpieza .....	59
CAPÍTULO IV .....	60
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	60
4.1 RESULTADOS .....	60
4.2 ESPECTROS PRUEBAS MOTOR .....	61
4.2.1 Espectro Prueba 0KM .....	61
4.2.2 Espectro Prueba 3000KM .....	64
4.2.3 Espectro Prueba 5500KM .....	67
4.2.4 Espectro Prueba 5800KM .....	70
4.2.5 Espectro Prueba 6000KM .....	73
4.3 ANÁLISIS ARMÓNICOS .....	77
4.3.1 ARMÓNICOS I-II-III .....	77
4.3.2 ARMÓNICOS II-III .....	79
4.3.3 ARMONICOS I-II-III .....	82
4.3.4 ARMONICOS II-III .....	84
4.3.5 Comparación Armónicos .....	85
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	86
4.4.1 Análisis estadístico pruebas I, II .....	86
4.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	88
4.5.1 Validación armónicos .....	88
4.5.1.1 Validación armónicos prueba (0 km) .....	89
4.5.1.2 Validación armónicos prueba 2 (0 km) .....	90
4.5.1.3 Validación armónicos prueba (3000 km) .....	90
4.5.1.4 Validación armónicos prueba 2 (3000 km) .....	91
4.5.1.3 Validación armónicos prueba (6000 km) .....	91
4.5.1.3 Validación armónicos prueba 2 (6000 km) .....	92
4.5.2 Validación análisis estadístico .....	92
4.5.2.1 Validación análisis estadístico prueba 1 .....	93



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



XII

4.5.2.1 Validación análisis estadístico prueba 2 .....	94
4.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACEITE .....	95
4.6.1 Niveles de desgaste .....	95
4.6.2 Contaminación.....	97
4.6.3 Limpieza.....	99
CAPITULO V .....	101
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
5.1 CONCLUSIONES .....	101
5.2 RECOMENDACIONES .....	103
5.3 ANEXOS.....	104



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Ejemplo plan de mantenimiento preventivo</i> .....	13
Tabla 2: <i>Niveles ACEA: aceite motor (gasolina y diésel ligeros)</i> .....	19
Tabla 3: <i>Niveles ACEA para aceite motor Diesel de servicio pesado</i> .....	21
Tabla 4: <i>Niveles vigentes de calidad API para aceite motor</i> .....	23
Tabla 5: <i>Vibraciones de desplazamiento</i> .....	30
Tabla 6: <i>Vibraciones de velocidad</i> .....	30
Tabla 7: <i>Especificaciones técnicas del motor</i> .....	32
Tabla 8: <i>Datasheet Sensor ICP 603 C01</i> .....	33
Tabla 9: <i>Entradas analógicas de la tarjeta de adquisición cDAC 9171 de National Instruments</i>	34
Tabla 10: <i>Salidas analógicas de la tarjeta de adquisición cDAC 9171 de National Instruments</i>	34
Tabla 11: <i>Datos ruta</i> .....	38
Tabla 12: <i>Opción 1 prueba toma de datos</i> .....	39
Tabla 13: <i>Opción 2 prueba toma de datos</i> .....	39
Tabla 14: <i>Opción 3 prueba toma de datos</i> .....	40
Tabla 15: <i>Parámetros</i> .....	41
Tabla 16: <i>Filtros para preparación de motor</i> .....	42
Tabla 17: <i>Datasheet Aceite</i> .....	42
Tabla 18: <i>Relación código - armónico</i> .....	44
Tabla 19: <i>Relación Estado - km</i> .....	45
Tabla 20: <i>Clasificación de pruebas</i> .....	45
Tabla 21: <i>Valores obtenidos a partir de pruebas piloto para adquisición de datos</i> .....	54
Tabla 22: <i>Ejemplo de recopilación de amplitudes</i> .....	55
Tabla 23: <i>Ejemplo de recopilación de frecuencias</i> .....	55
Tabla 24: <i>Metales de desgaste</i> .....	58
Tabla 25: <i>Distribución de pruebas</i> .....	61
Tabla 26: <i>Relación estado - km</i> .....	77
Tabla 27: <i>Tabla armónicos I, II, III</i> .....	77
Tabla 28: <i>Resultados tabla armónicos I, II, III</i> .....	78
Tabla 29: <i>Tabla armónicos II, III</i> .....	80
Tabla 30: <i>Resultados tabla armónicos II, III</i> .....	81
Tabla 31: <i>Tabla 2 armónicos I, II, III</i> .....	82
Tabla 32: <i>Resultados tabla 2 armónicos I, II, III</i> .....	83
Tabla 33: <i>Tabla 2 armónicos II, III</i> .....	84
Tabla 34: <i>Resultados tabla 2 armónicos II, III</i> .....	85
Tabla 35 <i>Tabla comparativa armónicos</i> .....	85
Tabla 36: <i>Relación estados - km</i> .....	86
Tabla 37: <i>Resultados análisis estadístico</i> .....	87
Tabla 38: <i>Tabla validación armónicos</i> .....	89
Tabla 39: <i>Tabla validación prueba - 0 km</i> .....	89
Tabla 40: <i>Tabla validación prueba 2- 0 km</i> .....	90
Tabla 41: <i>Tabla validación prueba -3000 km</i> .....	90
Tabla 42: <i>Tabla validación prueba 2 -3000 km</i> .....	91



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



XIV

Tabla 43: <i>Tabla validación prueba -6000 km</i> .....	91
Tabla 44: <i>Tabla validación prueba 2 -6000 km</i> .....	92
Tabla 45: <i>Tabla estados - análisis estadístico</i> .....	93
Tabla 46: <i>Tabla validación prueba 1</i> .....	93
Tabla 47: <i>Tabla validación prueba 2</i> .....	94
Tabla 48: <i>Tabla de niveles de desgaste</i> .....	96
Tabla 49: <i>Tabla de valores de Contaminación</i> .....	98
Tabla 50: <i>Tabla de valores de Limpieza</i> .....	100



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Ciclo diésel teórico</i> .....	4
Figura 2: <i>Diagrama ciclo diésel</i> .....	5
Figura 3: <i>Sistema CRDi</i> .....	6
Figura 4: <i>Sistema de refrigeración de un motor diésel</i> .....	7
Figura 5: <i>Película de aceite en un cojinete</i> .....	8
Figura 6: <i>Diagrama de lubricación</i> .....	9
Figura 7: <i>Mantenimiento, tipos de mantenimiento</i> .....	10
Figura 8: <i>Niveles de desempeño ACEA 2010 (Diesel pesados)</i> .....	22
Figura 9: <i>Niveles de desempeño API (Diesel pesados)</i> .....	25
Figura 10: <i>Clasificación de las señales</i> .....	26
Figura 11: <i>Ejemplo Transformada de Fourier</i> .....	27
Figura 12: <i>Partes Norma ISO 10816-3</i> .....	29
Figura 13: <i>Motor Isuzu turbo intercooler</i> .....	31
Figura 14: <i>Sensor ICP 603 C01</i> .....	33
Figura 15: <i>Tarjeta de adquisición de datos</i> .....	34
Figura 16: <i>Logo LabVIEW</i> .....	36
Figura 17: <i>Logo MATLAB</i> .....	36
Figura 18: <i>Metodología de investigación</i> .....	37
Figura 19: <i>Croquis</i> .....	38
Figura 20: <i>Preparación del motor</i> .....	41
Figura 21: <i>Posición sensor 0</i> .....	43
Figura 22: <i>Proceso metodológico para la adquisición de datos a partir de vibraciones</i> .....	44
Figura 23: <i>Diagrama de bloques en el programa LabVIEW</i> .....	46
Figura 24 <i>Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones</i> .....	46
Figura 25: <i>Plataforma de Matlab con su programación</i> .....	48
Figura 26: <i>Gráfica de datos de vibración</i> .....	49
Figura 27: <i>Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 5000km en EXCEL</i> .....	51
Figura 28: <i>Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 5000km en MATLAB</i> .....	52
Figura 29: <i>Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 6000km en EXCEL</i> .....	52
Figura 30: <i>Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 6000km en MATLAB</i> .....	53
Figura 31: <i>Comparación pruebas piloto</i> .....	53
Figura 32: <i>Espectro del motor en prueba a 0km</i> .....	62
Figura 33: <i>Amplitud prueba 34 a 0km</i> .....	63
Figura 34: <i>Frecuencia prueba 34 a 0km</i> .....	64
Figura 35: <i>Espectro del motor en prueba a 3000km</i> .....	65
Figura 36: <i>Amplitud prueba 25 a 3000km</i> .....	66
Figura 37: <i>Frecuencia prueba 25 a 3000km</i> .....	67
Figura 38: <i>Espectro del motor en prueba a 5500km</i> .....	68
Figura 39: <i>Amplitud prueba 13 a 5500km</i> .....	69
Figura 40: <i>Frecuencia prueba 13 a 5500km</i> .....	70
Figura 41: <i>Espectro del motor en prueba a 5800km</i> .....	71



Figura 42: <i>Amplitud prueba 15 a 5800km</i> .....	72
Figura 43: <i>Frecuencia prueba 15 a 5800km</i> .....	73
Figura 44: <i>Espectro del motor en prueba a 6000km</i> .....	74
Figura 45: <i>Amplitud prueba 34 a 6000km</i> .....	75
Figura 46: <i>Frecuencia prueba 34 a 6000km</i> .....	76
Figura 47: <i>Diagrama de dispersión armónicos I, II, III</i> .....	78
Figura 48: <i>Diagrama de dispersión armónicos II, III</i> .....	80
Figura 49: <i>Diagrama de dispersión armónicos I, II, III</i> .....	82
Figura 50: <i>Diagrama de dispersión armónicos II, III</i> .....	84
Figura 51: <i>Diagrama de dispersión estados tabla 29</i> .....	87
Figura 52: <i>Niveles de desgaste</i> .....	96
Figura 53: <i>Suciedad</i> .....	97
Figura 54: <i>Contaminación por refrigerante</i> .....	97
Figura 55: <i>Viscosidad</i> .....	99
Figura 56: <i>Condición del aceite</i> .....	99
Figura 57: <i>Formulación del aceite</i> .....	100



## **INDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1: Transformada de Fourier..... 28



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



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problema de investigación.

Los motores diésel se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones marítimas, industriales o de transporte. Detectar el estado del aceite de motor ayudará a encontrar problemas en estas máquinas en una etapa temprana y evitar reparaciones costosas. Entre las herramientas utilizadas para predecir el mantenimiento del motor diésel, está el análisis del lubricante utilizado en el mismo. Se discute el diagnóstico del estado del motor diésel en relación con la interpretación de los resultados del análisis físico y químico de las muestras de aceite utilizadas. El análisis de vibraciones puede considerarse útil para diagnosticar problemas de combustión en motores de encendido por compresión. Sin embargo, este es un experimento que intenta utilizar la vida útil del aceite como herramienta para prevenir y detectar fallas en el motor. Interpretar los resultados será difícil, ya que para comprenderlos se necesita cierta formación y además existen diversos medios para procesar las señales recibidas, incluidos dispositivos especiales como acelerómetros y sensores. Sin mencionar el software para crear bases de datos de fallos característicos del motor. Nuestro problema radica directamente en la falta de diagnósticos en los motores diésel para prevenir daños mediante la investigación y desarrollo del monitoreo de fallas con la vida útil del aceite, esto nos ayudará a saber cómo evitar posibles daños durante el funcionamiento del motor.

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 Objetivo General

Experimentar con un sistema de monitoreo avanzado para la detección de fallas en motores diésel, utilizando el análisis de vibraciones y el análisis de aceite como herramientas integradas.

#### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar las propiedades y características de los aceites lubricantes destinados al uso en motores de encendido por compresión.
- Diseñar software para la adquisición en tiempo real de datos vibratorios, mientras el vehículo se encuentra sometido a cargas.



- Adquirir datos vibratorios de manera sistemática para la obtención de información detallada sobre el presente sistema bajo estudio.
- Procesar de manera efectiva los datos vibratorios para proporcionar una comprensión detallada de las características y comportamientos de un motor diésel según la vida útil del aceite.
- Validar experimentos mediante ejecución de pruebas y revisión de resultados.

### **1.3 Alcance**

En nuestro proyecto se pretende experimentar y analizar fallos en un motor diésel relacionados con la vida útil del aceite de motor. Utilizaremos el análisis de vibraciones y el análisis de aceite como herramientas para detectar y prevenir fallas en un motor diésel. Este objetivo se logra mediante el uso de un sensor para recopilar datos y software como (LabVIEW y Matlab) para procesarlos y compararlos con diferentes parámetros de funcionamiento en los que estará sometido el motor bajo carga.

Los análisis se harán en un camión NMR PARTNER 2021, tiene sistema de inyección CRDi con motor diésel, cilindrada 2.999 cc y potencia de 130HP.

Los análisis que se harán en este vehículo serán de vibraciones y, aparte, se harán una prueba de aceite para ver su estado y corroborar su vida útil, se harán tres pruebas, la primera se hará cuando se cambie el aceite, a mitad de recorrido que este aceite soporte y el aceite este de cambiar.

La prueba de aceite se la hará al momento de cambiarlo, se tomará una muestra de ese aceite y se lo mandará al laboratorio de IASA el cual ellos nos ayudaran con un análisis detallado de cómo está el aceite y ver si su vida útil se acabó o puede seguir funcionando varios Kilómetros más en el vehículo.



## **1.4 Justificación**

El desarrollo e investigación de nuevos sistemas en la industria automotriz avanzan rápidamente, especialmente en los distintos componentes del motor de combustión interna (MCI). Tradicionalmente, la detección de fallos en estos motores se realiza mediante técnicas intrusivas, lo que representa una desventaja en términos del tiempo requerido para llevar a cabo estas evaluaciones [1]. En este contexto, el plan de desarrollo 2021-2025, titulado Fortalecimiento del sistema productivo basado en eficiencia e innovación, establece como objetivo principal “incrementar la producción intensiva en innovación, tecnología y conocimiento” [2].

En los motores diésel, las constantes mejoras en los sistemas electrónicos de gestión y control de los procesos de combustión y lubricación, junto con la sofisticación de los sistemas de inyección directa CRDi, requieren un mantenimiento adecuado. En este sentido, el análisis de vibraciones surge como una herramienta eficaz para evaluar la vida útil del aceite del motor. Para ello, se propone la aplicación de un algoritmo basado en la transformada rápida de Fourier (FFT) sobre la señal en el dominio del tiempo, una técnica que ha demostrado ser altamente efectiva [3].



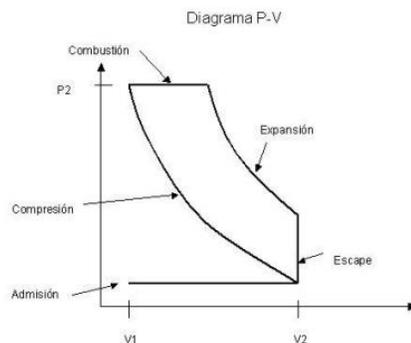
## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Funcionamiento del motor diésel

El motor diésel se caracteriza por su principio de autoignición, donde el aire es aspirado hacia el interior del motor y luego comprimido en la cámara de compresión, alcanzando una presión de 14 a 24 veces su volumen original y una temperatura de hasta 900 °C, en el momento de la inyección, el combustible se pulveriza finamente a una presión que puede llegar a los 2000 bar, esta mezcla de aire caliente y combustible inyectado se enciende espontáneamente, generando una explosión que impulsa el pistón [4].

Las transformaciones de fluidos en el motor siguen un ciclo cerrado, como se muestra en la **Figura 1**. Los motores diésel requieren una mayor cantidad de aire para la combustión, lo que ayuda a compensar las condiciones de mezcla desfavorables. Cuanto mayor sea el exceso de aire en la mezcla, menos será necesario ajustar la entrada de aire al cambiar la velocidad y la carga del motor. Por lo tanto, los cambios en la carga del motor se realizan principalmente mediante la regulación del suministro de combustible [5].

**Figura 1:**  
*Ciclo diésel teórico*



Tomado de: Consuegra S, Modulo motores diésel (2007) [5].

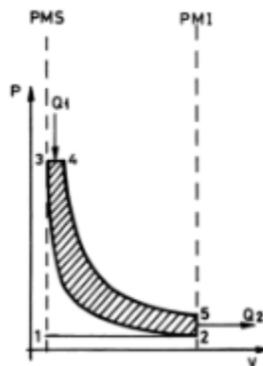


### 2.1.1. Combustión en motores diésel

El proceso de combustión en un motor diésel sigue un ciclo termodinámico que comprende en compresión adiabática, expansión isobárica y expansión adiabática y por último una descompresión isocórica [6].

En un motor diésel de 4 tiempos, la duración de todo el ciclo diésel es de  $720^\circ$ , el ciclo completo consta de las siguientes etapas: admisión, compresión de aire, inyección de combustible, formación de la mezcla, encendido, combustión, expansión y escape [7]. La fase de admisión comienza con la apertura de la válvula de admisión y continúa hasta que la válvula de admisión se cierra, después de eso, el aire entrante se comprime a un nivel correspondiente a una relación de compresión de 14:1 a 25:1 hacia el final de la compresión, el combustible se inyecta en la pre-combustión [8]. El combustible en aerosol se mezcla con aire comprimido caliente, se evapora y luego la mezcla se enciende, todos los ciclos terminan cuando se cierra la válvula de escape [9]. En un motor diésel, la explosión del fluido de funcionamiento se produce en el cilindro a presión constante y se representa en las líneas horizontales 3-4 de la **Figura 2**.

**Figura 2:**  
*Diagrama ciclo diésel*



Tomado de: Consuegra S, Modulo motores diésel (2007) [5].



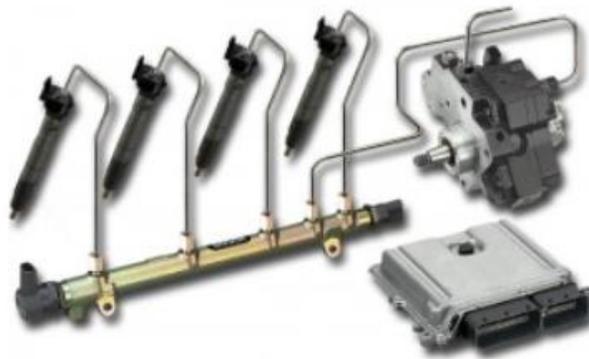
## 2.2. Sistemas del motor diésel

### 2.2.1 Sistema de inyección

Los motores diésel cuentan con el sistema de inyección Directa Riel Común (CRDi), El sistema CRDi consta de múltiples elementos como electroválvulas para controlar la presión y tiempo de apertura de los inyectores, logrando así una inyección de combustible eficiente y controlada durante todo el proceso, en la **Figura 3** se observa cómo es un inyector electrónico para estos sistemas [6].

**Figura 3:**

*Sistema CRDi*



Tomado de: Humberto W, Dávila V, Análisis Common Rail (2022) [6].

#### 2.2.1.1 Zonas del sistema CRDi.

Zona de baja presión: La zona de baja presión consta de elementos como la bomba de combustible, filtro de combustible, tanque de combustible, esta zona se basa en la prealimentación de combustible hacia la zona alta presión.[10].

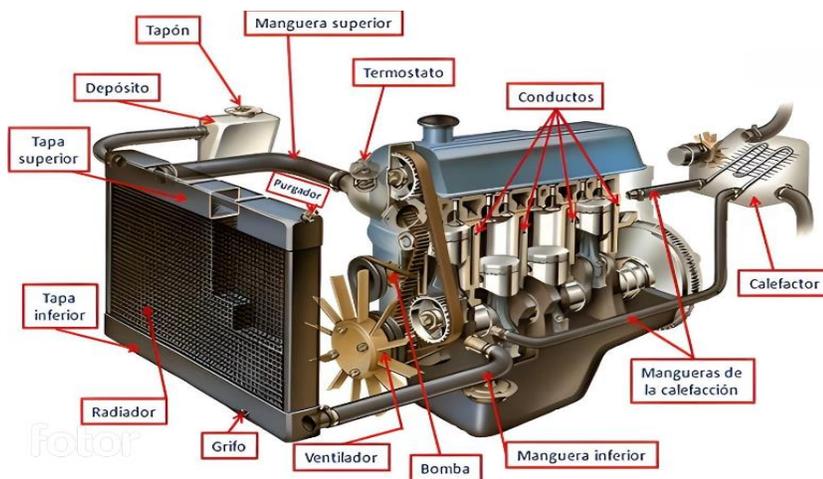
Zona de presión alta: La zona de presión alta consta de elementos principales que son, la bomba de alta presión, válvulas reguladoras y dosificadoras, riel, inyectores, esta zona se basa en aumentar la presión necesaria en el riel para una inyección eficiente de combustible en el motor [11].

### 2.2.2. Sistema de refrigeración

La eficiencia termodinámica de un motor de combustión interna depende directamente de su temperatura de funcionamiento, esto hace que sea crucial encontrar un equilibrio para evitar la fusión de componentes metálicos, por ello en motores diésel el sistema de refrigeración debe disipar el calor de manera eficiente como observamos en la **Figura 4** para mantener las partes críticas a una temperatura segura, según (Simone M) [12], existen dos métodos de refrigeración:

- Refrigeración por agua. – En este método de refrigeración el agua circula a través de una envoltura hueca dentro del motor, enfriando sus componentes para así dar un mejor funcionamiento y evitar daños.
- Refrigeración por aire. – En este método se logra con una corriente de aire exterior que circula entre las aletas metálicas de los cilindros, dando disipación de calor y mejorar la temperatura de su funcionamiento.

**Figura 4:**  
*Sistema de refrigeración de un motor diésel*

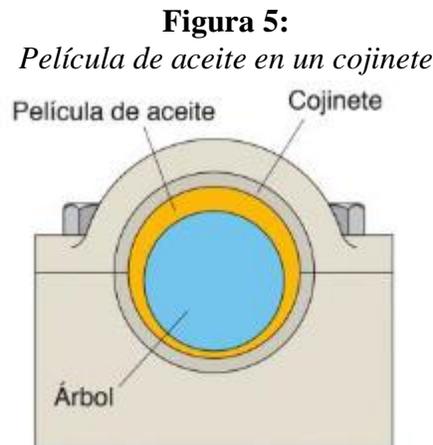


Tomado de: Vera J, Propuesta de mejora del sistema de lubricación (2023) [13].



### 2.2.3. Sistema de lubricación

El aceite tiene la misión de reducir el roce y el desgaste que existe en las piezas por el movimiento del motor, su función principal es lubricar las piezas móviles, como: pistones, bielas, cojinetes, formando una capa de aceite entre las superficies metálicas como se muestra en la **Figura 5**, que evita el contacto directo. contacto y reduce la fricción [14].



Tomado de: Vera J, Propuesta de mejora del sistema de lubricación (2023) [13].

La fricción entre las partes móviles del motor provoca desgaste, calentamiento y pérdida de potencia [15]. El aceite de motor es fundamental para enfriar y mantener la temperatura adecuada del motor, con el tiempo el aceite que ha sido utilizado por un largo periodo pierde su densidad y efectividad de sus funciones principales, como, lubricación, limpieza, enfriamiento, sellado y varios aspectos más que resaltan en la importancia de realizar el cambio de aceite a tiempo, algunas características del aceite tomadas de [16] son:

- Tener una viscosidad adecuada cuando el motor está caliente, así como también tener la fluidez necesaria que facilite el arranque en frío.
- Proteger de la corrosión que exista en las paredes de los cilindros, los cojinetes y también de las diferentes partes metálicas.
- El aceite que pasa a la cámara de combustión tiene que quemarse por completo dejando limpio sin residuos en las válvulas y segmentos. Estos residuos tampoco



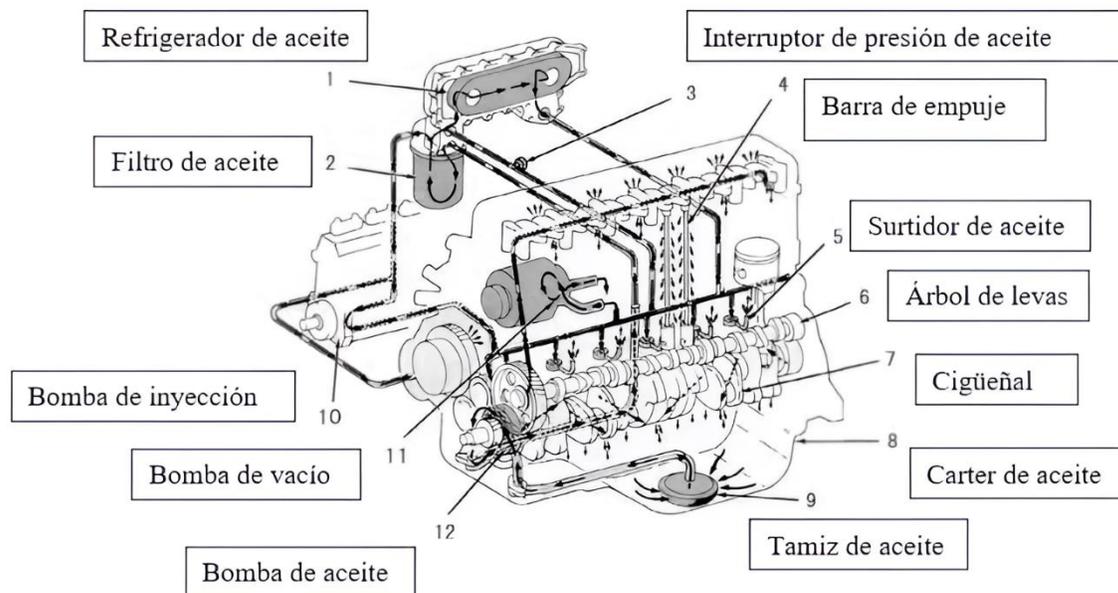
deben alterar el funcionamiento de los dispositivos anti-polución (catalizador, filtro de partículas o EGR).

El aceite actúa como agente limpiador cuando entra en contacto con los componentes calientes del motor, transfiriendo calor al sistema de enfriamiento a través del enfriador de aceite, preservando así las piezas críticas y eliminando contaminantes como suciedad, barniz y óxidos acumulados en los pistones, anillos, vástagos de válvulas [14].

### 2.2.3.1. Diagrama de lubricación de aceite.

El sistema de lubricación del motor diésel consta de varios elementos que desempeñan un papel crucial en el mantenimiento del excelente funcionamiento del motor. A continuación, en la **Figura 6** se detalla de mejor manera estos elementos.

