



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

**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

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

**“ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR ELECTRÓNICO MAZDA BT-50 CRDi  
UTILIZANDO BIODIÉSEL Y DIÉSEL”**



**AUTORES: GORDILLO CARRERA ALEXANDER NICOLÁS**

**ESPINOZA ANRANGO ADRIAN ABELARDO**

**DIRECTOR: ING. MAFLA YÉPEZ CARLOS NOLASCO MSc.**

Ibarra-Ecuador

**2024**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 1. 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:	100430732-6		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Espinoza Anrango Adrian Abelardo		
DIRECCIÓN:	CALLE PRINCIPAL vía a la comunidad de Peribuela		
EMAIL:	aaespinozaa@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	Ninguno	TELÉFONO MÓVIL:	0959011189

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Análisis de vibraciones en el motor electrónico Mazda BT-50 CRDi utilizando biodiésel y diésel
AUTOR (ES):	Espinoza Anrango Adrian Abelardo Gordillo Carrera Alexander Nicolás
FECHA: DD/MM/AAAA	2024/02/29
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc.

#### 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 29 días del mes de febrero de 2024

EL AUTOR:

Espinoza Anrango Adrian Abelardo



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

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

#### 1. 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			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	100476491-4		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Gordillo Carrera Alexander Nicolás		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Pedro Moncayo 12-18 y Av. Jaime Rivadeneira		
<b>EMAIL:</b>	angordilloc@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	Ninguno	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0985314645

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Análisis de vibraciones en el motor electrónico Mazda BT-50 CRDi utilizando biodiésel y diésel
<b>AUTOR (ES):</b>	Espinoza Anrango Adrian Abelardo Gordillo Carrera Alexander Nicolás
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	2024/02/29
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero Automotriz
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc.

#### 2. CONSTANCIAS

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

Ibarra, a los 29 días del mes de febrero de 2024

**EL AUTOR:**

.....  
Gordillo Carrera Alexander Nicolás

## CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de febrero de 2024

*Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc*

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

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

(f) .....  


*Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc*

*C.C.: 0401447826*

## APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

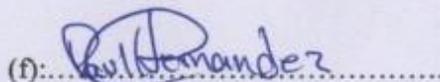
El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Análisis de vibraciones en el motor electrónico Mazda BT-50 CRDi utilizando biodiésel y diésel" elaborado por Gordillo Carrera Alexander Nicolás, Espinoza Anrango Adrian Abelardo, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:



(f):.....

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc.

C.C.: 0401447826



Ing. Hernández Rueda Erik Paúl MSc.

C.C.: 1002978060

## **DEDICATORIA**

A mis abuelitos y madre, faros de amor y fe que han iluminado cada paso de mi camino. A mi hermano, apoyo incansable y fuente inagotable de motivación. A mi compañero de tesis, con quien compartí desafíos y triunfos, construyendo más que un proyecto, una amistad duradera. Y a esa persona especial que me brindó apoyo incondicional en los momentos en los que pensaba rendirme, tu ayuda fue mi motor y luz en la oscuridad. A todos quienes guiaron mi formación académica, mi gratitud profunda. Este trabajo es un reconocimiento sincero a su impacto en mi vida y a su colaboración invaluable.

Espinoza Adrian

Dedico este trabajo académico a dos seres extraordinarios que han sido mi mayor apoyo: a mi adorada madre, cuya inquebrantable fe y aliento han iluminado mis caminos en los momentos más difíciles; a mi hermana, cuya firme determinación y constante empuje me han inspirado a superar todo obstáculo. Asimismo, mi sincero reconocimiento a mi compañero de tesis, cuya colaboración y esfuerzo conjunto han sido imprescindibles para alcanzar este logro. A todos ustedes, mi gratitud eterna.

Gordillo Nicolás

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte y a sus distinguidos docentes. Su apoyo incondicional ha sido fundamental en mi trayectoria académica y la culminación de esta tesis. Agradezco la calidad educativa brindada por esta institución, que ha fortalecido mis conocimientos y habilidades. Este logro no sería posible sin el respaldo constante de esta comunidad académica excepcional. A la Universidad Técnica del Norte y a mi director de tesis Ing. Carlos Mafla, ¡mi más profundo agradecimiento!

Espinoza Adrian

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Carlos Mafla Msc. por su invaluable orientación, apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto. Su experiencia y sabiduría fueron fundamentales para dar forma a esta investigación. Agradezco profundamente a mi familia por su inquebrantable apoyo y paciencia durante este proceso. Además, quiero reconocer el apoyo de mis amigos y seres queridos, quienes me han brindado su ánimo y comprensión en cada etapa de este viaje académico. Sin su ayuda desinteresada, este logro no hubiera sido posible.

Gordillo Nicolás

## RESUMEN

El presente estudio se enfoca en el análisis de vibraciones en un motor electrónico diésel, específicamente el Mazda BT-50 CRDi. Con el objetivo de evaluar el rendimiento, se eligió el diésel común, además, dentro del marco de investigación, se incluyeron las mezclas de biodiésel al 5% y al 15%, analizando su impacto en la dinámica del motor. Esta tarea se lleva a cabo mediante una metodología metódica que implica la instalación de un acelerómetro en un punto clave, específicamente en el bloque de cilindros, para la captura de datos de oscilaciones en términos de aceleración (g). Estos datos se visualizan y almacenan a través de un programa en el software LabVIEW, posteriormente importado a MATLAB. Esto posibilita la observación más clara de los espectros de vibración mediante la aplicación de la PSD, facilitando la identificación de los armónicos más prominentes. El análisis del armónico correspondiente a la combustión juntamente con los valores de opacidad e índice de cetano son la clave que permite determinar el combustible más eficiente en términos de operación, en este caso el B15. Al internarnos en términos de propiedades de combustión los resultados infieren que las dos mezclas son buenos combustibles porque tienen una gran facilidad de ignición, pero el B5 presenta ventajas en parámetros como el poder calorífico y punto de inflamación, esto significa que el biodiésel al 5% posee una mayor capacidad para liberar energía, lo que se traduce en un rendimiento térmico ligeramente superior.

**Palabras clave:** vibraciones, motor electrónico, dominio de la frecuencia, biodiésel, opacidad.

## ABSTRACT

The present study focuses on the analysis of vibrations in a diesel electronic engine, specifically the Mazda BT-50 CRDi. With the aim of evaluating performance, common diesel was chosen. Additionally, within the research framework, biodiesel blends at 5% and 15% were included, analyzing their impact on engine dynamics. This task is carried out through a meticulous methodology involving the installation of an accelerometer at a key point, specifically on the cylinder block, for data capture of oscillations in terms of acceleration (g). These data are visualized and stored through a program in LabVIEW software, later imported into MATLAB. This enables a clearer observation of vibration spectra by applying the Power Spectral Density (PSD), facilitating the identification of the most prominent harmonics. The analysis of the harmonic corresponding to combustion along with opacity and cetane index values is key to determining the most efficient fuel in terms of operation, in this case, B15. When delving into combustion properties, the results suggest that both blends are good fuels due to their ease of ignition. However, B5 has advantages in parameters such as calorific value and flash point, indicating that 5% biodiesel has a greater capacity to release energy, resulting in slightly higher thermal efficiency.

**Keywords:** vibrations, electronic engine, frequency domain, biodiesel, opacity.

## **LISTA DE SIGLAS**

**EDC.** Control Electrónico Diésel

**PMI.** Punto Muerto Superior

**ROM.** Memoria de Lectura

**RAM.** Memoria de Acceso Aleatorio

**ECU.** Unidad de Control Electrónico

**TDF.** Transformada Discrecional de Fourier

**FFT.** Transformada Rápida de Fourier

**DAQ.** Adquisición de Datos

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Problema de investigación.....	2
1.2. Justificación .....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General .....	3
1.3.2. Objetivos Específicos .....	3
1.4. Alcance .....	3
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>5</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
1.5. Motores diésel electrónicos .....	5
1.5.1. Gestión electrónica.....	5
1.5.1.1. Funcionamiento .....	6
1.5.2. Combustión.....	7
1.5.2.1. Ángulo de avance de la inyección .....	9
1.5.2.2. Triangulo de la combustión.....	10
1.5.2.3. Ciclo diésel .....	11
1.5.2.4. Vibraciones en la combustión.....	12
1.6. Vibraciones en motores .....	13
1.6.1. Vibración mecánica.....	13
1.6.2. Modelado de vibraciones .....	13
1.6.2.1. Método de las fuerzas .....	13
1.6.2.2. Principio de D Alembert.....	14
1.6.2.3. Método de energías.....	14

1.6.2.4.	Método de Lagrange .....	14
1.6.2.5.	Análisis modal .....	15
1.6.3.	Transformada de Fourier.....	15
1.6.3.1.	La Serie de Fourier .....	15
1.6.3.2.	La Transformada Integral de Fourier.....	16
1.6.3.3.	La Transformada Discrecional de Fourier (TDF).....	17
1.6.3.4.	La Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	18
1.7.	Densidad Espectral de Potencia (PSD) .....	19
1.8.	Biodiésel.....	20
1.8.1.	Fórmula química .....	21
1.8.1.1.	Propiedades fisicoquímicas .....	21
1.8.1.2.	Beneficios .....	23
1.9.	Opacidad en motores Diésel.....	23
1.9.1.	Proceso para calcular el índice de opacidad.....	24
1.10.	Normativas.....	26
1.10.1.	Normativas Opacidad.....	26
1.10.1.1.	NTE INEN 2 207:2002 .....	27
1.10.2.	Normativas de Vibraciones .....	28
1.10.2.1.	Norma ISO 10816 .....	28
1.10.2.2.	Norma ISO 10816-1: Directrices generales .....	29
<b>CAPÍTULO II.....</b>		<b>32</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>		<b>32</b>
2.1.	Materiales .....	33
2.1.1.	Motor experimental Mazda BT-50 CRDi .....	33
2.1.2.	Sensor vibración: Acelerómetro.....	34

2.1.3.	DAQ: Tarjeta de adquisición de datos .....	36
2.1.4.	Software .....	38
2.1.4.1.	LabVIEW.....	38
2.1.4.2.	MATLAB .....	38
2.1.5.	Biodiésel .....	39
2.1.5.1.	Lista de componentes .....	40
2.1.6.	Diésel .....	40
2.1.7.	FSA 740 .....	41
2.1.8.	BEA 070: Opacímetro portátil .....	43
2.2.	Método .....	44
2.2.1.	Elaboración biodiésel.....	44
2.2.1.1.	Determinación de los gramos del catalizador .....	44
2.2.1.2.	Preparación del Metóxido de sodio .....	45
2.2.1.3.	Transesterificación.....	46
2.2.1.4.	Sedimentación .....	47
2.2.1.5.	Separación .....	48
2.2.1.6.	Lavado .....	48
2.2.1.7.	Almacenamiento.....	50
2.2.2.	Selección de mezclas en el marco de la investigación.....	50
2.2.2.1.	Biodiésel al 5% (B5).....	51
2.2.2.2.	Biodiésel al 15% (B15).....	55
2.2.3.	Puntos de medición.....	56
2.2.3.1.	Bloque de cilindros.....	57
2.2.4.	Condiciones banco de pruebas.....	58
2.2.4.1.	Estado del motor .....	58

2.2.4.2.	Condiciones normales de funcionamiento.....	59
2.2.5.	Interfaz y programación en LabVIEW.....	60
2.2.5.1.	Sistema de Adquisición de datos.....	60
2.2.5.2.	Tratamiento de la señal con el software/ Programación.....	62
2.2.6.	Tratamiento de datos y programación en MATLAB.....	67
2.2.6.1.	Procesamiento de datos.....	67
2.2.6.2.	Algoritmo para la aplicación de la Transformada de Fourier y PSD.....	68
2.2.6.3.	Programa de operación para la importación y tratamiento de datos.....	70
2.2.7.	Medición de vibraciones.....	72
2.2.7.1.	Instrumentación e instalación.....	72
2.2.7.2.	Parámetros de medición.....	73
2.2.7.3.	Condiciones de experimentación.....	74
2.2.7.4.	Ensayos a practicar en el motor.....	75
2.2.7.5.	Procedimiento experimental.....	76
2.2.7.6.	Ensayos preliminares.....	77
2.2.8.	Medición opacidad.....	79
2.2.8.1.	Instrumentación e instalación de equipos.....	79
2.2.8.2.	Condiciones de experimentación.....	80
2.2.8.3.	Ensayos a practicar en el banco de estudio.....	81
2.2.8.4.	Procedimiento experimental.....	82
<b>CAPÍTULO III</b>	.....	<b>84</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	.....	<b>84</b>
3.1.	Resultados en pruebas Fisicoquímicas.....	84
3.1.1.	Análisis de resultados del Punto de Inflamación.....	85
3.1.2.	Análisis de resultados del Poder Calorífico Bruto.....	86

3.1.3.	Análisis de resultados del Índice de Cetano.....	88
3.2.	Vibraciones.....	89
3.2.1.	Ensayo con diésel.....	89
3.2.2.	Ensayo con biodiésel (B5) .....	94
3.2.3.	Ensayo con biodiésel (B15) .....	96
3.2.4.	Análisis de amplitud .....	98
3.2.4.1.	Análisis armónico 01 .....	98
3.2.4.2.	Análisis armónico 02.....	101
3.2.4.3.	Análisis armónico 03 .....	102
3.2.5.	Análisis de frecuencia .....	103
3.3.	Opacidad.....	104
3.3.1.	Ensayo con diésel.....	104
3.3.2.	Ensayo con biodiésel (B5) .....	105
3.3.3.	Ensayo con biodiésel (B15) .....	105
3.3.4.	Análisis general de opacidad con los diferentes combustibles .....	106
3.4.	Parámetros de funcionamiento de la gestión electrónica del motor Diésel.....	109
	<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>111</b>
	<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>111</b>
4.1.	Conclusiones .....	111
4.2.	Recomendaciones.....	113
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>121</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1</b> Propiedades del biodiésel .....	21
<b>Tabla 2</b> Opacidad para fuentes móviles con motores Diésel.....	27
<b>Tabla 3</b> Especificaciones técnicas del motor MAZDA BT-50 CRDi .....	33
<b>Tabla 4</b> Aspectos técnicos del sensor de vibración .....	35
<b>Tabla 5</b> Aspectos técnicos de la tarjeta de adquisición de datos .....	37
<b>Tabla 6</b> Materiales para la elaboración del biodiésel .....	40
<b>Tabla 7</b> Características del diésel Premium .....	41
<b>Tabla 8</b> Ficha técnica del equipo FSA 740.....	42
<b>Tabla 9</b> Ficha técnica del equipo BEA 070.....	43
<b>Tabla 10</b> Proporciones para la creación de la mezcla B5 .....	53
<b>Tabla 11</b> Proporciones exactas para la mezcla B5 .....	54
<b>Tabla 12</b> Proporciones para la creación de la mezcla B15 .....	55
<b>Tabla 13</b> Proporciones exactas en la mezcla B15 .....	56
<b>Tabla 14</b> Estado del banco de pruebas .....	58
<b>Tabla 15</b> Especificación de componentes utilizados en el banco de estudio .....	59
<b>Tabla 16</b> Condiciones normales de funcionamiento .....	60
<b>Tabla 17</b> Datos del panel frontal para la adquisición de datos .....	65
<b>Tabla 18</b> Conexión/Posición del acelerómetro.....	72
<b>Tabla 19</b> Parámetros de medición en el dominio de la frecuencia.....	73
<b>Tabla 20</b> Condiciones de experimentación en los ensayos .....	74
<b>Tabla 21</b> Nomenclatura usada para el levantamiento de datos.....	75
<b>Tabla 22</b> Detalles de la adquisición de datos.....	76
<b>Tabla 23</b> Condiciones de experimentación opacidad .....	81
<b>Tabla 24</b> Nomenclatura usada para el levantamiento de datos opacidad .....	82
<b>Tabla 25</b> Datos totales de los ensayos de opacidad.....	82
<b>Tabla 26</b> Propiedades fisicoquímicas de los combustibles .....	85
<b>Tabla 27</b> Datos de la señal vibratoria con diésel (Dc).....	90
<b>Tabla 28</b> Estudio general y estadístico de la amplitud en diésel .....	92

<b>Tabla 29</b> Estudio general y estadístico de la frecuencia en diésel.....	93
<b>Tabla 30</b> Estudio general y estadístico de la amplitud en B5.....	94
<b>Tabla 31</b> Estudio general y estadístico de la frecuencia en B5 .....	95
<b>Tabla 32</b> Estudio general y estadístico de la amplitud en B15.....	96
<b>Tabla 33</b> Estudio general y estadístico de la frecuencia en B15 .....	97
<b>Tabla 34</b> Resultados de opacidad diésel.....	104
<b>Tabla 35</b> Resultados opacidad B5 .....	105
<b>Tabla 36</b> Resultados opacidad B15 .....	106
<b>Tabla 37</b> Análisis estadístico general de los combustibles.....	107
<b>Tabla 38</b> Parámetros de funcionamiento del banco de estudio con los combustibles.....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1</b> Diagrama de la gestión electrónica del motor diésel .....	7
<b>Figura 2</b> Diagrama de distribución.....	9
<b>Figura 3</b> Triangulo de fuego.....	10
<b>Figura 4</b> Ciclo teórico de funcionamiento del motor diésel .....	11
<b>Figura 5</b> Densidad Espectral de Potencia.....	20
<b>Figura 6</b> Puntos de medición para máquinas recíprocas .....	30
<b>Figura 7</b> Zonas de evaluación.....	31
<b>Figura 8</b> Marco metodológico del estudio.....	32
<b>Figura 9</b> Acelerómetro ICP 603 C01 .....	34
<b>Figura 10</b> Imán empleado para la instalación sobre el motor .....	36
<b>Figura 11</b> Tarjeta DAQ NI-9250.....	37
<b>Figura 12</b> Logo LabVIEW .....	38
<b>Figura 13</b> Logo MATLAB .....	39
<b>Figura 14</b> FSA 740 .....	42
<b>Figura 15</b> BEA 070 .....	43
<b>Figura 16</b> Proceso para la elaboración del biodiésel.....	44
<b>Figura 17</b> Determinación de los gramos del catalizador .....	45
<b>Figura 18</b> Preparación del Metóxido de sodio .....	46
<b>Figura 19</b> Transesterificación.....	47
<b>Figura 20</b> Sedimentación.....	47
<b>Figura 21</b> Proceso de Separación .....	48
<b>Figura 22</b> Lavado del biodiésel .....	49
<b>Figura 23</b> Almacenamiento del biodiésel.....	50
<b>Figura 24</b> Bloque de cilindros Mazda BT-50 2.5 CRDi .....	57
<b>Figura 25</b> Sistema de adquisición de datos .....	61
<b>Figura 26</b> Asistente de adquisición de datos en LabVIEW .....	62
<b>Figura 27</b> Asistente para configurar los datos adquiridos de LabVIEW en el formato Excel .....	63
<b>Figura 28</b> Asistente para FFT en LabVIEW .....	63

<b>Figura 29</b> Icono de salida, señal FFT (PSD) .....	63
<b>Figura 30</b> Diagrama de bloques, programación LabVIEW .....	64
<b>Figura 31</b> Panel frontal VI: Interfaz del programa .....	65
<b>Figura 32</b> Iconos para insertar los datos del muestreo de vibraciones .....	65
<b>Figura 33</b> Indicadores de adquisición de datos .....	66
<b>Figura 34</b> Selección de carpeta destino de los datos .....	66
<b>Figura 35</b> Gráficas de la señal de vibración y PSD en el panel frontal .....	67
<b>Figura 36</b> Función para el cálculo de la PSD aplicando la Transformada de Fourier .....	68
<b>Figura 37</b> Programa para visualización de datos adquiridos desde LabVIEW .....	71
<b>Figura 38</b> Procedimiento para la Adquisición de Datos .....	76
<b>Figura 39</b> Test preliminar diésel .....	78
<b>Figura 40</b> Test preliminar para el enfoque del estudio .....	79
<b>Figura 41</b> Procedimiento para la adquisición de datos de Opacidad .....	83
<b>Figura 42</b> Punto de inflamación para el diésel y mezclas de biodiésel .....	85
<b>Figura 43</b> Poder calorífico bruto para el diésel y mezclas de biodiésel .....	87
<b>Figura 44</b> Índice de cetano para el diésel y mezclas de biodiésel .....	88
<b>Figura 45</b> Señal vibratoria con diésel (Dc) .....	90
<b>Figura 46</b> Media general en el armónico 01 .....	99
<b>Figura 47</b> Espectro vibratorio con respecto al armónico 01 .....	100
<b>Figura 48</b> Media general en el armónico 02 .....	101
<b>Figura 49</b> Media general en el armónico 03 .....	102
<b>Figura 50</b> Análisis de frecuencias general de los combustibles .....	103
<b>Figura 51</b> Análisis de la media con respecto a la opacidad .....	108

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

	Pág.
<b>Ecuación 1</b> Ecuación de movimiento para sistemas conservativos.....	15
<b>Ecuación 2</b> Ecuación de movimiento para sistemas conservativos.....	15
<b>Ecuación 3</b> Serie de Fourier .....	16
<b>Ecuación 4</b> Transformada Integral de Fourier.....	16
<b>Ecuación 5</b> Transformada Discrecional de Fourier (TDF).....	17
<b>Ecuación 6</b> Transformada Rápida de Fourier (FFT) .....	18
<b>Ecuación 7</b> Consumo de combustible .....	52
<b>Ecuación 8</b> Porcentaje biodiésel.....	54

## 1. INTRODUCCIÓN

En la vanguardia de la industria automotriz, los motores diésel electrónicos avanzan con notables avances destinados a impulsar el rendimiento y la eficiencia de manera sustancial. Sin embargo, la composición de los combustibles se presenta como una problemática crucial que afecta su funcionamiento óptimo. Resolver esta problemática se convierte en una misión imperante en la industria actual, buscando no solo maximizar el rendimiento de los motores, sino también reducir de manera significativa las emisiones asociadas. Este enfoque no solo mejora la eficiencia de los motores, sino también aborda la creciente necesidad de adoptar tecnologías más amigables con el medio ambiente.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el rendimiento de un motor diésel electrónico mediante el análisis de vibraciones, utilizando distintos tipos de combustibles como diésel, B5 y B15. Con el fin de alcanzar resultados óptimos y eficientes se realiza énfasis en establecer niveles de vibraciones, identificar zonas óptimas para adquirir información sobre las vibraciones con los diferentes combustibles y caracterizarlas. Para adquirir fundamentos adecuados dentro de la investigación estos resultados se los estima con los gases de escape (opacidad).

Este estudio utiliza LabVIEW y MATLAB para analizar los datos de las oscilaciones del motor diésel, centrándose en identificar patrones en los espectros. La investigación busca determinar como la composición de los combustibles afecta la combustión, identificando al combustible que produce menores niveles de vibración y opacidad contribuyendo así a comprender su impacto en el rendimiento del motor.

### **1.1. Problema de investigación**

El uso de diferentes combustibles y el análisis de vibraciones son herramientas fundamentales para evaluar el rendimiento de un motor Diésel, como el Mazda BT-50 CRDi. Para obtener datos relevantes mediante este tipo de diagnóstico, es crucial identificar las zonas del motor con la mayor fuente de vibración. Un análisis de vibraciones requiere equipos de diagnóstico especializados capaces de adquirir señales en un motor Diésel, permitiendo su estimación, caracterización y medición. Esta metodología genera información valiosa sobre el impacto de diversos combustibles en el rendimiento de un motor específico. Es por esto que se llega a generar la pregunta: ¿Qué correlación tiene el diésel y biodiésel con respecto al rendimiento de un motor electrónico Mazda BT-50 CRDi Diésel evaluado en base al diagnóstico por vibraciones?