**Figura 6:**  
*Diagrama de lubricación*



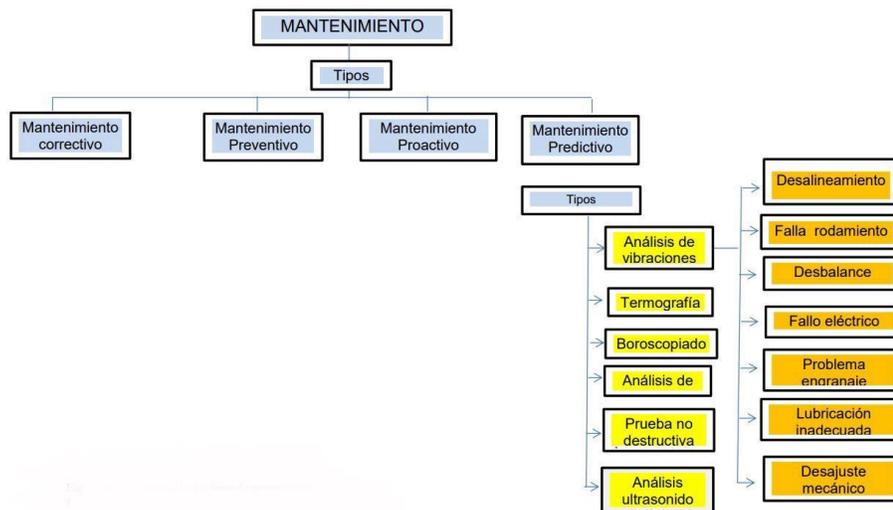
Tomado de: Benz C, Manual de mantenimiento del sistema de lubricación (2012) [17].



### 2.3. Tipos de mantenimientos en motores diésel

Los tipos de mantenimiento en motores diésel según la **Figura 7** se clasifican en: Mantenimiento predictivo, correctivo, proactivo y preventivo, en el motor diésel el mantenimiento predictivo y preventivo se constituyen como un papel fundamental en la optimización del rendimiento, la confiabilidad y la vida útil del motor. Estas dos aproximaciones se centran en identificar posibles fallos de manera temprana, la prevención de problemas y la maximización del tiempo de funcionamiento operativo.

**Figura 7:**  
*Mantenimiento, tipos de mantenimiento*



Tomado de: Salinas R, Mantenimiento preventivo (2020) [10].

#### 2.3.1. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo de motores diésel está en constante evolución y aplicación a nivel global, este enfoque se basa en la evaluación de la condición de una máquina considerando sus características operacionales, térmicas, de desgaste, vibraciones, pureza y hermeticidad, así como sus parámetros en condiciones de funcionamiento nominal, como se ilustra en la **Figura 7** el patrón de estas características [18].



### **2.3.1.1. Análisis de aceite.**

El análisis del aceite usado en motores diésel es una de las herramientas disponibles para implementar el mantenimiento predictivo, este método de diagnóstico se basa en la recolección periódica de muestras durante la operación de los vehículos, pudiendo coincidir con el cambio o relleno del aceite [19].

#### **Beneficios del análisis de aceite**

La implementación del análisis de aceite obtenido de [19] tiene beneficios como:

- Identificar el momento preciso para el cambio de aceite.
- Reducir costos en mano de obra y materiales.
- Prevenir riesgos asociados al uso de aceites y filtros degradados, los cuales podrían afectar gravemente al motor.
- Detectar fallas en sus etapas iniciales, permitiendo programar el mantenimiento adecuado y evitando tiempos de inactividad, imprevistos y prolongaciones.

#### **Parámetros del diagnóstico de aceite**

Los parámetros clásicos de diagnóstico del aceite que se miden en laboratorios obtenidos de [19] son:

- **Viscosidad.** – Indica la resistencia del aceite al flujo y su capacidad de lubricación.
- **Punto de inflamación.** – Es la temperatura a la que los vapores del aceite pueden inflamarse en presencia de una fuente de ignición.
- **Número básico o número básico total.** – Mide la capacidad del aceite para neutralizar ácidos y prevenir corrosión.
- **Contenido de carbón.** – Representa la cantidad de residuos carbonosos presentes en el aceite.
- **Contenido de cenizas.** – Determina la cantidad de residuos inorgánicos generados por aditivos o contaminantes.
- **Insolubles.** – Indica la presencia de partículas no disueltas, como productos de desgaste o contaminación.



- **Contenido de agua.** – Mide la cantidad de agua en el aceite, lo que puede indicar contaminación o condensación.
- **Contenido de combustible.** – Detecta la presencia de combustible en el aceite, lo que puede señalar problemas en la combustión o inyección.
- **Detergencia – dispersancia.** – Evalúa la capacidad del aceite para limpiar y mantener en suspensión los contaminantes.
- **Densidad.** – Relaciona la masa y el volumen del aceite, proporcionando información sobre su composición y pureza.

La viscosidad se determina con instrumentos conocidos como viscosímetros, en el caso de los aceites oscuros se utiliza el viscosímetro Ostwal que mide la viscosidad en centistokes (cSt), mientras que para aceites claros se realiza con el viscosímetro Ubbelohde [19].

### **2.3.1.3. Análisis de vibraciones.**

El análisis de vibraciones es una de las técnicas más empleadas en el mantenimiento predictivo, todas las máquinas generan vibraciones de manera natural durante su funcionamiento, sin embargo, cuando un componente falla las características de estas vibraciones cambian teniendo valores más altos referente a su amplitud, este fenómeno permite realizar estudios detallados para identificar la ubicación y el tipo de falla ocurrida, este tipo de análisis se basa en la interpretación de las señales de vibración tomando en cuenta como referencia los niveles de tolerancia establecidos por la fábrica [20].



### 2.3.2. *Mantenimiento preventivo*

El mantenimiento preventivo es una actividad planificada de inspección de motores, como se muestra en la **Tabla 1**, cuyo objetivo es evaluar su estado de funcionamiento y prevenir de manera eficaz fallos inesperados [21].

**Tabla 1:**  
*Ejemplo plan de mantenimiento preventivo*

A	B	C	D	E	OPERACION
X	X				Medir el nivel de refrigerante.
	X				Revisar que el motor no esté contaminado o con emulsión en él.
X			X		Cambio líquido refrigerante.
		X			Revisar tensión y estado de la correa de accesorios.
			X		Cambiar filtro de combustible.
X	X				Revisar el nivel de aceite en el Carter.
		X	X		Cambio aceite del motor.
		X	X		Cambio filtro de aceite 1.
		X			Cambio filtro de aceite 2.
				X	Cambio correa de repartición.

Tomado de Vidal J, Actualización plan de mantenimiento preventivo (2022) [18].

El mantenimiento preventivo consiste en prevenir anomalías que se pudieran dar mientras el motor esté en su funcionamiento ordinario. Hay aspectos olvidados y que son la causa principal de algunas fallas del motor, que tendrá un desgaste prematuro[22]

En un mantenimiento preventivo de acuerdo con [17] se debe tomar en cuenta:

- Horas de operación del motor



- Kilometraje recorrido
- Periodos de tiempo y cambios

### **2.3.2.1. Servicio de aceite.**

El aceite de motor es un fluido esencial que contribuye a la refrigeración y ayuda a mantener la temperatura óptima del motor, el uso prolongado del aceite hace que pierda su densidad y eficacia en sus funciones principales de lubricación, limpieza, enfriamiento y sellado, por esa razón es fundamental realizar cambios de aceite a tiempo para garantizar el correcto funcionamiento del motor [16].

### **2.3.2.2. Filtros.**

Los filtros se encargan de retener partículas y eliminar impurezas que puedan dañar los sistemas del motor, es importante localizar ambos filtros de aceite y gasolina, quitarlos de su posición, se sugiere aplicar aceite a los sellos de goma y llenar de aceite el filtro para evitar que, entre aire en el sistema, lo cual podría dificultar el arranque del motor.

## **2.4. Propiedades fisicoquímicas del aceite**

Los motores Diésel requieren de una gran cantidad de aceite para circular, para su enfriamiento se utiliza un dispositivo, este dispositivo consta de un intercambiador de calor de carcasa y tubos por donde circulará el agua del circuito de enfriamiento, su función principal es controlar la temperatura del motor, mantener la viscosidad del aceite y evitar la degradación química, dependiendo de las condiciones de funcionamiento del motor intercambios de calor entre aceite y agua, manteniendo así la temperatura ideal [23].

El aceite juega un papel crucial en mantener la temperatura adecuada del motor de combustión interna, ayudando a dispersar el calor generado por la fricción, la combustión y otro proceso, la refrigeración del aceite es esencial en ausencia de un sistema dedicado para



ello, ya que el aceite puede eliminar entre un 10% y un 25% del calor que necesita ser disipado en un MCI [24].

### ***2.4.1. Propiedades del aceite***

En el mercado existe una amplia variedad de lubricantes que ofrecen distintos niveles de protección al motor. La eficacia de esta protección depende de la base y composición del lubricante, así como de los aditivos y detergentes que contiene, estos componentes permiten que el aceite se adapte a cada aplicación, cumpliendo con los requisitos mecánicos [24].

Los aceites para motor se producen a partir de la destilación del petróleo, y están compuestos principalmente por hidrocarburos y compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno, a los que se les añaden diversos aditivos químicos que esto darán mayor o menor espesor al mismo mejorando sus cualidades de funcionamiento en este caso los aceites minerales, así también se elaboran en laboratorio mediante la combinación de diferentes componentes de bajo peso molecular, con el objetivo de lograr las características iniciales requeridas [25].

#### **2.4.1.1. Propiedades físicas de los aceites lubricantes.**

Se definen según las pruebas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y se han diseñado para elegir correctamente el lubricante que cumpla de manera eficiente con la función de proteger y lubricar los distintos componentes de una máquina, controlar su calidad y evaluar su desempeño en servicio para una aplicación específica [26]. Existen varias propiedades y estas son:

- **Gravedad Específica.** – Es la relación entre el peso de un volumen de aceite y el de agua a 15.6 °C, para los aceites derivados del petróleo, esta densidad se encuentra generalmente entre 0.89 y 0.93, siendo su valor típico de 0.91.



- **Color o fluorescencia.** – Es una característica que indica que el aceite es nuevo, pero no está relacionada con su calidad, cada fabricante tiene su propio color y fluorescencia, por lo que su utilidad se limita a comparar el aceite usado con el recién cambiado.
- **Viscosidad.** – Es la resistencia interna al flujo que presentan las moléculas de un aceite al moverse unas junto a otras, esta propiedad se ve influenciada por la temperatura ambiente y por los aditivos que modifican su comportamiento dependiendo del grado del aceite y de los aditivos presentes.
- **Rigidez dieléctrica.** – Se entiende como la capacidad de aislamiento eléctrico de los aceites expresada en Kv/cm y determina la tensión que genera un arco eléctrico a través de dos electrodos sumergidos en el aceite.

#### **2.4.1.2 Propiedades térmicas de los aceites lubricantes.**

Se refieren a su capacidad de conducir y disipar el calor, incluyendo la conductividad térmica, punto de inflamación y la capacidad de resistir cambios térmicos sin degradación [26].

- **Punto de inflamación.** – Es la temperatura mínima a la que los gases generados se encienden brevemente al acercarlos una chispa o llama, el punto de inflamación de los aceites para automóviles varía entre 260°C y 350°C.
- **Punto de combustión.** – Es la temperatura en la que se generan suficientes gases para sostener una llama durante al menos 5 segundos.
- **Punto de fluidez.** – Es la temperatura más baja a la que el aceite sigue siendo un fluido, se define como la temperatura que está 2,7°C por encima de la cual el aceite pertenece en su lugar cuando se inclina el recipiente que lo contiene.
- **Punto de floculación.** – Es la temperatura más baja en la que comienza a separarse, en forma de flóculos, las parafinas u otras sustancias disueltas cuando el aceite es sometido a un proceso de enfriamiento.
- **Punto de congelación y de enturbiamiento.** – El punto de congelación se refiere a la temperatura en la que el aceite pierde su fluidez al enfriarse, mientras que el punto de



enturbiamiento es la temperatura más baja en la que las parafinas u otras sustancias empiezan a separarse formando cristales.

### **2.4.1.3 Propiedades químicas de los aceites lubricantes.**

Las propiedades químicas de un aceite lubricante permiten conocer las composiciones que este tendrá para tener una buena función al momento de utilizarlos existen dos puntos muy importantes en las propiedades químicas de los lubricantes que se expresa en [27] estos son:

- **Reserva alcalina total de un lubricante (TBN).** – Es la cantidad de base que se encuentra medida en miligramos de hidróxido de potasio (KOH), necesaria para neutralizar los ácidos presentes en un gramo de muestra de aceite, este parámetro indica la capacidad del lubricante para contrarrestar la acidez y prevenir la corrosión del motor.
- **Contenido de Ácido Total de un Lubricante (TAN).** – Es la cantidad de ácido, medida en miligramos de (KOH), necesaria para neutralizar todas las sustancias alcalinas presentes en un gramo de muestra.

Estas propiedades químicas son mezclas de diferentes sustancias que tendrá el aceite para que pueda tener toda su consistencia y actuar de mejor manera todo sea por sus contenidos, existen varios y estos son [26]:

- **Residuos de carbón Conradson.** – Es la cantidad de carbón en peso que queda después de someter una muestra de aceite a un proceso de evaporación.
- **Contenido de cenizas sulfatadas.** – Es la cantidad de material no combustible presente en el aceite, que proviene del desgaste adhesivo de las superficies lubricadas.
- **Punto de anilina.** –Indica el contenido de hidrocarburos saturados y permite determinar la composición de la base del aceite, así como su tendencia a deformarse.



## 2.5. Normativa de aceite

Según la RTE INEN 014 “ACEITES LUBRICANTES” los aceites lubricantes deben cumplir con una serie de requisitos para garantizar la salud, seguridad y protección del medio ambiente, además de evitar prácticas que puedan inducir un error a los usuarios, en referencia a [28], las normativas que tendrá esto se basaran mediante las siguientes definiciones:

- Aceite básico
- Aceite lubricante
- Aceite mono grado
- Aceite multigrado
- Aditivos
- Instituto Americano de Petróleo (API)
- Asociación de Constructores Europeos de Automóviles (ACEA)
- Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE)
- Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM)

### 2.5.1 Niveles de calidad ACEA

Se basan en pruebas de laboratorio y con dinamómetros, algunas de ellas son similares a las utilizadas por el API, mientras que otras no lo son. Según [29], los parámetros evaluados son:

- **Protección contra el desgaste.** - Reduce la fricción entre las piezas del motor, evitando su deterioro prematuro y prolongando su vida útil.
- **Limpieza del motor.** - Mantiene en suspensión los residuos y contaminantes, evitando la formación de depósitos y lodos que puedan afectar el rendimiento del motor.
- **Resistencia a la oxidación.** - Previene la degradación del aceite causada por la exposición al oxígeno y altas temperaturas, asegurando una mayor estabilidad y durabilidad.
- **Resistencia al aumento de la viscosidad (debido al espesamiento por hollín).** - Evita el espesamiento del aceite debido a la acumulación de hollín y otros contaminantes, garantizando una lubricación adecuada.



- **Estabilidad de corte (resistencia del aceite ante altos esfuerzos mecánicos).** -  
Mantiene la viscosidad y propiedades lubricantes del aceite incluso bajo altas cargas y esfuerzos mecánicos.
- **Viscosidad a alta temperatura y alto esfuerzo de corte.** - Asegura que el aceite conserve sus propiedades de lubricación en condiciones extremas de temperatura y presión, protegiendo el motor en situaciones de alta exigencia.

Como observamos en la **Tabla 2**, la ACEA categoriza los aceites en:

- “A” para motores de gasolina
- “B” para motores Diesel ligeros

**Tabla 2:**

*Niveles ACEA: aceite motor (gasolina y diésel ligeros)*

Nivel ACEA	Año de revisión	Características	Grado SAE	Aplicaciones
<b>A1/B1</b>	2010	Calidad estándar. Ahorrador de combustible.	0/5W-20/30	Utilitarios y pequeños vehículos urbanos. Pueden no ser aptos para algunos motores.
<b>A3/B3</b>	2010	Calidad estándar. Sin requisitos de ahorro de combustible.	10/15/20W-30/40/50	Motores de gasolina de bajas prestaciones y diésel con inyección indirecta.
<b>A3/B4</b>	2010	Nivel alto de calidad y prestaciones. Aceites sintéticos y semisintéticos.	0/5/10W-20/30/40	Todo tipo de motorizaciones de altas prestaciones y largos periodos de aceite, gasolina y diésel con inyección directa.
<b>A5/B5</b>	2010	Nivel más alto de calidad y prestaciones. Aceites sintéticos	0/5W-20/30	Vehículo de altas prestaciones y largos periodos de cambio de aceite, gasolina y diésel con inyección directa.

Continúa



		economizadores de combustible.		Estos lubricantes pueden no ser aptos para algunos motores.
<b>C1</b>	2010	Nivel muy alto de calidad. Bajo contenido en cenizas y ahorrador de combustible.	0/5W-20/30	Compatible con sistemas de postratamiento y filtros de partículas (DPF, FAP.CRT, CAT). Pueden ser no aptos para motores que requieren de alta viscosidad. (Preconizado por Ford)
<b>C2</b>	2010	Nivel muy alto de calidad. Bajo contenido en cenizas y ahorrador de combustible.	0/5/10W-20/30/40	Compatible con sistema de postratamiento y filtros de partículas (DPF, FAP.CRT, CAT). Pueden ser no aptos para algunos motores. (Preconizado por Peugeot-Citroën)
<b>C3</b>	2010	Nivel muy alto de calidad. Bajo contenido en cenizas y ahorrador de combustible.	0/5/10W-20/30/40	Compatible con sistemas de postratamiento y filtros de partículas (DPF/FAP/CRT). Apto para todo tipo de motor.
<b>C4</b>	2010	Nivel muy alto de calidad. Bajo contenido en cenizas y ahorradores de combustible	0/5W-20/30	Compatible con sistemas de postratamiento y filtros de partículas (EGR/DPF/FAP/CRT/CAT). Apto para todo tipo de motor. (Preconizado por Renault)

Tomado de: George E, Lubricantes especificaciones y normativa (2020) [29].



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



21

**Tabla 3:**

*Niveles ACEA para aceite motor Diesel de servicio pesado*

Nivel ACEA	Año de revisión	Características	Grado SAE	Aplicaciones
<b>E4 num2</b>	2010	Lubricante de desempeño ultra-alto. Aceite sumamente estable que mantiene su grado de viscosidad. Potencian la economía del combustible, proveen una mejor limpieza del pistón, mejores propiedades antidesgaste y mejor control del hollín que los E3.	10W-40	Motores diésel de servicio pesado de alta potencia bajo condiciones de trabajo muy severas que cumplen las normativas Euro I, Euro II, Euro III y Euro IV. Apropiado para motores sin filtro de partículas, algunos motores equipados con EGR y algunos equipados con SCR para reducción de NOx. Permiten un alargamiento considerable de los periodos de drenaje siguiendo las recomendaciones del constructor.
<b>E6 num2</b>	2010	Lubricante muy estable para permanecer con el grado SAE Proveen excelente control de la limpieza de los pistones, desgaste, manejo del hollín, y estabilidad del lubricante. Lubricante con niveles de cenizas sulfatadas, fósforo y azufre bajos ( <b>Low SAPS</b> ).	10W-40	Motores diésel de servicio pesado de altas prestaciones bajo condiciones de trabajo extremadamente exigentes que cumplen las normas Euro I, Euro II, Euro III y Euro IV. Apropiado para motores con EGR con o sin filtro de partículas (fuertemente recomendado para motores con filtro de partículas DPF) y para motores equipados con SCR. Para uso en combustibles diésel de bajo contenido en azufre (s 50 ppm). Para periodos de drenaje extendidos significativamente siguiendo las recomendaciones del constructor.
<b>E7 num2</b>	2010	Lubricante muy estable para permanecer con el grado SAE. Proveen efectivo control de la limpieza de los pistones, del pulido de las camisas, y estabilidad del lubricante, excelente control del desgaste y los depósitos del	5/10/15W-40	Motores diésel de alta potencia bajo condiciones de trabajo muy severas que cumplen con las normas Euro I, Euro II, Euro III y Euro IV. Apropiado para motores sin filtro de partículas y para la mayoría de los motores con EGR y SCR Para periodos extendidos siguiendo las del constructor. de drenaje

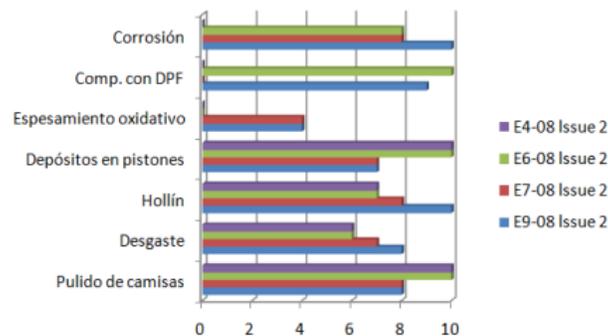
Continúa



		turbocargador, manejo del hollín. Contiene muchos elementos de la especificación API CI-4.		significativamente recomendaciones del constructor.
<b>E9 num2</b>	2010	Lubricantes con niveles de cenizas sulfatadas, fósforo y azufre bajos (Low SAPS). Contiene muchos elementos de la especificación API CJ-4.	5/10/15W-40/30	Motores con sistema de post-tratamiento o mantenimiento posterior DPF, EGR y/o SCR, en combinación con combustible de bajo contenido de azufre. Periodos de drenaje prolongados. Para motores Euro VI.

Tomado de: George E, Lubricantes especificaciones y normativa (2020) [29].

**Figura 8:**  
*Niveles de desempeño ACEA 2010 (Diesel pesados)*



Tomado de: George E, Lubricantes especificaciones y normativa (2020) [29].

### 2.5.2 Niveles de calidad API

La clasificación API dependerá del tipo de motor para su respectiva clasificación de aceite, según [29], se categoriza en:

- Servicio (S): Motores gasolina
- Comercial (C): Motores Diesel

La **Tabla 4** muestra los niveles API de aceite para motores diésel que están en vigencia en la actualidad:



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



23

**Tabla 4:**

*Niveles vigentes de calidad API para aceite motor*

<b>MOTORES DIESEL</b>	
<b>Categoría</b>	<b>Servicio</b>
CK-4	<p>Es la categoría actual que se usa en los motores diésel, esta categoría describe los aceites para su uso en motores diésel de alta velocidad y de ciclo de cuatro tiempos diseñado para cumplir con los estándares de emisiones de escape en carretera del modelo 2017 y de nivel 4 fuera de carretera. Estos aceites están formulados para su uso en todas las aplicaciones con combustibles diésel que varían en contenido de azufre hasta 500 ppm (0,05 % en peso). Sin embargo, el uso de estos aceites con más de 15 ppm (0,0015 % en peso) de combustible de azufre puede afectar la durabilidad del sistema de postratamiento del escape o el intervalo de drenaje del aceite. Estos aceites son especialmente efectivos para mantener la durabilidad del sistema de control de emisiones cuando se utilizan filtros de partículas y otros sistemas avanzados de postratamiento. Los aceites API CK-4 están diseñados para proporcionar protección mejorada contra la oxidación del aceite, la pérdida de viscosidad debido al cizallamiento y la aireación del aceite, además de protección contra el envenenamiento del catalizador, el bloqueo del filtro de partículas, el desgaste del motor, los depósitos del pistón, la degradación de las propiedades por baja o alta temperatura, y el aumento de la viscosidad relacionada con el hollín. Los aceites API CK-4 exceden los criterios de rendimiento de los aceites API CJ-4, CI-4 con CI-4 PLUS, CI-4 y CH-4, y pueden lubricar de manera efectiva los motores que requieren esas categorías de servicio del API. Cuando use aceite CK-4 con combustible de azufre superior a 15 ppm, consulte al fabricante del motor para obtener recomendaciones sobre los intervalos del servicio.</p>
CJ-4	<p>Se introdujeron en el año 2006. Están destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos diseñados para cumplir con las normas de emisión de gases de escape en autopista para el modelo del año 2007. Los aceites CJ-4 están compuestos para ser usados en todas las aplicaciones con combustibles diésel con rango de contenido de azufre hasta 500 ppm (0.05% en peso). El uso de estos aceites con combustibles con un contenido de azufre mayor de 15 ppm (0.0015% en peso) puede repercutir en la durabilidad del sistema postratamiento de los gases de escape y/o en el intervalo de drenaje de aceite. Los aceites CJ-4 son eficaces en la protección de la durabilidad del sistema de control de emisiones cuando se emplean filtros de partículas y otros sistemas de postratamiento avanzados. La protección es óptima en el control del envenenamiento catalítico,</p>

Continúa



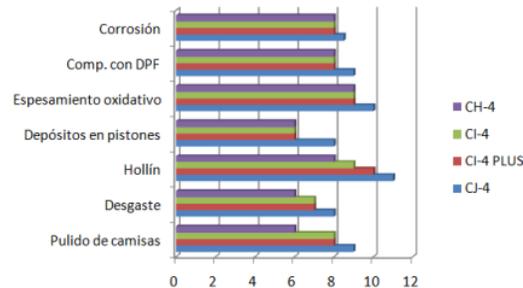
	bloqueo de filtros de partículas, desgaste del motor, formación de depósitos en pistones, estabilidad a baja y alta temperatura, propiedades en el manejo del hollín, espesamiento oxidativo, formación de espuma, y pérdida de viscosidad debido a corte. Los aceites API CJ-4 superan los criterios de desempeño de API C1-4, CI-4 PLUS, CI-4, CH-4, CG-4 y CF-4 y pueden lubricar eficazmente motores que requieren esas Categorías de Servicio API. Al utilizar aceite CJ-4 con combustible que contenga más de 15 ppm de azufre, consulte al fabricante del motor para el intervalo de servicio.
CI-4 PLUS	CI-4 PLUS surgen en 2004 por la insatisfacción de algunas constructoras en lo referente a requisitos de control del espesamiento provocado por el hollín y la caída de la viscosidad debido al alto esfuerzo mecánico sobre los aditivos mejoradores de viscosidad.
CI-4	Se introdujeron en el año 2002. Están destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos diseñados para cumplir con las normas de emisión de gases de escape del año 2004, puestas en práctica en el año 2002. Están formulados para proteger la durabilidad del motor cuando se utiliza la recirculación de gases de escape (EGR) y están ideados para ser utilizados con combustibles diésel con un rango de contenido en azufre de hasta 0.5% en peso. Pueden usarse en lugar de los aceites CD, CE, CF-4, CG-4 y CH-4. Comparada con CH-4 estos aceites otorgan una mayor protección contra la oxidación y la herrumbre, reducen el desgaste y mejoran la estabilidad de la viscosidad debido a un mayor control del hollín formado durante el uso del aceite. Mejoran el consumo de aceite.  Algunos aceites CI-4 también pueden clasificar para la designación CI-4 PLUS
CH-4	Se introdujeron en el año 1998. Están destinados a motores de alta velocidad, de cuatro tiempos diseñados para cumplir con las normas de emisión de gases de escape del año 1998. Están compuestos específicamente para ser usados con combustibles diésel con un rango de contenido en azufre de hasta 0,5% en peso Pueden utilizarse en lugar de los aceites CD, CE, CF-4 y CG-4.

Tomado de: George E, Lubricantes especificaciones y normativa (2020) [29].

En la **Figura 9** se puede notar los niveles de desempeño que tienen los antes mencionados niveles de calidad.



**Figura 9:**  
*Niveles de desempeño API (Diesel pesados)*



Tomado de: George E, Lubricantes especificaciones y normativa (2020) [29].

## 2.6. Fundamentos del análisis vibratorio

Se puede garantizar el funcionamiento confiable del motor mediante inspecciones y controles periódicos, la determinación de los parámetros del ciclo operativo para cada cilindro del motor ayuda a corregir y ajustar los parámetros necesarios para garantizar el funcionamiento eficiente del motor, distribuir uniformemente la carga en los cilindros del motor y detectar pronto tendencias peligrosas [30].

En los motores térmicos generan vibraciones incluso en condiciones normales de funcionamiento, esto quiere decir que el proceso de combustión produce vibraciones que se originan en diversos sistemas del motor, como el sistema de admisión, escape, transmisión y el propio bloqueo del motor, las vibraciones pueden ser analizadas para detectar posibles fallas mecánicas por ende estas vibraciones tendrán que estar en un límite aceptable y así saber que está en un funcionamiento óptimo [31].

Según (Mugmal T)[32], dice que, para tener una combustión idónea, el valor máximo de vibración cuando el motor se somete a una aceleración se encuentra en el rango de 0-10 kHz en el gráfico de tiempo-frecuencia, los factores que más influyen en las pruebas de vibraciones son:

- Detonación
- Sistema del combustible



- Apertura y cierre de válvulas
- Cigüeñal- biela- pistón
- Turbo

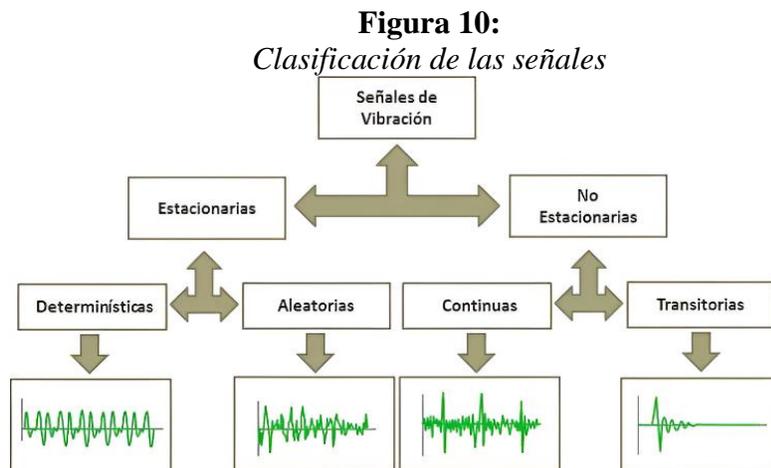
### 2.6.1 Clasificación de las señales

Las técnicas utilizadas en el procesamiento de señales suelen depender de las características propias de la señal que se está analizando, por lo tanto, su caracterización como los métodos de análisis varían en función de su estructura [33].

A continuación, se incluyen algunas posibles clasificaciones de las señales:

- Determinista o aleatoria
- Transitoria o continua
- Estacionaria o no estacionaria

En la siguiente **Figura 10** podemos ver la clasificación que tienen las señales y los gráficos que estos tendrían [33]:



Tomado de: Simón B, Procesamiento de señales (2012) [33].

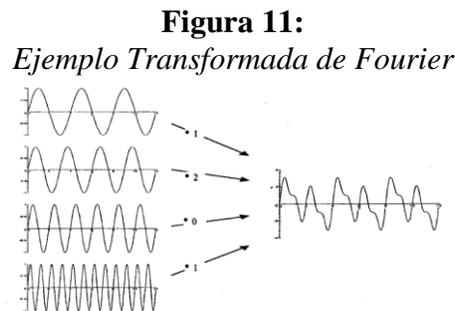
## 2.7 Transformada de Fourier aplicada en vibraciones

En el análisis de señales de vibración, se puede llevar a cabo en el dominio del tiempo, evaluando el nivel de amplitud o en el dominio de la frecuencia, esto se realizará aplicando la Transformada de Fourier (TF), ambos enfoques permiten caracterizar los eventos presentes



en la señal, especialmente cuando esta se encuentra dentro de un intervalo de tiempo finito de análisis [34].

La **Figura 11** presenta cómo funciona esta transformada, este análisis permite demostrar cómo se separan las señales complejas de las señales simples, lo que facilita su interpretación y caracterización.



Tomado de: Mugmal T, Flores K, Estudio de vibraciones en motores MEC (2023) [31].

### ***2.7.1. Transformada de Fourier en tiempos cortos***

Permite identificar las frecuencias que componen una señal y su correspondiente contribución energética, previo a esto se debe garantizar que la TF tenga una alta resolución en el dominio temporal, ya que su cálculo depende de los datos temporales de la señal o de la porción específica de ella, lo que impide determinar el instante exacto en el que aparece una componente de frecuencia particular [34].

El principal objetivo es representar un transitorio como la suma de funciones armónicas, asegurando que esta suma sea cero fuera del intervalo de duración de la señal y equivalente a la propia señal dentro de dicho intervalo [33].



En la **Ecuación 1** se puede ver la definición de esta transformada:

**Ecuación 1:**

Transformada de Fourier

$$X_g(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Donde:

*t*: Tiempo

*f*: Frecuencia en Hz

*x(t)*: señal de prueba

$e^{-j2\pi ft}$ : Fases de sondeo (kernel Funtion)

*X(f)*: Espectro en función de la frecuencia *f*

Se necesita un rango continuo de frecuencias para representar *x(t)* como una suma de funciones armónicas, básicamente es una representación de dos lados [33].

## **2.8. Normativa de vibraciones**

Todos los estándares deben incluir comparaciones con normas previamente establecidas, procedimientos de medición unificados y directrices para el análisis de datos, según el ámbito de aplicación y desarrollo en diversas organizaciones han definido estándares para evaluar la gravedad de las vibraciones, dentro de todas las organizaciones encontramos ANSI, ISO, BS (normas británicas e internacionales) y VDI, además de API y AGMA que establecen regulaciones específicas para la industria [35].

### **2.8.1. Normativa internacional de vibraciones**

Según la Norma ISO 10816-3, Establece las condiciones y procedimientos generales para medir y evaluar la vibración, realizando mediciones en partes no rotatorias de las máquinas, el criterio principal de evaluación se basa en la monitorización operativa y en pruebas de

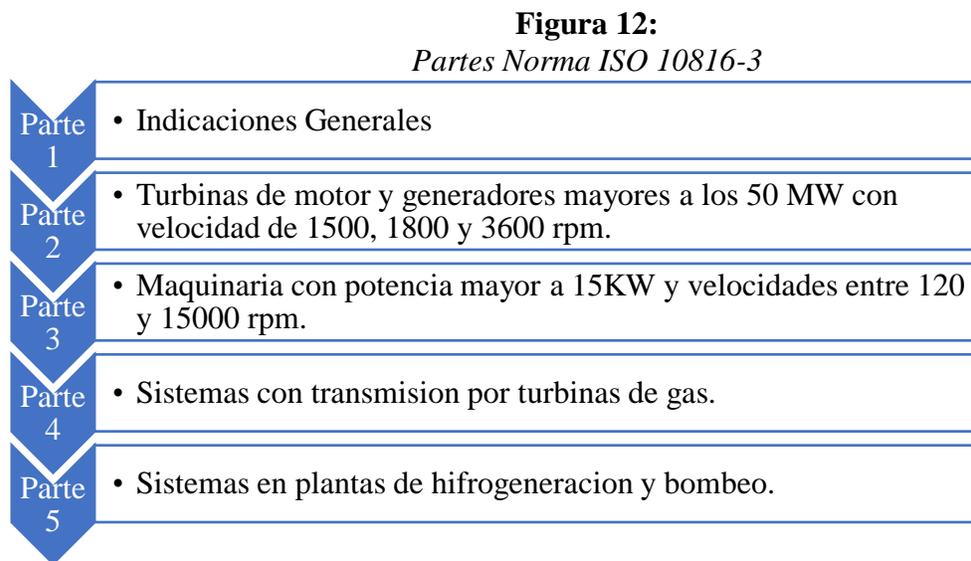


validación, diseñadas para asegurar un funcionamiento confiable de la maquina a largo plazo, en el caso de máquinas con velocidad o carga variable, las mediciones deben realizarse bajo todas las condiciones posibles, así se considerara como representativas aquellas vibraciones que superen los límites establecidos por el criterio y sugieren una vibración de fondo muy alta [36].

La severidad de la vibración se clasifica conforme a los siguientes parámetros según [36]:

- Tipo de máquina
- Potencia o altura de eje
- Flexibilidad del soporte

Esta norma está dada en cinco partes como muestra la **Figura 12:**



Tomado de: Gaibor M, Diaz L, Análisis de vibraciones en el motor diésel (2019) [15].

Las mediciones por realizar serán en temperatura de trabajo, teniendo en cuenta las condiciones de velocidad, flujo, presión y voltaje se deberá evaluar si las vibraciones superan los criterios permitidos, en caso de que esto no ocurra, la medición se realizará con la máquina en reposo, ya que, si las vibraciones superan el 25% durante la operación de la máquina, se deberán hacer las respectivas correcciones con la brevedad necesaria [15].



A continuación, se muestra la **Tabla 5** para vibraciones de desplazamiento que menciona la Norma 10816-3, la misma que muestra parámetros:

**Tabla 5:**  
*Vibraciones de desplazamiento*

**NORMA ISO 10816-3 PARA VIBRACIONES EN DESPLAZAMIENTO**

								340	5,51
								113	4,45
								90	3,54
								71	2,80
								56	2,20
								45	1,77
								36	1,42
								28	1,1
								22	0,87
								18	0,71
								11	0,43
								μm, rms	mil rms
Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Fundación	
Bombas <15 KW Radial, Axial, Flujo combinado				Máquinas de medidas medias 15 KW <P<300 KW		Máquinas grandes 300 KW< P<50 MW		Tipo de máquina	
Motor integrado		Motor externo		Motores 180mmSP<315mm		Motores 315mmSH			
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		Grupo	

A Condición de máquina nueva      C Operación aceptable a corto plazo  
 B Operación aceptable largo plazo      D Vibración causante de daño

Tomado de: Gaibor M, Diaz L, Análisis de vibraciones en el motor diésel (2019) [15].

De igual manera se mostrará la **Tabla 6** de vibraciones de velocidad, considerando varios parámetros:

**Tabla 6:**  
*Vibraciones de velocidad*

**NORMA ISO 10816-3 PARA VIBRACIONES EN VELOCIDAD**

								11	0,43
								7,1	0,28
								4,5	0,19
								3,5	0,14
								2,8	0,11
								2,3	0,09
								1,4	0,06
								0,71	0,03
								μm, rms	mil rms
Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Rígido	Flexible	Fundación	
Bombas <15 KW Radial, Axial, Flujo combinado				Máquinas de medidas medias 15 KW <P<300 KW		Máquinas grandes 300 KW< P<50 MW		Tipo de máquina	
Motor integrado		Motor externo		Motores		Motores			
Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		Grupo	

A Condición de máquina nueva      C Máquinas consideradas insatisfactorias pueden ser usadas e un tiempos limitado  
 B Máquinas consideradas aceptables pueden      D Vibraciones peligrosas pueden ocasionar

Tomado de: Gaibor M, Diaz L, Análisis de vibraciones en el motor diésel (2019) [15].



### **3. MATERIALES Y MÉTODO**

#### **3.1. MATERIALES**

En este capítulo se describen los materiales y equipos utilizados para realizar el análisis vibratorio del motor diésel bajo carga, con el objetivo de evaluar la vida útil del aceite de motor. Se incluyen especificaciones detalladas de los instrumentos y materiales.

##### ***3.1.1 Selección del motor diésel***

El motor utilizado en esta investigación es un Isuzu Euro 3 con turbo intercooler, instalado en un camión Chevrolet NMR, diseñado específicamente para transporte de carga. Este modelo de camión es uno de los vehículos más utilizados en el medio debido a su confiabilidad y eficiencia en operaciones de carga. A continuación, en la **Tabla 7 y Figura 13**, se presentan los datos técnicos del motor utilizado para las pruebas.

**Figura 13:**  
*Motor Isuzu turbo intercooler*





**Tabla 7:**  
*Especificaciones técnicas del motor*

Tipo	Turbo intercooler
Posición	Frontal/longitudinal
Cilindrada (cc)	2.999
Potencia (Hp @ RPM)	130 @2800
Torque (N.m @ RPM)	330 @ 1600
Alimentación	CRDi Inyección directa

### **3.1.2 Equipo para diagnóstico de vibraciones**

El diagnóstico de vibraciones de motores diésel es una herramienta clave para detectar problemas mecánicos y evaluar el estado de los componentes internos sin requerir su desmontaje. En el presente estudio, el análisis de vibraciones se utiliza como método indirecto para evaluar la vida útil del aceite del motor, ya que los cambios en las propiedades del lubricante pueden alterar la vibración del motor.

#### **3.1.2.1 Sensor de vibraciones.**

Para el análisis de vibraciones del motor diésel, se empleó un sensor industrial de la serie ICP 603 C01, el cual está certificado con ISO-9001, lo que asegura la calidad y precisión de las mediciones a lo largo de las pruebas. El sensor de la serie ICP 603 C01 como observamos en la **Figura 14**, ofrece la ventaja de una conectividad sencilla y fácil instalación. Este sensor fue colocado en un punto estratégico del motor, como el bloque de cilindros, utilizando un imán para asegurar su fijación.



**Figura 14:**  
*Sensor ICP 603 C01*



En la **Tabla 8** observamos el Datasheet del sensor utilizado en la investigación

**Tabla 8:**  
*Datasheet Sensor ICP 603 C01*

<b>Sensibilidad</b>	10,2 mV(m/s <sup>2</sup> )
<b>Rango de medición</b>	+/- 490 m/s <sup>2</sup>
<b>Rango de frecuencia</b>	0,5 a 10.000 Hz
<b>Rango de temperatura</b>	-54 a +121 °C
<b>Peso</b>	51 gramos
<b>Tamaño (hexágono x altura)</b>	18 mm + 42.2 mm
<b>Elemento sensor</b>	Cerámico

**Tomado de:** Ashton H, Model 603C01 Platinum Stock Products (2019) [37].

### 3.1.2.2 Tarjeta de adquisición de datos.

Para transmitir señales generadas por el sensor de vibraciones a la computadora portátil, se empleó una placa de adquisición de datos de la serie cDAC 9171 de National Instruments, comúnmente denominada chasis. Esta placa se conecta al ordenador mediante un puerto USB, la función principal de la placa que observamos en la **Figura 15**, es convertir las señales físicas detectadas por el sensor de vibraciones en señales eléctricas que pueden ser interpretadas en gráficos de amplitud y frecuencia en tiempo real.



**Figura 15:**  
*Tarjeta de adquisición de datos*



Las **Tablas 9 y 10** muestran las entradas y salidas analógicas de la tarjeta de adquisición, cuyas características son esenciales para la recopilación de los datos de vibración necesarios en esta investigación.

**Tabla 9:**  
*Entradas analógicas de la tarjeta de adquisición cDAC 9171 de National Instruments*

<b>Tamaño de FIFO de entrada</b>	127 muestras
<b>Frecuencia máxima de muestreo</b>	Determinado por el módulo de Serie C
<b>Precisión de tiempo</b>	50 PPM de frecuencia de muestreo
<b>Resolución de tiempo</b>	12.5 ns
<b>Numero de canales admitidos</b>	Determinado por el módulo de la Serie C

Tomado de: National Instruments, cDAQ™-9171 Specifications (2024) [38].

**Tabla 10:**  
*Salidas analógicas de la tarjeta de adquisición cDAC 9171 de National Instruments*

<b>NUMERO DE CANALES ADMITIDOS</b>	
<b>TAREA CRONOMETRADA POR HARDWARE</b>	
<b>Regeneración a bordo</b>	16
<b>No generación</b>	Determinado por el módulo de Serie C
<b>Tarea no cronometrada por hardware</b>	Determinado por el módulo de Serie C
<b>TASA MÁXIMA DE ACTUALIZACIÓN</b>	

Continua



<b>Regeneración a bordo</b>	1.6 MS/s (multicanal, agregado)
<b>No generación</b>	Determinado por el módulo de Serie C
<b>Precisión de tiempo</b>	50 ppm de frecuencia de muestreo
<b>Resolución de tiempo</b>	12.5 ns
<b>TAMAÑO DE FIFO DE SALIDA</b>	
<b>Regeneración a bordo</b>	8191 muestras compartidas entre canales utilizados
<b>No generación</b>	127 muestras
<b>Modos de forma de onda AO</b>	Forma de onda no periódica, modo de generación de forma periódica desde la memoria integrada.

Tomado de: National Instruments, cDAQ™-9171 Specifications (2024) [38].

### 3.1.2.3 LabVIEW.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un entorno de desarrollo gráfico creado por National Instruments que facilita el diseño de sistemas de prueba, medición y control. Es ampliamente utilizado en proyectos de adquisición de datos y análisis debido a su versatilidad, precisión y facilidad de uso, lo que lo convierte en una herramienta ideal para diversas aplicaciones en ingeniería y monitoreo de condiciones, en nuestra investigación LabVIEW juega un papel fundamental en la interpretación y visualización de los datos de vibración capturados por el sensor y la tarjeta de adquisición de datos, así como también permite tener datos detallados en tiempo real proporcionando gráficos y estadísticas que nos ayudan a evaluar las condiciones de operación del motor [39].



**Figura 16:**  
*Logo LabVIEW*



### 3.1.2.4 Matlab.

MATLAB (Matrix Laboratory) es una plataforma de computación numérica y un lenguaje de programación que ayuda principalmente en el ámbito de la ingeniería, la ciencia y las matemáticas. Se destaca por su capacidad para realizar cálculos complejos, análisis de datos, visualización de resultados y desarrollo de algoritmos. En esta investigación, se utiliza la versión estudiantil de MATLAB, que desempeña un papel crucial como herramienta de análisis y simulación en esta investigación, gracias a su capacidad para realizar cálculos complejos de manera eficiente, como la Transformada de Fourier. Esta funcionalidad permite descomponer las señales de vibración en sus componentes de frecuencia y amplitud, proporcionando un análisis detallado y preciso [40].

**Figura 17:**  
*Logo MATLAB*

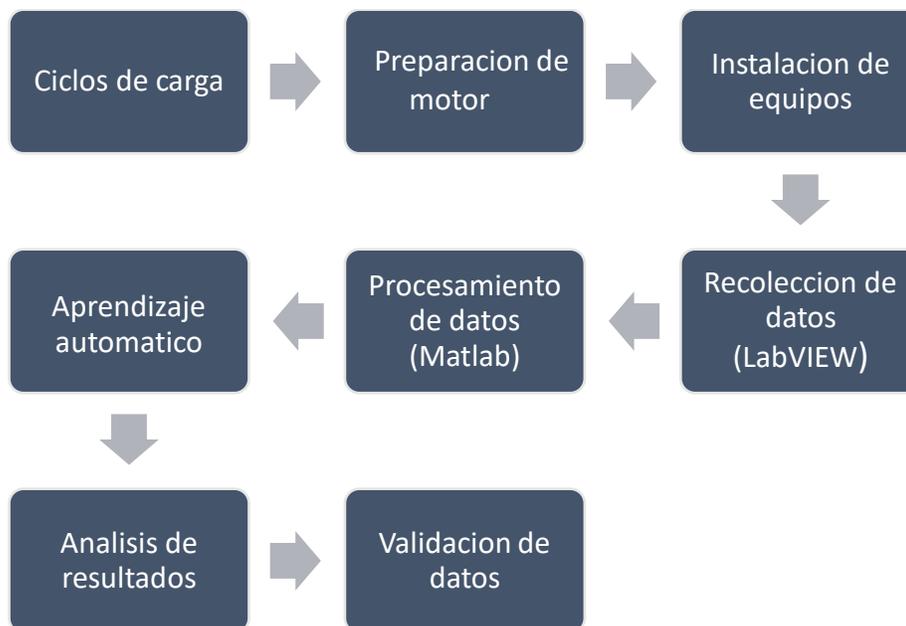




## 3.2 METODOLOGÍA

Este capítulo expone la metodología empleada para llevar a cabo el análisis vibratorio del motor diésel en función de su ciclo de carga, con el fin de determinar la vida útil del aceite de motor. En la **Figura 18** se detalla el procedimiento de recolección y procesamiento de las señales de vibración.

**Figura 18:**  
*Metodología de investigación*



### 3.2.1 Ciclos de carga

Antes de iniciar las pruebas, es fundamental que el vehículo alcance su temperatura óptima de funcionamiento para garantizar mediciones precisas y reproducibles. En este caso, el motor debe operar dentro de un rango de 75°C a 105°C, asegurando condiciones estables durante el análisis.

En las pruebas realizadas, el motor fue sometido a un régimen constante de 2500 rpm para evaluar su comportamiento bajo condiciones de carga. La velocidad promedio del vehículo se mantuvo entre 70 y 75 km/h, lo que permitió simular condiciones reales de operación en una ruta



con variaciones de altitud y topografía. Durante la mayor parte del recorrido, el vehículo operó en quinta marcha, asegurando estabilidad en las mediciones.

Las pruebas se llevaron a cabo en la ruta Otavalo - Cajas y viceversa, cubriendo un total de 16 kilómetros. Esta ruta presenta una combinación de tramos con pendientes y rectas, lo que permitió analizar cómo las diferentes condiciones de carga afectan la frecuencia y amplitud de las vibraciones del motor.

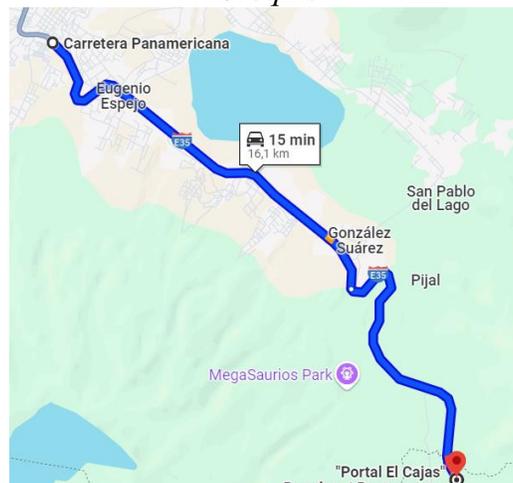
### 3.2.2.1 Ruta Otavalo-Cajas.

La **Tabla 11** presenta las diferentes condiciones que estará sometido el motor para las diferentes pruebas, mientras que en la **Figura 19** se muestra el trayecto seleccionado para llevarlas a cabo.

**Tabla 11:**  
*Datos ruta*

Régimen (RPM)	<b>2500</b>
Velocidad (Km/h)	<b>70-75</b>
Tiempo (min)	<b>15</b>
Distancia (Km)	<b>16,1</b>
Altura (msnm)	<b>2520</b>

**Figura 19:**  
*Croquis*





### 3.2.2.2 Opciones de prueba

Contamos con estas opciones de pruebas que podemos notar en la **Tabla 12**, **Tabla 13** y **Tabla 14**, se ajustan a diferentes necesidades y objetivos, tomando en cuenta el análisis que se necesita al momento de realizar las pruebas correspondientes, todas están diseñadas para ofrecer resultados precisión y confiables con la diferencia que unas opciones tomarán más tiempo al momento de hacer las pruebas y otras será más corto ese tiempo, todo dependerá del número de pruebas que se realice. Nuestro enfoque nos permite seleccionar la opción más adecuada para la realización de nuestro proyecto asegurando una evaluación exhaustiva y eficaz.

#### Opción 1

**Tabla 12:**

*Opción 1 prueba toma de datos*

<b>Aceite Nuevo – Kendall 15w40</b>	<b>Prueba</b>
<b>0 km</b>	1
<b>1000 km</b>	2
<b>2000 km</b>	3
<b>3000 km</b>	4
<b>4000 km</b>	5
<b>5000 km</b>	6
<b>5500 km</b>	7
<b>5800 km</b>	8
<b>6000 km</b>	9

#### Opción 2

**Tabla 13:**

*Opción 2 prueba toma de datos*

<b>Aceite Nuevo – Kendall 15w40</b>	<b>Prueba</b>
<b>0 km</b>	1
<b>2000 km</b>	2
<b>4000 km</b>	3
<b>5000 km</b>	4
<b>5500 km</b>	5
<b>5800 km</b>	6
<b>6000 km</b>	7



### Opción 3

**Tabla 14:**  
*Opción 3 prueba toma de datos*

Aceite Nuevo – Kendall 15w40	Prueba
0 km	1
3000 km	2
5500 km	3
5800 km	4
6000 km	5

Antes de llevar a cabo las pruebas definitivas, se evaluaron tres opciones de análisis, con el objetivo de seleccionar la más adecuada para el estudio final. La elección se fundamentó en los resultados obtenidos en dos pruebas piloto realizadas a intervalos de 5000 km y 6000 km, las cuales permitieron analizar la amplitud y frecuencia de las vibraciones.

Tras esta evaluación, se determinó que la **Opción 3** es la más adecuada, ya que permite realizar un seguimiento detallado del comportamiento del aceite a lo largo de su vida útil en el motor. Esta opción contempla la ejecución de cinco pruebas en distintos intervalos de kilometraje, tal como se especifica en la **Tabla 14**. Con este enfoque, se garantiza la recopilación de datos representativos y precisos para el análisis final.

#### **3.2.2 Preparación de motor**

El motor Isuzu Euro 3 con turbo intercooler debe encontrarse en óptimas condiciones para el análisis de vibraciones. Esto implica una revisión exhaustiva de todos sus componentes, garantizando que el sistema de inyección, refrigeración y escape funcione correctamente, y que no existan fugas de líquidos ni fallos eléctricos. Además, es crucial que se utilicen aceites y filtros nuevos, junto con un combustible adecuado, para asegurar la consistencia de las pruebas. Solo así se podrán obtener resultados precisos y confiables en las mediciones de vibración bajo carga.



En la **Figura 20** se muestra la preparación del motor, que incluye los cambios de filtros como aire, combustible y aceite, así como también se cambia el aceite de motor respectivamente, lo cual es fundamental para obtener resultados más precisos en los datos de vibración.

**Figura 20:**  
*Preparación del motor*



En la **Tabla 15** se presentan los parámetros técnicos esenciales utilizados durante las pruebas del motor Isuzu turbo intercooler. Estos datos permiten un monitoreo detallado de las condiciones operativas y aseguran la validez de los resultados obtenidos.

**Tabla 15:**  
*Parámetros*

<b>Temperatura ° óptima de funcionamiento (°C)</b>	75-105
<b>Tipo de combustible</b>	Diésel - Primax
<b>Nivel de combustible (Gal)</b>	0.75 galones
<b>Presión de neumáticos (Psi)</b>	60
<b>Vacío (kg)</b>	2.090



En la **Tabla 16** se detallan los diferentes filtros usados con sus respectivas marcas, así como sus códigos.

**Tabla 16:**  
*Filtros para preparación de motor*

<b>Tipo de Filtro</b>	<b>Marca</b>	<b>Código</b>
<b>Filtro de aceite</b>	Motorex power filter	M01501
<b>Filtro de combustible</b>	Advance Filter	AFP-046
<b>Filtro de aire</b>	General Motors	GM_8983214130

### 3.2.2.1 Aceite de motor

El aceite de motor utilizado en la investigación es de la marca KENDALL 15W40. Este aceite está diseñado específicamente para motores diésel de trabajo pesado y cumple con los más recientes estándares ambientales. Es ideal para su uso en equipos modernos de bajas emisiones, ofreciendo un rendimiento óptimo incluso en condiciones exigentes. El motor empleado en este estudio requiere un total de 2 galones y medio de este aceite para su correcto funcionamiento. En la **Tabla 17** observamos el Datasheet del aceite utilizado.