### **1.2. Justificación**

Debido a la calidad del combustible y las repercusiones que tiene en el rendimiento de los motores Diésel, es necesario realizar un estudio comparativo entre la nueva tendencia de uso de biodiésel con diésel común. Mediante el análisis de vibraciones que es un tipo de diagnóstico muy efectivo y a su vez de gran fiabilidad en este tipo de motores. Se realizarán algunas pruebas, todas serán necesarias para establecer una comparación y aportar con un nuevo conocimiento acerca del comportamiento de los biocombustibles con respecto al tipo de mezcla usada. Y así obtener una resolución sobre su influencia en un sistema tan eficiente como lo es el Common rail de los motores electrónicos Diésel.

Con el análisis de datos derivado de este tipo de diagnóstico, se permitirá realizar un cotejo de información. Al estimar juntamente las vibraciones con los gases de escape, se generarán resultados que permitirán encontrar las características tanto del motor aplicado para la investigación, como de los combustibles utilizados. Además, es importante recalcar que los

motores Diésel que tienen retroalimentación de gases y sistema Common rail, se ven muy influenciados por el tipo de combustible que está siendo utilizado. Por tanto, al analizar tanto las vibraciones como los gases de escape, se puede realizar un análisis muy fiable.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General***

- Evaluar el rendimiento de un motor diésel a base de vibraciones con el uso de dos tipos de combustibles.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Establecer niveles de vibraciones en motores diésel electrónicos.
- Evaluar zonas del motor óptimas para adquirir datos de vibraciones.
- Medir vibraciones con diferentes combustibles.
- Caracterizar datos de vibraciones.
- Estimar vibraciones con gases de escape.

### **1.4. Alcance**

El presente proyecto estará basado en un motor electrónico del taller Diésel de la Universidad Técnica del Norte, específicamente el motor Mazda BT-50 CRDi que se trata de un motor con un sistema avanzado en inyección como lo es el Common rail, esto permitirá obtener resultados de mayor relevancia en el campo, pues el mercado automotriz Diésel tiene como punto principal y base de crecimiento a los motores que contienen ese sistema.

En él se analizará las vibraciones y se caracterizará los datos obtenidos al utilizar combustibles como el diésel y biodiésel, con respecto al último su composición estará basada en una mezcla B5 y B15. Los equipos que se utilizarán serán los adecuados para un diagnóstico de

vibraciones. El estudio se llevará a cabo hasta obtener los datos esenciales para evaluar el desempeño del motor y su comportamiento dinámico.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

#### 1.5. Motores diésel electrónicos

De acuerdo con Báez [1], los motores diésel electrónicos modernos presentan una amplia variedad de ventajas en comparación con sus predecesores, los cuales se caracterizaban por la emisión de humo y la generación de ruido:

- Más silenciosos.
- Económicos.
- Limpieza rápida.
- Seguros.

A través de la implementación de regulación electrónica, se asegura la administración precisa del caudal de inyección en todas las fases de operación del motor, garantizando un arranque preciso de la inyección. Este método no solo optimiza la eficiencia del sistema, además, contribuye a la disminución de las emisiones de gases contaminantes.

##### 1.5.1. Gestión electrónica

La gestión electrónica del motor diésel suplanta las piezas mecánicas encargadas de regular la cantidad de combustible, posibilitando la ajustabilidad del momento preciso de la inyección mediante sus componentes electrónicos. Este enfoque permite una supervisión precisa de la bomba, con resultados que incluyen la disminución del consumo de combustible, la reducción de la contaminación atmosférica, el incremento de la potencia del motor y el logro de un funcionamiento más uniforme del mismo [2].

El Control Diésel Electrónico (EDC) permite la adaptación a variados estados operativos del motor, lo que resulta en las siguientes ventajas:

- Ajuste preciso de RPM máximas y mínimas.

- Control preciso de la dosis y el caudal de pulverización.
- Regulación del exceso de presión en motores con turbocompresor.
- Optimización fundamentada en diversos factores que ejercen influencia en el rendimiento del motor.

#### ***1.5.1.1. Funcionamiento***

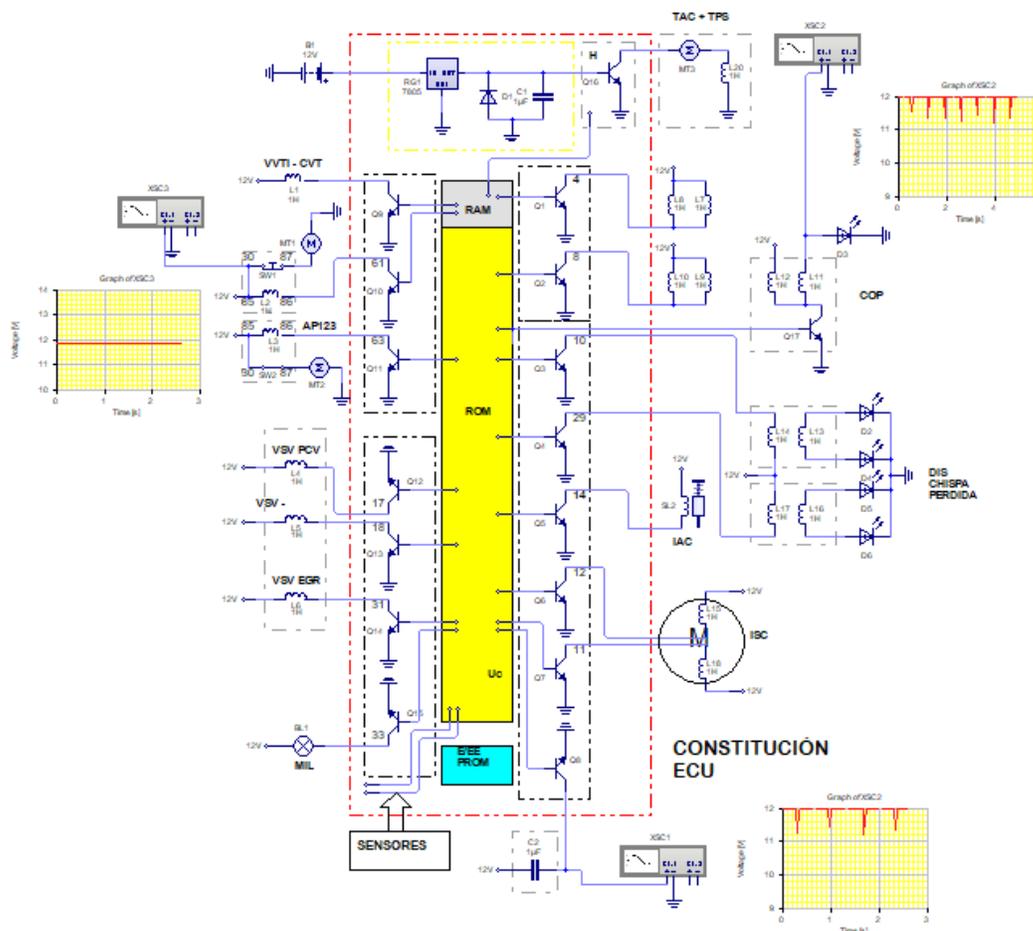
En el control electrónico de un motor de encendido por compresión (Figura 1), la unidad de control desempeña el papel de una computadora. Esta unidad está equipada con microprocesadores que procesan diversas señales provenientes de los sensores a través de un programa interno que se registra en la memoria de solo lectura. Como consecuencia, se generan siete señales de gestión que se envían a los equipos externos encargados de operar el motor [2].

El controlador electrónico recibe las señales provenientes de los diferentes tipos de sensores, las cuales son objeto de monitoreo ininterrumpido. En caso de que alguna de estas señales experimente una falla o presente defectos, se implementa automáticamente valores alternativos almacenados en la memoria de acceso aleatorio. Este mecanismo permite mantener la funcionalidad del vehículo de manera provisional, posibilitando su conducción hasta que se proceda a la corrección de la anomalía detectada [3].

Al emplear la Unidad de Control Electrónico (ECU), el primer objetivo es reducir significativamente el consumo de combustible y las emisiones, mejorando así la eficiencia de la máquina y la autonomía. Cuando opera a máxima capacidad, modula la cantidad de combustible inyectado con el fin de controlar la generación de gases de escape. En situaciones en las que surjan problemas en el motor, la ECU almacena la información correspondiente en su memoria RAM, permitiendo su lectura en talleres especializados con el equipo de diagnóstico correspondiente.

**Figura 1**

*Diagrama de la gestión electrónica del motor diésel*



Nota: En el grafico se puede observar el diagrama del funcionamiento electrónico del motor diésel. Fuente: [4]

### 1.5.2. Combustión

Los motores diésel funcionan mediante autoignición, un proceso en el cual una mezcla de aire y combustible se quema espontáneamente debido a las elevadas temperaturas y presiones presentes dentro del compartimiento de combustión. A diferencia de los motores Otto, no dependen de una chispa externa para iniciar la ignición [5].

En el proceso de combustión, el momento clave se presenta durante la inyección de combustible. En el caso del diésel, es imperativo que se cumplan ciertas condiciones: la atomización debe lograrse hasta obtener un polvo fino (entre 120 y 400  $\mu\text{m}$ ) según los datos suministrados en la revista académica [6], el combustible debe dispersarse de manera uniforme dentro de la cámara de combustión y mezclarse eficazmente con el aire. Además, debido a la compresión, la temperatura en ese instante debe superar el punto de ignición del diésel, que es de 280°C [6].

Durante el proceso de combustión se producen tres fases:

- **Retardo de ignición**

Cuando el combustible diésel ingresa en el compartimiento de combustión, se combina con aire frío, generando un calentamiento del combustible. El lapso que transcurre desde el inicio de la inyección de la primera gota hasta el comienzo de la ignición se conoce como tiempo de rotación del cigüeñal. Este intervalo abarca desde el momento en que se inyecta el combustible hasta que se desencadena la combustión.

- **Combustión descontrolada**

Una vez que la primera gota se calienta, el ingreso de diésel continua a la cámara de combustión. Cuando esta primera gota de combustible alcanza su temperatura de autoignición, se produce la combustión, provocando la quema del combustible restante acumulado en la cámara debido al incremento de temperatura.

- **Combustión controlada**

Tras finalizar el segundo paso, el diésel se quema gradualmente al ingresar al compartimiento de combustión. El enfoque primordial se centra hacia el proceso de regulación

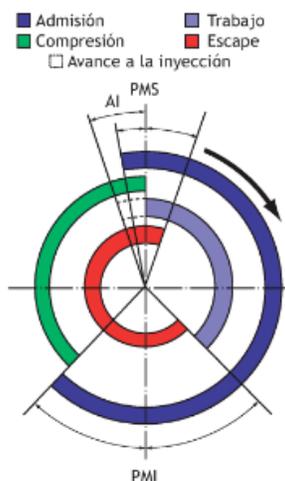
adecuada del combustible para asegurar un control preciso de la presión en los cilindros. Se tiene en cuenta que algunas partículas de combustible se consumirán una vez que se complete la atomización, ya que pueden tener dificultades para encontrar el aire necesario para la combustión.

### 1.5.2.1. Ángulo de avance de la inyección

El rendimiento del motor diésel se ve considerablemente influenciado por el ángulo de avance de la inyección de combustible. Un ángulo de inyección más elevado conlleva a una prolongación del tiempo de preparación del combustible y a una carga térmica más exigente para el motor. En contraste, un ángulo insuficientemente bajo ocasiona un notable retardo en el proceso de combustión, con la consiguiente disminución del valor de la presión máxima y una marcada reducción en la eficiencia térmica del motor [7].

## Figura 2

### Diagrama de distribución



Fuente: Adaptada de [8]

Los motores diésel ajustan sus ángulos de inyección de acuerdo con su modo operativo predominante. El ángulo de avance en la inyección se determina en función de parámetros tales

como la presión de inyección, la composición del combustible, la temperatura del aire, la velocidad del motor y la cantidad de combustible [9].

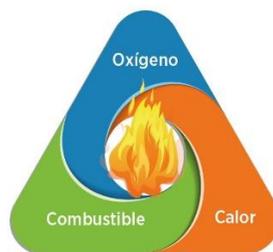
### ***1.5.2.2. Triangulo de la combustión***

El triángulo de combustión (Figura 3) simboliza los elementos esenciales para el desencadenamiento de la combustión. En este contexto, se necesitan la presencia de combustible, un agente oxidante y la aportación de energía de activación [10].

- El combustible, se define como cualquier sustancia capaz de experimentar una reacción de combustión. Este material puede encontrarse en estados físicos sólido, líquido o gaseoso.
- El oxidante, típicamente constituido por oxígeno atmosférico, desempeña el papel de agente oxidante presente en la reacción.
- La energía de activación, también conocida como calor, representa la cantidad de energía necesaria para que la reacción entre el combustible y el oxígeno ocurra dentro de un intervalo específico de tiempo y en un espacio determinado.

### **Figura 3**

#### *Triangulo de fuego*



Fuente: Adaptada de [11]

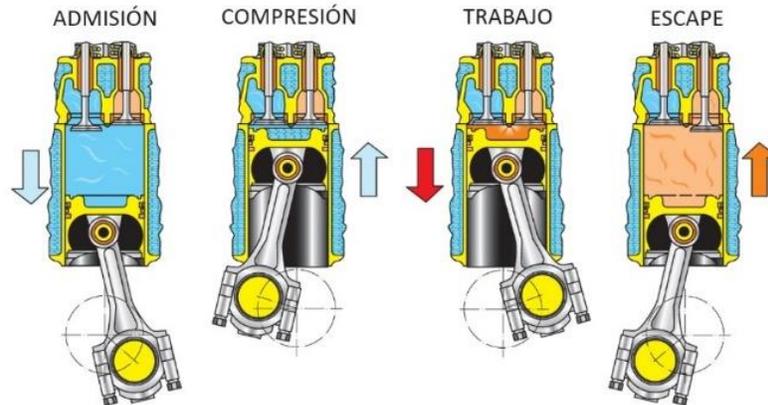
Cuando estos factores se combinan en las proporciones adecuadas, el fuego se desencadena. Así mismo, los incendios pueden prevenirse o extinguirse eliminando uno de estos factores o dicho de otra manera uno de los lados del triángulo.

### 1.5.2.3. Ciclo diésel

El ciclo diésel se presenta en cuatro carreras del pistón como se presenta en la Figura 4:

**Figura 4**

*Ciclo teórico de funcionamiento del motor diésel*



Fuente: Adaptada de [8]

- **Admisión**

En este instante, el motor se encuentra en régimen de ralentí, resultando en la apertura de la válvula de admisión para permitir el flujo de la mezcla de aire y combustible hacia el cilindro. Simultáneamente, la válvula de escape permanece cerrada, facilitando que la mezcla previamente admitida impulse el movimiento del vehículo [12].

- **Compresión**

En este punto, se produce la inversión de la acción mecánica. El pistón inicia su fase ascendente, lo que conlleva al cierre de la válvula de admisión. De manera simultánea, la válvula de escape permanece cerrada, y la mezcla experimenta un proceso de compresión. Este fenómeno se denomina así debido a que la relación de compresión varía considerablemente a lo largo de la carrera ascendente del pistón.

- **Explosión o Ignición**

El inyector introduce combustible en la cámara desde un instante ligeramente anterior al punto máximo del pistón hasta el inicio de su recorrido descendente. La elevada temperatura del gas provoca la expansión, ejerciendo una fuerza descendente sobre el pistón. Dada la celeridad de este proceso, su representación se aproxima mediante una curva adiabática reversible [13].

Durante esta etapa del ciclo, el motor experimenta un sin número vibraciones provocadas por la mezcla de combustible, así como el golpeteo de los pistones o de los asientos de válvula.

- **Escape**

Cuando se alcanza el Punto Muerto Inferior (PMI), se produce la apertura de la válvula de escape para liberar los compuestos gaseosos internos consumidos por la combustión, completando así el ciclo del motor diésel. Considerando el balance energético, se puede figurar que el aire se enfría de la misma manera porque entra y sale la misma cantidad de aire.

#### ***1.5.2.4. Vibraciones en la combustión***

El deterioro de los motores diésel se puede observar mediante pérdida de potencia, sobrecalentamiento, ruido anormal, cambios en las emisiones y se puede monitorear en diferentes condiciones [14].

La exposición del motor a diversas condiciones de funcionamiento y la recopilación de datos adicionales, como la posición del cigüeñal, permiten la investigación de los defectos de combustión, presentes como lo es en el encendido y la detección de detonaciones mediante la identificación de patrones de vibración.

Las diversas causas de fallas en un motor pueden identificarse mediante componentes clave como los inyectores, los anillos del pistón, las paredes del cilindro y las válvulas. Estos elementos

son críticos en el proceso de combustión y están directamente relacionados con las condiciones de admisión de aire y la evacuación del fluido de trabajo. Su desempeño, eficacia y confiabilidad son indicadores fundamentales que permiten evaluar la integridad y el rendimiento del motor. La detección y corrección oportuna de problemas en estos componentes son esenciales para mantener un funcionamiento óptimo y garantizar la durabilidad del motor.

## **1.6. Vibraciones en motores**

### **1.6.1. Vibración mecánica**

La vibración se define como una oscilación mecánica o un movimiento repetitivo que un objeto realiza en torno a una condición de referencia. Puede ocurrir de manera periódica, caracterizada por su repetición, como no periódica. El movimiento de armónicos, que representa la forma más elemental de oscilación repetitiva, sirve como un ejemplo ilustrativo de estas oscilaciones mecánicas [15].

### **1.6.2. Modelado de vibraciones**

El modelado de vibraciones constituye un enfoque técnico empleado en ingeniería y ciencias físicas con el propósito de representar y analizar el comportamiento dinámico de sistemas mecánicos o dispositivos que generan oscilaciones. Diversos métodos se aplican en este análisis, siendo los principales los siguientes:

#### ***1.6.2.1. Método de las fuerzas***

La aplicación de la segunda ley de Newton resulta imperativa, considerando cada dirección o dimensión de movimiento, donde el resultado de la combinación de fuerzas externas es equivalente de multiplicar la masa por la aceleración [14].

### ***1.6.2.2. Principio de D'Alembert***

Puede conceptualizarse como un enfoque alternativo a las ecuaciones de Newton, caracterizándose por la introducción de fuerzas inerciales y la imposición de condiciones de equilibrio [16].

### ***1.6.2.3. Método de energías***

Fundamentado principalmente en la fórmula de conservación de la energía, este enfoque se emplea para modelar matemáticamente sistemas vibratorios que incluyen movimientos lineales, angulares o una combinación de ambos. Su objetivo es derivar un modelo equivalente simplificado, restringiéndose a sistemas de un grado de libertad (1 GDL) y sistemas sin amortiguamiento [17].

### ***1.6.2.4. Método de Lagrange***

Meruane [18] menciona que este método para sistemas conservativos consiste en definir el Lagrangiano  $L$ , correspondiente al sistema, y se establece como  $L = T - U$ . En la ecuación de conservación de energía,  $T$  representa la energía cinética total y  $U$  la energía potencial total, ambas expresadas en términos de las coordenadas generalizadas, representadas por  $q_i(t)$ . Tomando como ejemplo el sistema masa-resorte, la coordenada generalizada  $q_i$  sería la posición  $x$ .

Según Criollo [14], el método de Lagrange postula que las ecuaciones de movimiento para sistemas conservativos se derivan de:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

**Ecuación 1***Ecuación de movimiento para sistemas conservativos*Reemplazando  $L = T - U$ ,

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial \dot{q}_i} = 0$$

**Ecuación 2***Ecuación de movimiento para sistemas conservativos*

Dentro de este contexto, la coordenada generalizada  $q_i$  se relaciona directamente con el desplazamiento  $x$ .

**1.6.2.5. Análisis modal**

Mediante modelos matemáticos, es posible describir el comportamiento dinámico, es decir, las oscilaciones, de estructuras mecánicas. El análisis modal, en particular, facilita la determinación de los parámetros del modelo modal. Se asume que la estructura, a lo largo del tiempo, permanece inalterada y es flexible de manera rectilínea. Las oscilaciones se restringen a un número específico de posiciones en varias direcciones (un grado de libertad) y a un rango preciso de frecuencias. Por lo tanto, la continuidad de la estructura se reemplaza de manera clara y precisa por un conjunto finito de oscilaciones, donde cada una posee una masa unitaria [19].

**1.6.3. Transformada de Fourier**

A continuación, se detallan las principales representaciones de la transformada de Fourier:

**1.6.3.1. La Serie de Fourier**

Convierte una señal periódica de rango infinito en un espectro de frecuencia discreto e infinito, su fórmula general esta expresada de la siguiente forma:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)],$$

### **Ecuación 3**

*Serie de Fourier*

con coeficientes  $\{a_n\}_{n=0}^{+\infty}$  y  $\{b_n\}_{n=1}^{+\infty}$ , se denomina serie de Fourier de  $f(t)$ .

La operación de esta serie se fundamenta en una señal de tiempo que exhibe periodicidad. Se trata de una señal cuya forma se repite infinitamente. Fourier demostró que dicha señal puede representarse como una combinación de expresiones funcionales tanto del seno como del coseno, cuyas frecuencias son inversamente proporcionales al periodo de la señal de tiempo. Un hallazgo sorprendente es que cualquier forma de onda finita puede desglosarse en una serie de componentes armónicos, cada uno con una frecuencia fundamental igual a 1, dividida por la extensión de la estructura de onda. Los coeficientes de amplitud de estos armónicos, conocidos como coeficientes de Fourier, pueden calcularse fácilmente siempre que se conozca la ecuación que describe la forma de onda [20].

#### **1.6.3.2. La Transformada Integral de Fourier**

Convierte una señal temporal continua de duración infinita en un espectro de frecuencias infinito y continuo [21]. Se indica que la fórmula general está representada de la siguiente manera:

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

### **Ecuación 4**

*Transformada Integral de Fourier*

Donde,  $F(\omega)$  es la transformada de Fourier de  $f(t)$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $i$  es la unidad imaginaria, y  $t$  es la variable del tiempo.

La extensión natural de la serie de Fourier implica señales temporales no periódicas de duración infinita, conocida como la transformada integral de Fourier o solo transformada de Fourier. Esta operación integral transforma de manera versátil una señal ininterrumpida en el tiempo, en un espectro que es continuo y abarca un rango infinito de frecuencias. Una propiedad notable de la transformada de Fourier es que los eventos de corta duración temporal se extenderán a lo largo de un amplio rango de frecuencias, y viceversa.

### 1.6.3.3. La Transformada Discrecional de Fourier (TDF)

Transforma una señal temporal periódica discreta en un espectro de frecuencias igualmente periódico y discreto [22]. Y la fórmula para la TDF de una secuencia  $x[n]$  de longitud  $N$  es:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

#### **Ecuación 5**

*Transformada Discrecional de Fourier (TDF)*

Donde,

- $X[k]$  es la  $k$ -ésima componente de frecuencia compleja en el dominio de la frecuencia.
- $x[n]$  es la  $n$ -ésima muestra de la secuencia en el dominio del tiempo.
- $N$  es la longitud total de la secuencia.
- $j$  es la unidad imaginaria ( $j^2 = -1$ )
- $e$  es la base del logaritmo natural.