**Tabla 17:**  
*Datasheet Aceite*

<b>Grado SAE</b>	<b>15W-40</b>
<b>Gravedad específica @ 60 °F</b>	0.875
<b>Densidad, Ibs/gal @60 °F</b>	7.29
<b>Color, ASTM D1500</b>	4.0
<b>Punto de inflamación (COC) °C(°F)</b>	240(464)
<b>Punto de fluidez</b>	-40(-40)
<b>cSt @ 40 °C</b>	119
<b>cSt @ 100 °C</b>	15.4
<b>Índice de viscosidad</b>	135
<b>Viscosidad CCS, cP @ (°C)</b>	6,400(-20)
<b>Viscosidad HTHS, cP @ 150</b>	4.4
<b>Cenizas sulfatadas, ASRM D874, Masa %</b>	1.00
<b>Número básico total (TBN)</b>	10.5
<b>Titanio, masa %</b>	0.0010
<b>Zinc, masa %</b>	0.122
<b>Fosforo, masa %</b>	0.1100

Tomado de: Kendall, Diesel Engine Oil with Liquid Titanium (2017) [41].



### 3.2.3 Instalación de equipos

#### 3.2.3.1 Ubicación de sensor

El sensor instalado en el motor cumple con la norma ISO-5348 y fue colocado en el bloque del motor. Durante las pruebas, se verificó cuidadosamente la correcta ubicación de todos los componentes, incluyendo los cables y el dispositivo cDAQ, así como la conexión a la computadora mediante USB. Estas precauciones se tomaron para evitar la influencia de vibraciones no deseadas y asegurar que solo se registraran las vibraciones generadas por el motor. La **Figura 21** muestra la posición exacta del sensor.

**Figura 21:**  
*Posición sensor 0*



### 3.2.4 Adquisición de datos

El proceso de recolección de datos fue mediante una interfaz desarrollada en LabVIEW, la cual permite la captura y monitoreo en tiempo real de las señales de vibración del motor diésel. Para comenzar, el sensor fue instalado en el bloque del motor y conectado a la tarjeta de adquisición de datos cDAQ 9171 utilizando el cable del sensor mencionado anteriormente. Posteriormente, la tarjeta fue conectada a la computadora portátil para iniciar la captura de datos. La **Figura 22** expresa el proceso para la adquisición de datos de vibraciones.



**Figura 22:**

*Proceso metodológico para la adquisición de datos a partir de vibraciones*



Tomado de: Mariño s, análisis de vibraciones en el motor de combustión interna (2019) [42].

En el análisis de vibraciones del motor diésel, se utilizaron los armónicos y los estados como parámetros clave para evaluar la relación entre el comportamiento vibratorio y la vida útil del aceite. Los armónicos representan las frecuencias múltiples de una señal fundamental y permiten identificar patrones específicos de vibración dentro del motor. En este estudio, se analizaron los armónicos I, II y III, los cuales se codificaron como ARM1, ARM2 y ARM3, respectivamente, como se puede expresar en la **Tabla 18**.

Por otro lado, los estados corresponden a los diferentes intervalos de kilometraje en los que se realizaron las pruebas, reflejando la degradación progresiva del aceite. Estos estados fueron asignados con valores numéricos que indican el kilometraje en el que se tomó cada muestra, esto podemos ver detallado en la **Tabla 19**.

**Tabla 18:**

*Relación código - armónico*

CÓDIGO	ARMÓNICO
<b>ARM1</b>	Armónico I
<b>ARM2</b>	Armónico II
<b>ARM3</b>	Armónico III



**Tabla 19:**  
*Relación Estado - km*

Estado	Kilometraje (km)
<b>0</b>	0
<b>0.5</b>	5000
<b>0.9</b>	5500
<b>0.95</b>	5600
<b>1</b>	6000

Para garantizar la precisión y confiabilidad del análisis, en cada estado se requirió la recopilación de 200 datos. Para alcanzar esta cantidad, se realizaron múltiples pruebas en la ruta establecida, completando el número necesario de mediciones.

Cada prueba consistió en recorrer la ruta seleccionada de ida y vuelta en dos ocasiones, permitiendo así obtener una mayor cantidad de datos representativos en condiciones de operación reales. En total, se realizaron a cabo cuatro pruebas por cada estado, asegurando que la variabilidad en las mediciones fuera mínima y que los resultados reflejarán con precisión el comportamiento del motor y la degradación del aceite.

En la **Tabla 20**, se presentan las clasificaciones de las pruebas realizadas, junto con la distribución de los datos recopilados en cada estado.

**Tabla 20:**  
*Clasificación de pruebas*

Ruta	Vuelta	Numero de pruebas
<b>Otavallo-Cajas (O-C)</b>	Primera	53
<b>Cajas- Otavallo (C-O)</b>	Primera	53
<b>Otavallo- Cajas (O-C)</b>	Segunda	53
<b>Cajas-Otavallo (C-O)</b>	Segunda	53

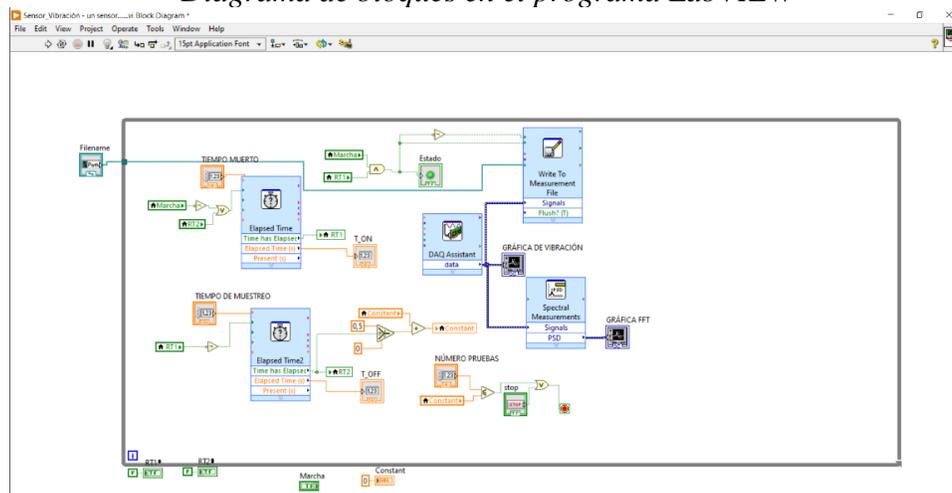
### 3.2.4.1 Programa en LabVIEW

Este programa fue desarrollado basado en un antiguo proyecto de Ing. automotriz [42].

La **Figura 23** muestra el diagrama de bloques en LabVIEW, y la **Figura 24** ilustra el diseño del panel de control.

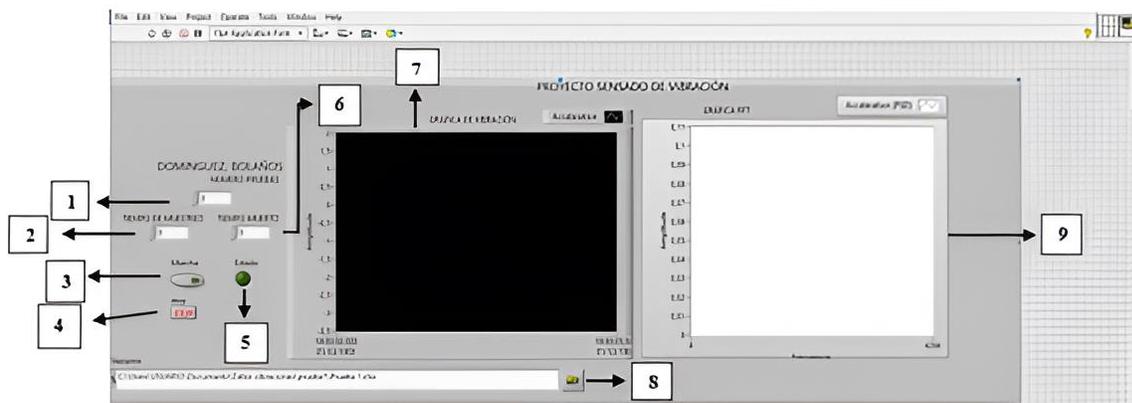
**Figura 23:**

*Diagrama de bloques en el programa LabVIEW*



**Figura 24**

*Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones*





- 1. Numero pruebas:** En este cuadro se detalla la cantidad de pruebas que el sensor llevará cabo durante el periodo de uso.
- 2. Tiempo muestreo:** Indica el tiempo (en segundos) durante el cual los sensores están activos, registrando datos sobre las vibraciones del motor.
- 3. Marcha:** Es el botón que permite iniciar el proceso de registro de la información de las vibraciones en los documentos correspondientes.
- 4. Stop:** Es el botón que se utiliza para detener la lectura de datos y finalizar el programa.
- 5. Estado:** Es un indicador tipo LED que muestra el estado de la lectura del sensor, si el foco este encendido significa que el sensor está en tiempo de muestreo, y si esta apagado el sensor se encuentra en su tiempo muerto de lectura.
- 6. Tiempo muerto:** Se refiere al periodo (en segundos) durante el cual el sensor permanecerá inactivo, es decir, no registra ningún dato específico en ese intervalo de tiempo.
- 7. Gráfica de vibración:** Se mostrará la gráfica de vibración que se esté realizando en ese momento en tiempo real.
- 8. Canal 0:** Este canal se encarga de almacenar la información proveniente del sensor horizontal.
- 9. Gráfica FFT:** Es un cuadro que muestra en tiempo real la gráfica de vibraciones obtenida a través de la FFT, donde se representan las coordenadas X (Frecuencia) y Y (Amplitud), permitiendo analizar las componentes de frecuencia de la señal de vibración.

### ***3.2.5 Procesamiento de datos***

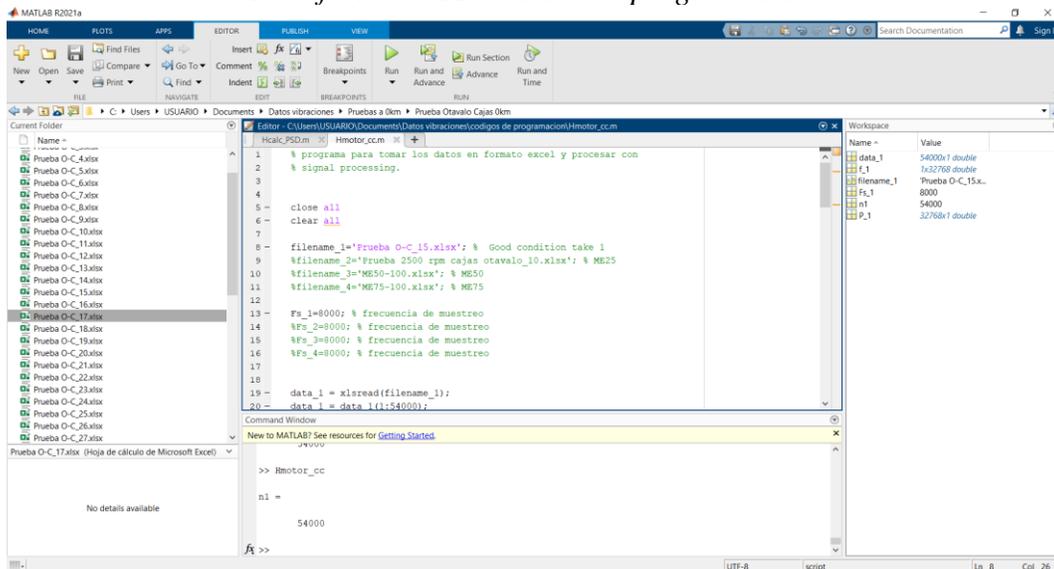
Para realizar el procesamiento de los datos obtenidos, se utilizará la plataforma MATLAB, que permitirá generar representaciones gráficas que faciliten la visualización de las variaciones en amplitud y frecuencia de las señales de vibración. Este proceso se llevará a cabo mediante un script de programación que importará los datos desde archivos Excel. Los datos se generarán en la tarjeta de adquisición de señales de forma cronológica y serán enviados directamente a la computadora



en formato Excel. Posteriormente, estos datos se transferirán a MATLAB mediante el script de programación para realizar el análisis correspondiente y generar las gráficas necesarias, con el fin de obtener los resultados esperados en cuanto a las características vibracionales del motor.

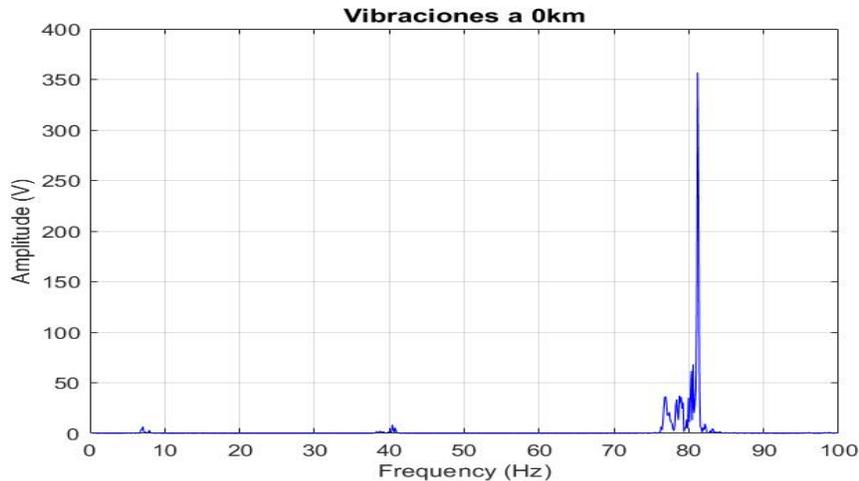
En la **Figura 25** se presenta la interfaz de la plataforma MATLAB, destacando la estructura del entorno de programación empleado para obtener los diferentes resultados del análisis. Asimismo, en la **Figura 26** se ilustra un ejemplo de las gráficas generadas mediante esta programación.

**Figura 25:**  
*Plataforma de Matlab con su programación*





**Figura 26:**  
*Gráfica de datos de vibración*



Para el análisis de vibraciones del motor diésel, se implementaron diferentes modelos de entrenamiento con el objetivo de identificar la relación entre los armónicos y la eficiencia. Estos modelos fueron desarrollados en MATLAB, donde se evaluaron múltiples configuraciones para determinar cuáles armónicos proporcionaron los resultados más precisos y representativos.

El proceso consistió en entrenar diversos modelos y comparar su desempeño en función de la eficiencia obtenida. A partir de estos resultados, se seleccionaron los armónicos más relevantes para el estudio. A continuación, se detallan los modelos utilizados:

1. Árbol fino
2. Árbol mediano
3. Árbol grueso
4. Discriminante lineal
5. Discriminante cuadrática
6. Bayas ingenuas gaussianas
7. Kernel Naive Bayes
8. SVM lineal
9. SVM cuadrática
10. SVM cúbica
11. SVM gaussiana fina
12. SVM gaussiana media
13. SVM gaussiana gruesa



14. KNN fino
15. KNN medio
16. KNN grueso
17. KNN coseno
18. KNN cúbico
19. KNN ponderado
20. Árboles potenciados
21. Árboles en bolsa
22. Discriminante subespacial
23. KNN subespacial
24. Árboles potenciados RUS
25. Red neuronal estrecha
26. Red neuronal media
27. Red neuronal ancha
28. Red neuronal de dos capas
29. Red neuronal de tres capas

### ***3.2.6 Pruebas piloto***

#### **3.2.6.1 Prueba 5000-6000 km**

Esta prueba inicial permitirá observar la amplitud y frecuencia de las vibraciones en condiciones específicas, proporcionando datos claves para identificar qué opción es la correcta previo a las pruebas reales. Los resultados de esta prueba, junto con otra a los 6000 km, serán comparados para identificar la amplitud y frecuencia más representativa y útil para el estudio final. Esta evaluación preliminar es fundamental para garantizar que el análisis definitivo se base en datos de alta calidad y relevancia.

**Paso 1:** Instalación del sensor en el lugar mencionado.

**Paso 2:** Conectar el sensor en el puerto 0 de la tarjeta de adquisición con el cable BNC/SMW

**Paso 3:** Conectar la tarjeta de adquisición al pc por medio de cable USB y ejecutar la aplicación LabVIEW para posterior verificar que el software reconoce el sensor que está conectado.

**Paso 4:** Configurar las diferentes partes del panel de muestreo de vibraciones (Número de pruebas, tiempo de muestreo y tiempo muerto).



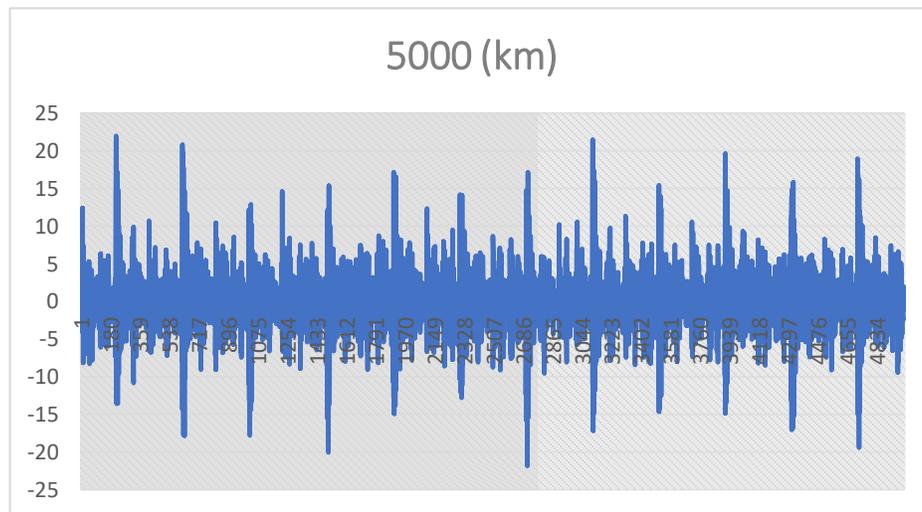
**Paso 5:** Configurar la carpeta y el documento Excel en el que necesitaremos que se guarden las respectivas pruebas que tendremos a lo largo del tiempo

**Paso 6:** Arrancar el motor, esto se debe hacer antes de comenzar a ejecutar el programa porque pueden existir fallas.

**Paso 7:** Ejecutar el programa que se desarrolló en LabVIEW y observar las gráficas de oscilaciones de las vibraciones en tiempo real.

A partir del archivo XLSX generado por LabVIEW, se obtuvieron diferentes gráficas que representan las oscilaciones registradas durante todo el tiempo de prueba. **La Figura 27** muestra los resultados de las pruebas realizadas en ruta, ejecutadas a un régimen constante de 2500 RPM, específicamente después de 5000 km de operación. Estas gráficas permiten analizar las características de las vibraciones.

**Figura 27:**  
*Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 5000km en EXCEL*

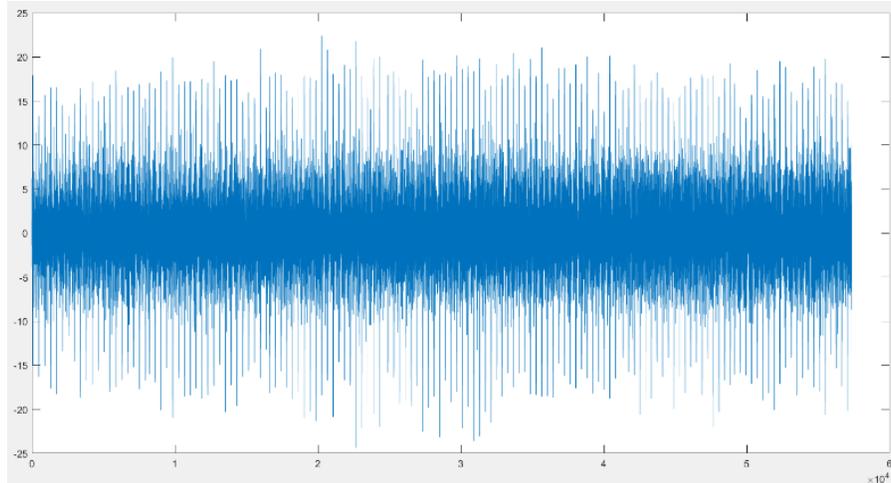


Con el archivo XLSX generado por el programa LabVIEW, se pueden importar los datos al software MATLAB para obtener gráficos más detallados y con mayor precisión. Este proceso permite un análisis más profundo de las vibraciones del motor. **La Figura 28** muestra los



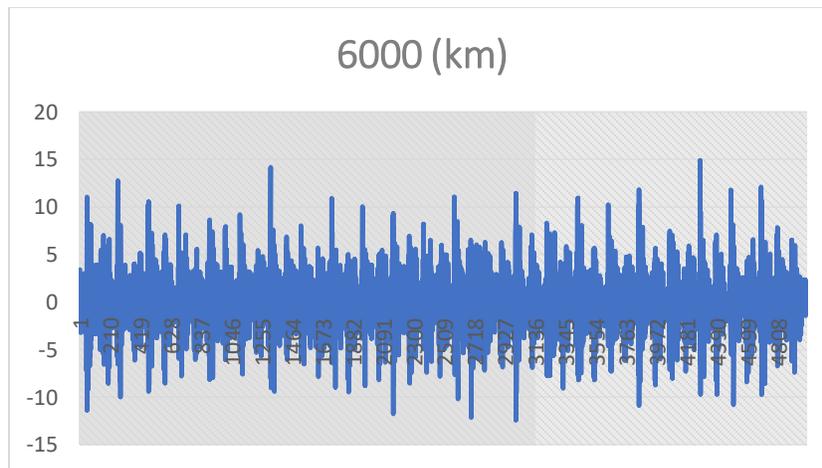
resultados de las pruebas realizadas en ruta, operando el motor a un régimen constante de 2500 RPM, después de 5000 km de recorrido en Matlab.

**Figura 28:**  
*Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 5000km en MATLAB*



La **Figura 29** muestra los resultados de las pruebas realizadas en ruta, ejecutadas a un régimen constante de 2500 RPM, específicamente después de 6000 km de operación.

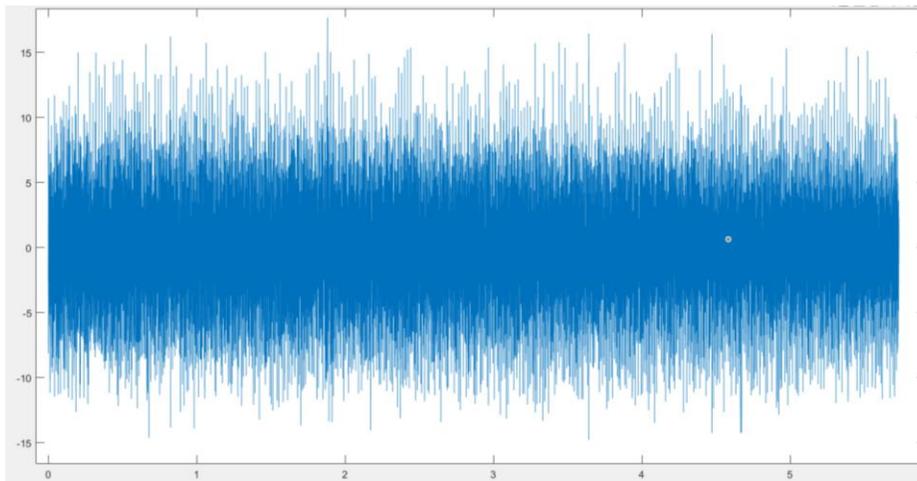
**Figura 29:**  
*Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 6000km en EXCEL*





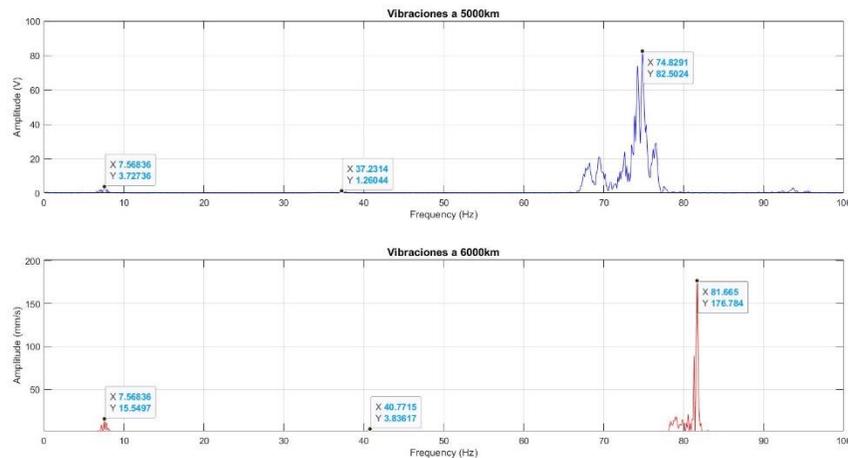
La **Figura 30** muestra los resultados de las pruebas realizadas en ruta, operando el motor a un régimen constante de 2500 RPM, después de 6000 km de recorrido en Matlab.

**Figura 30:**  
*Señal de vibración en ruta a 2500rpm – 6000km en MATLAB*



La **Figura 31** muestra cómo será la diferencia entre las pruebas piloto con una diferencia de 1000km teniendo en cuenta que la de color azul es de 5000km y la de color rojo de 6000km.

**Figura 31:**  
*Comparación pruebas piloto*





**Tabla 21:**

*Valores obtenidos a partir de pruebas piloto para adquisición de datos*

<b>Tipo prueba</b>	<b>Señal de vibración</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Frecuencia</b>
<b>5000 km</b>	Sensor 0	82.5	74.82
<b>6000 km</b>	Sensor 0	176.78	81.66

Con la obtención de los datos mostrados se concluye que la opción 3 es seleccionada como la mejor alternativa para el análisis final, ya que requiere un menor número de pruebas y presenta una variación notable en la amplitud de las vibraciones. Esta opción no solo optimiza los recursos y el tiempo de recolección de datos, sino que también proporciona resultados más claros y representativos de las condiciones de operación del motor. Esta elección asegura un análisis vibratorio detallado y confiable, facilitando la interpretación de los cambios en la vida útil del aceite.

### ***3.2.7 Recopilación de Datos***

Para la recopilación de datos, se utilizó principalmente Excel como herramienta de tabulación. Se registraron los valores de los armónicos más prominentes identificados en los gráficos generados en Matlab tras aplicar la TF. Se consideraron aquellos armónicos cuya amplitud se encontraba en un rango de 20 a 180, mientras que la frecuencia mostró mínima variación, ya que cada armónico se mantuvo dentro de sus valores iniciales.

A continuación, se presentan en la **Tabla 22** y **Tabla 23** ejemplos de la hoja de cálculo utilizada para organizar los datos, la cual sirvió como base para la simulación y posterior análisis.



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



**Tabla 22:**

*Ejemplo de recopilación de amplitudes*

<b>Prueba 1</b>	<b>Amplitud</b>			
<b>Muestra</b>	Armónico	1	2	3
<b>15</b>	Ensayo a condiciones de carga	7.88	2.75	39.84
<b>22</b>		10.57	2.47	96.04
<b>25</b>		6.1	2.43	135.51
<b>28</b>		3.8	3.36	32.27
<b>33</b>		9.91	1.23	29.58
<b>35</b>		13.16	1.95	41.81
<b>36</b>		6.18	1.75	34.93
<b>38</b>		11.79	2.14	46.31
<b>41</b>		11.86	2.34	34.7
		<b>Promedio</b>	10.16	2.55
	<b>Desviación</b>	2.70	0.45	27.21

**Tabla 23:**

*Ejemplo de recopilación de frecuencias*

<b>Prueba 1</b>	<b>Amplitud</b>			
<b>Muestra</b>	Armónico	1	2	3
<b>15</b>	Ensayo a condiciones de carga	7.44	38.2	77.02
<b>22</b>		7.56	40.52	82.03
<b>25</b>		7.69	41.13	81.42
<b>28</b>		7.32	38.57	76.17
<b>33</b>		7.69	40.4	79.71
<b>35</b>		7.56	38.08	76.53
<b>36</b>		7.32	36.62	71.65
<b>38</b>		7.2	37.71	75.07
<b>41</b>		7.2	39.06	78.73
		<b>Promedio</b>	8.37	43.79
	<b>Desviación</b>	0.16	1.21	2.56



Al finalizar la recopilación de datos de frecuencia y amplitud, junto con sus respectivos armónicos en cada situación de falla, se presentan valores obtenidos en una de todas las pruebas que se realizaron, teniendo promedios y desviación. En el siguiente capítulo, se analizará y discutirá estos resultados con más detalle obteniendo tablas y gráficas que representen a cada prueba, considerando el comportamiento vibratorio del motor.

### **3.2.8 Aprendizaje automático**

Este aprendizaje automático o más conocido como Machine Learning se basa en una rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender de los datos sin ser programados explícitamente.

En el contexto del análisis vibratorio de motores diésel, esta tecnología es útil para detectar patrones en los datos obtenidos a partir de sensores de vibración y análisis de aceite, con el fin de predecir fallas y estimar la vida útil del lubricante, para este estudio, se propone la aplicación de modelos de aprendizaje supervisado que permitan correlacionar las señales de vibración con el estado del aceite del motor. Mediante el procesamiento de datos obtenidos con sensores de vibración y software especializado (LabVIEW y MATLAB), se pueden extraer características clave de las señales para alimentar modelos predictivos.

Para implementar este aprendizaje nos basamos en los siguientes pasos:

1. **Adquisición de datos:** Se recopilan todos los datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a lo largo del estudio que en este caso adquirimos la cantidad de 2000 documentos Excel cada uno con 54 mil pruebas con un tiempo de 8 milisegundos por cada prueba.
2. **Preprocesamiento de datos:** Se filtran señales necesarias y se extraen características relevantes mediante la TF y el análisis espectral para posterior a esto poder realizar los siguientes pasos es decir tener listas todas las pruebas.



3. **Entrenamiento del modelo:** Se utilizan algoritmos como Random Forest, Suport Vector, entre otros para poder verificar con qué algoritmo es más eficiente realizar el entrenamiento para obtener valores correctos y de mejor manera.
4. **Validación y evaluación:** Se comparan los resultados obtenidos con datos de prueba para medir la precisión del modelo y su aplicabilidad en mantenimiento predictivo, tomando en cuenta que para hacer la validación se debe excluir los primeros 10 valores, así como también los 10 últimos ya que estos tendrán valores incorrectos y no se podrá dar una buena verificación.
5. **Implementación y optimización:** Se ajusta el modelo para mejorar la precisión de las predicciones y su integración en sistemas de monitoreo del motor dando recomendaciones de como poder obtener mejores datos en las pruebas y todo lo que se debe tener para hacerlas, como el estado del motor, combustible usado, aceite usado, filtros de aceite, aire y combustible.

### ***3.2.9. Análisis de aceite***

El análisis de aceite permite evaluar el estado del lubricante tras un determinado periodo de operación, proporcionando información valiosa sobre el desgaste de los componentes internos del motor y la presencia de contaminantes. Este análisis se llevará a cabo en el laboratorio IASA, ubicado en la ciudad de Guayaquil. El estudio se centrará en comparar el comportamiento vibracional del motor utilizando un aceite con un recorrido de 6000 km, con el objetivo de identificar posibles variaciones en la respuesta dinámica del sistema asociadas a la degradación del lubricante.

El análisis de aceite se basó en varias secciones para la comprobación del estado del aceite, estas son:

- Niveles de desgaste
- Contaminación
- Limpieza



### 3.2.9.1 Niveles de desgaste

En esta sección del análisis de aceite, se realizará un estudio elemental orientado a la verificación de los niveles máximos permitidos según la normativa ASTM D5185 (petróleo) vigente. Este análisis busca identificar la presencia y concentración de ciertos metales de desgaste que actúan como indicadores del estado del motor y del aceite. Entre los elementos evaluados se incluyen componentes metálicos comúnmente asociados al desgaste interno del motor. **La Tabla 24**, presenta los metales de desgaste en aceites.

**Tabla 24:**  
Metales de desgaste

<b>Cu</b>	Desgaste en bujes, protectores de inyectores, tubo de núcleo de refrigerante, arandelas de empuje, guías de válvulas, bielas, anillos de pistón, cojinetes, manguitos, jaulas de cojinetes.
<b>Fe</b>	Desgaste del bloque del motor, cilindro, engranajes, camisas del cilindro, guías de válvulas, pasadores de muñequilla, anillos, árbol de levas, bomba de aceite, cigüeñal, bolas y rodillos, cojinetes.
<b>Cr</b>	Desgaste de anillos, fugas en el sistema de refrigeración, piezas cromadas en motores de aeronaves, camisas de cilindros, anillos de sellado.
<b>Al</b>	Desgaste de pistones y cojinetes, varillas de empuje, enfriador de aire, mangueras de bombas, bombas de aceite, piezas fundidas de engranajes, piezas fundidas de cajas.
<b>Pb</b>	Cojinetes, escape de combustible, cojinetes de empuje, jaulas de cojinetes, retenedores de cojinetes.
<b>Sn</b>	Fuga de anticongelante, cojinetes y revestimientos de bielas y pistones de hierro.
<b>Si</b>	Cojinetes, válvulas, revestimientos de engranajes.
<b>Na</b>	Cojinetes de pasador de muñeca en motores de ferrocarril y automóviles, bomba de lubricación con estrías trazadas en plata.
<b>Mo, Ni</b>	Desgaste en aleaciones de cojinetes y enfriadores de aceite: diversos componentes aleados con molibdenos en motores de aeronaves, anillos de pistón.
<b>Ag</b>	Intrusión de suciedad debido a materiales de sellado y filtros de aire inadecuados.
<b>Ti</b>	Diversos componentes de aleación de titanio en aeronaves.



<b>Mg</b>	Camisas de cilindros y carcasas de cajas de cambios en motores de aeronaves.
<b>Cd</b>	Aspectos.
<b>B</b>	Fuga de refrigerante en el sistema.
<b>Sb</b>	Cojinetes del cigüeñal y del árbol de levas.
<b>Zn</b>	Sellos de neopreno, tuberías galvanizadas.

### 3.2.9.2 Contaminación

Los niveles de contaminación indican la presencia de partículas externas o sustancias no deseadas en el aceite, como polvo, agua, combustible o metales. Estos contaminantes pueden afectar el rendimiento del lubricante y acelerar el desgaste de los componentes del motor.

La verificación de contaminación se distribuirá en los siguientes puntos:

- Viscosidad
- Infrarrojo (hollín, oxidación, sulfatación, nitratación)
- Agua
- Refrigerante
- Combustible

### 3.2.9.3 Limpieza

El nivel de limpieza hace referencia a la cantidad de partículas sólidas presentes en el lubricante, lo cual es un indicador clave de su calidad y capacidad para proteger los componentes del motor.

Las partículas por analizar son de los siguientes elementos:

- Magnesio
- Bario
- Boro



## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 RESULTADOS**

Se presentan resultados obtenidos a partir del análisis vibratorio del motor diésel sometido a carga, con el objetivo de evaluar la vida útil del aceite lubricante y su relación con el desgaste del motor. Para ello, se realizaron mediciones en distintas condiciones operativas, registrando variaciones en las señales de vibración a lo largo del ciclo de vida del aceite.

Los datos recopilados fueron procesados mediante herramientas especializadas como MATLAB y Excel, permitiendo extraer información clave sobre la amplitud y frecuencia de las vibraciones del motor. Se aplicó la TF para descomponer las señales en sus componentes armónicos y detectar patrones relevantes. Los resultados obtenidos revelan una correlación directa entre el deterioro del aceite y el comportamiento vibratorio del motor. A medida que el aceite se degrada se observa que existe un aumento progresivo en la amplitud de las vibraciones, lo que indica una disminución en la capacidad del lubricante para reducir fricción y disipar el calor dentro del motor. Este efecto fue más evidente en los últimos ciclos de prueba, donde los valores de vibración mostraron picos muy altos a comparación con los iniciales que era cuando el aceite estaba nuevo.

Los gráficos obtenidos muestran la evolución de la señal vibratoria en función del kilometraje recorrido y el estado del aceite. Se identificaron patrones repetitivos en la vibración del motor, lo que sugiere que el análisis vibratorio puede ser una herramienta efectiva para predecir el momento óptimo para el cambio de aceite y prevenir fallos mecánicos.

Es importante señalar que las pruebas que se realizaron fueron en ruta como se puede expresar en el **Tabla 25** dando en este todas las condiciones a las que se sometió el motor para realizar las respectivas pruebas teniendo en cuenta que se realizó en las mismas condiciones solo que el



cambio fue en el estado del aceite teniendo en cuenta que se hacía desde que estaba nuevo el aceite hasta que se tenía que cambiar, dando 5 tipos de pruebas a lo largo de la vida útil del aceite en ese motor.

**Tabla 25:**  
*Distribución de pruebas*

<b>PRUEBA</b>	<b>KILOMETRAJE</b>
<b>Prueba 1</b>	0KM
<b>Prueba 2</b>	3000KM
<b>Prueba 3</b>	5500KM
<b>Prueba 4</b>	5800KM
<b>Prueba 5</b>	6000KM

## **4.2 ESPECTROS PRUEBAS MOTOR**

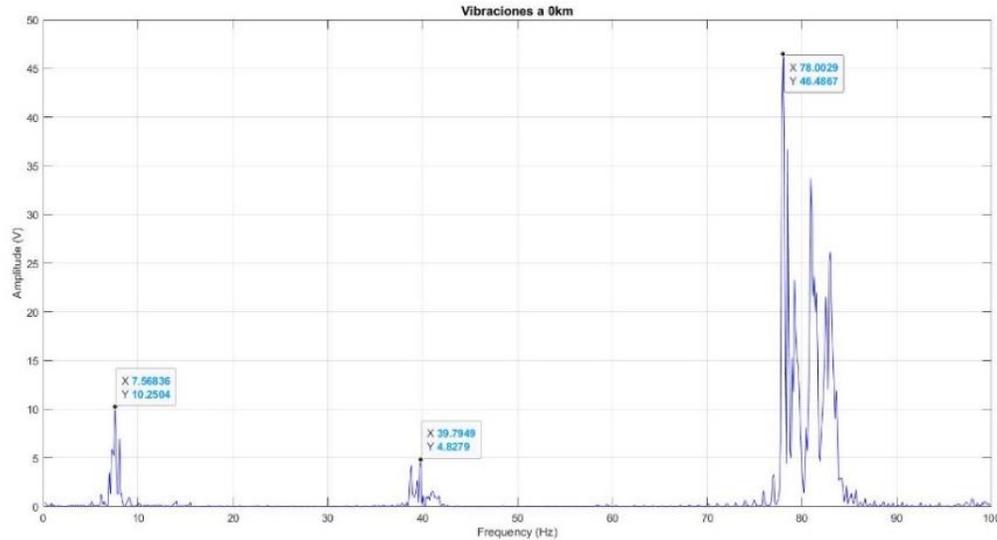
### **4.2.1 Espectro Prueba 0KM**

En la **Figura 32** se muestra los valores que se tendrá en las pruebas de vibración teniendo un aceite nuevo en el motor es decir a 0km, en esta figura se muestra los tres armónicos en el que el mayor de estos será el tercero y alcanzará una amplitud de 25.66. Se puede notar que en la Frecuencia la diferencia entre los tres armónicos será de 30 del primero con el segundo y de 40 del segundo con el tercero.

La grafica que se muestra es de la prueba número 17 de la ruta de Otavalo-Cajas, nos permite analizar los valores obtenidos durante la prueba, los cuales son bajos debido a que el aceite es nuevo. El aceite hace que las vibraciones del motor se mantengan en niveles bajos, lo que indica que el motor está funcionando de manera óptima en esta etapa del análisis.



Figura 32:  
*Espectro del motor en prueba a 0km*

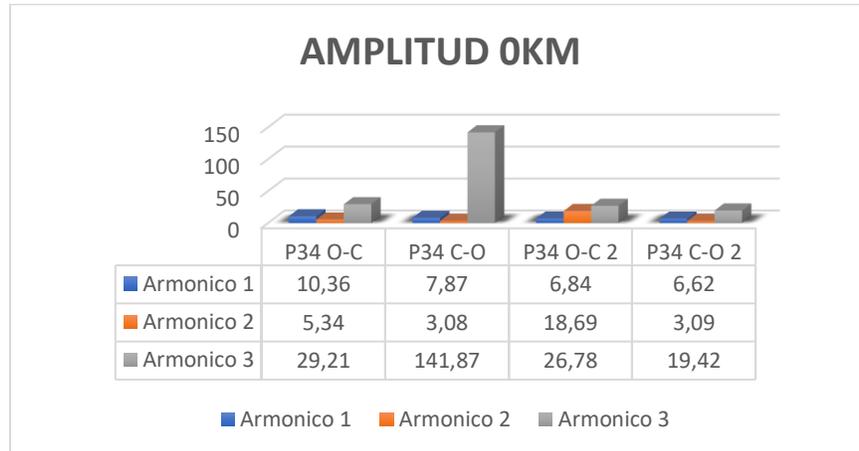


En la **Figura 33** muestra la amplitud de vibraciones de diferentes condiciones de medición, analizando los tres armónicos ARM1, ARM2 y ARM3. Se observa que el ARM3 presenta la mayor amplitud en referencia a los dos armónicos más donde alcanza un valor máximo de 141.87, lo que sugiere un fenómeno de resonancia o que existan intervenciones de factores externos como la carretera, cambio de marcha brusca, así como también aumentar la revolución es decir estar en un valor más alto que el de la prueba.

En comparación, el ARM1 y ARM2 tiene valores significativamente menores, indicando que la vibración dominante se da en el ARM3.



**Figura 33:**  
*Amplitud prueba 34 a 0km*

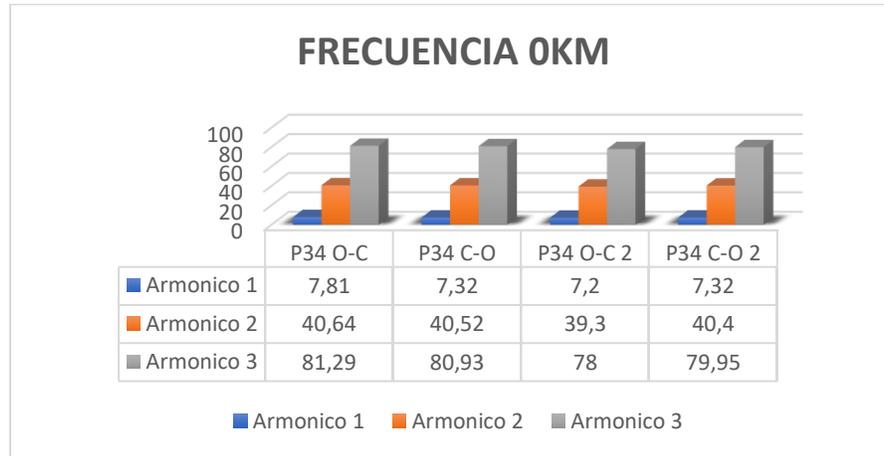


La **Figura 34** muestra los valores de frecuencia en diferentes condiciones de prueba, se observa al ARM3 que presenta las frecuencias más altas, con valores cercanos a 80 en todas las condiciones mostradas, lo que indica que será el componente predominante en la señal de vibración. El ARM2 mantiene valores alrededor de 40, mientras que el ARM1 muestra frecuencias más bajas teniendo un rango de 7-8.

La consistencia en los valores sugiere un comportamiento estable de los armónicos bajo estas condiciones operativas, lo que es relevante para la identificación de patrones de vibración y posibles anomalías en el motor.



**Figura 34:**  
*Frecuencia prueba 34 a 0km*



#### **4.2.2 Espectro Prueba 3000KM**

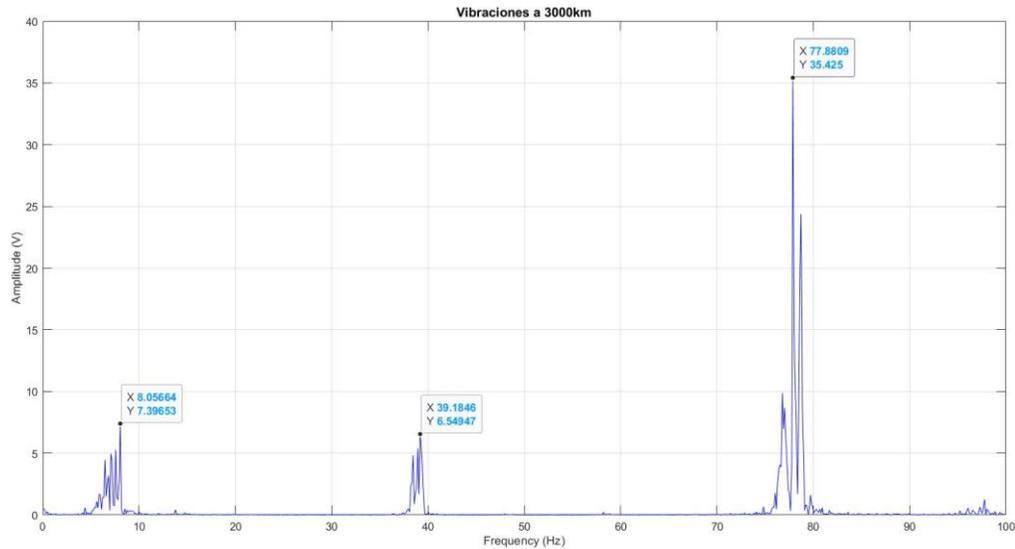
En la **Figura 35** se muestra los diferentes picos que se tendrán, estos se los llamara ARM1, ARM2 y ARM3.

En el primer pico que es el ARM1 con una frecuencia de 8.05 y una amplitud de 7.39, puede indicar una vibración de baja frecuencia asociada a una estabilidad en el motor. El pico dos o ARM2 con una frecuencia de 39.18 y una amplitud de 6.95, posiblemente se relaciona a un armónico superior al anterior por una fuente de vibración más grande que se da en el motor. Por último, el ARM3 con una frecuencia de 77.88 y una amplitud de 35.42, dando como comparación a los otros armónicos se da que es una frecuencia dominante que depende del funcionamiento del motor y su ciclo de funcionamiento ya que estos valores de vibraciones aumentaran constantemente siendo el ARM1 el menor y el ARM3 el mayor.

La grafica que se muestra es de la prueba número 23 de la ruta de Otavalo-Cajas segunda vuelta, esto nos permite observar de cómo serán los valores que tendremos en esta prueba serán un poco más altos que los de 0km, no tendrán una diferencia muy amplia teniendo en cuenta que el aceite ya está a la mitad de su vida útil.



**Figura 35:**  
*Espectro del motor en prueba a 3000km*

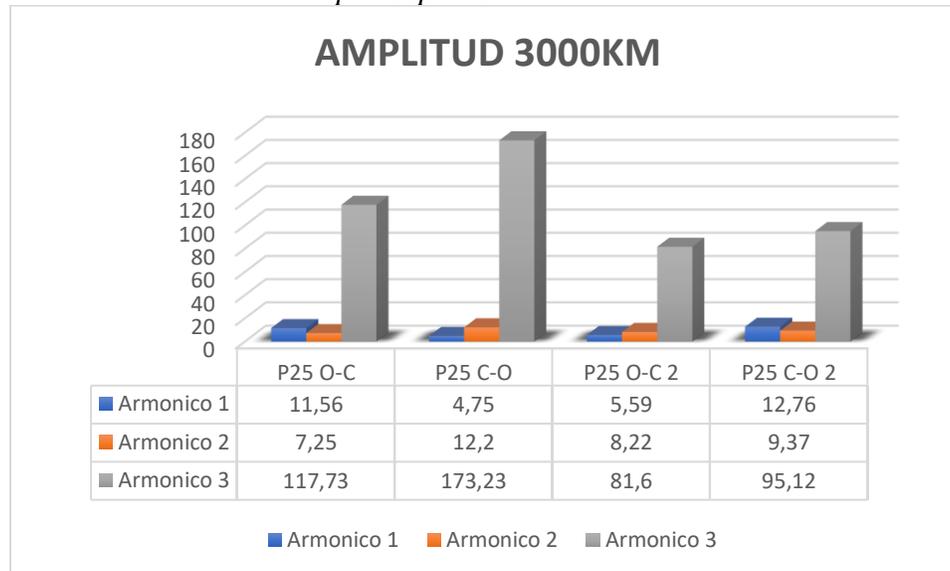


En la **Figura 36** se observa que existe una diferencia que no se excede entre las 4 pruebas que entre los armónicos 1 y 2, los valores no exceden de 12.2 y se mantienen en ese rango que esta entre 4 a 13 que así será en las 4 pruebas en los dos primeros armónicos, cuando se habla del armónico 3 se puede notar que en la prueba 2 hay un pico muy alto que es de 173.23 y los picos de las otras pruebas se encuentran en el rango entre 80 a 117, el pico de la prueba 2 se puede dar por varios motivos como se explicó en la anterior figura de amplitud que son por factores externos, cambios de marcha o revoluciones más altas a las que se hace la prueba.



**Figura 36:**

*Amplitud prueba 25 a 3000km*

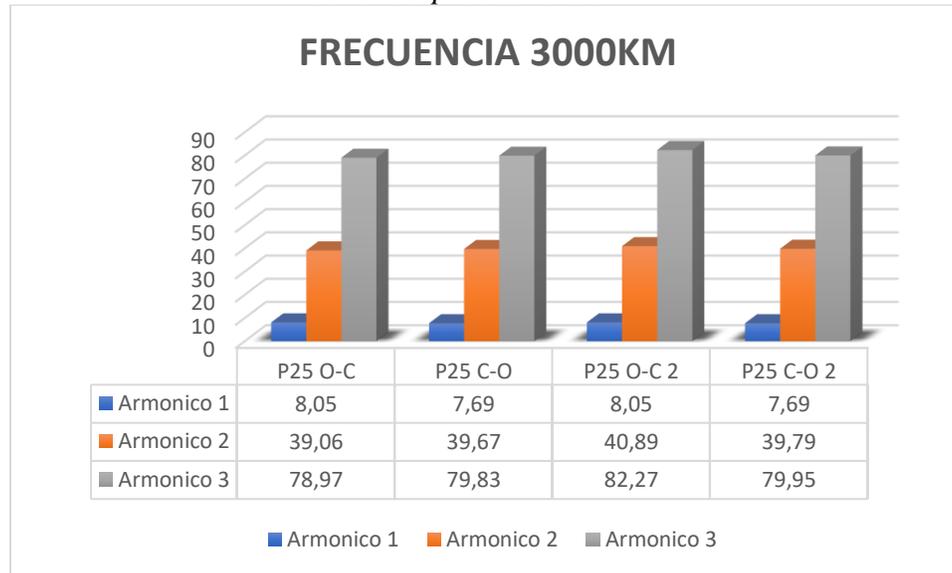


La **Figura 37** muestra variaciones mínimas en cada prueba, manteniendo constantes los valores de los armónicos. Se observa una progresión clara, donde el ARM1 presenta la frecuencia más baja y el ARM3 la más alta. En detalle, el ARM1 oscila entre 7-8, e ARM2 oscila entre 39-41 y el ARM3 se encuentra oscilando entre 78-83.

Los resultados mostrados son sólidos y coherentes, demostrando que el motor opera de manera correcta y estable en sus frecuencias, la consistencia en los valores de cada armónico indica que la frecuencia no varía con un rango significativo más bien se encuentran en valores cercanos teniendo una diferencia entre cada armónico que este no cambiara.



**Figura 37:**  
*Frecuencia prueba 25 a 3000km*



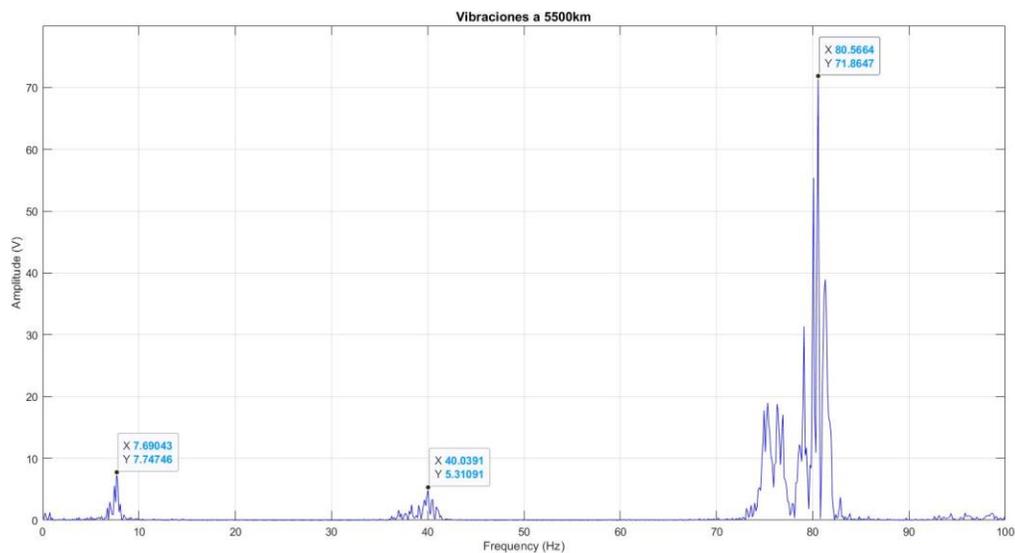
### 4.2.3 Espectro Prueba 5500KM

En la **Figura 48** se muestra los valores que se tendrá en las pruebas de vibración teniendo un aceite que tendrá un recorrido de 5500km, se muestra los tres armónicos en el que el mayor de estos será el ARM3 y alcanzará una amplitud de 71.86. Se puede notar que en la Frecuencia la diferencia entre los tres armónicos será de 30 del ARM1 con el ARM2 y de 40 del ARM2 con el ARM3.