Tanto la serie de Fourier como la transformada de Fourier presentan limitaciones para realizar cálculos en una computadora digital. Para abordar este desafío, se introdujo la transformada discreta de Fourier (TDF). Aunque el concepto de TDF probablemente fue concebido por Wilhelm Friedrich Gauss, un destacado matemático alemán del siglo XIX, en ese momento no

contaba con una computadora digital para su implementación. La TDF opera en el dominio temporal con señales muestreadas o discretas, produciendo un espectro discreto de muestras en el dominio de la frecuencia [20].

El espectro resultante constituye una aproximación en serie de Fourier, en la cual se pierde información entre las muestras de las formas de onda. La clave para la Transformada Discreta de Fourier (TDF) radica en tener una forma de onda específica, es decir, una función que represente la forma de onda mediante una serie de números. La generación de este conjunto de números a partir de una señal analógica implica un proceso de muestreo y una conversión analógica a digital. La señal seleccionada se presenta como una representación matemática del nivel de señal instantáneo durante un intervalo de tiempo definido, aunque carece de información de la señal entre los momentos en que se tomaron las muestras.

#### ***1.6.3.4. La Transformada Rápida de Fourier (FFT)***

Es un algoritmo de computadora para calcular la TDF. Schmidt [23] menciona, que la idea básica detrás de la TRF o más conocida como FFT, es descomponer de manera iterativa a dos Transformadas Discretas de Fourier más simples, por lo tanto, para su inicialización parte de la fórmula de la TDF:

$$X[k] = \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r] \cdot (W_{N/2})^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x[2r+1] \cdot (W_{N/2})^{rk}$$

**Ecuación 6**

*Transformada Rápida de Fourier (FFT)*

Donde,  $W_N^2 = e^{-j\frac{2\pi}{N}2} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} = W_{N/2}$ .

Para utilizar la TDF en computadoras digitales, se desarrolló la transformada rápida de Fourier (FFT) siendo un algoritmo de cálculo rápido y eficiente para TDF. Según los informes, Cooley y Tuckey la descubrieron en 1967. Sin embargo, las computadoras necesarias para usar la TRF no existían antes de esa fecha. El algoritmo impone varias restricciones tanto a la señal como al espectro generado.

Por ejemplo, la señal que se va a muestrear y convertir debe consistir en un número de muestras igual a una potencia de 2. La mayoría de los analizadores TRF permiten la conversión de 512, 1024, 2048 o 4096 según las investigaciones [20] . El rango de frecuencia incluido en el análisis TRF depende del número de muestras recolectadas y de la frecuencia de muestreo.

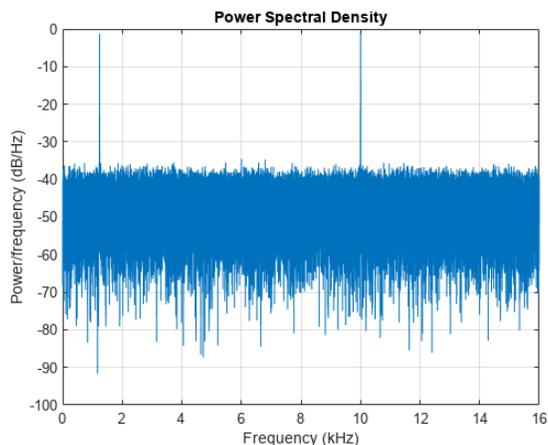
### **1.7. Densidad Espectral de Potencia (PSD)**

La PSD se aplica a espectros continuos, la integración de la misma en un intervalo de frecuencia específico permite calcular la potencia promedio de la señal dentro de dicho rango. A diferencia del Espectro Cuadrático Medio, los picos en este espectro no indican la potencia en una frecuencia específica [24].

Una Densidad Espectral de Potencia unilateral abarca la potencia total de la señal desde la frecuencia de componente continua (DC) hasta la mitad de la tasa de Nyquist. Por otro lado, una PSD bilateral comprende la potencia total en el intervalo de frecuencia desde DC hasta la tasa de Nyquist. Un caso ilustrativo se encuentra representado en la Figura 5:

## Figura 5

### *Densidad Espectral de Potencia*



Nota. PSD de una señal sinusoidal con dos componentes de frecuencia. Fuente: [24]

## 1.8. Biodiésel

El biodiésel es un biocombustible en estado líquido que puede obtenerse tanto de aceite vegetal como de grasa animal. Tiene propiedades similares al diésel en términos de número de cetano y densidad. Por esta razón, el biodiésel tiene la capacidad de ser mezclado con diésel para ser utilizado en motores, o inclusive sustituirse por completo con algunas modificaciones apropiadas.

En los motores de combustión interna se puede utilizar 100% biodiésel (B100) o diésel fósil en diversas mezclas, para las cuales se utiliza Bx. Donde "B" es el combustible y "x" es el porcentaje, el biodiésel es una mezcla de diésel fósil y biodiésel puro. La combustión de biodiésel genera cantidades reducidas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que son liberadas en la atmósfera y resultan neutras, el combustible no incorpora sustancias perjudiciales [1].

### 1.8.1. Fórmula química

La materia prima utilizada en la fabricación de biodiésel se compone de aceite vegetal, que puede proceder de fuentes como girasol, canola, soja o palma africana. Estos aceites vegetales consisten mayormente en moléculas de triglicéridos de ácidos grasos con longitudes de cadena carbonada que oscilan entre 14 y 24 átomos de carbono, las propiedades del biodiésel se presentan en la Tabla 1. Además, contienen en proporciones reducidas mono glicéridos y triglicéridos, así como elementos variables que son eliminados durante el proceso de refinación del biodiésel.

**Tabla 1**

*Propiedades del biodiésel*

	Detalles
Fórmula química	$(C_{18,1203}H_{34,9963}O_2)^{45}$
Poder calorífico	37.10 MJ/Kg
Densidad	880 Kg/m <sup>3</sup>
Punto de inflamación	100-170°C
Número de cetano	Min. 47

Nota: En esta tabla se encuentran las principales propiedades del biodiésel. Fuente: [1]

#### 1.8.1.1. Propiedades fisicoquímicas

Según Cerdeira [25] la estructura física del biodiesel se obtiene fácilmente mediante observación directa y contacto físico. A continuación, se presentan las principales propiedades:

- **Color:** La materia prima de la cual se produce el biodiesel influye en este aspecto. Cuando se elabora con aceite obtenido de la palma, la coloración peculiar es el amarillo casi transparente, pero esto no impide que el color cambie.

- **Densidad:** El componente principal que da valor a esta propiedad es la materia prima. El biodiésel tiene entre 1200 y 1850  $Kg/cm^3$ , por lo tanto, tiene una densidad mayor que la del agua.
- **Volumen:** La determinación del volumen específico del biodiésel está directamente influenciada por la materia prima utilizada. Es crucial tener en cuenta que el volumen específico se determina como el recíproco de la densidad, es decir, el cociente entre el volumen y la masa.
- **Punto de inflamación:** El punto de inflamación representa la temperatura mínima a la cual un líquido emite vapores en cantidades adecuadas para crear una mezcla inflamable con el aire. Un punto de inflamación elevado puede incrementar la seguridad durante el almacenamiento y la manipulación del biodiésel.
- **Viscosidad:** La viscosidad se enfoca en la resistencia de un fluido al flujo. En el caso del biodiésel, una viscosidad adecuada es esencial para garantizar una pulverización eficiente y una combustión completa en los motores diésel.
- **Índice de cetano:** El índice de cetano es una medida de la facilidad con la que el biodiésel se enciende durante la combustión. Un índice de cetano más alto generalmente se asocia con una mejor ignición y un rendimiento más suave en motores diésel.
- **Contenido de agua y sedimentos:** Un bajo contenido de agua es esencial para prevenir la formación de emulsiones y reducir la corrosión. El contenido de sedimentos también debe ser controlado para evitar problemas en los sistemas de combustible.
- **Contenido de azufre:** En particular, esta propiedad es significativamente inferior cuando se trata del biodiésel, lo que contribuye a una combustión más limpia y favorece el

rendimiento del motor y prolonga la vida útil de los sistemas de escape al minimizar la formación de depósitos y corrosión.

- **Poder calorífico:** El poder calorífico es la cantidad de energía liberada cuando se quema por completo una determinada cantidad de biodiésel. Un alto poder calorífico significa una alta eficiencia energética durante la combustión.
- **Estabilidad a la oxidación:** La estabilidad oxidativa se refiere a la capacidad del biodiésel para resistir la oxidación, que puede resultar en la formación de compuestos que afectan la calidad del combustible y la operación del motor.

#### *1.8.1.2. Beneficios*

- El biodiésel se quema eficientemente sin requerir modificaciones en el motor y tiene la capacidad de ser alimentado tanto con diésel convencional como con una combinación de ambos.
- Incrementa la durabilidad del motor gracias a su mayor capacidad de lubricación.
- El biodiésel, al ser un combustible de origen vegetal, no incluye ninguna sustancia nociva para la salud.
- En comparación con el diésel, produce menos emisiones de partículas, aromáticos y monóxido de carbono.

### **1.9. Opacidad en motores Diésel**

La opacidad en los motores diésel se refiere a la cantidad de partículas sólidas suspendidas en los gases de escape, las cuales afectan la transmisión de la luz a través de los mismos. Este fenómeno guarda una estrecha relación con la eficiencia de la combustión y la presencia de hollín en el sistema de liberación de gases del motor. La medida de la opacidad se realiza comúnmente en unidades de König, utilizando un opacímetro que evalúa la absorción y dispersión de la luz por las partículas presentes en los gases de escape. El control y la reducción de la opacidad son imperativos tanto desde una perspectiva medioambiental, debido a la emisión de partículas contaminantes, como desde el punto de vista normativo, ya que existen estándares que limitan los niveles aceptables de opacidad en las emisiones de vehículos diésel.

La combustión del motor produce varios gases que se consideran no contaminantes, entre ellos dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Esto se debe a que en bajas concentraciones no tiene efectos nocivos para los seres humanos, los organismos y el medio ambiente [26].

Sin embargo, al buscar  $\text{CO}_2$ , es importante recordar que es el único gas producido en altas concentraciones a partir de fuentes artificiales que causa el calentamiento global. Por ello, grupos ecologistas de todo el mundo se han planteado limitar las emisiones de  $\text{CO}_2$  de la industria y los motores de combustión, especialmente en el sector de la automoción.

Para mitigar la opacidad en motores diésel, se implementan diversas tecnologías, como Sistemas de Recirculación de Gases de Escape (EGR), Filtros de Partículas diésel (DPF) y catalizadores de oxidación. Estos dispositivos trabajan en conjunto para optimizar la combustión, reducir la emisión de partículas sólidas y que cumpla con las más estrictas normativas medioambientales. Además, el monitoreo continuo de la opacidad mediante tecnologías avanzadas permite un mantenimiento proactivo y la optimización de los componentes del sistema de escape para mantener niveles de emisión dentro de los límites permitidos [27].

### **1.9.1. Proceso para calcular el índice de opacidad**

De acuerdo a INEN [28], la metodología para calcular el índice de opacidad de un motor diésel mediante la prueba estática de aceleración libre se detalla en las siguientes etapas.

#### **I. Verificación:**

La presente etapa de verificación se centra en validar la metodología utilizada para calcular dicho índice, asegurando la fiabilidad y precisión de los resultados [28]:

- Se sugiere detener el motor y verificar en el vehículo que el nivel de aceite en el cárter se encuentre dentro de los límites recomendados por el fabricante del vehículo, comprendidos entre el nivel mínimo y máximo.
- Es importante que se garantice que el motor del vehículo se encuentre operando a la temperatura normal de funcionamiento.
- Se recomienda verificar que la transmisión del vehículo esté en punto muerto (en el caso de transmisión manual) o en posición de estacionamiento (en el caso de transmisión automática).
- El vehículo tiene que cumplir con los puntos anteriores, si es el caso. La prueba puede seguir al siguiente paso.
- Se aconseja permitir que el medidor se caliente y estabilice de acuerdo con las especificaciones del fabricante, garantizando así su correcto funcionamiento.
- Comprobar que el equipo esté debidamente calibrado.
- Verificar que la lectura del opacímetro marque cero.

## **II. Medición:**

La fase de medición en la metodología empleada para calcular el índice de opacidad de motores diésel representa un paso crucial hacia la comprensión precisa de las emisiones vehiculares [28].

- Verificar que no existan obstrucciones físicas para la libertad de movimiento del acelerador.
- El motor operando a ralentí, efectuar como mínimo tres aceleraciones consecutivas, desde la posición de ralentí hasta la posición de máxima revolución, con el fin de purgar el tubo de escape.
- Unir la sonda de prueba a la salida del sistema de escape del vehículo.
- Acelerar el vehículo de manera libre y luego permitir que el motor retorne a la condición de ralentí.
- Registrar el porcentaje máximo de cobertura alcanzado en cada ciclo y, posteriormente, desconsiderar los valores obtenidos con el motor en ralentí después de cada aceleración.

- Para obtener un resultado preciso, se requiere considerar al menos tres mediciones realizadas en condiciones estacionarias, donde estas lecturas consecutivas se sitúen dentro de un margen del 10% y no sigan una secuencia decreciente.

### **III. Informe de resultados:**

La fase de informe de resultados en la metodología empleada para calcular el índice de opacidad de motores diésel representa el cierre de un proceso exhaustivo orientado a comprender y evaluar las emisiones vehiculares de manera precisa [28].

- El cálculo del resultado definitivo se llevará a cabo mediante la determinación de la media aritmética de los valores obtenidos en las tres lecturas realizadas.
- La entidad encargada de llevar a cabo la prueba generaría un informe técnico que incluya los datos obtenidos y adjuntarlo al documento emitido por el opacímetro.

#### **1.10. Normativas**

##### **1.10.1. Normativas Opacidad**

Las normativas de opacidad en los motores diésel se refieren a estándares establecidos para controlar y limitar la cantidad de partículas y gases contaminantes emitidos por los vehículos diésel. Estas regulaciones generalmente tienen como objetivo medir la opacidad, que es la cantidad de luz bloqueada por los gases de escape. Estas regulaciones tienen como objetivo mejorar la calidad del aire y reducir los impactos negativos en la salud humana y el medio ambiente mediante la reducción de las emisiones de partículas y compuestos peligrosos. Estas regulaciones varían según la región y el país y a menudo incluyen límites de transparencia específicos que los vehículos diésel deben cumplir durante las pruebas de emisiones para garantizar un funcionamiento limpio y confiable del motor diésel.

### **1.10.1.1. NTE INEN 2 207:2002**

La normativa, tiene el enfoque de “establecer los límites de emisiones contaminantes por vehículos automotores a diésel” [29, p. 1], este documento normativo es emitido por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) y define las especificaciones y requisitos técnicos destinados a los sistemas de gestión de calidad en organizaciones. La norma ofrece pautas detalladas para la implementación efectiva de un sistema de gestión de calidad, con el propósito de elevar la calidad de los productos y servicios, incrementar la satisfacción del cliente, y garantizar el cumplimiento de los requisitos legales y reglamentarios correspondientes.

La NTE INEN 2 207 se basa en principios reconocidos internacionalmente, como los de la norma ISO 9001, y busca estandarizar los procesos de gestión de calidad en las empresas ecuatorianas. Al seguir esta normativa, las organizaciones pueden demostrar su compromiso con la calidad y la mejora continua, lo que contribuye a fortalecer la competitividad en el mercado y facilita la participación en procesos de licitación y contratación tanto a nivel nacional como internacional.

Cualquier fuente móvil equipada con un motor de encendido por compresión no puede emitir emisiones que excedan los límites especificados a continuación en la Tabla 2:

**Tabla 2**

Opacidad para fuentes móviles con motores Diésel

Año modelo	% Opacidad
2000 y posteriores	50
1999 y anteriores	60

Nota: Máximos niveles de opacidad en prueba de aceleración libre. Fuente: Adaptada de [28]

## **1.10.2. Normativas de Vibraciones**

### **1.10.2.1. Norma ISO 10816**

La normativa ISO con respecto a la vibración de las máquinas proporcionan condiciones para evaluar las vibraciones en rangos que tienen una frecuencia que oscila entre 0.5 a 150 Hz. Se estima que esta regla se aplica a toda clase de máquina según su tipo de carga, características y el tamaño. Dentro de la norma, se establece recomendaciones que se enfocan en la medición y por recurrencia al análisis de la vibración juntamente con la causa. Con la finalidad de la detección de problemas que puedan afectar el desempeño y la extensión de vida útil del equipo [30].

En el apartado de la normativa ISO [30] los investigadores mencionan las secciones de la normativa ISO-10816. Con respecto a la gama de maquinarias que aplican a esta norma oscilan entre las 0.5 a 150 toneladas. Cada sección de la normativa establece los límites de vibración considerados aceptables, los cuales varían según el tamaño y la función de las distintas máquinas.

Según la Organización Internacional de Normalización [31] define que las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de vibraciones se dirige hacia la supervisión operativa y pruebas de validación para asegurar la confiabilidad a largo plazo de la máquina a través de mediciones en partes no giratorias.

La correcta preparación del equipo de medición resulta esencial para asegurar una evaluación apropiada. La fiabilidad de las mediciones aumenta a medida que se abarcan frecuencias en un rango amplio, dependiendo de la intrincación de la señal completa de vibración. Por lo tanto, es recomendable emplear frecuencias que oscilen entre 2 y 1000 Hz, así como valores totales en RMMS (Root Mean Square) de desplazamiento, velocidad y aceleración, con una precisión del  $\pm 10\%$  en el rango de 10 a 1000 Hz y del  $+10\%/-20\%$  en el rango de 2 Hz a 10 Hz [31]. Es crucial posicionar adecuadamente los sensores para obtener datos precisos.

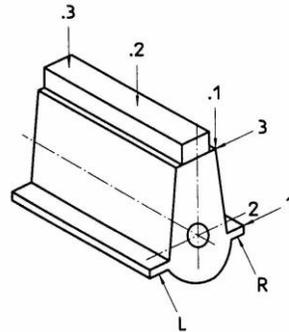
### **1.10.2.2. Norma ISO 10816-1: Directrices generales**

En esta sección de la normativa se mencionan parámetros generales y las metodologías para la medición y evaluación de las oscilaciones, principalmente esta parte de la normativa ISO 10816 va enfocada hacia las partes no rotatorias. Los criterios que se mencionan aquí tienen la misión de relacionar las oscilaciones generadas por la maquinaria en cuestión y no a través de las oscilaciones que puedan producirse en el exterior y sean transmitidas a ella [32]. A continuación, se presentan los parámetros de medición:

- **Rango de frecuencias:** Las frecuencias dependen del tipo de máquina, principalmente se utilizaba los rangos de 10 Hz a 1000 Hz. Sin embargo, pueden aplicarse diferentes rangos para los distintos tipos de máquinas existentes.
- **Parámetros a medir:** Desplazamiento, velocidad, aceleración de la vibración.
- **Magnitud de la vibración:** Cuando es evaluada la vibración de banda ancha, es habitual considerar la velocidad, pero en cuestión de la investigación pueden ser de preferencia utilizar parámetros de aceleración en lugar del valor r.m.s, aunque para ello se requieran criterios alternativos.
- **Severidad de la vibración:** La medición se realiza en diferentes posiciones y en diferentes direcciones, por lo tanto, los resultados son variados dependiendo de la magnitud de vibración elegida para la investigación. Sin embargo, un valor de la severidad puede caracterizar la vibración de la maquinaria, dependiendo de su tipo.
- **Posiciones de medición:** Dentro de las directrices generales encontramos el punto más importante que se enfoca en las posiciones de medición como se observa en la Figura 6. Se menciona que para una respuesta apta y fiable que caracterizará las vibraciones, es necesario que sea una parte estructural que de gran significado a las fuerzas dinámicas.

## Figura 6

### *Puntos de medición para máquinas recíprocas*



Nota. Puntos de medición adaptada para una investigación de un motor en línea. Fuente: [32, p. 8]

Para los ensayos de aceptación, es crucial contar con la información y equipos adecuados para recabar la información en el marco de la investigación:

- **Instalación de ensayos.** Para algunas máquinas en cuestión de economía se realiza en bancos de pruebas. Por lo tanto, la estructura en la cual esta superpuesta la máquina debe considerarse estable y garantizar que las frecuencias naturales no coincidan con las frecuencias rotacionales.
- **Condiciones del funcionamiento de la máquina.** La adquisición de datos inicia cuando las condiciones de la máquina alcanzan su nivel normal de funcionamiento. También pueden iniciar bajo otras condiciones dependiendo de la investigación.
- **Criterios.** Dentro de los criterios se encuentra la magnitud de vibración de la cual surgen las zonas de evaluación de la maquinaria, como se observa en la Figura 7:

Zona A: Las máquinas recién instaladas.

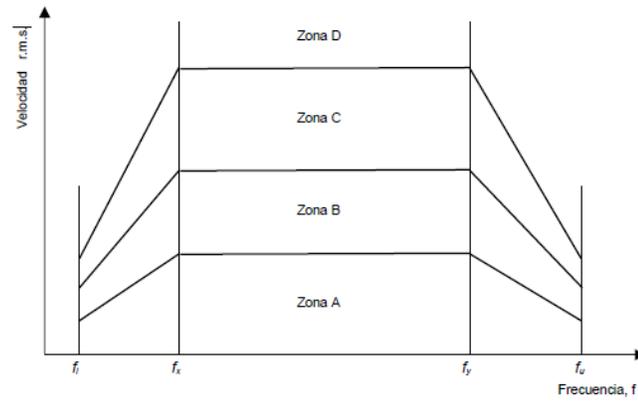
Zona B: Máquinas para largos periodos de operación sin restricciones.

Zona C: Máquinas que operan dentro de un límite determinado.

Zona D: Daños severos en la máquina.