La grafica que se muestra es de la prueba número 20 de la ruta de Cajas-Otavallo primera vuelta, esto nos permite observar que los valores siguen subiendo según va subiendo el recorrido, pero como se ha mencionado en donde más se va a ver la diferencia siempre será en la amplitud ya que en la frecuencia no variará y será constante.



**Figura 38:**  
*Espectro del motor en prueba a 5500km*



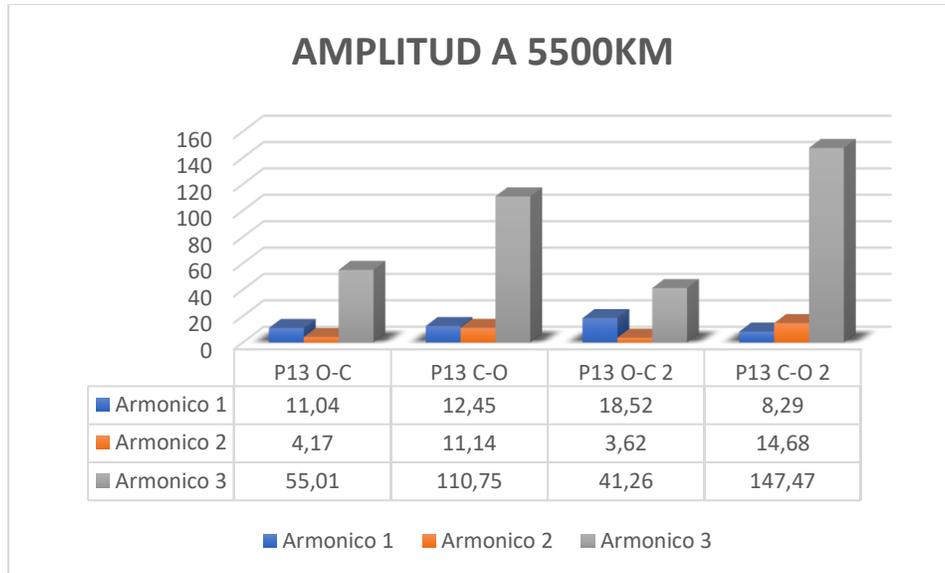
En la **Figura 39** se observa los resultados muestran que el ARM1 presenta valores relativamente bajos, con variaciones entre 8.29 y 18.52, lo que indica una fluctuación moderada en la amplitud de la vibración. En el caso del ARM2, se observan valores más estables, con una amplitud mínima de 3.62 y una máxima de 14.68, lo que sugiere una menor contribución de este armónico en la señal global de vibración del motor, por otro lado, el ARM3 presenta los valores más altos y con mayor variabilidad, oscilando entre 41.26 y 147.47, lo que evidencia una mayor intensidad de este componente en la señal vibratoria del motor. El pico más alto se registra en la prueba P13 C-O2, lo que podría estar asociado con un mayor desgaste del lubricante o cambios en la condición operativa del motor.

Estos resultados indican que la amplitud de los armónicos aumenta en ciertas condiciones, lo que puede estar vinculado con el deterioro del aceite y la presencia de irregularidades en el



funcionamiento del motor. En capítulos posteriores, se compararán estos valores con otras mediciones para determinar tendencias y evaluar el impacto en el rendimiento del motor.

**Figura 39:**  
*Amplitud prueba 13 a 5500km*

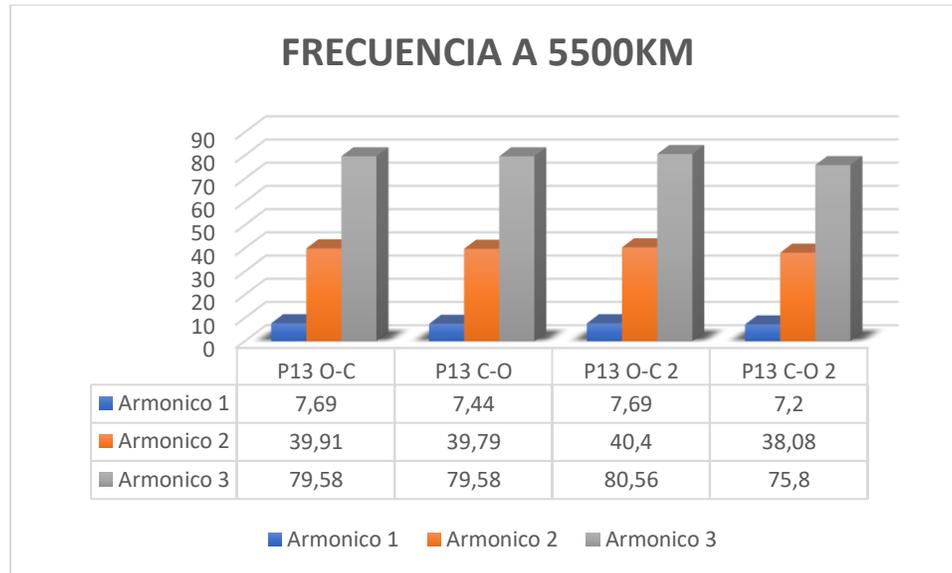


La **Figura 40** muestra los resultados que el ARM1 mantiene valores bajos y relativamente constantes, con ligeras variaciones entre 7.2 y 7.69. En contraste, el ARM2 presenta valores más altos, con un rango entre 38.08 y 40.4, reflejando una leve fluctuación en la frecuencia medida. Finalmente, el ARM3 alcanza las mayores magnitudes, con valores entre 75.8 y 80.56, lo que significa una mayor presencia de señal de vibración del motor.

Sugiere que a medida que el motor opera a mayores kilometrajes, los cambios en los armónicos de la vibración pueden estar relacionados con la degradación del aceite y el desgaste de los componentes internos.



**Figura 40:**  
*Frecuencia prueba 13 a 5500km*

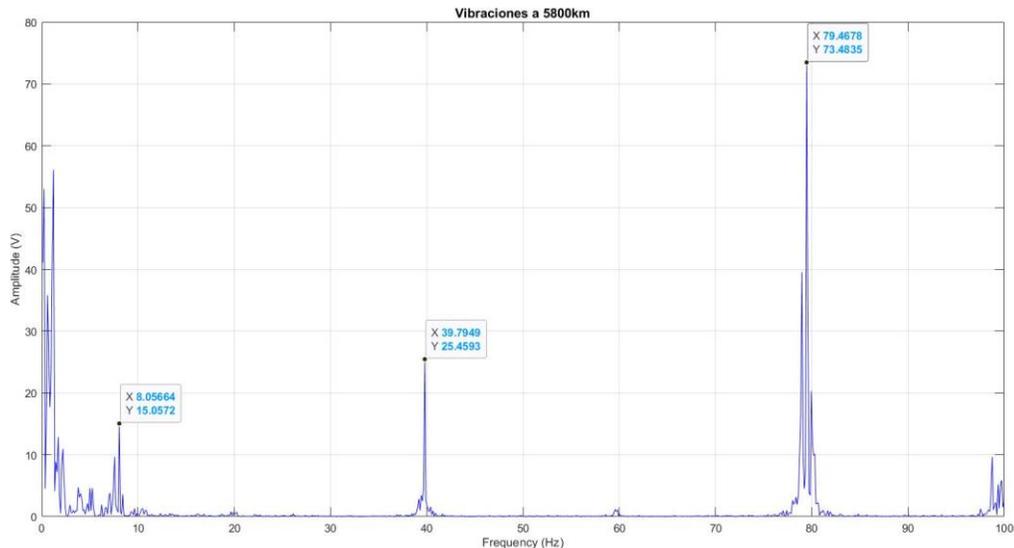


#### **4.2.4 Espectro Prueba 5800KM**

La **Figura 41** muestra un espectro de vibraciones registrado a 5800 km, revelando armónicos que indican frecuencias de vibración significativas. El ARM1, ubicado en aproximadamente 8.06 con una amplitud de 15.06, representa la frecuencia fundamental de vibración. Le sigue el ARM2 centrado en 39.79, con una amplitud de 25.46, sugiriendo un armónico de orden superior. El ARM3 es el más prominente y se encuentra en 79.47, con una amplitud de 73.48, indicando otro armónico de orden superior y la vibración más intensa registrada. Se observa una clara progresión en la amplitud de los armónicos, con el ARM1 teniendo la menor amplitud y el ARM3 la mayor, un comportamiento común en sistemas vibratorios. La claridad y definición de los armónicos sugieren una cierta estabilidad en las frecuencias de vibración. La presencia de estos picos indica posibles fuentes de vibración en el sistema analizado, el análisis de su magnitud y frecuencia puede ayudar a identificar y mitigar problemas potenciales, resaltando la influencia significativa del ARM3 en las vibraciones del sistema.



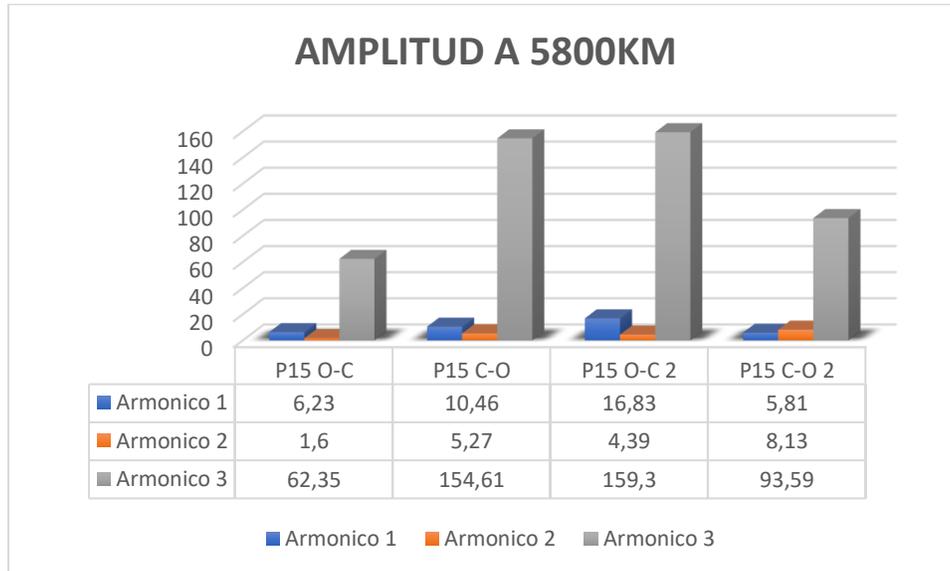
Figura 41:  
*Espectro del motor en prueba a 5800km*



La **Figura 42** presenta el resultado de las comparaciones de 4 pruebas en diferente ruta teniendo la amplitud de vibración en cada uno de los armónicos. Se observa que el ARM3 exhibe las amplitudes más elevadas en todas las configuraciones, destacando particularmente los resultados de las pruebas P15 C-O y P15 O-C2, donde los valores alcanzan niveles mayores en las dos partes que serán de 154.61 y 159.3 respectivamente, lo que se puede notar una mayor vibración en el motor por el desgaste del lubricante dando esos valores ya en dos pruebas de las cuatro presentadas, aquí se puede denotar que ya no solo es parte de factores externos como se ha venido explicando sino también del desgaste del lubricante en el motor que hace que tenga mayor fricción y produzca vibraciones más altas.



**Figura 42:**  
*Amplitud prueba 15 a 5800km*

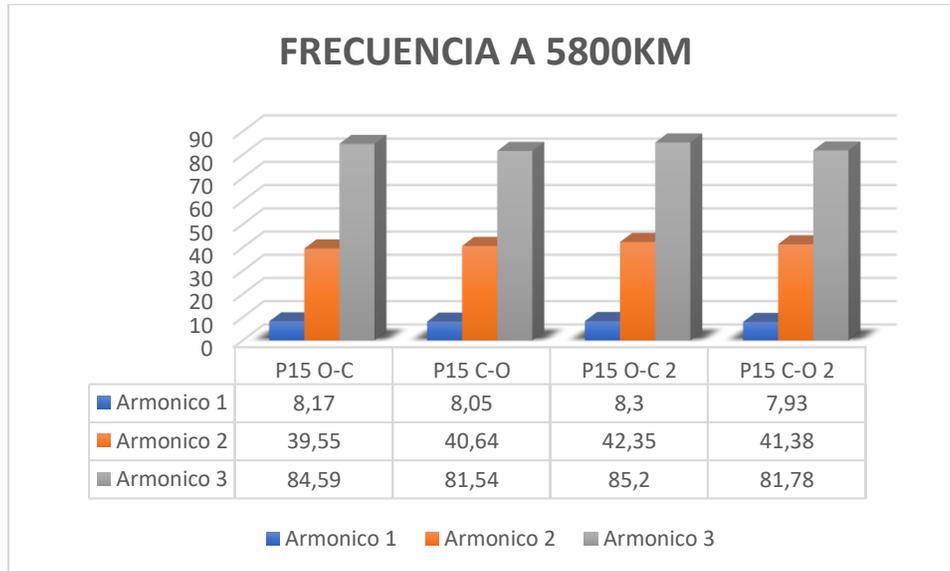


La **Figura 43** muestra los resultados que tienen los tres armónicos, manteniendo de la misma manera como se ha notado a lo largo de los diferentes resultados mostrados anteriormente. El ARM1 se mantendrá en oscilaciones ligeras entre 7.93 y 8.3, el ARM2 se mantendrá en un rango de 39.55 y 42.35, así como también el ARM3 tendrá oscilaciones que se mantendrán en el rango de 81.54 y 85.2 lo que se da a notar que se tendrá mayor presencia de señal vibratoria del motor la mayor parte en el ARM3.

Se denota que ha existido una pequeña variación en la frecuencia con referencia a los resultados obtenidos con el aceite a 0km que eran un poco más bajas, no constante la diferencia es mínima por esa razón en donde se explica de mejor manera algún daño o condición anormal del motor es en amplitud ya que la frecuencia se mantiene constante.



**Figura 43:**  
*Frecuencia prueba 15 a 5800km*



#### **4.2.5 Espectro Prueba 6000KM**

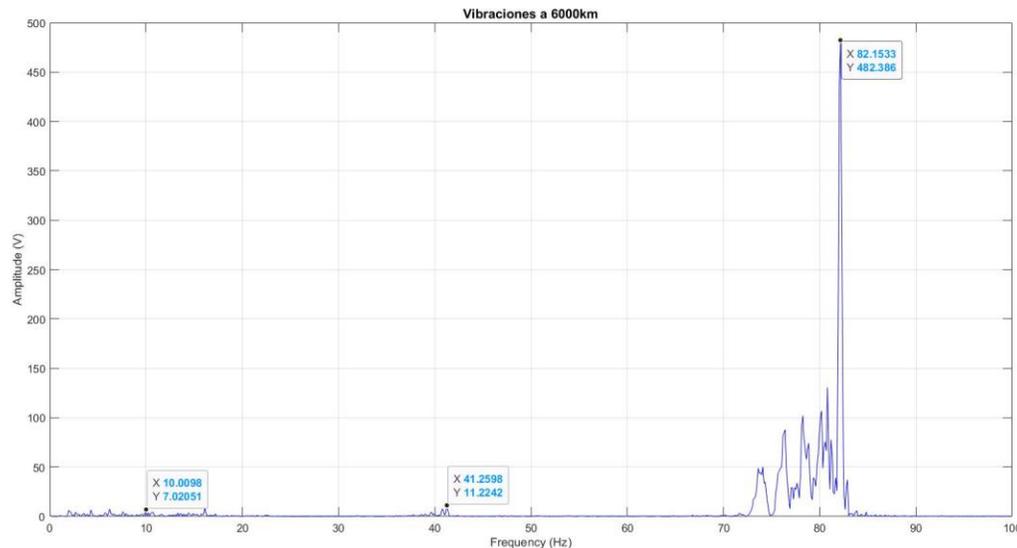
La **Figura 44** presenta un espectro de vibraciones registrado a 6000 km, revelando un patrón de frecuencias significativas que indican posibles fuentes de vibración. Se identifican tres armónicos: el ARM1, ubicado en aproximadamente 7.80 con una amplitud de 11.22, representa una frecuencia de vibración inicial. Le sigue el ARM2 en 41.25, con una amplitud de 112.24, indicando un incremento notable en la amplitud a una frecuencia superior. El punto más prominente es el ARM3 en 82.15, con una amplitud de 482.30, señalando la vibración más intensa registrada en este espectro.

Se observa un incremento significativo en la amplitud a medida que aumenta la frecuencia, especialmente notable en el pico de 82.15, lo que sugiere una posible resonancia o una fuente de vibración de alta energía en esa frecuencia. La nitidez de los armónicos en el espectro indica una estabilidad relativa en las frecuencias de vibración, lo que facilita su análisis y diagnóstico. La marcada diferencia en las amplitudes entre los armónicos indica la presencia de múltiples fuentes de vibración o la amplificación de ciertas frecuencias a través del sistema.



El análisis de la magnitud y frecuencia de estos armónicos es crucial para identificar y mitigar problemas potenciales en el sistema analizado. Este espectro, al igual que el anterior, proporciona información valiosa para el mantenimiento predictivo y la optimización del sistema, subrayando la importancia de monitorear y analizar las vibraciones a diferentes distancias.

**Figura 44:**  
*Espectro del motor en prueba a 6000km*



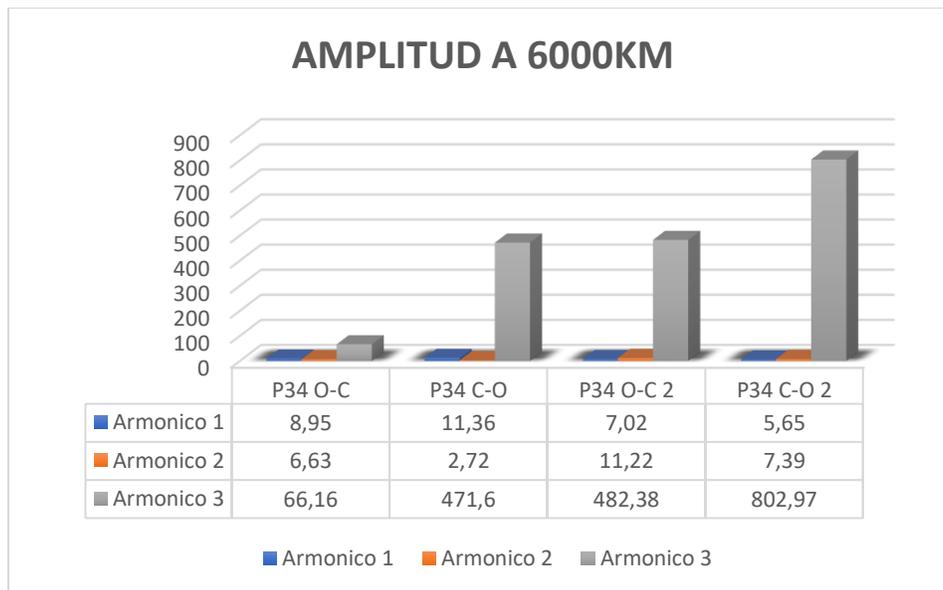
La **Figura 45** presenta los resultados de la comparación de cuatro configuraciones de prueba a una distancia de 6000 km, mostrando la amplitud de vibración en cada uno de los armónicos. Se observa ARM3 exhibe las amplitudes más elevadas en todas las configuraciones, destacando particularmente los resultados de las pruebas P34 C-O, P34 O-C 2 y P34 C-O 2, donde los valores alcanzan niveles significativamente mayores en comparación con P34 O-C. Los valores específicos son 471.6, 482.38 y 802.97 respectivamente, lo que sugiere una mayor vibración en el motor en estas tres configuraciones.

Este incremento notable en la amplitud del ARM3, especialmente en P34 C-O 2, podría indicar un desgaste significativo del lubricante, resultando en mayor fricción y, por ende, vibraciones más altas. A diferencia de P34 O-C, donde la amplitud del ARM3 es considerablemente menor con un



valor de 66.16, las otras tres configuraciones muestran un patrón consistente de alta vibración, lo que sugiere que el problema no se limita a factores externos, sino que también involucra el desgaste del lubricante.

**Figura 45:**  
*Amplitud prueba 34 a 6000km*



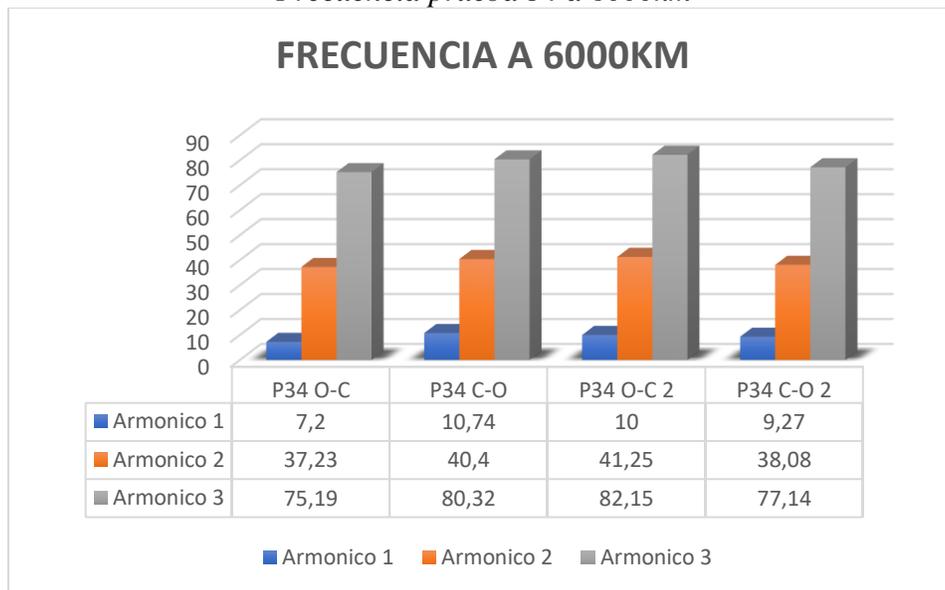
La **Figura 46** presenta los resultados de la frecuencia de vibración para la prueba 34 a 6000 km, comparando cuatro configuraciones distintas y sus tres armónicos. Al igual que en análisis previos, se observa que el ARM3 presenta las frecuencias más elevadas en todas las configuraciones. El ARM1 se mantiene con frecuencias bajas, oscilando entre 7.2 y 10.74. El ARM2 también muestra frecuencias bajas, variando entre 37.23 y 41.25. En contraste, el ARM3 exhibe un rango de frecuencias mucho mayor, desde 75.19 en P15 O-C hasta 82.15 en P15 O-C 2, lo que indica una presencia significativa de vibración en esta frecuencia.

Se denota una ligera variación en la frecuencia del ARM3 entre las configuraciones, lo que sugiere que las frecuencias de vibración se mantienen relativamente constantes a lo largo de las diferentes pruebas. Esto respalda la observación de que la amplitud, más que la frecuencia, es el



indicador clave de cambios en el estado del sistema. La estabilidad de las frecuencias indica que la fuente de vibración se mantiene constante, mientras que las variaciones en amplitud sugieren cambios en la intensidad de la vibración, posiblemente debido al desgaste del lubricante o a problemas mecánicos.

**Figura 46:**  
*Frecuencia prueba 34 a 6000km*



El análisis de vibraciones realizado reveló cambios significativos en la amplitud a medida que aumentaba el kilometraje. Se observó un incremento notable desde valores bajos a 0 km hasta valores elevados a 6000 km, punto considerado como el fin de la vida útil recomendada del aceite en este motor. Esto subraya la importancia del cambio de aceite para prevenir daños.

En contraste, la frecuencia de las vibraciones mostró una estabilidad notable a lo largo del kilometraje, con el ARM1 siendo el más bajo y el ARM3 el más alto, manteniendo rangos similares en todas las mediciones.

Es crucial considerar que la vida útil del lubricante varía según el fabricante, la marca y el tipo de aceite. Aunque algunos recomiendan cambios a 5000 km o 7000 km, este análisis, utilizando un lubricante recomendado para 6000 km, demostró que el aceite mantiene su rendimiento hasta esta distancia.



### 4.3 ANÁLISIS ARMÓNICOS

#### 4.3.1 ARMÓNICOS I-II-III

En el presente estudio, se establecieron diferentes estados para representar los intervalos de kilometraje como se presenta en la **Tabla 26**. Estos estados permiten identificar y analizar la evolución de las vibraciones del motor en función del desgaste del aceite. Cada estado corresponde a un punto específico del ciclo de vida del lubricante, abarcando desde su estado inicial (aceite nuevo) hasta su estado final antes del cambio.

En la etapa inicial de las pruebas, se tomaron en cuenta los armónicos I, II y III, como se puede identificar en la **Tabla 27**, debido a la presencia de diferentes picos en las gráficas de vibración. Estos picos indicaban variaciones en la respuesta del motor bajo carga, lo que hacía necesario analizar cada armónico para determinar su relevancia en la evaluación de la vida útil del aceite.

**Tabla 26:**

*Relación estado - km*

Estado	Kilometraje (km)
<b>0</b>	0
<b>0.5</b>	5000
<b>0.9</b>	5500
<b>0.95</b>	5600
<b>1</b>	6000

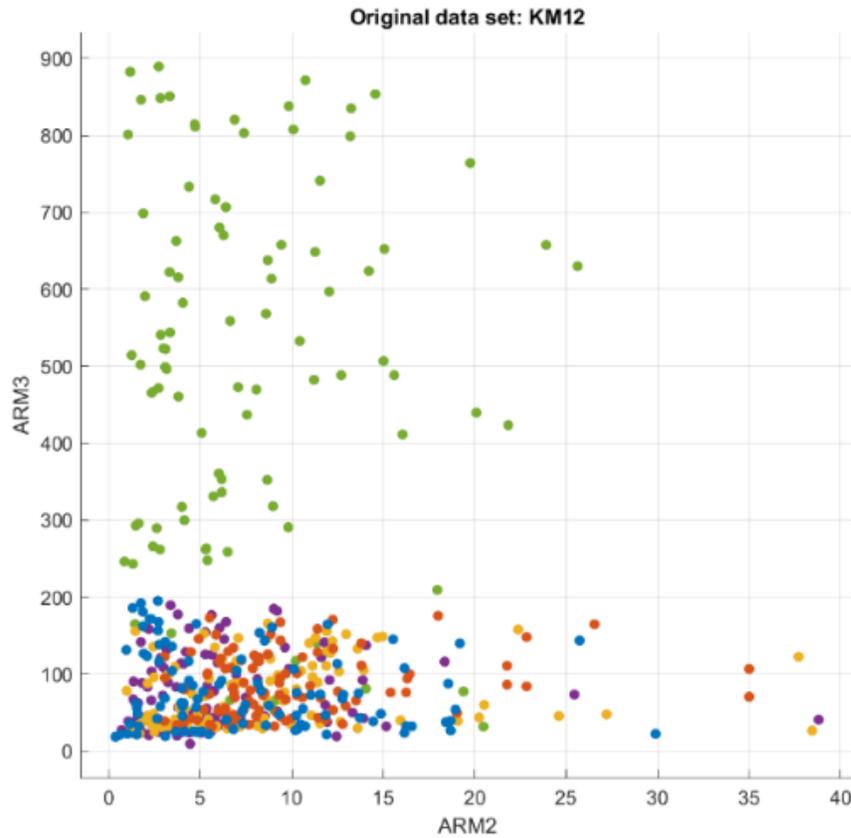
**Tabla 27:**

*Tabla armónicos I, II, III*

ARM1	ARM2	AMR3	ESTADO
<b>5,07</b>	8,78	25,66	0
<b>6,79</b>	4,08	35,46	0,5
<b>4,36</b>	1,72	35,18	0,9
<b>2,66</b>	2,04	40,52	0,95
<b>6,39</b>	3,67	32,12	1



**Figura 47:**  
*Diagrama de dispersión armónicos I, II, III*



**Tabla 28:**  
*Resultados tabla armónicos I, II, III*

Resultados de entrenamiento	
<b>Precisión (Validación)</b>	46,2 %
<b>Costo total (Validación)</b>	269
<b>Velocidad de predicción</b>	4800 observaciones/seg
<b>Tiempo de entrenamiento</b>	2.3871 s



Tipo de modelo	
<b>Preestablecido</b>	Arboles potenciados
<b>Método de conjunto</b>	AdaBoost
<b>Tipo de alumno</b>	Árbol de decisión
<b>Número máximo de divisiones</b>	20
<b>Taza de aprendizaje</b>	0.1

En los armónicos I, II y III, se obtuvo una eficiencia del 46.2%, Datos presentados en la **Tabla 28**. Sin embargo, este valor no es suficiente para los requerimientos de nuestra investigación. Por esta razón, se decidió descartar el análisis del armónico I y enfocar el estudio únicamente en los armónicos II y III.

### **4.3.2 ARMÓNICOS II-III**

En este estudio, se implementó un modelo de aprendizaje automático (Machine Learning) utilizando los armónicos II y III, con el objetivo de analizar y predecir el comportamiento de las vibraciones del motor en función de la degradación del aceite.

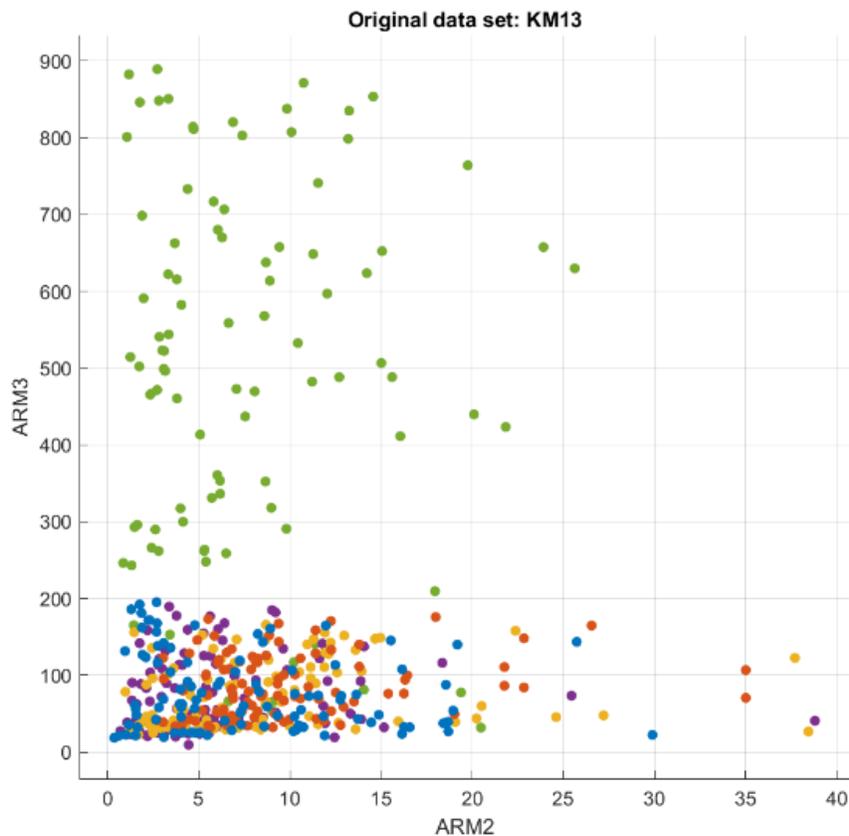
A continuación, se presentan la tabla de datos utilizados, el diagrama del modelo de aprendizaje automático y los resultados obtenidos a partir del análisis de Machine Learning.



Tabla 29:  
*Tabla armónicos II, III*

ARM2	AMR3	ESTADO
8,78	25,66	0
4,08	35,46	0,5
1,72	35,18	0,9
2,04	40,52	0,95
3,67	32,12	1

Figura 48:  
*Diagrama de dispersión armónicos II, III*





**Tabla 30:**

*Resultados tabla armónicos II, III*

Resultados de entrenamiento	
<b>Precisión (Validación)</b>	48.0 %
<b>Costo total (Validación)</b>	260
<b>Velocidad de predicción</b>	9200 observaciones/seg
<b>Tiempo de entrenamiento</b>	1.0143 s

Tipo de modelo	
<b>Preestablecido</b>	SVM gaussiano fino
<b>Función Kernel</b>	Gaussiana
<b>Escala de núcleo</b>	0.35
<b>Método multiclase</b>	Uno contra uno
<b>Estandarizar datos</b>	Verdadero

En los armónicos II y III, se obtuvo una eficiencia del 48%, datos presentados en la **Tabla 30**. Sin embargo, este valor no es suficiente para los requerimientos de nuestra investigación. Por esta razón, se decidió descartar el análisis en los estados de 0.9. 0.95 respectivamente y enfocar el estudio únicamente en los estados 0, 0.5 y 1.

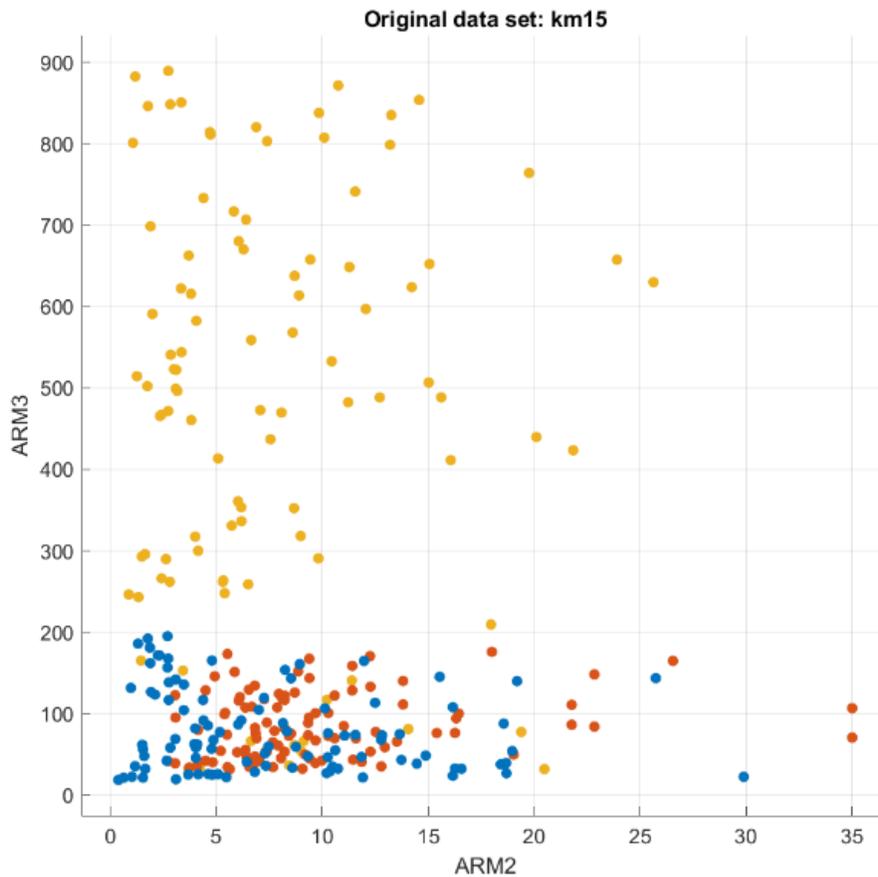


### 4.3.3 ARMONICOS I-II-III

**Tabla 31:**  
*Tabla 2 armónicos I, II, III*

ARM1	ARM2	AMR3	ESTADO
5,07	8,78	25,66	0
6,79	4,08	35,46	0,5
6,39	3,67	32,12	1

**Figura 49:**  
*Diagrama de dispersión armónicos I, II, III*





**Tabla 32:**  
*Resultados tabla 2 armónicos I, II, III*

Resultados de entrenamiento	
<b>Precisión (Validación)</b>	74.3 %
<b>Costo total (Validación)</b>	77
<b>Velocidad de predicción</b>	21000 observaciones/seg
<b>Tiempo de entrenamiento</b>	0.56867 s

Tipo de modelo	
<b>Preestablecido</b>	Árbol grueso
<b>Número máximo de divisiones</b>	4
<b>Criterio de división</b>	Índice de diversidad de Gini
<b>División de decisión sustituta</b>	Desactivada

En los armónicos I, II y III, considerando los estados previamente mencionados, se obtuvo una eficiencia del 74.3% como observamos en la **Tabla 32**, cumpliendo con los requerimientos de nuestra investigación. No obstante, se decidió descartar el análisis del armónico I y centrar el estudio únicamente en los estados 0, 0.5 y 1 de los armónicos II y III.

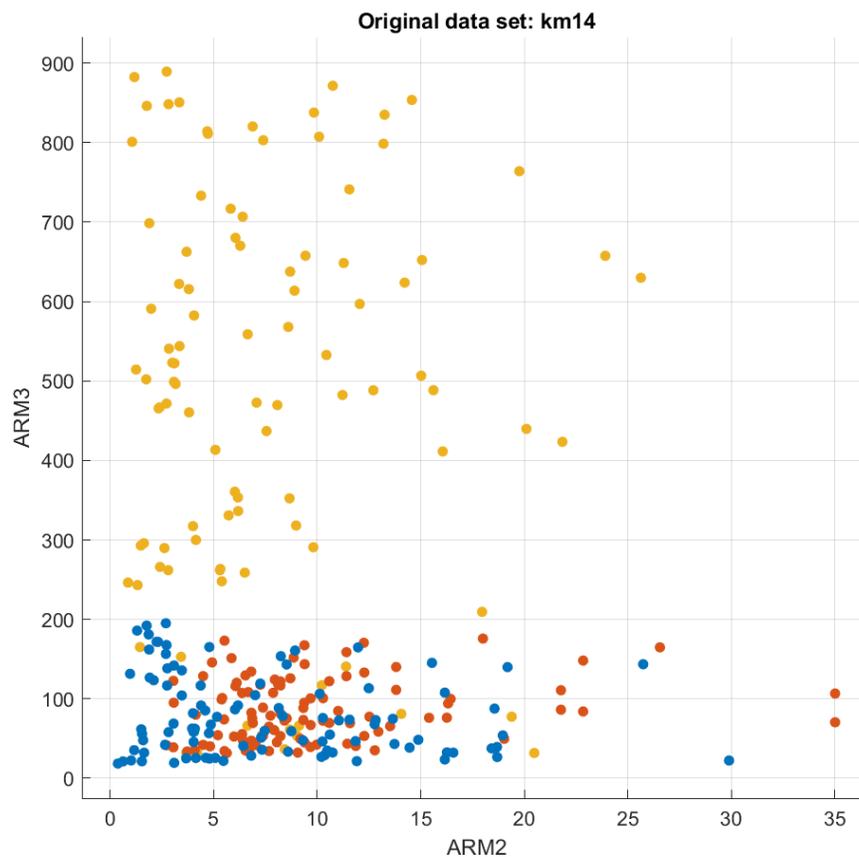


### 4.3.4 ARMONICOS II-III

Tabla 33:  
Tabla 2 armónicos II, III

ARM2	AMR3	ESTADO
<b>8,78</b>	25,66	0
<b>4,08</b>	35,46	0,5
<b>3,67</b>	32,12	1

Figura 50:  
Diagrama de dispersión armónicos II, III





**Tabla 34:**  
*Resultados tabla 2 armónicos II, III*

Resultados de entrenamiento	
<b>Precisión (Validación)</b>	75.3 %
<b>Costo total (Validación)</b>	74
<b>Velocidad de predicción</b>	13000 observaciones/seg
<b>Tiempo de entrenamiento</b>	0.5664 s

Tipo de modelo	
<b>Preestablecido</b>	Kernel Naive Bayes
<b>Nombre de distribución para predictores numéricos</b>	Kernel
<b>Nombre de distribución para predictivos categóricos</b>	No aplicable
<b>Tipo de núcleo</b>	gaussiano

### 4.3.5 Comparación Armónicos

**Tabla 35**  
*Tabla comparativa armónicos*

Armónicos	Estados	Eficiencia
<b>Armónicos I, II, III</b>	0-0.5-0.90- 0.95-1	46.2%
<b>Armónicos I, II, III</b>	0 – 0.5 -1	74.3%
<b>Armónicos II, III</b>	0-0.5-0.90- 0.95-1	48%
<b>Armónicos II, III</b>	0 – 0.5 -1	75.3%



En los armónicos II y III, considerando los estados previamente mencionados, se obtuvo una eficiencia del 75.3% como observamos en la **Tabla 35**, lo que cumple con los requerimientos de nuestra investigación. Con base en estos resultados, se estableció la tabla que se utilizará para la validación de los datos obtenidos.

## 4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### 4.4.1 *Análisis estadístico pruebas I, II*

En el análisis estadístico, se utilizó una tabla creada en Excel que incluye los siguientes parámetros: varianza, media, mediana, curtosis, moda, asimetría, media cuadrática, desviación estándar y estados. La asignación de los estados que ilustran la **Tabla 35**, se realizará en función de la eficiencia obtenida a través del software MATLAB.

En el presente estudio, se establecieron diferentes estados para representar los intervalos de kilometraje en los que se realizaron las pruebas. Estos estados permiten identificar y analizar la evolución de las vibraciones del motor.

**Tabla 36:**  
*Relación estados - km*

Estado	Km
BE	0
BE-50	3000
BE-100%	6000



Figura 51:  
Diagrama de dispersión estados tabla 29

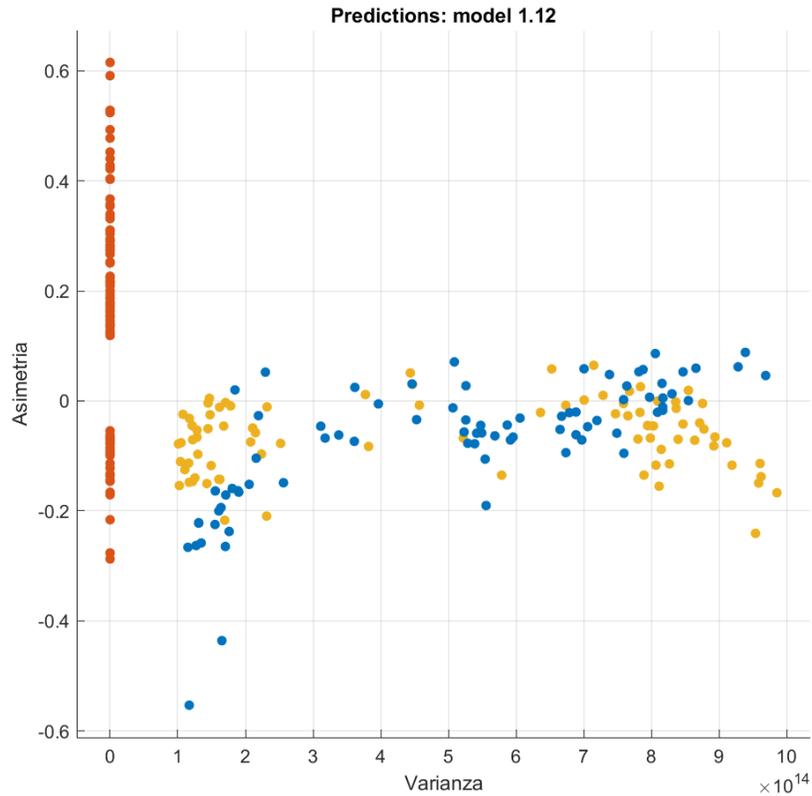


Tabla 37:  
Resultados análisis estadístico

Resultados de entrenamiento	
<b>Precisión (Validación)</b>	88.3 %
<b>Costo total (Validación)</b>	35
<b>Velocidad de predicción</b>	9600 observaciones/seg
<b>Tiempo de entrenamiento</b>	0.61018 s



Tipo de modelo	
<b>Preestablecido</b>	SVM gaussiano medio
<b>Función de Kernel</b>	Gaussiano
<b>Escala de Kernel</b>	2.8
<b>Método multiclasa</b>	Uno contra uno

En el análisis estadístico considerando los estados previamente mencionados, se obtuvo una eficiencia del 88.3%, datos presentados en la **Tabla 37**, lo que cumple con los requerimientos de nuestra investigación. Con base en estos resultados, se estableció la tabla que se utilizará para la validación de los datos obtenidos.

## 4.5 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

### 4.5.1 Validación armónicos

Para la validación de los resultados, específicamente del análisis de armónicos, se utilizó el software MATLAB. En primer lugar, se generó una función basada en el modelo exportado, mencionado en la Tabla 28. El modelo utilizado fue `**trainClassifier(km14)**`, y la función aplicada para la predicción fue `**yfit = c.predictFcn(T)**`.

En este proceso, se realizaron los siguientes reemplazos:

- `**C**` fue asignado como `**trainedModel.Mat**`
- `**T**` fue sustituido por `**Tabla1**`

Estos ajustes permitieron validar los resultados obtenidos en los diferentes estados como se indican en la **Tabla 38**, y optimizar el análisis de armónicos dentro del estudio.



**Tabla 38:**

*Tabla validación armónicos*

Estado	Km	Matlab
BE	<b>0</b>	yfit = 0
BE-50	<b>3000</b>	yfit = 0.5000
BE-100%	<b>6000</b>	yfit = 1

#### 4.5.1.1 Validación armónicos prueba (0 km)

**Tabla 39:**

*Tabla validación prueba - 0 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P15	No	P16	Si	P14	No	P10	Si
P19	Si	P19	No	P15	Si	P12	No
P22	No	P23	Si	P25	Si	P15	Si
P26	Si	P28	Si	P33	Si	P25	No
P30	Si	P29	Si	P35	Si	P30	Si
P31	Si	P30	Si	P36	Si	P35	Si
P36	Si	P31	Si	P37	Si		
P39	Si	P33	Si	P40	Si		
P40	Si	P41	Si				

Total, Si	Total, No
26	6

32	100%
26	x
81,25	%



### 4.5.1.2 Validación armónicos prueba 2 (0 km)

**Tabla 40:**

*Tabla validación prueba 2- 0 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P14	No	P16	Si	P13	Si	P12	Si
P19	Si	P17	Si	P14	Si	P15	Si
P22	No	P23	Si	P15	Si	P18	Si
P25	No	P26	Si	P21	No	P21	Si
P26	Si	P29	Si	P23	Si	P22	Si
P33	Si	P34	Si	P25	Si	P25	Si
P39	Si	P37	Si	P34	Si	P32	Si
P40	Si	P38	Si	P35	Si	P36	No

Total, Si	Total, No
27	5

32	100%
27	x
84,37	%

### 4.5.1.3 Validación armónicos prueba (3000 km)

**Tabla 41:**

*Tabla validación prueba -3000 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P15	Si	P2	No	P3	Si	9	No
P17	No	P3	Si	5	No	11	Si
P18	No	P5	Si	10	Si	14	Si
P19	Si	P30	Si	14	Si	17	Si
P20	Si	P31	Si	22	Si	18	Si
P24	No			23	Si		
P25	Si			25	Si		
P35	Si			36	Si		
P36	Si			37	Si		
P37	Si			38	Si		
P38	Si						
P49	Si						

Continua



Total, Si	Total, No
26	6

32	100%
26	x
81,25	%

#### 4.5.1.4 Validación armónicos prueba 2 (3000 km)

**Tabla 42:**

*Tabla validación prueba 2 -3000 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P15	Si	P13	Si	P14	No	P15	Si
P16	Si	P14	No	P16	Si	P16	Si
P17	No	P15	Si	P19	Si	P17	No
P18	Si	P17	Si	P23	Si	P18	Si
P19	No	P18	Si	P37	Si	P19	Si
P21	Si	P19	Si	P38	Si	P20	Si
P23	Si	P27	Si	P40	Si		
P24	Si	P29	Si				
P25	Si						
P37	Si						
P38	Si						

Total, Si	Total, No
27	5

32	100%
27	x
82,75	%

#### 4.5.1.3 Validación armónicos prueba (6000 km)

**Tabla 43:**

*Tabla validación prueba -6000 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P14	No	P10	Si	P13	Si	P15	Si
P15	Si	P13	Si	P15	Si	P16	Si
P22	No	P18	Si	P19	Si	P19	Si
P24	No	P22	Si	P23	Si	P22	Si
P25	Si	P25	Si	P26	Si	P28	Si
P34	No	P29	Si	P30	Si	P29	Si
P35	Si	P34	Si	P32	Si	P40	Si

Continua



P36	No	P37	Si	P42	Si	P41	Si
-----	----	-----	----	-----	----	-----	----

Total, Si	Total, No
27	5

32	100%
27	x
84,37	%

#### 4.5.1.3 Validación armónicos prueba 2 (6000 km)

**Tabla 44:**

*Tabla validación prueba 2 -6000 km*

O-C		C-O		2 O-C		2C-O	
P10	Si	P3	Si	P10	Si	P3	Si
P14	Si	P4	Si	P22	Si	P4	Si
P15	No	P8	No	P24	Si	P6	Si
P22	No	P10	No	P25	Si	P8	Si
P35	No	P11	Si	P30	No	P11	Si
P33	Si	P15	Si	P33	No	P14	Si
		P17	Si			P21	Si
		P36	Si			P40	Si
		P47	Si			P51	Si
		P48	Si				
		P52	Si				

Total, Si	Total, No
25	7

32	100%
25	x
78,12	%

#### 4.5.2 Validación análisis estadístico

Para la validación de los resultados, específicamente del análisis estadístico, se utilizó el software MATLAB. En primer lugar, se generó una función basada en el modelo exportado, mencionado en la Tabla 30. El modelo utilizado fue `**trainClassifier (TABLACOMPLETA) **`, y la función aplicada para la predicción fue `**yfit = c. predictFcn(T)**`.

En este proceso, se realizaron los siguientes reemplazos:

- `**C**` fue asignado como `**trainedModel.Mat**`
- `**T**` fue sustituido por `**Tabla1**`



Estos ajustes permitieron validar los resultados obtenidos y optimizar el análisis de armónicos dentro del estudio.

**Tabla 45:**

*Tabla estados - análisis estadístico*

Estado	Km	Matlab
BE	0	<u>categórica</u> BE
BE-50	3000	<u>categórica</u> BE-50%
BE-100%	6000	<u>categórica</u> BE-100%

#### 4.5.2.1 Validación análisis estadístico prueba 1

**Tabla 46:**

*Tabla validación prueba 1*

Datos 0 (km)		Datos 3000 (km)		Datos 6000 (km)	
P6	No	P10	Si	P6	Si
P7	No	P6	Si	P7	Si
P10	Si	P7	Si	P8	Si
P38	Si	P8	Si	P9	Si
P12	Si	P9	Si	P10	Si
P13	Si	P15	Si	P25	Si
P16	Si	P16	Si	P26	Si
P17	Si	P17	Si	P27	Si
P18	Si	P18	Si	P28	Si
P21	Si	P21	Si	P29	Si

Total, Si	Total, No
28	2

30	100%
28	x
93,33	%



### 4.5.2.1 Validación análisis estadístico prueba 2

**Tabla 47:**  
*Tabla validación prueba 2*

Datos 0 (km)		Datos 3000 (km)		Datos 6000 (km)	
P7	Si	P7	Si	P7	Si
P8	Si	P8	No	P8	Si
P9	No	P9	Si	P9	Si
P10	Si	P10	No	P10	Si
P11	No	P25	Si	P15	Si
P12	No	P30	Si	P16	Si
P18	Si	P33	Si	P25	Si
P19	Si	P34	Si	P28	Si
P20	Si	P37	Si	P29	Si
P21	Si	P39	Si	P30	Si

Total, Si	Total, No
25	5

30	100%
25	x
83,33	%

Al analizar la validación de las diferentes pruebas dentro del análisis estadístico y armónicos, se observó en las tablas correspondientes que la eficiencia máxima alcanzada fue del 93.33%, mientras que la mínima fue del 78.12%. Estos valores se encuentran dentro del rango establecido, lo que permitió validar cada prueba realizada en los distintos estados de forma satisfactoria.



## **4.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACEITE**

### **4.6.1 Niveles de desgaste**

Para evaluar el estado interno del motor y la efectividad del lubricante utilizado, se llevó a cabo un análisis elemental del aceite, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D5185. Este análisis permite detectar niveles de desgaste de los componentes internos del motor, así como identificar la presencia de contaminantes o aditivos en el lubricante. En la **Tabla 48** se presentan los resultados obtenidos del análisis de metales de desgaste, donde se comparan los valores medidos en partes por millón (ppm) con los valores máximos de referencia establecidos por la normativa. Entre los resultados más relevantes se identificaron ciertos elementos que superan los límites permitidos:

- **Titanio (Ti):** Se detectó un valor de 112 ppm, superior al límite de 40 ppm. Esto podría deberse a la presencia de aditivos en el aceite de motor o a un posible desgaste del sistema de sobrealimentación, como el turbocompresor.
- **Fósforo (P):** Registró un valor de 1222 ppm, excediendo el máximo de 1000 ppm. El fósforo es un elemento habitual en aditivos de aceites (especialmente en paquetes anti desgaste como el ZDDP - Zinc, lo que indica la presencia de un aditivo activo en el lubricante.
- **Zinc (Zn):** Se encontró una concentración de 1440 ppm, cercana al límite máximo de 1600 ppm. Valores elevados de zinc, además de su función como aditivo, pueden también sugerir un inicio de desgaste en componentes como las camisas o chaquetas del motor.