### Figura 7

*Zonas de evaluación*



Nota: Forma general de criterio de aceptación de la velocidad de la vibración. Fuente: [32, p. 13]

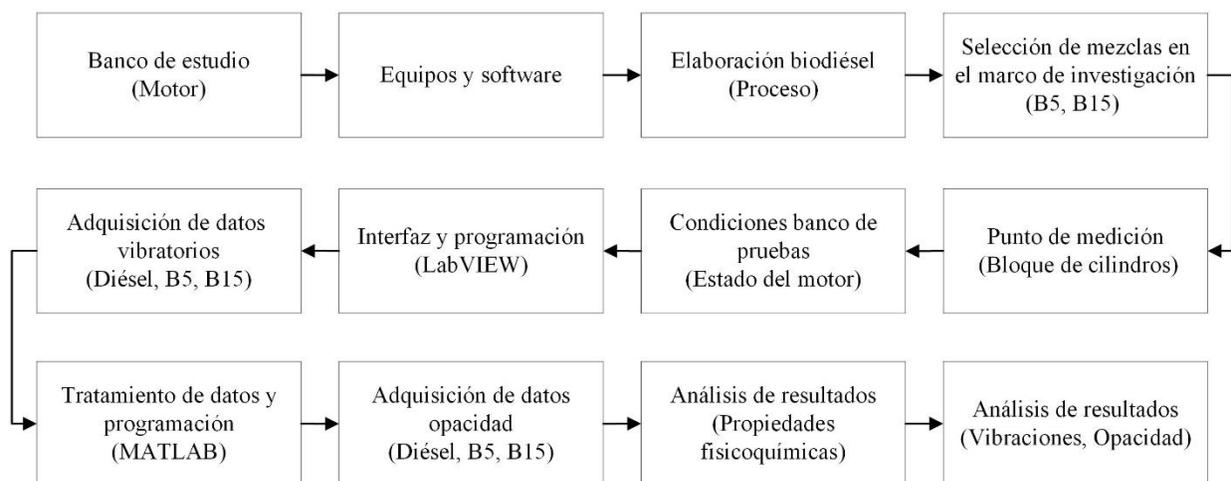
## CAPÍTULO II

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el marco de este estudio, se ejecuta un minucioso análisis de vibraciones en un motor diésel electrónico con el propósito de evaluar y comparar su comportamiento dinámico al emplear distintos tipos de combustibles. A continuación, se detalla de manera íntegra el procedimiento experimental, los instrumentos utilizados y los procesos llevados a cabo para la adquisición y análisis de los datos, abarcando tanto las mediciones vibratorias como las de opacidad. Este enfoque metodológico posibilitará una evaluación precisa de la influencia que los combustibles diésel y biodiésel tienen en el comportamiento vibracional del motor. La metodología empleada en este estudio se presenta en el diagrama de flujo en la Figura 8:

**Figura 8**

*Marco metodológico del estudio*



El procedimiento específico para cada tema se describe detalladamente en los diversos subtemas que se presentarán a continuación:

## 2.1. Materiales

### 2.1.1. Motor experimental Mazda BT-50 CRDi

Con el fin de efectuar el estudio, se establece el uso del motor de la línea Mazda, específicamente el modelo BT-50. Sus aspectos técnicos se detallan en la Tabla 3, el banco de pruebas es de un motor gasóleo turboalimentado con curvas de torque y potencia de 330Nm a 1800 RPM y 105Kw a 3500 RPM, respectivamente.

El banco de estudio está diseñado para el fin académico lo cual resulta amigable para el desarrollo de la investigación. Con datos bibliográficos se puede expresar algunas de las características nuevas a comparación de modelos antiguos, como lo son las cámaras de combustión independientes en cada uno de los pistones, piezas reforzadas como la falda del pistón, construcción de la culata de aluminio, cuenta con doble árbol de levas que impulsan cuatro válvulas de escape y admisión para cada uno de los 4 cilindros del motor.

**Tabla 3**

*Especificaciones técnicas del motor MAZDA BT-50 CRDi*

	Detalles
Nº de cilindros, tipo	4 cilindros en línea, DOHC
Cilindrada	2499cm <sup>3</sup>
Relación de compresión	18:1
Sistema de combustible:	BOSCH
Orden de encendido:	1-3-4-2
Diámetro interior y carrera (mm):	93x92
Potencia:	105 KW a 3500 rpm
Torque:	330 Nm a 1800 rpm
Sistema de lubricación, tipo:	Tipo engrase a presión
Sistema de refrigeración, tipo:	Circulación forzada refrigerada por agua
Alimentación:	Turbo compresor de geometría variable

Fuente: [33]

### 2.1.2. Sensor vibración: Acelerómetro

En el marco de la investigación, se empleó un acelerómetro de la serie ICP 603 C01 (Figura 9), que se clasifica como un sensor de vibraciones tipo cizallamiento con cristal de cuarzo. Se destaca que existen dos variantes de sensores dentro de esta categoría, siendo la opción cerámica la segunda alternativa.

#### Figura 9

*Acelerómetro ICP 603 C01*



En este contexto, se opta por el sensor con cristal de cuarzo debido a sus notables propiedades operativas presentadas en la Tabla 4. Este dispositivo presenta una mayor resistencia a los efectos adversos de los cambios de temperatura y lo posiciona como una elección óptima para aplicaciones sensibles. Además, demuestra una capacidad sobresaliente para adaptarse a ambientes acústicamente desafiantes, respondiendo eficazmente a frecuencias tanto altas como bajas.

**Tabla 4***Aspectos técnicos del sensor de vibración*

<b>ICP 603 C01</b>	<b>Detalles</b>
Tecnología	ICP
Rango de medición	50 g
Sensibilidad	100 mV/g
Rango de frecuencia	0.5-10 000 Hz
Calibración de un punto	100 Hz
Toma de conexión	Dos polos en la parte superior
Perno de montaje	Métrico o en pulgadas

Fuente: [34]

Este sensor es de tipo piezoeléctrico que permite obtener datos en función de una señal eléctrica la cual ha sido transformada desde un fenómeno mecánico, específicamente las vibraciones. Estos sensores internamente poseen un amplificador que convierte señales de carga con alta impedancia en una señal de voltaje de baja impedancia.

La interacción entre la masa, los cristales y un sistema elástico en vibración da origen a fuerzas. Este proceso está regido por la ley de Newton, donde la fuerza de inercia (F) es el resultado del producto entre la masa (m) y la aceleración (a) del sistema  $F = m \cdot a$ . En este contexto, la aceleración del sistema ocasionará una fuerza directamente proporcional a la masa, provocando deformaciones en los cristales y generando variaciones en la carga eléctrica. En términos generales, las aceleraciones medidas por estos sensores se expresan en unidades de gravedad, g ( $m/s^2$ ).

El montaje implementado en el banco de pruebas será de tipo magnético como se puede observar en la Figura 10. Esta técnica permite tomar mediciones en varios puntos, el material del imán también puede afectar en los resultados de las mediciones y la mala instalación conlleva a

una caída del rango de frecuencia. Los imanes de tierras raras tienen una alta resistencia haciéndolos ideales para el estudio.

### **Figura 10**

*Imán empleado para la instalación sobre el motor*



### **2.1.3. DAQ: Tarjeta de adquisición de datos**

En el marco de la obtención de datos, se emplean los registradores de adquisición de datos (DAQ), destacándose por sus distintos modelos y versiones que llevan a cabo la medición y registro de fenómenos físicos. En este contexto, se prioriza el uso del modelo NI-9250 que se muestra en la Figura 11. Este dispositivo ha sido diseñado para sistemas de pequeña escala, destacándose por su simplicidad compacta y la capacidad de transferir datos a un servidor externo, típicamente un PC.

**Figura 11**

*Tarjeta DAQ NI-9250*



En el proceso de captura de datos, las señales generadas por el sensor de vibración son sometidas a una conversión. La señal analógica proveniente del sensor se transforma en formato digital, siendo almacenada en la memoria del registrador. Posteriormente, estos datos pueden ser direccionados a canales específicos, donde se aplican diversas operaciones y cambios de magnitud, entre otras manipulaciones. Los datos técnicos de la tarjeta DAQ NI-9250 se presentan en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Aspectos técnicos de la tarjeta de adquisición de datos*

<b>NI 9250</b>	<b>Detalles</b>
Número de canales	2 canales de entrada analógica
Resolución ADC	24 bits
Modo de muestreo	Simultáneo
Frecuencia	13,1072 MHz
Exactitud	$\pm 100$ ppm máximo
Impedancia de entrada	$2 \text{ M}\Omega \parallel 280 \text{ pF}$
Rango de voltaje de entrada	Típico $\pm 5,1 \text{ V}_{\text{pico}}$
Temperatura operativa	$40^\circ\text{C}$ a $70^\circ\text{C}$

Fuente: [35]

## 2.1.4. Software

### 2.1.4.1. LabVIEW

Dentro del marco de la adquisición de datos, el programa LabVIEW en su versión 2020 SP1, con licencia Campus UTN, es el punto de partida dentro del proceso de investigación. Este software se destaca por su capacidad para adaptarse a diversas configuraciones de hardware, convirtiéndolo en una herramienta versátil y esencial.

La programación se realiza de manera sencilla, lo que facilita la tarea de evitar procesos o pasos que puedan introducir márgenes de error en la recopilación de datos. La atención se centra en asegurar la exactitud y la integridad de la información., lo que subraya la importancia de una implementación cuidadosa y sin errores en todo el proceso.

### Figura 12

*Logo LabVIEW*



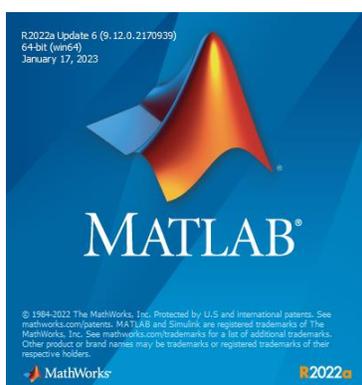
### 2.1.4.2. MATLAB

El componente culminante del proceso de análisis de vibraciones es la aplicación del software MATLAB en su versión R2022a, con licencia Campus UTN. Este es un lenguaje de cálculo técnico diseñado específicamente para entornos de programación. MATLAB se utiliza para la ejecución de algoritmos complejos, análisis exhaustivos de datos, representación visual y

cálculos numéricos detallados. La característica central de este software radica en su capacidad para manipular eficientemente vectores y matrices, junto con la habilidad para integrar datos provenientes de archivos con formato tabular, ya sean datos numéricos o textuales, que pueden ser fácilmente introducidos en su interfaz de programación.

### Figura 13

*Logo MATLAB*



#### 2.1.5. Biodiésel

El biodiésel, un biocombustible renovable derivado de fuentes orgánicas como aceites de origen vegetal o grasas provenientes de animales, se produce a través del proceso de conversión mediante transesterificación. Este procedimiento químico transforma los triglicéridos presentes en dichos materiales en ésteres metílicos o etílicos, que constituyen los elementos fundamentales del biodiésel. Este combustible se presenta como una opción más sostenible y respetuosa con el medio ambiente en comparación con los combustibles fósiles tradicionales, ya que genera emisiones reducidas de gases de efecto invernadero, colaborando así a disminuir la dependencia de recursos no renovables.

El biocombustible puede emplearse en motores diésel estándar sin necesidad de modificaciones sustanciales, facilitando su integración en la infraestructura existente. Además, su

producción a partir de materias primas renovables no solo aboga por la mitigación del cambio climático, sino que también impulsa el desarrollo de una economía más sostenible.

### **2.1.5.1. Lista de componentes**

A continuación, en la Tabla 6 se presenta el listado de los materiales principales que se utilizó en la elaboración del biodiésel:

**Tabla 6**

*Materiales para la elaboración del biodiésel*

	Detalles
Metanol	1 gal
Hidróxido de sodio	200g (Pellets)
Tiras indicadoras de pH	PH 0-14
Hotplate con control de temperatura	Marca CO-Z, Modelo SH2
Termómetro de varilla de vidrio	0-110°
Embudo de separación	500 ml
Agua destilada	1 gal

### **2.1.6. Diésel**

El diésel, también llamado gasóleo o gasoil, es un líquido hidrocarburo obtenido principalmente a través de la destilación del petróleo. Los motores de combustión por compresión utilizan combustibles derivados del petróleo, específicamente el diésel, este es un material en forma líquida que es resultado de la condensación y evaporación luego de la explotación petrolera, son ideales para los motores por sus cualidades químicas que producen una gran cantidad de energía térmica.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) es el encargado de regular el diésel comercializado en el Ecuador y divide en tres grupos: Diésel N°1, Diésel N°2 y el Diésel Premium, este último es el utilizado en los vehículos automotores.

Las características del diésel Premium comercializado en el Ecuador según la normativa ecuatoriana se muestran en la Tabla 7:

**Tabla 7**

*Características del diésel Premium*

<b>Requisitos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Método de ensayo</b>
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493 Procedimiento A
$\varphi$ Contenido de agua y sedimento	%	-	0,05	NTE INEN 1494
$W$ Contenido de residuo carbonoso sobre el 10% del residuo de la destilación	%	-	0,15	NTE INEN 1491
$W$ contenido de cenizas	%	-	0,01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,0	5,0	NTE INEN 810
$W$ contenido de azufre	%	-	0,05	ASTM 4294 NTE INEN 1490
Corrosión a la lámina de cobre	Clasificación	-	No.3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel, $\varphi_{Biodiésel}$	%	--- Nota	5	EN 14078

Nota. De no contener biodiésel, no es necesario la realización de este ensayo.

Nota. Principales características y propiedades fisicoquímicas del diésel Premium. Fuente: Adaptada de [36]

### 2.1.7. FSA 740

Este sistema de diagnóstico de fallas se destaca por su versatilidad y seguridad, como se ilustra en la Figura 14. El dispositivo cuenta con un sistema integrado que comprende un módulo de medición y una unidad de procesamiento montada en un carro de transporte, sus aspectos técnicos se los ilustra en la Tabla 8. Este conjunto integral presenta alrededor de 50 pruebas

preconfiguradas para componentes, junto con un osciloscopio universal y un módulo de análisis de emisiones diseñado específicamente para vehículos diésel y gasolina.

## Figura 14

*FSA 740*



Nota: Vista general del equipo FSA 740. Fuente: [37]

## Tabla 8

*Ficha técnica del equipo FSA 740*

	<b>Detalles</b>
Medidas (Al x An x L)	1785 x 680 x 670 mm
Peso	91 kg
Voltaje de alimentación	90 - 264 VCA / 47 - 63 Hz
Rango de temperatura de operación	5°C - 40°C
Rango de medición de la temperatura del aceite	20°C - 150°C
Rango de medición de la temperatura del aire	20°C -100°C
<b>Volumen de suministro FSA 740</b>	
Carro	
Módulo de medición con soporte para sensores	
Unidad de alimentación con conexiones principales	
PC con sistema operativo Windows XP	
Monitor, mouse	
Control remoto	
Sistema de diagnóstico KTS 540	
Software SystemSoft[plus]	

Fuente: [37]

### 2.1.8. BEA 070: Opacímetro portátil

Este dispositivo se emplea en la evaluación de la opacidad de vehículos diésel y gasolina, con su conectividad Bluetooth, puede llevar a cabo pruebas y ajustes precisos en el motor en cualquier momento. La vista general se evidencia en la Figura 15 y sus aspectos técnicos se presentan en la Tabla 9.

**Figura 15**

*BEA 070*



Nota. Vista general del equipo para medición de opacidad en motores Diésel BEA 070. Fuente: [37]

**Tabla 9**

*Ficha técnica del equipo BEA 070*

			<b>Detalles</b>
Dimensiones			414 x 330 x 280 mm
Peso			10 kg
Voltaje de alimentación			100-240V / 50 - 60 Hz
Rango de temperatura de operación			5°C - 45°C
Temperatura máx. Sonda de gases			250°C
Temperatura máx. Punto de medición			200°C
<b>Sensor</b>	<b>Intervalo Medición</b>	<b>Resolución</b>	
Grado de opacidad	0 ... 100%	0,10%	
Coefficiente absorción	0 ... 10 m-1	0,01% m-1	

Fuente: [37]

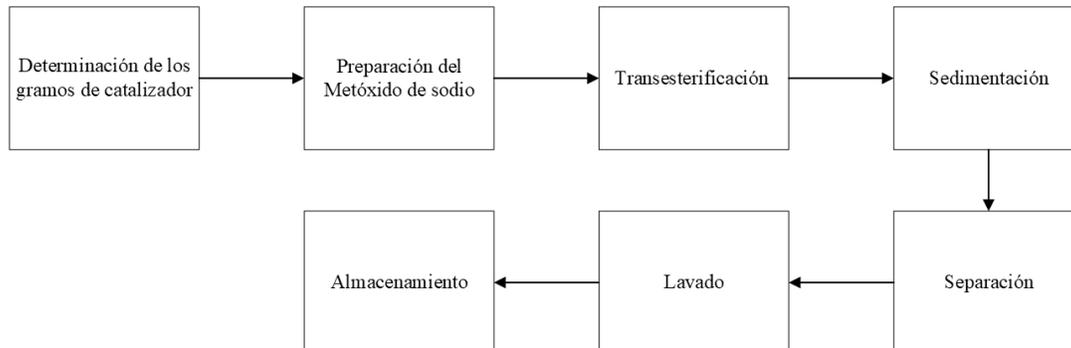
## 2.2. Método

### 2.2.1. Elaboración biodiésel

En el ámbito del procedimiento de producción de biodiésel, se lleva a cabo meticulosamente la aplicación del protocolo conforme al delineado en la Figura 16. Este protocolo cuidadosamente diseñado, abarca una secuencia de operaciones altamente especializadas que se despliegan con el propósito de asegurar la eficiencia y calidad óptima en cada etapa del proceso. Cada paso, debidamente documentado en la mencionada figura y detallado a continuación, se ejecuta bajo estrictas normativas y estándares, garantizando así la consistencia y reproducibilidad del proceso de producción.

#### Figura 16

*Proceso para la elaboración del biodiésel*



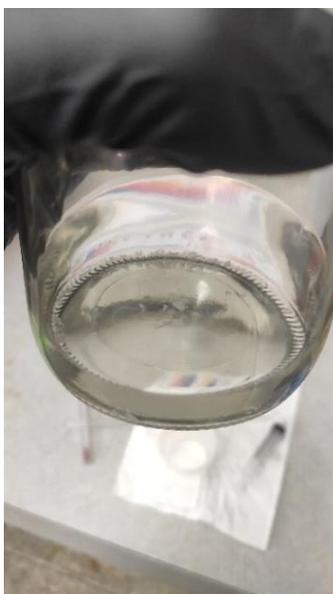
#### 2.2.1.1. Determinación de los gramos del catalizador

El procedimiento empleado para calcular la cantidad de catalizador requerida en la descomposición del aceite usado se basa en el método de titulación. Esta técnica implica una reacción entre el catalizador y el aceite vegetal, donde el alcohol isopropílico actúa como reactivo en lugar del metanol, ya que no reacciona con el aceite vegetal.

Para llevar a cabo la titulación, es imperativo disolver 1 gramo (g) de hidróxido de sodio (NaOH) en 1 litro (L) de agua destilada y emulsionar 1 mililitro (mL) de aceite vegetal en 10 mL de alcohol isopropílico. Luego, se procede a añadir gradualmente el NaOH diluido al aceite vegetal emulsionado, de 1 mL en 1 mL. Tras cada adición de 1 mL, se procede a medir el potencial de hidrógeno (pH) del aceite vegetal emulsionado. La elevación del pH indica la neutralización de los ácidos grasos libres presentes. Por ejemplo, si el pH inicial del aceite vegetal emulsionado es 5 y, después de agregar 2 mL de NaOH disuelto en agua, el pH aumenta a 8 o 9, este incremento en el pH sugiere la neutralización de los ácidos grasos libres, confirmando así el proceso de titulación.

### **Figura 17**

*Determinación de los gramos del catalizador*



#### **2.2.1.2. Preparación del Metóxido de sodio**

Después de calcular la cantidad exacta de gramos de NaOH necesarios, se procede a pesarla luego añadirla al metanol para su disolución y creando así el metóxido de sodio, Figura 18.

Es esencial asegurarse de que el hidróxido de sodio se disuelva por completo en el metanol antes de incorporarlo al aceite vegetal.

### **Figura 18**

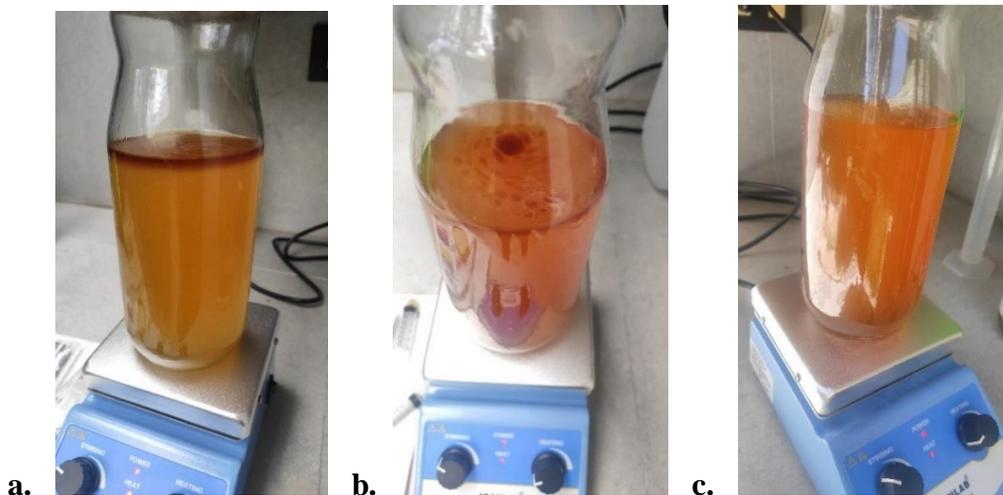
*Preparación del Metóxido de sodio*



Nota: Agitación de la mezcla NaOH/ Metanol para su disolución.

#### ***2.2.1.3. Transesterificación***

Para realizar la transesterificación, es crucial combinar el metóxido de sodio con el aceite vegetal después de su preparación para evitar así su descomposición. Una vez que se ha añadido el metóxido al aceite, es necesario agitar la mezcla durante una hora. El proceso se visualiza en la Figura 19:

**Figura 19***Transesterificación*

Nota. **a.** Reacción Transesterificación, **b.** Proceso de agitación, **c.** Transesterificación final.

**2.2.1.4. Sedimentación**

La sedimentación requiere alrededor de 8 horas y debe llevarse a cabo en recipientes protegidos de la luz. Durante la primera hora después de la reacción, aproximadamente el 75% de la separación ocurre. Después de 8 horas, la glicerina se depositará en el fondo del reactor, creando dos capas discernibles. La parte superior contiene biodiésel, mientras que la inferior está formada por glicerina, que representa entre el 5% y el 20% del volumen total.

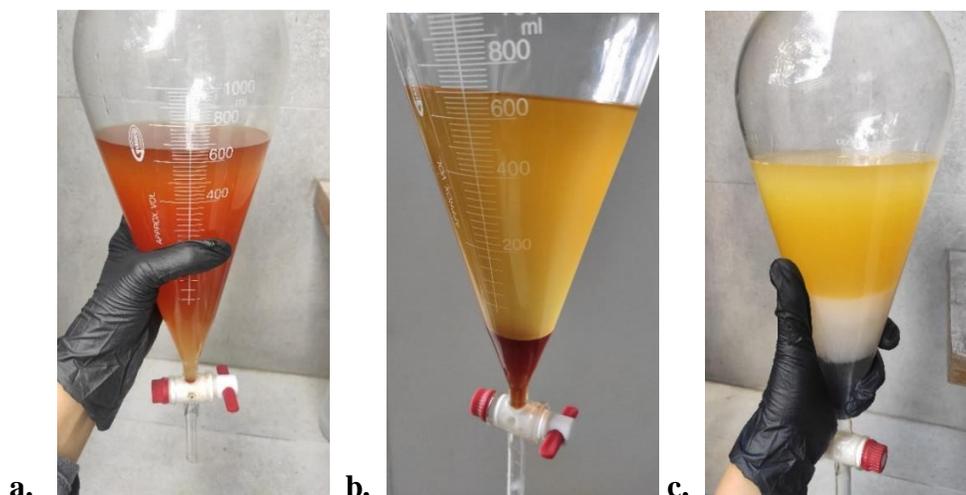
**Figura 20***Sedimentación*

### 2.2.1.5. Separación

Después de que las partículas se han asentado en el fondo, se lleva a cabo la separación entre la capa de glicerina y la de biodiésel. Este proceso se puede realizar mediante la decantación o utilizando una válvula de drenaje en el tanque de sedimentación, si está disponible. Cualquiera de estos métodos es adecuado, siempre y cuando no provoque la mezcla nuevamente de las capas.

### Figura 21

#### Proceso de Separación



Nota. **a.** Separación inicial, **b.** Separación glicerina, **c.** Separación jabón.

### 2.2.1.6. Lavado

El propósito de emplear agua para lavar el biodiésel es eliminar cualquier rastro de alcohol, catalizador y glicerina que pudieran quedar después de la reacción. En una reacción completa de biodiésel, el lavado con agua no es necesario, ya que el 99.9% del catalizador y la glicerina se separarán y serán eliminados con la fase de glicerina que se deposita en el fondo del reactor.

En el biodiésel no lavado, la concentración de alcohol no reaccionado generalmente oscila entre 50 000 y 100 000 ppm (5-10%). La desventaja de dejar alcohol no reaccionado en el biodiésel

es que puede causar desgaste en las mangueras de hule de combustible de algunos vehículos, además de disminuir el punto de ignición del biodiésel. Si el biocombustible contiene más del 0.2% de alcohol, no cumple con los estándares de ASTM. Lavando el biodiésel con agua, es posible reducir el contenido de alcohol a menos de 2 000 ppm (0.2%).

El lavado con agua también elimina cualquier residuo de jabón en el biodiésel. Si se ha utilizado una gran cantidad de catalizador y la reacción produce una fase de biodiésel, una de glicerina y una fase lechosa adicional, es probable que haya jabón en el biodiésel. Si la fase lechosa representa el 10% o más del volumen total de la mezcla, es necesario lavar el biodiésel.

Se aconseja lavar el biodiésel con agua solo si el vehículo que lo utilizará tiene mangueras de hule, si la reacción de biodiésel produce una cantidad significativa de la fase lechosa o si se busca cumplir con los estándares de calidad de la ASTM. En la mayoría de los casos, este proceso es innecesario y solo prolonga el tiempo del procedimiento.

## **Figura 22**

*Lavado del biodiésel*



### **2.2.1.7. Almacenamiento**

Para guardar el biodiésel correctamente, es esencial seguir ciertas pautas: debe conservarse en recipientes sellados a temperaturas que oscilen entre 10.00°C y 48.89°C. Además, es importante alejarlo de sustancias oxidantes, altas temperaturas y posibles fuentes de ignición. Se debe almacenar y utilizar en áreas bien ventiladas. Nunca se debe perforar, arrastrar o deslizar el contenedor, y jamás vaciar el tanque a presión.

### **Figura 23**

*Almacenamiento del biodiésel*



### **2.2.2. Selección de mezclas en el marco de la investigación**

En el contexto del análisis vibracional de motores, es imperativo subrayar la sustancial repercusión del tipo de combustible empleado. La investigación se encuentra específicamente enfocada en el fenómeno de la combustión, constituyendo este último el epicentro de la obtención de datos cruciales para el avance y respaldo de aspectos bibliográficos clave, tales como:

- La cuantificación de la reducción de emisiones.
- Eficiencia en la combustión.
- Comportamiento dinámico del motor, en relación con las variaciones en la composición y características de diferentes combustibles.

Por esta razón, se opta por seleccionar mezclas que exhiban un nivel significativo de severidad e impacto en el rendimiento del motor, lo que implica cambios notables tanto en el análisis de la maquinaria como en la relación con los aspectos ambientales. En este sentido, se eligen el biodiésel al 5% (B5) y el biodiésel al 15% (B15) como los biocombustibles sujetos a experimentación. Esta elección posibilita evaluar cómo la adición gradual de biodiésel incide en las propiedades del combustible y en su comportamiento en términos de vibraciones.

En la actualidad, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía predominante. Dada esta situación, los combustibles ecológicos, especialmente el biodiésel, emergen como una perspectiva viable para motores de encendido por compresión que buscan aprovechar fuentes renovables. La misión fundamental de los combustibles ecológicos es competir con los combustibles convencionales en términos de eficiencia y sostenibilidad. Este desafío se justifica por diversas razones técnicas y ambientales.

#### **2.2.2.1. Biodiésel al 5% (B5)**

La creación de la mezcla B5, que comprende un 5% de biodiésel y un 95% diésel, implica una serie de pasos técnicos extenuantes para considerar una fiabilidad de los resultados. El análisis vibratorio requiere de una versión de mezclas que permitan adquirir datos muy confiables al momento de analizarlos.

Este apartado pretende proporcionar consideraciones fundamentales en la búsqueda de un combustible más sostenible y eficiente dentro del marco de la investigación. Una comprensión detallada de los pasos y factores involucrados en la producción de esta mezcla específica, incluye:

- Selección de materia prima y producción de biodiésel, lo cual se detalla en el apartado 2.2.1.
- Proporciones y mezcla.

- Consideraciones logísticas.
- Implicaciones en el rendimiento del motor.

Las ventajas existentes del biodiésel al ser una fuente renovable, es un punto crucial al momento de seleccionar la materia prima adecuada para procesarla y convertirla en biocombustible a partir de un proceso de transesterificación.

Las proporciones exactas en el biodiésel y diésel es fundamental para garantizar la conformidad con las especificaciones descritas para un B5. Con el fin de lograr una mezcla uniforme y estable, se considera:

### **Proporciones**

Con el fin de la creación detallada se analiza el consumo de combustible, bajo supervisión de los investigadores se desarrolló un test preliminar utilizando diésel. Esto para garantizar primero las variables y luego considerarlas para no crear problemas con el combustible resultante, en este caso el B5. Mediante un envase con una proporción de 4 litros, se determina que el banco de estudio, no tiende a consumir en demasía, dado este análisis se procede a corroborar esta afirmación.

Se considera el funcionamiento del motor entre un lapso de 5 a 6 horas. Para calcular el consumo de combustible por hora, se utiliza:

$$\text{Consumo por hora} = \frac{\text{Consumo total de combustible}}{\text{Tiempo de funcionamiento en horas}}$$

### **Ecuación 7**

*Consumo de combustible*

En un tiempo de funcionamiento de un total de 5.5 horas utilizando la media aritmética, el consumo se mantuvo entre los 5 L. Una observación es que se incrementa un litro adicional antes

de que llegue a su punto más bajo, considerando los puntos de medición en el envase. Y el funcionamiento del motor no tenga ninguna complicación.

Así, al utilizar la Ecuación 7, se procede a calcular:

$$\text{Consumo por hora} = \frac{5 \text{ L}}{5.5 \text{ h}}$$

$$\text{Consumo por hora} = 0,909090 \text{ L/h}$$

Detallamos las proporciones exactas para el marco de experimentación:

- Se realizará 7 litros concretamente:

Detallando la elección, 5 litros son utilizados en los test con el biocombustible. Sobre lo restante, un litro es utilizado para enviarlo a su respectiva caracterización de propiedades, y el final es utilizado para drenar restos de diésel del sistema de inyección. Es decir, se intenta que el sistema inicie funcionando en totalidad con la mezcla B5 al momento de comenzar con los ensayos.

- Se concreta las variables en la Tabla 10:

**Tabla 10**

*Proporciones para la creación de la mezcla B5*

	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Porcentaje de biodiésel	5	%
Volumen total de la mezcla	7	L
Volumen de biodiésel	...	L

### **Mezcla**

Después de llevar a cabo el análisis pertinente, se busca evitar la sobreproducción de la mezcla B5 con el objetivo de evitar excesos que puedan resultar en desperdicio innecesario. La intención es optimizar la cantidad de mezcla producida para minimizar la necesidad de desechar

materiales y garantizar un uso eficiente de los recursos, y por esto se procederá a su creación mediante el siguiente proceso:

Si como punto de partida se toma en consideración que se reduce un 5% de diésel común, equivalente a 0.5 L en 1L, entonces, para conocer la cantidad prevista y obtener una resolución equilibrada y exacta, se debe seguir el siguiente proceso:

$$\text{Porcentaje de biodiésel} = \left( \frac{\text{Volumen de biodiésel}}{\text{Volumen total de la MEZCLA}} \right) \cdot 100\%$$

### **Ecuación 8**

*Porcentaje biodiésel*

Se reemplazan los datos en la **Ecuación 8**:

$$5\% = \left( \frac{\text{Volumen de biodiésel}}{7 \text{ L}} \right) \cdot 100\%$$

Entonces, se obtiene:

$$\text{Volumen de biodiésel} = \mathbf{0.35 \text{ L}}$$

$$\text{Volumen de diésel} = \mathbf{6.65 \text{ L}}$$

Apoyándose en la información recopilada que se muestra en la Tabla 11, que engloba tanto el volumen exacto de biodiésel y diésel, se procederá a la realización de dicha mezcla.

**Tabla 11**

*Proporciones exactas para la mezcla B5*

	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Porcentaje de biodiésel	5	%
Volumen total de la mezcla	7	L
Volumen de biodiésel	0.35	L
Volumen de diésel	6.65	L

Con las **condiciones logísticas** se resalta, el proceso que se debe tomar en cuenta al momento de finalizar la creación de la mezcla de biodiésel, como lo es el almacenamiento adecuado hasta el vaciado en el envase de contenido. Este proceso se gestiona para garantizar la integridad del combustible y su disponibilidad, el buen manejo del combustible repercutirá en el motor, y su rendimiento.

Con respecto a las **implicaciones en el rendimiento del motor**, se analizará posteriormente en el concepto de análisis de vibraciones y opacidad. Puesto que implica aspectos como la eficiencia en la combustión, observar la reducción de emisiones, y el comportamiento del sistema de combustible del banco de pruebas.

#### **2.2.2.2. Biodiésel al 15% (B15)**

La elaboración de la mezcla B15, constituida por un 15% de biodiésel y un 85% de diésel, conlleva procesos idénticos a los de la mezcla B5. Además, requiere la consideración de aspectos técnicos y logísticos detallados en la sección 2.2.2.1.

#### **Proporciones**

- Se mantiene el volumen total de la mezcla que es 7 litros.
- Se concreta las variables en la Tabla 12:

**Tabla 12**

*Proporciones para la creación de la mezcla B15*

	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Porcentaje de biodiésel	15	%
Volumen total de la mezcla	7	L
Volumen de biodiésel	...	L

#### **Mezcla**

Con el análisis correspondiente, el objetivo es evitar la sobreproducción como se menciona con la mezcla B5. Y la intención es optimizar la cantidad de mezcla B15 producida para minimizar la necesidad de desechar el biocombustible y garantizar un uso eficiente de este recurso.

$$\text{Porcentaje de biodiésel} = \left( \frac{\text{Volumen de biodiésel}}{\text{Volumen total de la MEZCLA}} \right) \cdot 100\%$$

Reemplazando los datos:

$$15\% = \left( \frac{\text{Volumen de biodiésel}}{7 \text{ L}} \right) \cdot 100\%$$

Entonces, se obtiene:

$$\text{Volumen de biodiésel} = \mathbf{1.05 \text{ L}}$$

$$\text{Volumen de diésel} = \mathbf{5.95 \text{ L}}$$

Con base en la información recopilada, evidenciada en la Tabla 13, que engloba tanto la cantidad exacta de biodiésel como la de diésel, se procederá a realizar el procedimiento.

**Tabla 13**

*Proporciones exactas en la mezcla B15*

	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Porcentaje de biodiésel	15	%
Volumen total de la mezcla	7	L
Volumen de biodiésel	1.05	L
Volumen de diésel	5.95	L

### **2.2.3. Puntos de medición**

En el marco de la presente investigación, la selección del punto de medición se basa en el fenómeno de la combustión. Este proceso se fundamenta de manera rigurosa, dando especial énfasis a las pautas establecidas por la normativa ISO 10816-1. Las disposiciones detalladas de

esta normativa se abordan exhaustivamente en la sección 1.9.9.2. En ella se presenta de manera sistemática las pautas generales para la selección de puntos de medición específicamente diseñados para un motor en línea, similar al banco de estudio objeto de análisis. Considerando lo explicado se selecciona específicamente al: bloque de cilindros.

### ***2.2.3.1. Bloque de cilindros***

La identificación de un punto crítico en la maquinaria, específicamente el bloque de cilindros, es crucial para abordar las oscilaciones y garantizar el rendimiento óptimo del motor. Este componente central en la transmisión de potencia está directamente relacionado con la calidad de la ignición, golpeteos y cambios en la composición de la mezcla de aire y combustible. Un bloque motor eficiente es fundamental para la durabilidad y eficiencia del vehículo. Las oscilaciones pueden indicar desequilibrios internos o defectos en el diseño original, y los ingenieros desempeñan un papel crucial al detectar y resolver problemas antes de que evolucionen. La monitorización precisa de estas oscilaciones no solo mejora la experiencia del vehículo, sino que también contribuye a aumentar la comodidad y reducir el ruido percibido.

### **Figura 24**

*Bloque de cilindros Mazda BT-50 2.5 CRDi*



## 2.2.4. Condiciones banco de pruebas

### 2.2.4.1. Estado del motor

Dentro del ámbito investigativo, se subraya la relevancia fundamental de asegurar condiciones idóneas y precisas para llevar a cabo el análisis en el banco de estudio, estas se resaltan en la Tabla 14. Con este propósito en mente, se ha elaborado una exhaustiva lista de verificación del motor que aborda diversos aspectos técnicos, presentados de manera práctica y comprensible.

**Tabla 14**

*Estado del banco de pruebas*

Verificación	Detalles
1. Tanque del Motor:	Se verifica la integridad y capacidad del tanque de combustible, asegurando un suministro constante y limpio de diésel al sistema de inyección.
2. Sistema de Ignición:	Se realiza una inspección detallada del sistema de encendido para garantizar una chispa adecuada en el momento oportuno, esencial para la combustión eficiente del combustible diésel.
3. Suministro de Aire:	Se verifica el flujo de aire al motor, asegurando que el sistema de admisión esté libre de obstrucciones y que el filtro de aire esté limpio para optimizar la mezcla aire-combustible.
4. Sistema de Escape:	Se examina el sistema de escape para detectar posibles fugas o restricciones que puedan afectar la eficiencia del motor y las emisiones.
5. Sistema de Lubricación:	Se analiza el sistema de lubricación para verificar el nivel y la calidad del aceite, así como el funcionamiento adecuado de la bomba de aceite, crucial para reducir la fricción y el deterioro de los elementos internos del motor.
6. Sistema de Refrigeración:	Se evalúa el sistema de refrigeración para garantizar que el motor funcione a una temperatura óptima, evitando el sobrecalentamiento y asegurando un rendimiento eficiente.

7. Sistema Eléctrico: Se realiza una revisión minuciosa del sistema eléctrico, incluyendo el alternador, el motor de arranque y las conexiones eléctricas, para asegurar un suministro eléctrico estable y confiable a todos los componentes del motor.
8. Control y Regulación: Se verifica el correcto funcionamiento de los dispositivos de control y regulación del motor, como sensores y actuadores, para mantener las condiciones de operación óptimas en diversas situaciones.
9. Mantenimiento Preventivo: Se establece un programa de mantenimiento preventivo, considerando los intervalos recomendados por el fabricante para cambiar filtros, aceite y otros componentes, con el objetivo de prolongar la vida útil del motor y mantener su rendimiento óptimo.
- 

Esta exhaustiva revisión técnica asegura que el motor diésel Mazda BT-50 CRDi esté en condiciones ideales para su función como banco de pruebas en el análisis de esta investigación, como adición en la Tabla 15 se muestra unos detalles específicos que se utilizó para el mantenimiento preventivo en el banco de estudio para la experimentación.

### **Tabla 15**

*Especificación de componentes utilizados en el banco de estudio*

	Detalles
Filtro de aire	M_MPIC0013Z40
Filtro de aceite	M_1UA114302
Filtro de combustible	M_MPPM0013480
Aceite	Mobil Delvac 20W-50
Refrigerante	ACDelco DEX-COOL 50/50

#### **2.2.4.2. Condiciones normales de funcionamiento**

Los parámetros clave que caracterizan el rendimiento y la operación estándar del motor Mazda BT-50 CRDi para la realización de las pruebas de la investigación se muestran en la Tabla 16:

**Tabla 16***Condiciones normales de funcionamiento*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor Normal</b>	<b>Unidad de Medida</b>
Temperatura del refrigerante	73	°C
Temperatura del aire ambiente	29	°C
RPM (Revoluciones por minuto)	723	RPM
Voltaje del sistema eléctrico	13.9	V
Presión de admisión de aire	79	kPa
Temperatura de admisión de aire	41	°C
Presión atmosférica	78	kPa
Presión del riel de combustible	37 580	kPa
Flujo de masa de aire	6.05	g/seg
Carga del motor	25	%
Temperatura combustible	52	°C
Emisiones de escape	Cumple con estándares	-

### **2.2.5. Interfaz y programación en LabVIEW**

En el centro del análisis de vibraciones, la interfaz y programación en el software desempeñan un papel fundamental al proporcionar la plataforma que integra y orquesta la adquisición de los datos y el procesamiento de señales. LabVIEW, al ser un entorno de desarrollo gráfico, ofrece una potente combinación de capacidades de programación y visualización.

Facilitando la creación de sistemas que extraen información técnica y robusta, además de implementar eficientemente algoritmos para las oscilaciones. En esta sección se explora los aspectos clave, proporcionando una base para el análisis de vibraciones con diferentes combustibles.

#### **2.2.5.1. Sistema de Adquisición de datos**

El proceso de desarrollo para la captura de datos involucra varios componentes técnicos esenciales como se indica en la Figura 25. En primera instancia hablaremos del hardware, como

lo es el sensor de vibración altamente sensible diseñado para detectar variaciones minuciosas en las señales, sus detalles técnicos, así como su tipo se especifican en el apartado de materiales en la sección 2.1.2.

Luego, se incorpora una avanzada tarjeta de adquisición de datos que desempeña un papel crucial al facilitar la conexión entre el sensor y el sistema informático. Esta tarjeta DAQ permite la captura precisa de las señales, posibilitando su registro de manera simultánea con la ejecución del programa desarrollado en el entorno de LabVIEW.

### Figura 25

*Sistema de adquisición de datos*



Fuente: [38]

Finalmente, para asegurar una adecuada documentación y análisis de los datos, las conexiones físicas que se integran desde el acelerómetro hacia el computador, necesita una extrema atención y evitar ruidos parásitos que generen datos erróneos. Este enfoque integral garantiza una recopilación de datos precisa, esencial para investigaciones y análisis técnicos de alto nivel.

### 2.2.5.2. Tratamiento de la señal con el software/ Programación

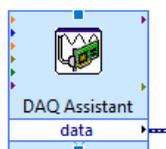
Para el tratamiento de la señal, existen algoritmos específicos implementados en el programa de LabVIEW. Debido a su extensa librería, el análisis de diversos problemas resulta factible analizarlos por medio de diversos complementos que posee el software, dando como resultado de manera fácil la interpretación de los mismos, por los asistentes que poseen los mismos complementos.

#### **Bloques principales para la adquisición de datos, procesamiento y visualización:**

La adquisición de datos se realiza mediante **DAQ Assistant**, este componente está configurado para adquirir datos a través de la tarjeta NI-9250 del sensor de vibración, en unidades de aceleración. La salida de este componente es un conjunto de datos que representan las mediciones de vibración, su icono se puede apreciar en la Figura 26.

#### **Figura 26**

*Asistente de adquisición de datos en LabVIEW*



Seguidamente, los datos adquiridos se están guardando en un archivo de medidas, **Write to Measurement File**. El tipo de archivo y el formato pueden configurarse en este componente, para esta investigación el tipo de archivo es Excel, en formato **.xlsx**, este bloque se observa en la Figura 27.

## Figura 27

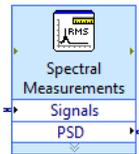
*Asistente para configurar los datos adquiridos de LabVIEW en el formato Excel*



De manera similar, el bloque más utilizado para transformar una señal de ingreso en tiempo a un espectro se utiliza **Spectral Measurements**, este componente realiza un análisis de frecuencia en los datos de entrada. Se conecta al DAQ Assistant, a través de la entrada Signals. La salida es la Densidad Espectral de Potencia (PSD), que es básicamente la representación de la distribución de potencia de la señal a lo largo del espectro de frecuencias. La Figura 28 muestra su icono:

## Figura 28

*Asistente para FFT en LabVIEW*



La salida de **Spectral Measurements**, que es la PSD, se conecta a un gráfico que muestra la Transformada de Fourier de la señal, específicamente la representación en frecuencia de la señal (FFT). Su icono se visualiza en la Figura 29:

## Figura 29

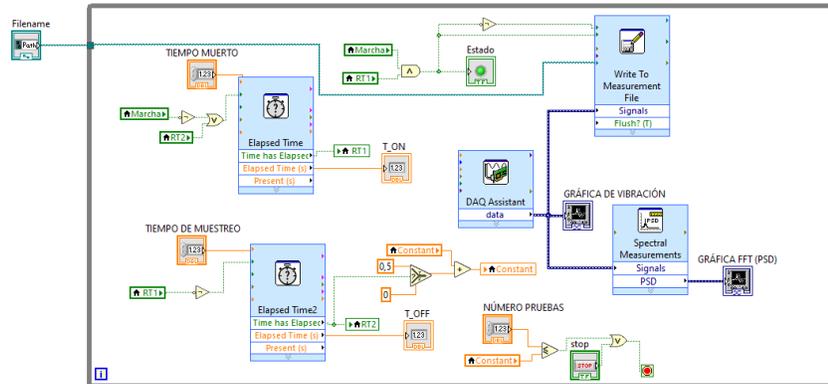
*Icono de salida, señal FFT (PSD)*



El desarrollo de esta programación, se basa en proyectos de investigación previos en la Universidad Técnica del Norte, la Figura 30 muestra el contenido del programa:

**Figura 30**

*Diagrama de bloques, programación LabVIEW*

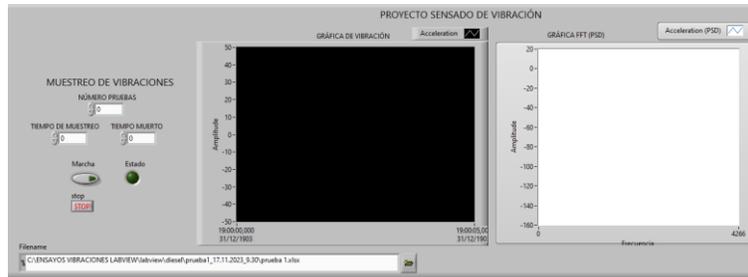


Generalizando, este programa construido en lenguaje **G**, está adquiriendo los datos de vibración, guardándolos en un archivo y luego realizando un análisis de frecuencia para visualizar la distribución de potencia de la señal en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada de Fourier.

Después de completar la programación, observamos el panel frontal en la Figura 31, el cual es generado por el conjunto de bloques gráficos mencionado anteriormente en la Figura 30. En otras palabras, los VI (Instrumentos Virtuales) incluyen una interfaz interactiva de usuario que simula un panel de instrumentos físicos.

## Figura 31

*Panel frontal VI: Interfaz del programa*



### Detalles del panel frontal

Para el muestreo de vibraciones en el marco investigativo los datos que se utilizaron son los que se muestran en la Tabla 17, y como observación está la Figura 32 que amplía los iconos del panel frontal.