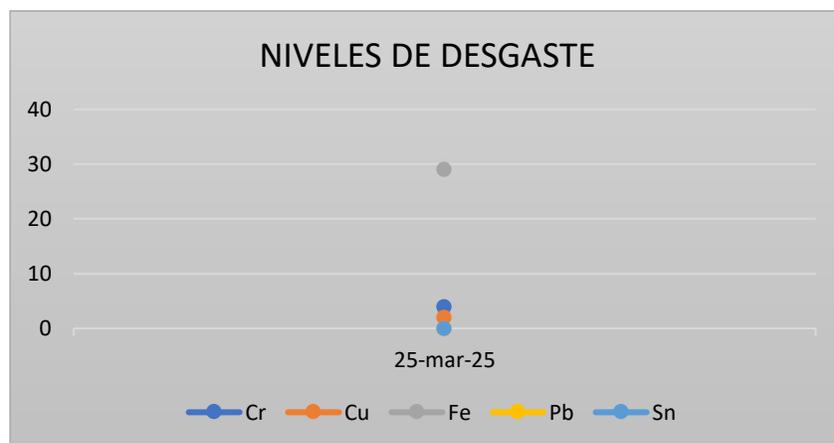


**Tabla 48:**

*Tabla de niveles de desgaste*

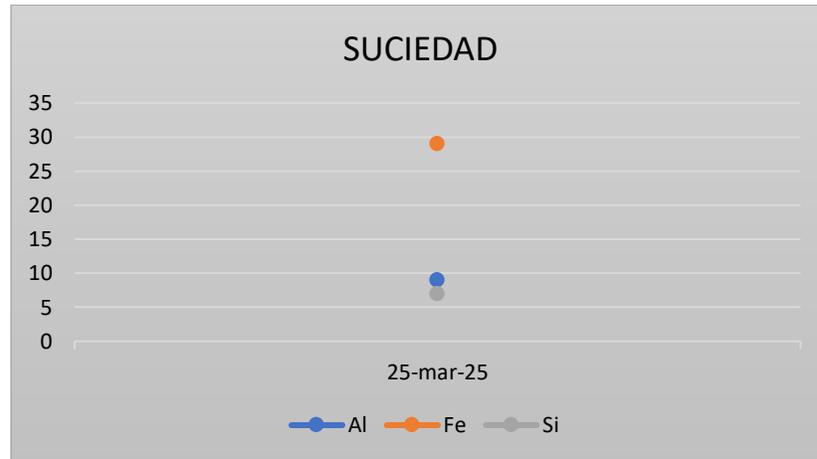
Niveles de desgaste			
Análisis Elemental (PPM) ASTM D5185 (PETROLEO)			
Siglas	Elemento	Valor análisis	Valor máximo
<b>Cu</b>	Cobre	2	160
<b>Fe</b>	Hierro	29	140
<b>Cr</b>	Cromo	4	40
<b>Al</b>	Aluminio	9	40
<b>Pb</b>	Plomo	0	
<b>Sn</b>	Estaño	0	40
<b>Si</b>	Silicio	7	50
<b>Na</b>	Sodio	4	70
<b>K</b>	Potasio	38	1200
<b>Mo</b>	Molibdeno	7	200
<b>Ni</b>	Níquel	0	40
<b>Ag</b>	Plata	0	50
<b>Ti</b>	Titanio	112	40
<b>V</b>	Vanadio	0	50
<b>Mn</b>	Manganeso	1	700
<b>Cd</b>	Cadmio	0	
<b>Ca</b>	Calcio	2323	9000
<b>P</b>	Fosforo	1222	1000
<b>Zn</b>	Zinc	1440	1600

**Figura 52:**  
*Niveles de desgaste*

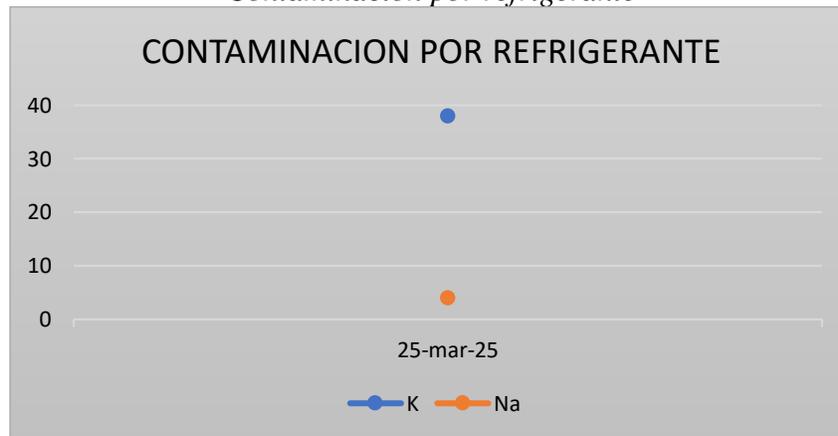




**Figura 53:**  
*Suciedad*



**Figura 54:**  
*Contaminación por refrigerante*



#### 4.6.2 Contaminación

Para complementar el análisis elemental del aceite, se realizó un estudio de los niveles de contaminación, siguiendo los métodos de prueba ASTM D445 para viscosidad e ASTM E2412 para análisis infrarrojo de contaminantes típicos como hollín, oxidación, sulfatación y nitración. Este análisis es crucial para evaluar la degradación del aceite y la presencia de contaminantes críticos que pueden comprometer el funcionamiento del motor.



Los resultados, presentados en la **Tabla 49**, muestran que no se detectaron niveles significativos de refrigerante, combustible ni agua en el lubricante (valores registrados como "N" o "No detectado"). Esta ausencia de contaminantes indica que componentes vitales del motor, como la junta de culata y los anillos de pistón, se encuentran en óptimas condiciones de sellado y funcionamiento, sin evidencia de fugas internas o mezclas no deseadas.

Adicionalmente, la viscosidad medida a 100 °C se mantiene en 15 centistokes, dentro del rango adecuado para aceites de clasificación SAE 15W40, asegurando una lubricación correcta bajo condiciones de carga. Los niveles de hollín (8 UJM), oxidación (12 UJM) y sulfatación (20 UJM) están controlados, sin representar riesgo inmediato de degradación severa del aceite.

**Tabla 49:**  
*Tabla de valores de Contaminación*

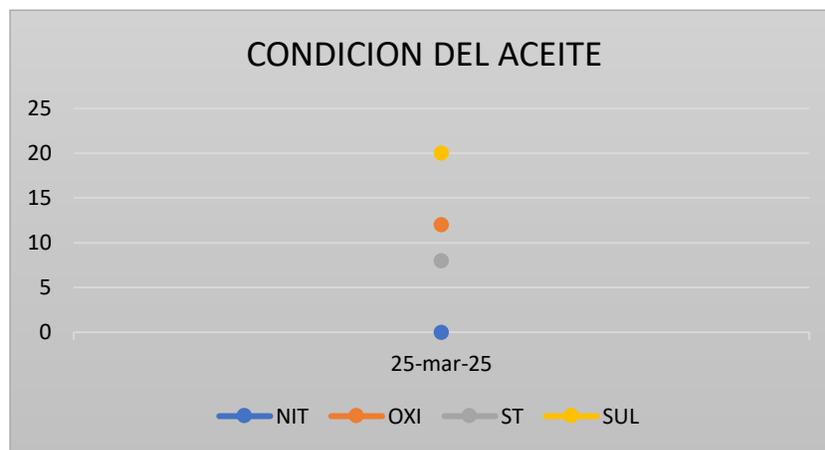
<b>Contaminación</b>			
<b>Viscosidad (Centistokes) ASTM D445</b>			
Siglas	Descripción	Temperatura	Valor análisis
<b>V100</b>	Viscosidad	100	15
<b>Infrarrojo (UJM) ASTM E2412</b>			
Siglas	Descripción	Valor análisis	
<b>ST</b>	Hollín	8	
<b>OXI</b>	Oxidación	12	
<b>SUL</b>	Sulfatación	20	
<b>NIT</b>	Nitración	0	
<b>Agua</b>			
Siglas	Descripción	Valor análisis	
<b>W</b>	Agua	N	
<b>Refrigerante</b>			
Siglas	Descripción	Valor análisis	
<b>A</b>	Anticongelante	N	
<b>Combustible</b>			
Siglas	Descripción	Valor análisis	
<b>F</b>	Combustible	N	



**Figura 55:**  
*Viscosidad*



**Figura 56:**  
*Condición del aceite*



### 4.6.3 Limpieza

Como parte del análisis de limpieza del aceite lubricante, se realizó una medición de aditivos presentes que pueden influir en la protección interna del motor, utilizando el método de prueba ASTM D5185. Este análisis permite identificar los niveles de elementos que ayudan a mantener la limpieza del sistema de lubricación, previniendo la formación de depósitos y barnices.

En la **Tabla 50** se presentan los resultados obtenidos. Se destaca el valor de boro (B), con un registro de 197 ppm, significativamente superior al valor máximo de referencia de 30 ppm. Esta



concentración elevada puede atribuirse a la presencia de aditivos de boro incluidos intencionalmente en la formulación del aceite utilizado, los cuales mejoran propiedades como la resistencia al desgaste y la dispersión de contaminantes. El magnesio (Mg) mostró una concentración de 534 ppm, valor que se encuentra dentro del rango normal para aceites modernos, donde se utiliza como detergente para mantener limpio el motor. Por otro lado, el bario (Ba) no fue detectado, registrando 0 ppm, lo cual es favorable ya que altas concentraciones de bario podrían indicar contaminación o el uso de aditivos no deseados.

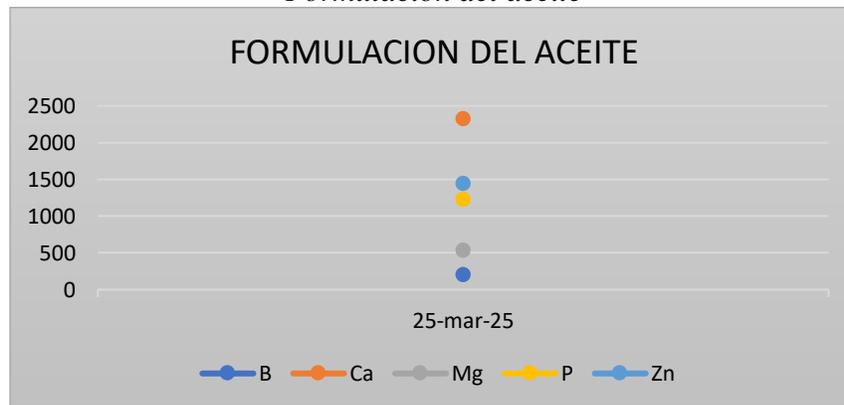
**Tabla 50:**

*Tabla de valores de Limpieza*

Limpieza			
Análisis Elemental (PPM) ASTM D5185 (PETROLEO)			
Siglas	Elemento	Valor análisis	Valor máximo
<b>Mg</b>	Magnesio	534	1700
<b>Ba</b>	Bario	0	4
<b>B</b>	Boro	197	30

**Figura 57:**

*Formulación del aceite*





## **CAPITULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- A través del uso combinado del análisis de vibraciones y del análisis de aceite como herramientas de diagnóstico, se logró determinar que el motor diésel Isuzu turbo intercooler objeto de esta investigación se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento. Esto se evidenció en los resultados del análisis elemental de aceite, los cuales reflejaron una ausencia total de contaminantes como agua (0%), refrigerante (0%) y combustible (0%) en la muestra evaluada, no se detectó presencia de contaminantes externos, lo cual indica que no existe ingreso anómalo de fluidos al sistema del motor. Complementariamente, el análisis de vibraciones reveló un comportamiento progresivo de desgaste del aceite a través de la amplitud de los armónicos. A los 0 km, se registraron valores bajos, lo que reflejaba una condición saludable del motor. Tomando como referencia el valor del ARM1, se observó un incremento del 18.19% en el ARM2 y del 46.57% en el ARM3, lo que indica un comportamiento armónico dentro de parámetros normales. No obstante, a los 6000 km, las amplitudes aumentaron de forma considerable. En relación con el ARM1, el ARM2 presentó un incremento del 58.23%, mientras que el ARM3 lo superó en un 72%, siendo este último el más representativo del deterioro del lubricante por su alta sensibilidad al desgaste interno del motor. Este crecimiento armónico indica un incremento en la fricción interna del motor debido a la pérdida de propiedades del aceite, confirmando que el análisis de vibraciones es un indicador efectivo para estimar la condición del motor y determinar el momento óptimo para el mantenimiento.

- La adquisición sistemática de datos vibratorios permitió establecer un patrón claro de comportamiento del motor diésel bajo carga a lo largo de distintos periodos de uso del lubricante. Se observaron incrementos progresivos en los valores de los armónicos a



medida que aumentaba el kilometraje. En el caso del ARM1, y tomando como referencia los valores registrados a 0 km, la amplitud aumentó en un 76.92% a 3000 km, 85.75% a 5500 km, 88.83% a 5800 km y alcanzó un 89.95% a 6000 km. Para el ARM2, en función del valor inicial a 0 km, los incrementos fueron del 83.82% a 3000 km, 91.06% a 5500 km, 93.63% a 5800 km y 94.87% a 6000 km. En particular, se evidenció una variación significativa en el ARM3, con respecto al mismo punto de referencia: un 78.24% a 3000 km, 89.27% a 5500 km, 93.56% a 5800 km y finalmente 94.67% a 6000 km. Con estos datos, se corrobora de forma clara la relación directa entre el incremento en la amplitud vibratoria y el desgaste progresivo del aceite lubricante. Esta estrategia de recolección metódica de datos permitió identificar con precisión los momentos críticos de mayor vibración, lo que facilita la toma de decisiones para el mantenimiento predictivo del sistema y garantiza una caracterización profunda del comportamiento del motor. El procesamiento de los datos vibratorios se realizó en el entorno MATLAB, aplicando análisis armónicos y análisis estadístico. Como resultado, se obtuvo una eficiencia del 75.3% en el análisis de armónicos y del 88.3% en el análisis estadístico, evidenciando que los modelos utilizados son adecuados para representar el comportamiento del motor en distintas condiciones de operación y desgaste del aceite.

- La validación de los modelos se efectuó utilizando el 30% de los datos obtenidos por cada estado. En el análisis de armónicos, se logró una eficiencia del 84,75% en el estado 0, del 82,75% en el estado 0.5 y del 84,37% en el estado 1. Por otro lado, en el análisis estadístico, los modelos demostraron una precisión del 93,33% en la primera prueba y del 83,33% en la segunda. Estos resultados validan la eficacia de los datos obtenidos en las pruebas realizadas. Se utilizaron comparaciones entre armónicos registrados en diferentes ciclos de kilometraje y los valores fueron contrastados con los resultados del análisis de aceite realizado en laboratorio. La coincidencia entre los incrementos de amplitud vibratoria (hasta 482.30 unidades en ARM3) y los parámetros de desgaste y contaminación del aceite como 112 ppm de titanio y 12 UJM de oxidación, aquí se evidenció una alta



correlación. Validando así el método propuesto como eficaz y confiable para la detección de la vida útil del aceite y el estado del motor.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- A partir de los resultados obtenidos, se recomienda implementar un plan de mantenimiento preventivo y monitoreo continuo para asegurar la prolongación de la vida útil del motor. En primer lugar, es aconsejable verificar el estado físico de componentes internos críticos como el turbocompresor, los anillos de pistón y la junta de culata, dado que algunos niveles de elementos como el titanio y el fósforo sobrepasaron los límites de referencia, lo cual podría estar relacionado con desgaste localizado o con aditivos presentes en el lubricante. Asimismo, se sugiere repetir el análisis de aceite a los 50,000 km de operación para establecer una tendencia de desgaste y contaminantes, lo cual permitirá validar si el comportamiento observado se mantiene estable o si existe un deterioro progresivo. Esta segunda prueba permitirá comparar los niveles actuales con los futuros y tomar decisiones más acertadas respecto al mantenimiento o intervención del motor.
- Complementar el análisis vibracional con otras técnicas de diagnóstico, como análisis termográfico o ultrasonido, para obtener una visión más integral del estado del motor.
- Implementar un sistema combinado de monitoreo de vibraciones y análisis de aceite como parte del mantenimiento predictivo en flotas diésel, ya que se demostró que la correlación entre la degradación del aceite y el aumento de las vibraciones puede anticipar fallas internas del motor, permitiendo actuar antes de que ocurran daños mayores.



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



**5.3 ANEXOS**

<b>IASA</b>		IASA - Av. Juan Tanca Marengo Km.3 Guayaquil, Ecuador 593-4-5730300, Ext. 1417 ECUADOR	
		Web: <a href="https://iasaglobal.com/">https://iasaglobal.com/</a> Email: <a href="mailto:marcial_maria@iasaglobal.com">marcial_maria@iasaglobal.com</a>	
<b>MOTOR</b>	<b>NUM. EQUIPO: 4551131P85</b>	<b>NUM. SERIE : 4551131P85</b>	
<b>R440-55092-0058</b>	<b>CHEVROLET NMR</b>		
N° ORDEN DE TRABAJO: R. ENRIQUEZ	<b>Seguimiento</b>		<b>Interpretado por Carlos Freire</b>
Tiempo de Envío de Muestra: 8			<b>Fecha de Interpretación 03-Apr-25</b>
<b>DIEGO MEJIA</b>			
IBARRA			
Fecha recepción de muestra 02-Apr-25			
	EL PAQUETE DE ADITIVOS NO CORRESPONDE A UN ACEITE CAT DEO-ULS. POTASIO ALTO EN ESTA PRIMERA MUESTRA. REVISE LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL MOTOR Y NIVEL DE ACEITE PERIODICAMENTE. LA VISCOSIDAD Y RESULTADOS DE INFRARROJO ESTÁN NORMALES. REALIZÓ EL CAMBIO DE ACEITE Y FILTRO DE ACEITE EN ESTA MUESTRA?, CASO CONTRARIO, REALICE LOS CAMBIOS. RECUERDE QUE UNA BUENA PRÁCTICA DE MANTENIMIENTO ES CORTAR Y REVISAR EL FILTRO DE ACEITE EN BUSCA DE PARTÍCULAS VISIBLES. TOMA OTRA MUESTRA DESPUÉS DE LO REALIZADO PARA OBSERVACIÓN.		

<b>INFORMACIÓN DE MUESTRA</b>		Para historial de muestras adicional, ir a	
		<b>CONDICIÓN / CONTAMINACIÓN</b>	
		25-Mar-25	
Fecha De Muestra	25-Mar-25	<b>VISCOSIDAD (CENTISTOKES) ASTM D446</b>	
Id De Muestra	R440-55092-0058	V100	Viscosidad a 100C 15
Fecha De Lab	02-Abr-25	<b>INFRARROJO (UFM) ASTM E2412</b>	
Horómetro [Hr]	249927	ST	Hollín 8
Horas Del Fluido	5400	OXI	Oxidación 12
Marca Del Fluido	CAT	SUL	Sulfatación 20
Grado Del Fluido	15W-40	NIT	Nitración 0
Tipo De Fluido	CK-4	<b>AGUA</b>	
Fluido Cambiado	U	W	Agua N
Filtro Cambiado	U	<b>REFRIGERANTE</b>	
Filtrado Externo	U	A	Anticongelante N
Total Fluid Added	0	<b>COMBUSTIBLE</b>	
		F	Combustible N
<b>NIVELES DE DESGASTE / ADITIVOS</b>		<b>LIMPIEZA</b>	
		25-Mar-25	
		<b>ANÁLISIS ELEMENTAL (PPM) ASTM D6185 (PETRÓLEO) / ASTM D6130 (REFRIGERANTE)</b>	
Cu	Cobre 2	Mg	Magnesio 534
Fe	Hierro 29	Ba	Bario 0
Cr	Cromo 4	B	Boro 197
Al	Aluminio 9		
Pb	Plomo 0		
Sn	Estaño 0		
Si	Silicio 7		
Na	Sodio 4		
K	Potasio 38		
Mo	Molibdeno 7		
Ni	Níquel 0		
Ag	Plata 0		
Ti	Titanio 112		
V	Vanadio 0		
Mn	Manganeso 1		
Cd	Cadmio 0		
Ca	Calcio 2323		
P	Fósforo 1222		
Zn	Zinc 1440		

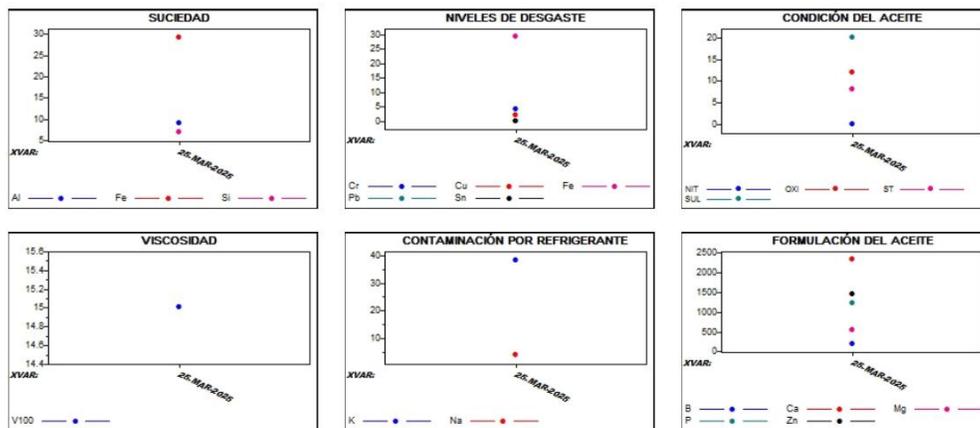
Nota: Este análisis es una ayuda en predecir desgaste mecánico. No se garantiza, explícita o implícitamente, contra el fallo de este compartimento o equipo.



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



MOTOR NUM. SERIE : 4551131P85 NUM. EQUIPO: 4551131P85 CHEVROLET NMR	R440-55092-0058  Seguimiento
--	------------------------------------



Nota: Este análisis es una ayuda en predecir desgaste mecánico. No se garantiza, explícita o implícitamente, contra el fallo de este compartimento o equipo.

Informe de Análisis de Aceite PÁGINA 2 of 2



- [1] B. Santiago and H. Teodoro, “Diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna Hyundai Accent DOHC 1.5L mediante análisis de vibraciones,” pp. 1–103, Apr. 2016.
- [2] Republica del Ecuador, “Estrategia nacional para el cambio de la matriz productiva,” 2017.
- [3] O. Criollo and H. Matute, “Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones,” pp. 1–129, Mar. 2014.
- [4] C. Padilla, “Estudio comparativo de la contaminación del motor diésel, utilizando combustible Ecuatoriano y extranjero,” pp. 1–118, Oct. 2016.
- [5] S. Pacheco, *Modulo motores diésel*. 2007.
- [6] W. Davila, “Análisis estequiométrico y de combustible en un sistema de alimentación common rail para determinar la vida útil de motor diésel,” 2022.
- [7] G. Fernando, G. Sánchez, J. Luis, C. Velasco, and C. Guerrero, “Modelado de la combustión en motores Diésel: revisión del estado del arte,” Jun. 2013.
- [8] K. Rivera, “Diagnóstico en motores Diesel,” pp. 1–91, 2022.
- [9] “BredaaKegl MarkooKegl StanislavvPehan Green Diesel Engines Biodiesel Usage in Diesel Engines.” [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/8874>
- [10] Salinas R, “Implementación de un plan de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos rotativos críticos en la central termoeléctrica santo domingo de los olleros,” 2020.
- [11] F. Suarez, “Diagnóstico del funcionamiento de un motor diésel en el sistema de inyección directa de riel comúnD,” pp. 1–128, 2023.
- [12] M. Simone and J. Hilbert, “Sistema de refrigeración del motor,” pp. 1–21, 2020.
- [13] Vera J, “Propuesta de Mejora del Sistema de Lubricación en Motores 1NR–FE Toyota, para Aumentar su Vida útil y Operatividad,” 2023.
- [14] C. Garcia, “Estudio del mantenimiento de los sistemas de lubricación de los motores principales de un buque Ro-Ro,” Barcelona, Feb. 2022.
- [15] M. Gaibor and L. Landa, “Análisis de vibraciones en el motor de combustión interna j20-a a través de simulación de modos de fallas para contribuir el mantenimiento predictivo,” 2018.
- [16] R. Varbanets *et al.*, “Concepto de diagnóstico vibroacústico de los sistemas de inyección de combustible y lubricación electrónica de cilindros de motores diésel marinos.,” *Polish Maritime Research*, vol. 29, no. 4, pp. 88–96, Dec. 2022, doi: 10.2478/pomr-2022-0046.
- [17] C. Benz, “Manual del mantenimiento del sistema de lubricación,” Jun. 2012.
- [18] J. Vidal, “Actualización del plan de mantenimiento preventivo del banco de motor diésel de la Universidad Antonio Nariño - Sede Farallones,” 2022.
- [19] B. Tormos, “Diagnóstico de motores diésel mediante el análisis del aceite usado,” 2016.
- [20] M. Botero and B. A. Cañon, “Agosto de 2010,” *Scientia et Technica Año XVI*, vol. 45, 2010.
- [21] J. Zambrano and J. Pérez, “Estudio de la aplicación del mantenimiento predictivo en motores diésel en la provincia de Manabí,” *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, vol. 4, no. 8 Edición especial diciembre, pp. 96–116, Dec. 2021, doi: 10.46296/ig.v4i8edespdic.0053.



- [22] N. Sena, “Sistema de lubricacion,” 2010.
- [23] N. Sena, “Sistema de lubricación,” Feb. 2010.
- [24] A. Villacis and J. Lema, “Análisis del poder calorífico del aceite SAE 20w50 durante la degradación en el motor de combustión interna mediante el uso de una bomba calorimétrica,” 2022.
- [25] P. Yar, “Aceite de motor - Industria del automovil,” 2013.
- [26] R. Casanova, “Diseño de propuesta de ampliación de los intervalos para los cambios de aceite en motores diésel, empleados en maquinaria agrícola y de construcción, basados en la tribología,” *Octavio Rey Betancourt*, pp. 1–196, May 2021.
- [27] Villafuerte. J, “Aceite lubricante - Propiedades,” pp. 1–38, Nov. 2020.
- [28] “RTE-014-1R.”
- [29] E. George, “Lubricantes: especificaciones y normativa,” 2020.
- [30] J. Park and J. Oh, “Un algoritmo de mantenimiento predictivo basado en aprendizaje automático para motores de generadores de barcos que utiliza simulaciones de motores y datos recopilados del barco,” *Energy*, vol. 285, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129269.
- [31] T. Mugmal, A. Jeanpierre, P. Flores, and K. Hernan, “Estudio de vibraciones mecánicas en motores MEC para el mantenimiento predictivo,” 2023.
- [32] A. Taghizadeh and A. Mahdavian, “Detección de fallos en inyectores en motores diésel mediante análisis tiempo-frecuencia de vibración.,” *Applied Acoustics*, vol. 143, pp. 48–58, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.09.002.
- [33] S. Braun, *Procesamiento de señales - Guia interactiva para ingenieros*, Primera edicion. MADRID: UNED, 2012.
- [34] Florez Elkin, Cardona Salvador, and Jordi Lluisa, “Selección de la ventana temporal en la transformada de Fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren,” pp. 1–14, Dec. 2009.
- [35] J. Criollo and H. Matute, “Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones,” pp. 1–129, Mar. 2014.
- [36] RODESPREX, “Norma ISO 10816,” 2017.
- [37] Intertek Ashton, “Sensor Modelo 603C01- especificaciones,” Apr. 2019. [Online]. Available: [www.pcb.com](http://www.pcb.com).
- [38] National Instruments, “Tarjeta de datos cDAQ™- especificaciones,” 2024.
- [39] P. Corcuera, “Introducción a LabView,” 2021.
- [40] M. Cristina and C. Fernández, “Manual básico de Matlab,” 2017.
- [41] Motor Kendall, “Super-D XA Diesel Engine Oil with Liquid Titanium,” 2017. [Online]. Available: [www.pdmjumps77.nik/AC/pribunts/\\_lhas/K](http://www.pdmjumps77.nik/AC/pribunts/_lhas/K)
- [42] M. Guevara and L. Landa, “Análisis de vibraciones en el motor de combustión interna j20-a a través de simulación de modos de fallas para contribuir el mantenimiento predictivo,” 2019.