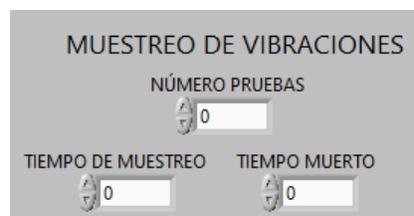
## Tabla 17

*Datos del panel frontal para la adquisición de datos*

	Detalles
Número de pruebas	200
Tiempo de muestreo	8
Tiempo muerto	4

## Figura 32

*Iconos para insertar los datos del muestreo de vibraciones*



Estos datos estarán presentes en todos los ensayos que se realizan en este estudio. El **número de observaciones** es elegido de manera que facilite posteriormente el análisis, el **tiempo de muestro** se refiere a los segundos que transcurren durante el registro de información, es decir el tiempo en el cual el sensor adquiere los resultados y el **tiempo muerto** hace énfasis al tiempo de diferencia entre cada prueba.

Los iconos de la Figura 33, permite poner en marcha el programa y con el led se adquiere una visión de cuando está tomando datos y cuando se encuentra en el tiempo muerto.

### Figura 33

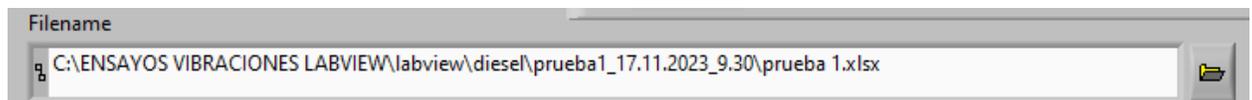
*Indicadores de adquisición de datos*



Para el almacenamiento de datos, se selecciona el icono de la Figura 34. En el cual se selecciona la carpeta de destino de los resultados.

### Figura 34

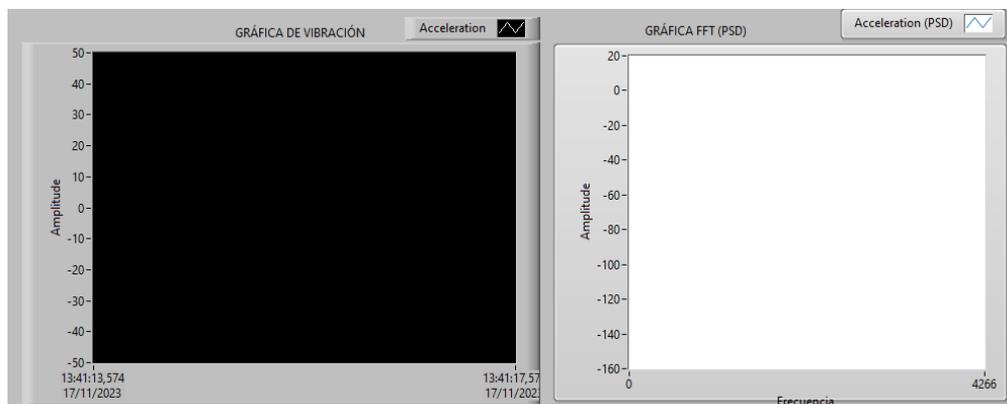
*Selección de carpeta destino de los datos*



En la Figura 35, se observa los paneles en los cuales se visualiza las señales cuando se reciba los datos. En la primera gráfica, la señal de las vibraciones adquiridas por el sensor, y la siguiente muestra la gráfica FFT (PSD).

## Figura 35

Gráficas de la señal de vibración y PSD en el panel frontal



### 2.2.6. Tratamiento de datos y programación en MATLAB

En el contexto de la investigación en análisis de vibraciones, la eficiente manipulación y procesamiento de datos desempeñan un papel crucial. Este estudio se centra en la aplicación del software MATLAB como una herramienta fundamental para la programación avanzada y el tratamiento de datos en el dominio de la frecuencia, tiempo.

MATLAB, conocido por su versatilidad y capacidad numérica, ofrece complementos que permiten abordar datos complejos y analizar señales de oscilaciones. El desarrollo de la investigación propone explorar y optimizar las capacidades de programación del software, así como su eficiencia en el procesamiento de datos, con el motivo de proporcionar un enfoque integral y técnico en el análisis vibracional.

#### 2.2.6.1. Procesamiento de datos

Es fundamental resaltar que el archivo generado a partir del software LabVIEW será presentado en formato (**.xlsx**). En este contexto, en MATLAB, se utiliza el programa para importar datos que será detallado a continuación como una solución apropiada. Al realizar esta acción, se realiza una cuidadosa selección de los datos relevantes, según los requisitos del análisis. Una vez

que los datos se han importado con éxito, se inicia el proceso de análisis en el programa, lo que posibilita llevar a cabo cálculos y análisis de vibraciones con precisión y eficiencia.

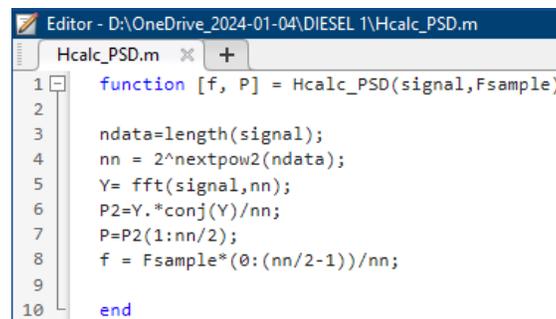
### 2.2.6.2. Algoritmo para la aplicación de la Transformada de Fourier y PSD

Cuando aplicamos la transformada de Fourier en MATLAB, es crucial destacar la credibilidad e importancia que tiene en el análisis de señales. Su atractivo radica en la capacidad subjetiva de desvelar información oculta en el dominio de la frecuencia

El desarrollo de un algoritmo para la aplicación de la FFT y PSD, nos permite descomponer señales complejas en sus componentes fundamentales, y brinda la capacidad de explorar y entender el contenido de la frecuencia de manera profunda. En base a análisis previos en la Universidad Técnica del Norte que conllevan estudios de vibraciones, se consiguió la base para el desarrollo de este programa, y se visualiza en la Figura 36:

#### Figura 36

*Función para el cálculo de la PSD aplicando la Transformada de Fourier*



```

Editor - D:\OneDrive_2024-01-04\DIESEL 1\Hcalc_PSD.m
Hcalc_PSD.m x +
1 function [f, P] = Hcalc_PSD(signal, Fsample)
2
3     ndata=length(signal);
4     nn = 2^nextpow2(ndata);
5     Y= fft(signal,nn);
6     P2=Y.*conj(Y)/nn;
7     P=P2(1:nn/2);
8     f = Fsample*(0:(nn/2-1))/nn;
9
10    end
  
```

La función es creada con el objetivo de calcular la Densidad Espectral de Potencia de una señal:

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

Define una función llamada `Hcalc_PSD`, que toma dos argumentos de entrada “`signal`” la señal de entrada para la cual se calculara la PSD, y “`Fsample`” viene a ser la frecuencia de muestreo de la señal.

- `ndata=length(signal);`

Calcula la longitud de la señal de entrada “`signal`” y almacena el resultado en la variable “`ndata`”.

- `nn = 2^nextpow2(ndata);`

Utilizamos el exponente de la siguiente potencia superior de 2, esto se hace para optimizar el rendimiento al calcular la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y realiza el cálculo de manera más eficiente cuando el número de puntos en la FFT es una potencia de 2. En este caso, “`nn`” se utiliza para almacenar esos resultados.

- `Y= fft (signal, nn);`

Calcula la FFT, de la señal “`signal`” usando “`nn`” puntos. Y el resultado se almacena en la variable “`Y`”.

- `P2=Y.*conj(Y)/nn;`

Calcula el cuadrado del valor absoluto de la FFT y lo divide por el número de puntos en la FFT para obtener la Densidad Espectral de Potencia (PSD). El resultado se almacena en “`P2`”.

- `P=P2(1: nn/2);`

Selecciona la mitad izquierda del vector PSD para evitar redundancias debido a la simetría de la FFT.

- $f = F_{\text{sample}} * (0:(nn/2-1)) / nn;$

Calcula el vector de frecuencias correspondientes a la PSD utilizando la frecuencia de muestreo “Fsample”.

Como una forma de detallar, esta función toma una señal de entrada y su frecuencia de muestreo, realiza la FFT, calcula la PSD y devuelve dos vectores, uno es las frecuencias, el otro la PSD. La Densidad Espectral de Potencia, se calcula usando la FFT para evitar redundancias a la simetría de la FFT.

### ***2.2.6.3. Programa de operación para la importación y tratamiento de datos***

En el universo de la programación científica y análisis de datos, la capacidad de importar y manipular datos de manera efectiva es esencial. En este contexto, el desarrollo de un programa especializado en MATLAB para la importación y tratamiento de datos para un análisis de vibraciones se revela como una herramienta indispensable.

Este programa no solo simplifica la complejidad de la gestión de datos, sino que también aprovecha la potencia y versatilidad de MATLAB para realizar operaciones avanzadas de análisis y transformación. Desde la importación de datos (.xlsx) provenientes de LabVIEW hasta la aplicación de algoritmos sofisticados, este programa se presenta como una interfaz dinámica que facilita la extracción y visualización de los datos.

Permitiendo explorarlos y deducirlos de manera eficiente y precisa. En este recorrido, exploraremos las funcionalidades clave de este programa, destacando cómo MATLAB se convierte en un aliado fundamental en la optimización del flujo de trabajo para el manejo y análisis de datos.

### **Programa/Código**

El código que se visualiza en la Figura 37, realiza un análisis de la PSD para tres señales vibratorias provenientes de diferentes fuentes: diésel, biodiésel B5, biodiésel B15. Luego se grafican las señales en dos figuras distintas con diferentes rangos de frecuencia.

### Figura 37

*Programa para visualización de datos adquiridos desde LabVIEW*

```
filename_1='prueba 22.xlsx'; % PRUEBA DIÉSEL
filename_2='prueba 24.xlsx'; % PRUEBA BIODIÉSEL B5
filename_3='prueba 26.xlsx'; % PRUEBA BIODIÉSEL B15

Fs_1=8000; % frecuencia de muestreo
Fs_2=8000; % frecuencia de muestreo
Fs_3=8000; % frecuencia de muestreo

data_1 = xlsread(filename_1);
data_1 = data_1(1:64000);
n1=length(data_1)

[f_1, P_1] = Hcalc_PSD(data_1,Fs_1);

data_2 = xlsread(filename_2);
data_2 = data_2(1:64000);
n2=length(data_2)

[f_2, P_2] = Hcalc_PSD(data_2,Fs_2);

data_3 = xlsread(filename_3);
data_3 = data_3(1:64000);
n3=length(data_3)

[f_3, P_3] = Hcalc_PSD(data_3,Fs_3);
```

El desarrollo se explica en tres pasos, definimos los nombres de los archivos y frecuencias de muestreo. Se procede a la lectura de los datos de cada archivo, se propone un rango específico para la señal y se utiliza la función “Hcalc\_PSD” para el cálculo de la PSD. Al final se crean dos gráficas que contienen, tres subgráficos. En la primera figura se visualiza una PSD con un rango de frecuencias amplio, y en la segunda, se muestran los mismos gráficos, pero con un rango menor.

Con el objetivo de obtener un análisis más detallado y específico de las señales en las diferentes partes del espectro. El enfoque en la región con un rango de frecuencias **más alto**, puede proporcionar una visión de cómo se distribuye la energía. Esto es útil para identificar tendencias generales y características dominantes de las señales.

Al encontrarse con un **rango limitado** de frecuencias, se puede encontrar características específicas o picos en la PSD que podrían no ser claramente visibles en el rango amplio. Esto puede ser crucial si buscamos patrones o características específicas en frecuencias particulares.

## 2.2.7. Medición de vibraciones

### 2.2.7.1. Instrumentación e instalación

La sección se enfoca en detallar algunos puntos no expuestos en el apartado 2.1, correspondiente al sensor de vibración y a la tarjeta DAQ al momento de adquirir los datos.

- Sensor de vibración: Acelerómetro

El sensor de vibración tipo acelerómetro es instalado recurriendo como referencia la norma ISO 5348:2021, la cual especifica propiedades técnicas de algunos métodos existentes para montar estos transductores de vibraciones. El sensor fue colocado de manera que no exista influencias respecto a la respuesta de frecuencia, Tabla 18, por lo tanto, se ubicó horizontalmente centrándose con la parte superior del bloque del motor. La misión principal en cada prueba fue corroborar que los sensores y cables tengan un correcto estado y permitan adquirir datos fiables.

**Tabla 18**

*Conexión/Posición del acelerómetro*

Sensor	Canal en la tarjeta DAQ	Ubicación
Sensor 00	Canal 0	Bloque de cilindros

- DAQ: Tarjeta de adquisición de datos

En la instalación de este equipo y su reconocimiento en la computadora (PC), el controlador de instrumentos NI-DAQmx juega un rol crucial para seguir con el proceso. Al controlar cada

aspecto del sistema DAQ, permite el ingreso desde la configuración del dispositivo hasta el programa creado en LabVIEW.

### ***2.2.7.2. Parámetros de medición***

En el ámbito de la ingeniería y la monitorización de motores, el análisis de vibraciones se ha convertido en una herramienta fundamental para evaluar el rendimiento y la salud de diferentes sistemas mecánicos. En particular, cuando se aborda el estudio de diferentes combustibles, es esencial profundizar en la comprensión de los parámetros de medición enfocados en el dominio de la frecuencia, presentados en la Tabla 19.

Estos parámetros permiten detectar posibles irregularidades en el funcionamiento de los equipos, sino que también ofrecen información fiable sobre como los diferentes combustibles pueden influir en las características de las oscilaciones del banco de estudio. En este contexto, se explora a fondo elementos clave en el análisis de vibraciones, y discernir complejidades inherentes a la interacción entre los combustibles.

### **Tabla 19**

#### *Parámetros de medición en el dominio de la frecuencia*

<b>Parámetros</b>	
Frecuencia Media	Proporciona una indicación general de la tendencia central de las frecuencias.
Varianza	Dispersión de las frecuencias en el espectro.
Curtosis	Cuantifica las colas de las distribución de frecuencias.

### 2.2.7.3. Condiciones de experimentación

En el presente estudio de vibraciones que se enfoca en los motores electrónicos Diésel, se llevaron a cabo experimentos exhaustivos con el objetivo de caracterizar las vibraciones y sus variaciones con los diferentes combustibles seleccionados para el marco de la investigación.

Las mediciones se realizaron en un entorno controlado, durante el transcurso de los experimentos se evaluaron tres tipos de combustible: Diésel, Biodiésel B5 y Biodiésel B15. Simultáneamente a las condiciones normales de funcionamiento del motor que se detalla anteriormente, se añaden ciertas variables que se expresan en la Tabla 20 que influyen al momento de extraer los datos de las oscilaciones.

**Tabla 20**

*Condiciones de experimentación en los ensayos*

		<b>Detalles</b>
Entorno de experimentación	Taller Diésel-Campus Estadio Universitario	Espacio controlado, con un entorno apto para experimentación.
Condiciones Ambientales	Temperatura	20 °C
	Humedad	56%
	Altura	2 225 m.s.n.m
	Presión atmosférica	78 kPa
Estado del motor	Ralentí	723 RPM
Equipo de adquisición	Tipo	NI-9250
Sensor vibración	Acelerómetro	Serie ICP 603 C01
Panel frontal VI LabVIEW	Número de pruebas	200
	Tiempo de muestreo	8s
	Tiempo muerto	4s
Ensayos	Diésel, B5, B15	5 pruebas por ensayo

Estas condiciones fundamentales se implementan de manera integral para todos los ensayos subsiguientes. Como punto central se debe mencionar que los **equipos de adquisición de datos**

están debidamente **calibrados**, para que no existan errores en los resultados y sean los más confiables posibles.

Se toma en consideración que las **condiciones ambientales** pueden experimentar fluctuaciones a lo largo de los periodos de adquisición de datos, los cuales se llevarán a cabo en distintos días. Incluso, es posible que se presenten variaciones mínimas en los intervalos de tiempo entre cada prueba.

#### ***2.2.7.4. Ensayos a practicar en el motor***

Los ensayos se centran los descritos en la Tabla 21. La elección de estos combustibles específicos busca evaluar sus propiedades individuales y su impacto en el comportamiento del motor, con especial atención a las variaciones con respecto a las vibraciones. Este enfoque permitirá discernir de manera precisa cómo la adición gradual de biodiesel, en proporciones del 5% y 15%, afecta las características fundamentales de los combustibles y, por ende, su influencia en el desempeño vibracional del motor.

### **Tabla 21**

*Nomenclatura usada para el levantamiento de datos*

<b>Simbología</b>	<b>Descripción</b>
Dc	Diésel Premium
B5	Biodiésel al 5%
B15	Biodiésel al 15%

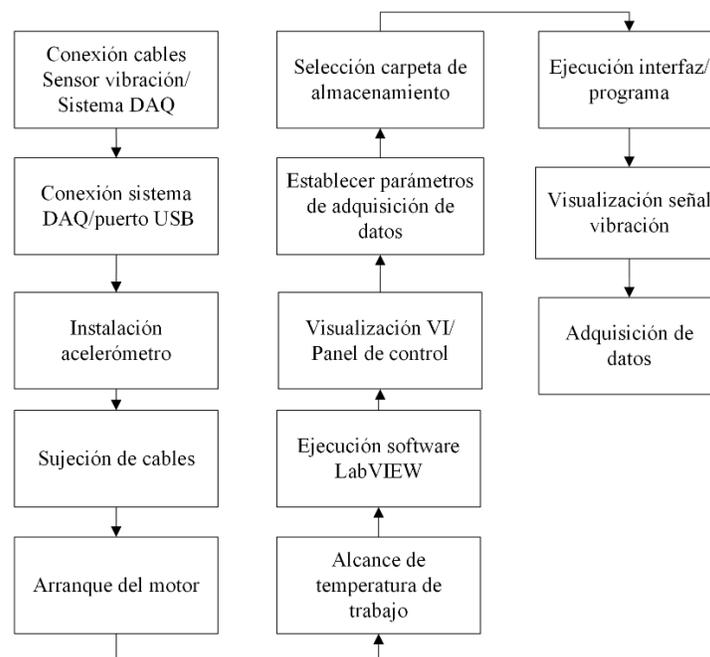
A continuación, la Tabla 22 se proporciona el total de datos correspondientes a la recopilación de cada ensayo realizado en la investigación.

**Tabla 22***Detalles de la adquisición de datos*

	<b>Detalles</b>	<b>Total</b>
Número de pruebas	5	15
Núm. de muestras por cada prueba	200	3000
Núm. de datos por archivo	65 537	196 611 000

**2.2.7.5. Procedimiento experimental**

En la fase del procedimiento experimental, se llevó a cabo una meticulosa implementación de la metodología diseñada para analizar las vibraciones en el sistema en cuestión, Figura 38. El objetivo principal de este procedimiento es obtener datos fiables y detallados sobre el comportamiento vibracional, proporcionando así una base sólida para el análisis subsiguiente, asegurando la reproducibilidad y validez de los resultados obtenidos.

**Figura 38***Procedimiento para la Adquisición de Datos*

### **2.2.7.6. Ensayos preliminares**

En este apartado, los test preliminares se realizan con el fin de corroborar el correcto funcionamiento de los equipos instalados y afinar el programa creado en LabVIEW para la adquisición de datos. Para esta investigación, se debe seguir el procedimiento experimental como una regla, esto solo aplica para este análisis de vibraciones.

Fue crucial estos ensayos iniciales para reconocer las falencias que se pueden crear al momento de montar el sensor de vibración o el cable, pues es importante que mantenga firmeza y no se originen datos parásitos debido a ello.

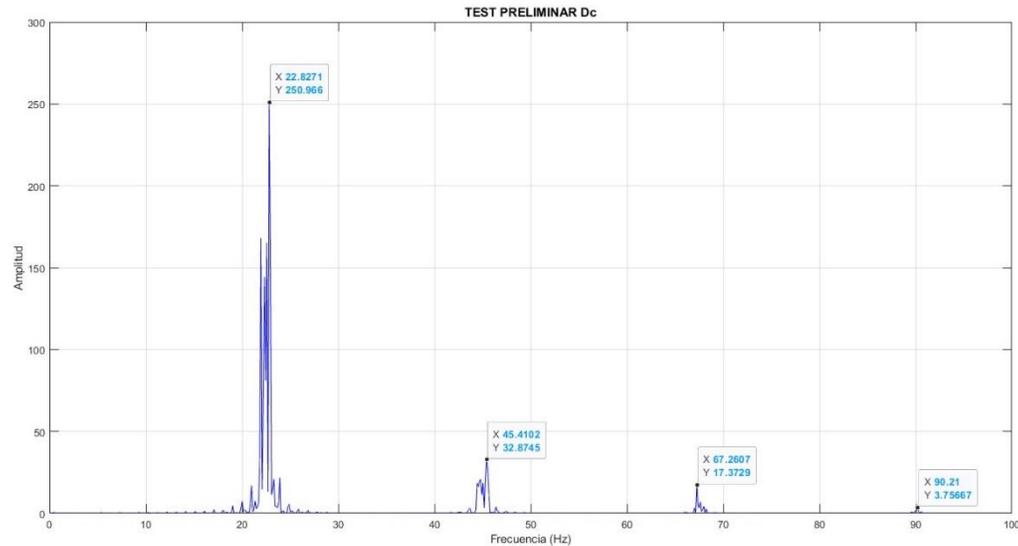
Se llevaron a cabo ensayos iniciales exclusivamente con el combustible diésel (Dc) con el propósito de adquirir conocimientos previos antes de emprender las pruebas directas con los biocombustibles. Es crucial destacar la importancia de familiarizarse con el manejo de los equipos, lo que contribuye a obtener datos de manera más precisa y confiable.

#### **Test preliminar**

En la Figura 39, se presenta una vista previa que ilustra la señal a partir del archivo (.xlsx) generado por el software LabVIEW. Y luego, importado mediante programación en el software MATLAB, permitiendo una representación visual de la información recopilada.

### Figura 39

#### *Test preliminar diésel*

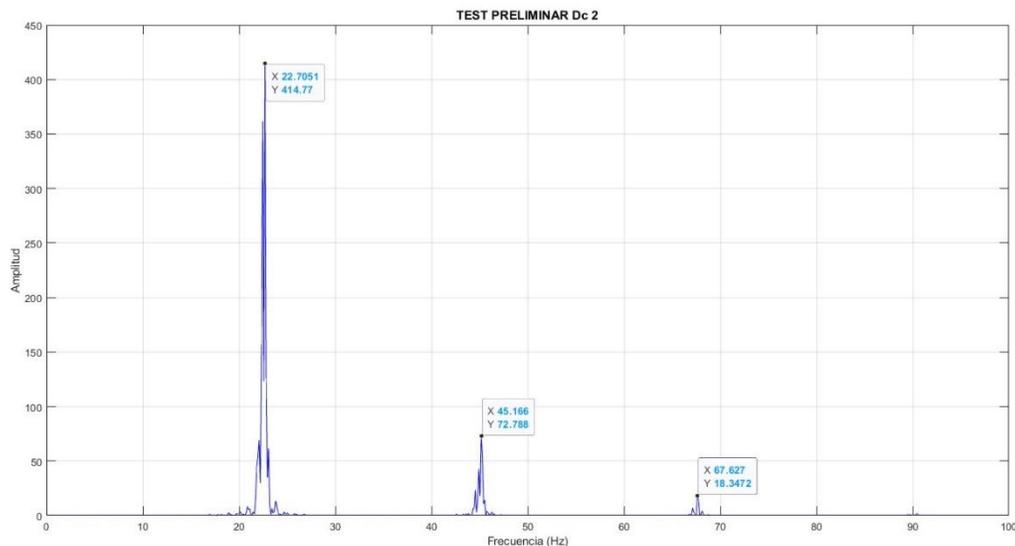


Además de evaluar el proceso de aprendizaje, el propósito del test preliminar fue identificar el armónico más destacado, el cual se relaciona con el tiempo de ignición del combustible. Esta determinación se llevó a cabo mediante la observación de datos en tiempo real durante la prueba. Se llevó a cabo un intento de identificar los armónicos subsiguientes que se corresponden a los diferentes intervalos de tiempo del motor.

No obstante, el marco de este estudio se enfoca en el análisis de los armónicos más sobresalientes como se observa en la Figura 40:

## Figura 40

*Test preliminar para el enfoque del estudio*



### 2.2.8. Medición opacidad

#### 2.2.8.1. Instrumentación e instalación de equipos

- FSA 740

Con el módulo de medición portátil integrado en el equipo FSA, se requieren elementos específicos para llevar a cabo la medición tanto de las RPM como de la temperatura del aceite. Estos componentes desempeñan un papel fundamental en el proceso de medición de opacidad. Para iniciar con el test, retiramos la varilla de aceite y conectamos el dispositivo portátil de adquisición de datos de temperatura del aceite. Este dispositivo nos proporciona información precisa sobre la temperatura en grados Celsius, debiendo alcanzar un mínimo de 60°C. Posteriormente, utilizamos las pinzas conectadas a la batería para medir las RPM.

El concepto modular que tiene el equipo FSA 740, integra ESI[tronic] 2.0, este software permite un diagnóstico en línea que incluye al módulo de la serie BEA para la medición de gases de escape y el cual permite adquirir los datos de opacidad.

- BEA 070

Las características propias de este instrumento se detallan en la sección 2.1.8, para el análisis investigativo mediante la opacidad para este marco de estudio es importante recalcar que el componente se encuentre debidamente calibrado según los estándares propios del BEA 070, asegurando la precisión y confiabilidad de las mediciones. El concepto modular integrado ESI[tronic] 2.0, indica con pasos exactos el procedimiento a seguir para la adquisición de datos, guiando de manera correcta el ingreso de la sonda, el estado, y cuando puedes comenzar a medir la opacidad.

#### ***2.2.8.2. Condiciones de experimentación***

En el marco de investigación centrada en la medición de opacidad, se han establecido condiciones experimentales diseñadas para explorar y comprender en profundidad como los diferentes combustibles juegan un rol con las emisiones. El enfoque se orienta hacia la evaluación precisa de la opacidad en diversas fuentes, proporcionando un análisis detallado de su variación e impacto en el motor.

A través de la implementación de las condiciones de experimentación que se observa en la Tabla 23, se busca obtener detalles sobre las complejidades de la opacidad en diversas situaciones y su relevancia en la comprensión global de la calidad del aire y la eficiencia de los sistemas de combustión.

**Tabla 23***Condiciones de experimentación opacidad*

		<b>Detalles</b>
Entorno de experimentación	Taller Diésel-Campus Estadio Universitario	Espacio controlado, con un entorno apto para experimentación.
Condiciones Ambientales	Temperatura	21 °C
	Humedad	51%
	Altura	2.225 m.s.n.m
	Presión atmosférica	78 kPa
Condiciones del motor	Temperatura aceite	Mínimo 60°C
Ensayos	Diésel, B5, B15	5 pruebas por ensayo

En términos generales, es imperativo analizar estas condiciones en función del día en que se lleve a cabo la adquisición de datos, dado que las condiciones ambientales tienden a variar, ya sea en un rango mínimo o de manera más significativa. Por lo tanto, resulta fundamental prestar una atención especial a las condiciones de experimentación al realizar evaluaciones, reconociendo su influencia crucial en la interpretación de los resultados obtenidos.

### **2.2.8.3. Ensayos a practicar en el banco de estudio**

Más allá de las mediciones convencionales de opacidad, Tabla 24. Este estudio se propone llevar a cabo una comparación única al integrar el análisis de vibraciones con los diferentes combustibles. Al combinar estas dos metodologías, se busca obtener una comprensión más holística de las emisiones, explorando cómo las características vibracionales pueden proporcionar información adicional sobre la calidad de la combustión en comparación con las mediciones tradicionales de opacidad.

Este enfoque integral tiene como objetivo no solo arrojar información sobre las diferencias en las emisiones entre los combustibles mencionados, sino también enriquecer la comprensión general del impacto ambiental y el rendimiento de los motores.

**Tabla 24**

*Nomenclatura usada para el levantamiento de datos opacidad*

<b>Simbología</b>	<b>Descripción</b>
Opa Dc	Opacidad diésel Premium
Opa B5	Opacidad biodiésel al 5%
Opa B15	Opacidad biodiésel al 15%

A continuación, en la Tabla 25 se detalla el total de datos que se adquieren durante la experimentación:

**Tabla 25**

*Datos totales de los ensayos de opacidad*

	<b>Detalles</b>	<b>Total</b>
Número de pruebas	5	15
Núm. de datos por archivo	5	75

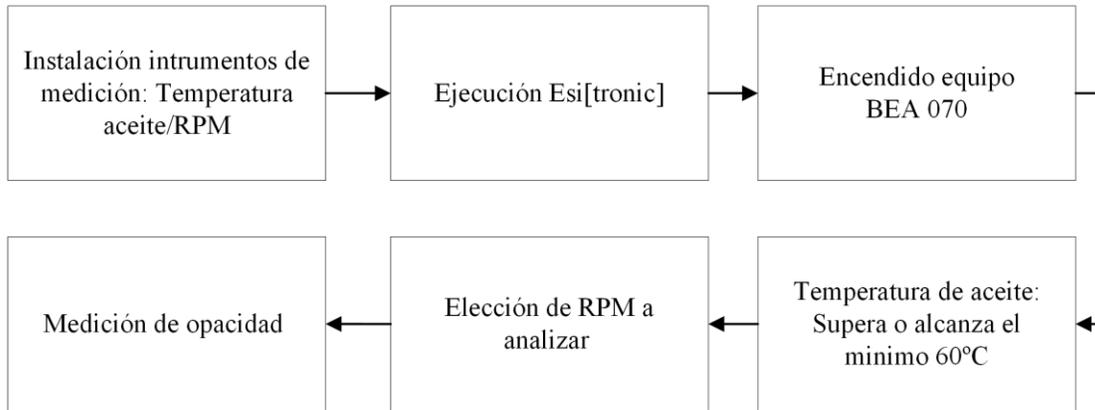
#### **2.2.8.4. Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental presentado en la Figura 41, es empleado para la medición de opacidad que constituye una parte esencial de nuestra investigación, guiada por un enfoque meticuloso y sistemático. Inicialmente, se establecieron protocolos detallados para garantizar la uniformidad y fiabilidad de los resultados. Durante cada fase del experimento, desde la preparación de las muestras hasta la ejecución de las mediciones, se implementaron medidas para minimizar posibles variables y asegurar la consistencia en la obtención de datos.

La instrumentación especializada y las condiciones controladas fueron primordiales para obtener mediciones precisas y reproducibles. A lo largo de este proceso, se prestó especial atención a la calidad y confiabilidad de los datos, garantizando así una base sólida para el análisis posterior.

**Figura 41**

*Procedimiento para la adquisición de datos de Opacidad*



## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, se lleva a cabo el análisis de los datos obtenidos durante la investigación exhaustiva de las vibraciones en el dominio de la frecuencia, respaldado por un análisis estadístico significativo. El enfoque de este estudio se centra en la observación detallada de los armónicos y frecuencias generados durante todas las pruebas, con especial énfasis en la comparativa de los combustibles utilizados: diésel, biodiésel B5 y biodiésel B15. La investigación tiene como objetivo identificar patrones distintivos y comportamientos singulares en el espectro vibratorio asociado con cada combustible.

A lo largo de la investigación, se exploran variables como las frecuencias y amplitudes con el fin de identificar posibles correlaciones. Al mismo tiempo, se busca caracterizar de manera plausible y comprensible las oscilaciones inherentes en el banco de estudio. Además, se investiga la influencia directa de las composiciones específicas de los combustibles en las señales vibratorias y opacidad. Este enfoque permite obtener una comprensión más profunda de cómo estas oscilaciones inciden en la dinámica del sistema.

#### 3.1. Resultados en pruebas Físicoquímicas

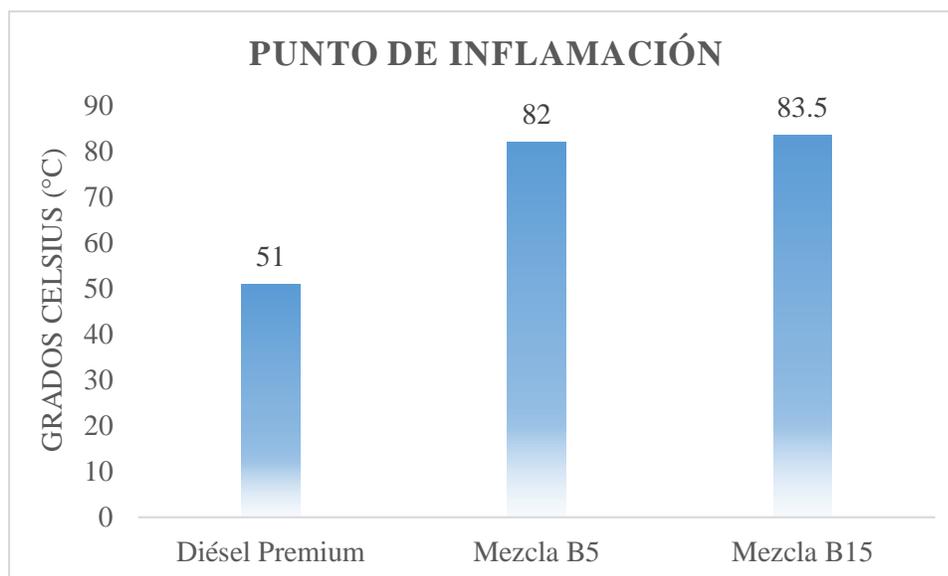
Las propiedades físicoquímicas tanto del biodiésel B5 como del biodiésel B15 fueron meticulosamente determinadas en los laboratorios de petróleos de la Universidad Central. Los resultados obtenidos se exponen detalladamente en la Tabla 26, conjuntamente con los valores correspondientes al diésel Premium distribuido en el interior del país.

**Tabla 26***Propiedades fisicoquímicas de los combustibles*

	Diésel	B5	B15	Unidades
Punto de inflamación	51.0	82	83.5	°C
Poder Calorífico bruto	35.86	45.102	44.519	MJ/kg
Índice de cetano	45	48.3	48.5	-

### 3.1.1. Análisis de resultados del Punto de Inflamación

En la Figura 42 se presenta la comparación de los resultados obtenidos para el punto de inflamación del diésel y los biocombustibles B5 y B15. La propiedad, que es interpretada como la temperatura mínima necesaria para que un material inflamable emita vapores que, al mezclarse con el aire, puedan encenderse en presencia de fuego y extinguirse rápidamente, desempeña un papel fundamental en la prevención de riesgos durante la manipulación de combustibles. Entender este parámetro resulta esencial para anticipar y mitigar eficazmente el peligro de ignición.

**Figura 42***Punto de inflamación para el diésel y mezclas de biodiésel*

Los resultados indican que la muestra de biodiésel al 15% (83.5°C) presenta mayor resistencia a la ignición en comparación con el B5 (82 °C) y significativamente superior al valor mínimo del diésel Premium que se presenta en NTE INEN 1489. Es decir, el punto de inflamación en las mezclas de biocombustible tiene un aumento significativo del 61% (B5) y el 63% (B15) respectivamente. En el análisis de este parámetro se interpreta que el B15 muestra gran ventaja en términos de seguridad por sus características superiores. Sin embargo, aunque un punto de inflamación más alto puede sugerir una mayor estabilidad térmica en términos de resistencia a la inflamación, es crucial considerar que el rendimiento del motor no se determina únicamente por este parámetro.

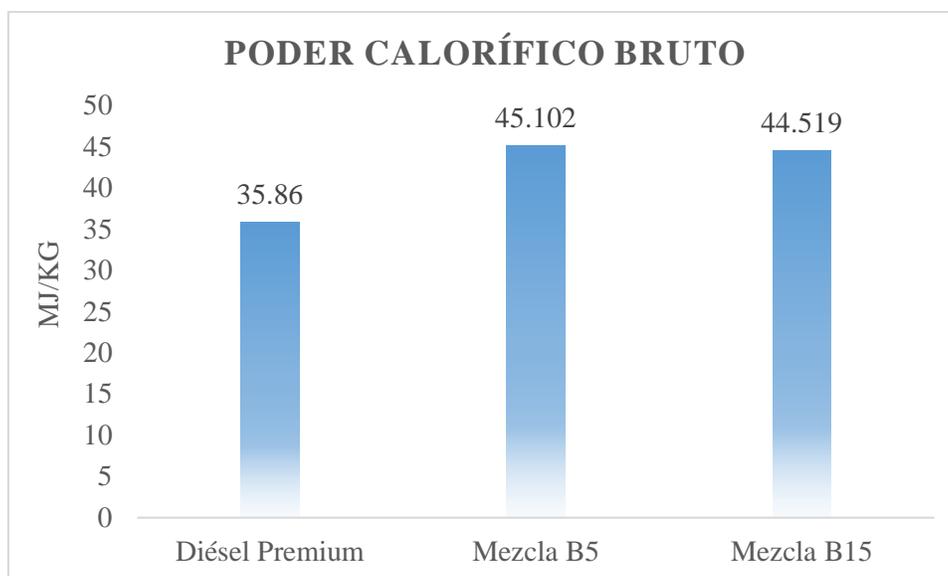
Con el punto de inflamación se puede estimar la cantidad de volatilidad del combustible, mientras este parámetro sea más bajo un combustible es más volátil, no se debe confundir con el punto de encendido, la diferencia radica en que el primero implica inflamación provocada por una llama, mientras que el segundo implica encendido sin requerir una llama, simplemente por el contacto con el aire caliente en la cámara de combustión.

### **3.1.2. Análisis de resultados del Poder Calorífico Bruto**

En la Figura 43 se presentan los resultados obtenidos para el poder calorífico bruto del diésel y los biocombustibles B5 y B15. El poder calórico denota la cantidad de energía que un combustible libera al quemarse por completo, expresado como la unidad de energía liberada por unidad de masa, ya sea en MJ/kg o BTU/lb. En el contexto de los biocombustibles, su capacidad calorífica se vincula directamente a su contenido de ácidos grasos, siendo comúnmente observado que los aceites vegetales exhiben un valor aproximado de un 10% inferior al del diésel, es decir que mientras más puro es el combustible menor será el valor del poder calorífico.

**Figura 43**

*Poder calorífico bruto para el diésel y mezclas de biodiésel*



En la interpretación de esta figura, se observa como el poder calórico aumenta significativamente en las mezclas de biodiésel con respecto al diésel. Este crecimiento indica que las mezclas tienen un mayor contenido energético por unidad de masa, lo que se puede traducir en términos beneficiosos con respecto a la eficiencia térmica del motor. La mezcla B5 tiene un crecimiento de 26% en su poder calórico a comparación del diésel, mientras que la muestra de B15 aumenta en un 24% denotando que tiene un decrecimiento mientras más altos son los niveles de biocombustible.

También se puede aclarar que existe un menor consumo de combustible, dado que hay más energía disponible en las mezclas de biodiésel y esto es directamente proporcional con la reducción de emisiones. Tanto la mezcla B5 como la B15 permiten la obtención de más energía por cada litro o kilogramo de combustible consumido, es decir que se requiere menos cantidad de combustible para lograr la misma cantidad de trabajo o potencia en comparación con el diésel.

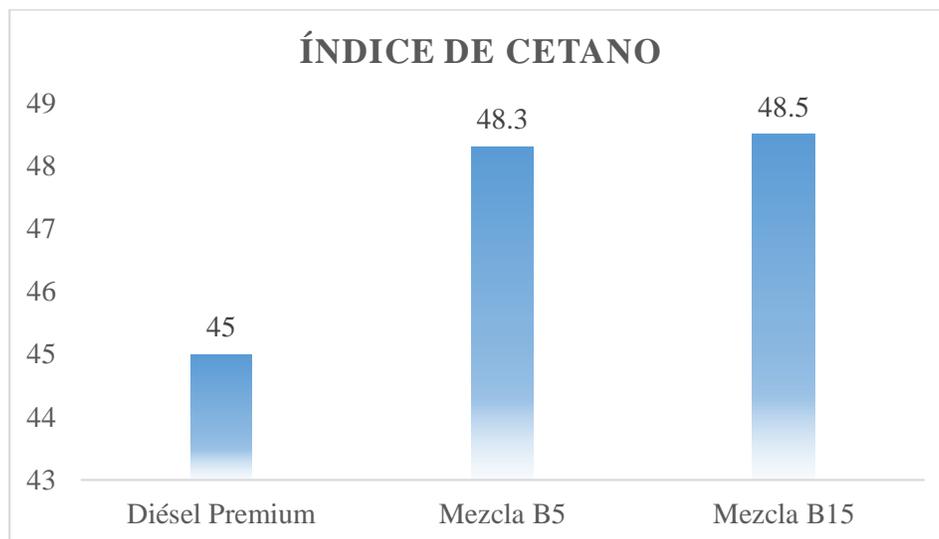
Este parámetro tiene una tendencia a decrecer mientras la mezcla tiene más contenido de biocombustible, teóricamente es correcto ya que el poder calórico desciende mientras el contenido de ácidos grasos aumenta, es por eso que la muestra B5 tiene un poder calórico de 45.102 MJ/kg superior a la mezcla B15 con 44.519 MJ/kg.

### 3.1.3. Análisis de resultados del Índice de Cetano

En la Figura 44 se presentan los resultados obtenidos para el índice de cetano del diésel y los biocombustibles B5 y B15. El número de cetano refleja el tiempo que tarda un combustible en encenderse después de ser inyectado en la cámara de combustión. A medida que este indicador aumenta, se reduce el retraso de ignición, así como la temperatura y la presión de combustión. Este fenómeno conduce a una mejora en la eficiencia de la combustión dentro de los cilindros y a una disminución de las emisiones de hidrocarburos no quemados. Una calidad óptima se caracteriza por una ignición rápida seguida de una quema completa y uniforme del combustible, y se asocia con un alto índice de cetano.

**Figura 44**

*Índice de cetano para el diésel y mezclas de biodiésel*



En la figura, se evidencia un incremento notable en el índice de cetano al analizar las mezclas B5 y B15 en relación con el valor correspondiente al diésel Premium según la normativa NTE INEN 1489. A comparación de las características antes mencionadas, el índice de cetano tiene una variación de 7.3% y 7.7% para la muestra B5 y B15, este fortalecimiento en la propiedad físico-química resulta fundamental, ya que denota una mejora sustancial en la calidad de la inflamación.

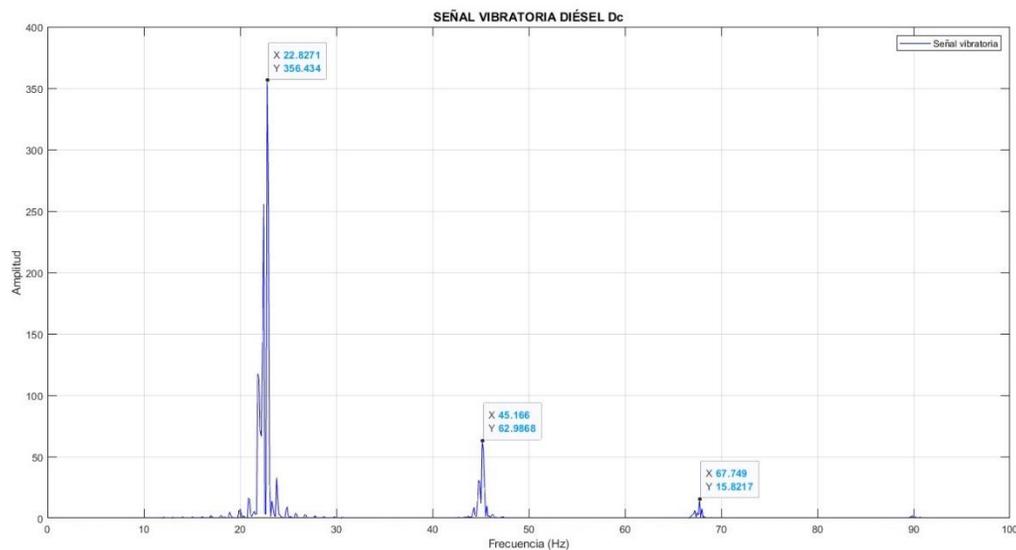
Un índice de cetano más alto indica un menor retraso de la ignición, permitiendo un mejor arranque en frío y una combustión más eficiente, reduciendo la cantidad de combustible que se quema premezclado y como consecuencia también elevando la presión en el cilindro. Este proceso influye directamente en la opacidad al facilitar un quemado total y uniforme del combustible, lo que puede resultar en una reducción de la opacidad de las emisiones durante el funcionamiento del motor.

El biodiésel es superior al diésel común porque uno de sus componentes tiene similitud al cetano, el contenido de ácidos grasos en cada mezcla será un factor que delimitará el cetanaje de una mezcla, mientras más presencia de esto mayor será el número de cetano, es por eso que el diésel común tiene el valor de 45 a comparación de la tendencia creciente que tienen las mezclas de biodiésel B5 y B15 con 48.3 y 48.5 respectivamente.

## **3.2. Vibraciones**

### **3.2.1. Ensayo con diésel**

Al abordar el análisis con el combustible diésel, como primer punto se encuentra la señal creada en MATLAB como se muestra en la Figura 45, con la cual se visualiza el espectro de vibración.

**Figura 45***Señal vibratoria con diésel (Dc)*

Para una mejor visualización de los datos se los extrae en la Tabla 27:

**Tabla 27***Datos de la señal vibratoria con diésel (Dc)*

	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Amplitud	356.434	62.986	15.821
Frecuencia	22.827	45.166	67.749

El programa ofrece una visión detallada de las características fundamentales de las vibraciones en el sistema. Este análisis es esencial para comprender la dinámica y la influencia del tipo de combustible utilizado, ya que las vibraciones pueden revelar información valiosa tanto de las frecuencias dominantes como de las amplitudes.

En este caso se observa como el armónico sobresaliente alcanza una amplitud de 356.434 y en el ámbito de las frecuencias se denota una singularidad que es la de repetirse cada 22Hz. Indicando así que el motor se encuentra en buen funcionamiento y las frecuencias son periódicas.

En el proceso de recopilación de datos, se lleva a cabo una filtración con el propósito de lograr una percepción más precisa y eficiente. Es crucial resaltar que, en particular para el análisis del diésel (Dc), se ejecutan cinco pruebas, cada una con un conjunto de 200 datos. Con el fin de mejorar la fiabilidad y facilitar el tratamiento de la información, se seleccionan 50 muestras de manera aleatoria del conjunto total, descartando las 20 muestras iniciales y finales.

Una vez recopilada esta información, se procedió a calcular la media aritmética general de las 50 muestras para cada prueba individual por cada armónico correspondiente. Este proceso se repitió para las cuatro pruebas restantes, generando así una serie de valores de media aritmética específicos para cada prueba realizada.

Posteriormente, con el propósito de presentar de manera clara y concisa estos resultados, se creó una tabla integral que contiene la información de las medias aritméticas obtenidas para cada prueba en cada armónico tanto para la amplitud como la frecuencia como se observa en la Tabla 28 y Tabla 29. Esta tabla proporciona una visión organizada y detallada de las tendencias observadas a lo largo de las diferentes pruebas, permitiendo una fácil comparación y análisis de los datos recopilados.

**Tabla 28***Estudio general y estadístico de la amplitud en diésel*

Combustible diésel			
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	483.960	81.042	16.141
Prueba 02	484.834	83.808	16.959
Prueba 03	483.208	83.104	17.046
Prueba 04	483.823	81.837	16.930
Prueba 05	482.994	81.836	15.945
Media	483.764	82.326	16.604
Desviación	0.723	1.110	0.519
Error típico	0.323	0.496	0.232
Varianza	0.523	1.232	0.269
Curtosis	0.067	-1.396	-2.822

Los valores medios de los armónicos revelan información esencial sobre la tendencia central de las mediciones. Para el Armónico 01, se encontró una media de 483.764, indicando que este componente tiende a mantener valores cercanos a la media en todas las pruebas, con una desviación estándar mínima de 0.723. En contraste, el Armónico 02 presenta una media de aproximadamente 82.33, con una desviación estándar notablemente más alta de 1.110, denotando una mayor variabilidad entre las distintas pruebas. Por último, el Armónico 03 exhibe una media de 16.60 y una desviación estándar de 0.519, sugiriendo una tendencia a mantenerse cercano a la media con una variabilidad comparativamente menor.

El análisis de curtosis revela información valiosa sobre la forma de la distribución de los datos. El Armónico 01 presenta una curtosis positiva de 0.067, indicando una distribución con colas ligeramente más pesadas que una distribución normal. Por otro lado, el Armónico 02 exhibe una curtosis negativa de -1.396, sugiriendo colas más ligeras en su distribución. La curtosis del

Armónico 03 es aún más pronunciada, con un valor de -2.822, señalando colas más ligeras en comparación con los otros armónicos.

**Tabla 29**

*Estudio general y estadístico de la frecuencia en diésel*

	Combustible diésel		
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	22.532	45.066	67.603
Prueba 02	22.471	45.042	67.585
Prueba 03	22.502	45.039	67.534
Prueba 04	22.520	45.066	67.522
Prueba 05	22.605	44.949	67.559
Media	22.526	45.032	67.561
Desviación	0.050	0.048	0.034
Error típico	0.022	0.022	0.015
Varianza	0.002	0.002	0.001
Curtosis	1.908	3.650	-2.072

La frecuencia media del Armónico 01 es de 22.526, con una desviación estándar mínima de 0.050. Esto sugiere una consistencia en las mediciones, con valores cercanos a la media en todas las pruebas. Similarmente, el Armónico 02 presenta una frecuencia media de 45.032, con una desviación estándar de 0.048, indicando una estabilidad en las mediciones. El Armónico 03 tiene una frecuencia media de 67.561, con la desviación estándar más baja de 0.034, sugiriendo una tendencia a mantenerse cercano a la media en todas las pruebas. La desviación estándar y la varianza proporcionan información sobre la variabilidad de las mediciones. En este caso, la varianza es mínima para los tres armónicos, destacando la consistencia en las mediciones de frecuencia.

La curtosis, que describe la forma de la distribución, revela que el Armónico 01 tiene una curtosis positiva de 1.908, indicando colas más pesadas que una distribución normal. El Armónico 02 muestra una curtosis aún más pronunciada con un valor de 3.650, sugiriendo colas más pesadas y una distribución más concentrada en torno a la media. En contraste, el Armónico 03 exhibe una curtosis negativa de -2.072, señalando colas más ligeras y una distribución más dispersa.

### 3.2.2. Ensayo con biodiésel (B5)

Siguiendo el mismo enfoque detallado en la sección 3.2.1, se reúne de manera integral los datos correspondientes al combustible B5, los cuales se presentan de manera detallada en la Tabla 30 y Tabla 31:

**Tabla 30**

*Estudio general y estadístico de la amplitud en B5*

Combustible B5			
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	441.325	75.792	16.713
Prueba 02	442.157	79.014	16.368
Prueba 03	442.786	77.135	16.911
Prueba 04	441.723	79.739	15.914
Prueba 05	442.721	77.450	15.387
Promedio	442.142	77.826	16.259
Desviación	0.631	1.567	0.617
Error típico	0.282	0.701	0.276
Varianza	0.398	2.457	0.381
Curtosis	-2.004	-1.217	-0.965

La amplitud media del Armónico 01 para el B5 es de 442.142, con una desviación estándar de 0.631. Esto sugiere una consistencia en las mediciones, con valores cercanos a la media en todas las pruebas. Para el Armónico 02, la amplitud media es de 77.826, con una desviación estándar de

1.567, indicando una mayor variabilidad en comparación con el Armónico 01. El Armónico 03 tiene una amplitud media de 16.259, con una desviación estándar de 0.617, mostrando una estabilidad relativa en las mediciones.

Comparando estos resultados con los del combustible diésel previamente analizado, se observa que, en general, las amplitudes para el B5 tienden a ser ligeramente menores en términos de magnitud. La desviación estándar y la varianza para el B5 son comparativamente más bajas en todos los armónicos, indicando una menor variabilidad en las mediciones. La curtosis para el B5 muestra valores negativos en todos los armónicos, lo que sugiere colas más ligeras en la distribución de las amplitudes en comparación con el diésel.

**Tabla 31**

*Estudio general y estadístico de la frecuencia en B5*

	Combustible B5		
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	22.476	45.012	67.546
Prueba 02	22.550	45.032	67.542
Prueba 03	22.441	44.995	67.585
Prueba 04	22.571	45.029	67.583
Prueba 05	22.532	45.024	67.571
Promedio	22.514	45.019	67.565
Desviación	0.054	0.015	0.020
Error típico	0.024	0.007	0.009
Varianza	0.003	0.000	0.000
Curtosis	-1.723	0.349	-2.887

La frecuencia media del Armónico 01 para el B5 es de 22.514, con una desviación estándar de 0.054. Esto sugiere una consistencia en las mediciones, con valores cercanos a la media en todas las pruebas. En el Armónico 02 la frecuencia media es de 45.019, con una desviación estándar

mínima de 0.015, indicando una estabilidad en las mediciones. El Armónico 03 tiene una frecuencia media de 67.565, con una desviación estándar de 0.020, mostrando una estabilidad relativa en las mediciones.

Comparando estos resultados con los del combustible diésel, se observa que las frecuencias para el B5 son prácticamente idénticas en términos de magnitud. La desviación estándar, el error típico y la varianza para el B5 son extremadamente similares a los del diésel en todos los armónicos. La curtosis para el B5 también muestra valores negativos en los armónicos, indicando colas más ligeras en la distribución de las frecuencias, al igual que se observó en el diésel.

### 3.2.3. Ensayo con biodiésel (B15)

De manera congruente con la explicación proporcionada en la sección 3.2.1, se han reunido de manera sistemática los datos obtenidos en cada ensayo utilizando biodiésel al 15%, presentándose en detalle en la Tabla 32 y Tabla 33:

**Tabla 32**

*Estudio general y estadístico de la amplitud en B15*

	Combustible B15		
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	372.438	75.454	15.677
Prueba 02	373.780	76.714	16.833
Prueba 03	373.901	75.163	15.328
Prueba 04	373.140	76.770	15.632
Prueba 05	374.130	75.424	15.877
Promedio	373.478	75.905	15.869
Desviación	0.687	0.773	0.573
Error típico	0.307	0.346	0.256
Varianza	0.473	0.597	0.329
Curtosis	-0.148	-3.139	3.019

En el análisis de los armónicos en el combustible B15, se observa que el Armónico 01 presenta una distribución cercana a la normalidad, con valores que se sitúan alrededor del promedio de 373.478 y una baja desviación estándar de 0.687, indicando una consistencia en la medida. Por otro lado, el Armónico 02 exhibe una mayor variabilidad, evidenciada por una desviación estándar de 0.773 y una curtosis negativa, señalando una distribución más dispersa y achatada. En cuanto al Armónico 03, se destaca por valores consistentes cercanos al promedio de 15.869, con la menor desviación estándar entre los armónicos analizados (0.573) y una curtosis positiva, indicando una distribución más puntiaguda.

Este análisis descriptivo revela patrones distintivos en los armónicos del combustible B15, proporcionando una comprensión detallada de su comportamiento. Mientras el Armónico 01 muestra una estabilidad relativa, el Armónico 02 presenta una mayor variabilidad, y el Armónico 03 se caracteriza por su consistencia.

### **Tabla 33**

*Estudio general y estadístico de la frecuencia en B15*

Combustible B15			
	Armónico 01	Armónico 02	Armónico 03
Prueba 01	22.515	45.054	67.576
Prueba 02	22.495	45.054	67.573
Prueba 03	22.498	45.069	67.515
Prueba 04	22.520	45.027	67.551
Prueba 05	22.527	45.032	67.590
Promedio	22.511	45.047	67.561
Desviación	0.014	0.017	0.029
Error típico	0.006	0.008	0.013
Varianza	0.000	0.000	0.001
Curtosis	-2.489	-1.806	1.046

Los análisis de frecuencia para los armónicos 01, 02 y 03 en los combustibles diésel, B5 y B15 revelan una notable consistencia en las mediciones. Las medias se mantienen cercanas entre los tres combustibles, indicando una uniformidad en los resultados. Además, las bajas desviaciones estándar y varianzas sugieren una baja dispersión de los datos en cada conjunto. La curtosis, aunque variable, no presenta extremos, indicando distribuciones relativamente normales. Estos hallazgos sugieren que no hay diferencias sustanciales en la frecuencia de los armónicos entre el diésel común, B5 y B15, respaldando la estabilidad y consistencia en las propiedades de los combustibles analizados.

#### **3.2.4. Análisis de amplitud**

El análisis de vibraciones se centra en la amplitud de los armónicos más destacados en el espectro. El reconocimiento de patrones se lleva a cabo manualmente utilizando la información recopilada. Esto se facilita mediante el nivel de adquisición de datos de cada software aplicado en esta investigación.

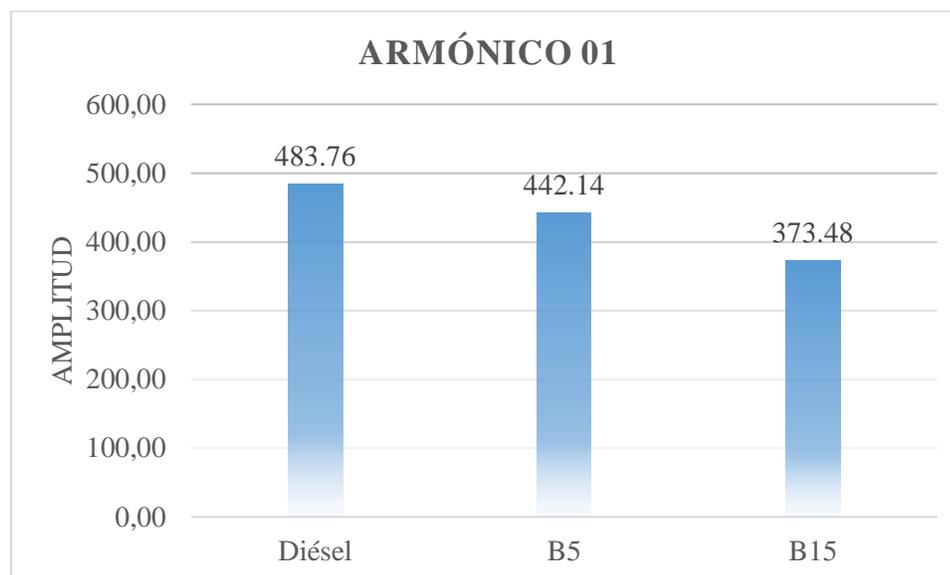
Con el objetivo de analizar el impacto e influencia de los combustibles en el comportamiento dinámico del motor, se examinan los niveles de vibración presentes en cada ensayo para cada armónico. Esto permite una visualización más detallada de la amplitud.

##### ***3.2.4.1. Análisis armónico 01***

En la figura 46 se observan los detalles de amplitud en el Armónico 01:

**Figura 46**

*Media general en el armónico 01*



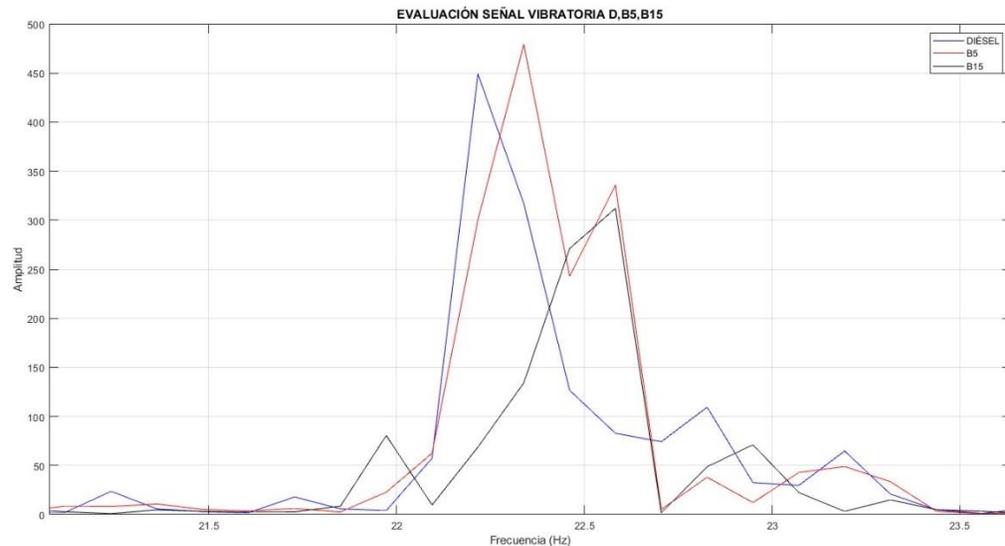
En la figura se presentan los valores correspondientes al Armónico 01, el cual se considera un indicador del tiempo de combustión en el motor. Mediante un análisis concreto, se observa que los valores de amplitud disminuyen en un 8.6% para el B5 en comparación con el diésel. Además, al expresar los resultados para el biodiésel B15, la tasa de reducción es aún más evidente, alcanzando un 22.8%. Los biocombustibles con una señal vibratoria menos exuberante sugieren una mayor estabilidad en el tiempo de combustión.

Al comparar tanto el B5 como el B15, se obtiene una reducción del 15.5%, lo que sugiere que este último tiene una valoración más significativa en términos de oscilaciones. Además, menos vibraciones en este armónico indican un rendimiento más suave en términos de ignición. En resumen, estos valores confirman que la calidad de la combustión es buena y que hay menos fluctuaciones.

En la Figura 47 observamos los picos de amplitud que se forman en el Armónico 01 con respecto a los combustibles:

### Figura 47

*Espectro vibratorio con respecto al armónico 01*



En este contexto, se introduce la propiedad fisicoquímica previamente mencionada: el índice de cetano. Al comparar este valor con el combustible diésel, se concreta que el B5 presenta una mejora del 7.3%, mientras que el B15 supera a ambos con un valor del 7.7%. Esta diferencia sugiere que la calidad de la combustión con el B15 es más uniforme y completa reduciendo sus picos de amplitud como se visualiza en la Figura 47.

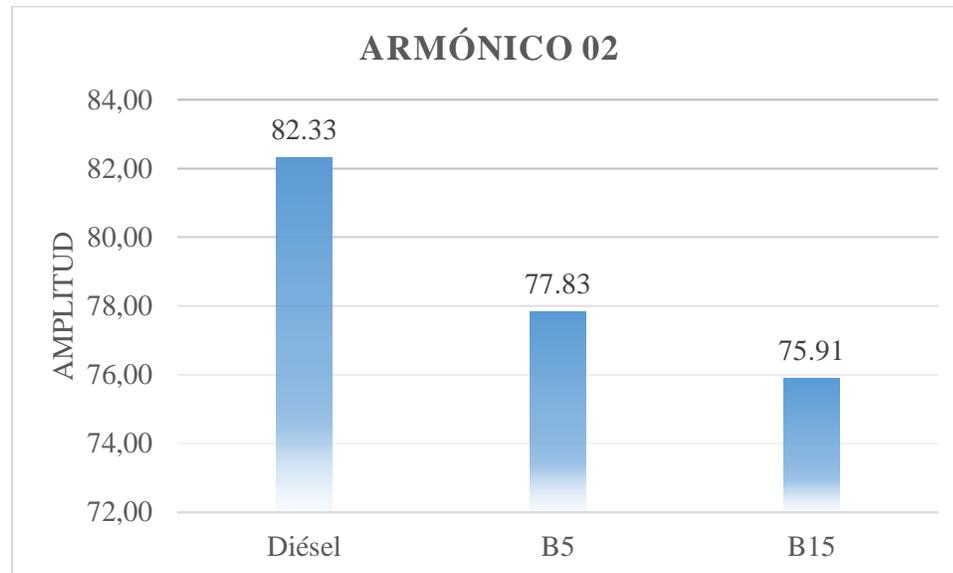
Un índice de cetano ligeramente superior indica que el combustible se enciende de manera más suave y uniforme. Esto, a su vez, produce una combustión más controlada en la cámara de combustión, lo que puede reducir las fluctuaciones que generan vibraciones no deseadas en el motor. Además, esta mejora contribuye a la reducción de la opacidad, es decir, hay menos partículas en el escape, lo que concreta una mejora en la calidad del aire.

### 3.2.4.2. Análisis armónico 02

En la Figura 48 se observa los valores de amplitud en el armónico 02:

**Figura 48**

*Media general en el armónico 02*



La mezcla de biodiésel B5 notoriamente presenta mayores vibraciones a comparación del ensayo con B15, esto se debe al poder calórico que genera en la combustión, produciendo contra explosiones e inestabilidad en el motor. Al tener más energía presente en el cilindro se adelanta levemente el avance de encendido esto por ende genera una “marcha más dura” haciendo que el pistón baje de manera violenta produciendo más vibraciones en las piezas internas del motor.

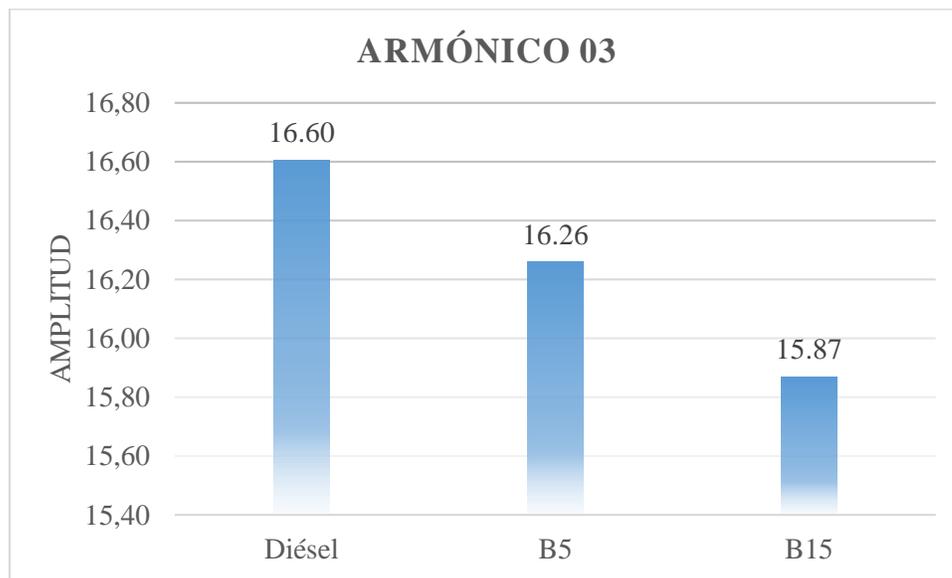
El diésel Premium utilizado en las pruebas es menos eficiente, con un cetanaje bajo al igual que su poder calórico a comparación de las mezclas con biocombustible, traduciéndose en una combustión incompleta y menos eficiente provocando un espectro vibratorio mayor en la cámara de combustión y emisiones más altas por el contenido rico en hidrocarburos al final de todo este proceso.

### 3.2.4.3. Análisis armónico 03

En la Figura 49 se observa los valores de amplitud en el armónico 03:

**Figura 49**

*Media general en el armónico 03*



Con el análisis de los armónicos se observa la tendencia decreciente en términos de amplitud (aceleraciones) en todos los ensayos con los diferentes combustibles. Como se evidencia en términos de operación optar por el B15 es la elección más adecuada ya que se presencia una estabilidad del motor en todos sus armónicos presentes, es decir experimentamos una mayor suavidad y operación más estable, y este es un factor predominante a la hora de la reducción de la emisión de gases de escape.

Con respecto a las propiedades fisicoquímicas y rendimiento se puede presenciar que el B5 es una opción aceptable, si hablamos del punto de inflamación (82 °C) es ligeramente menor que el B15 lo cual sugiere una mayor facilidad en el encendido. Si se habla del poder calorífico el B5

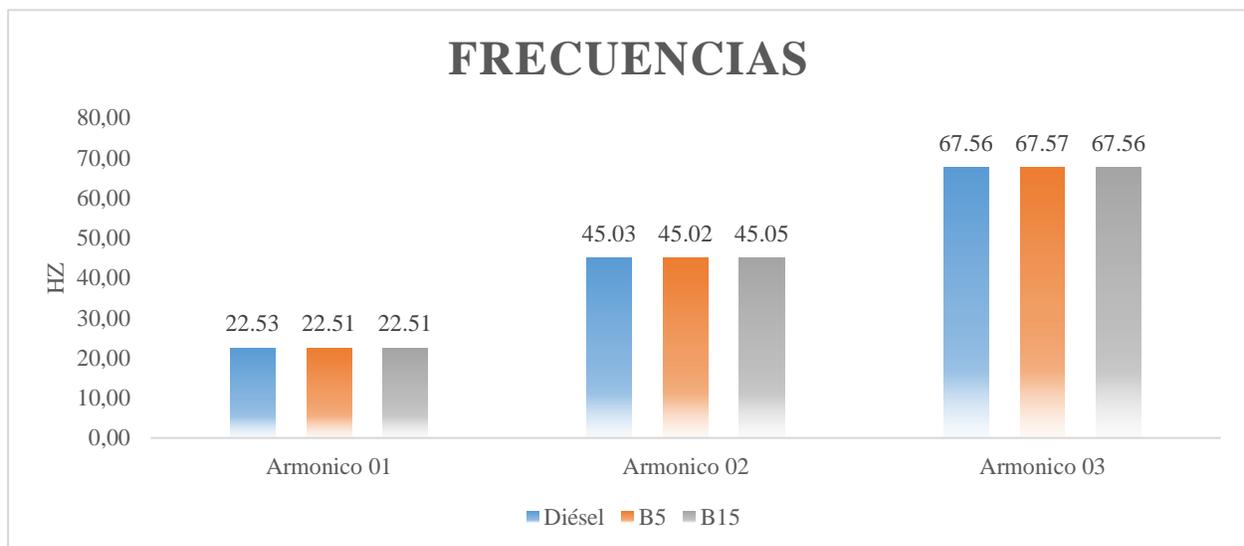
tiene un valor superior (45.102 MJ/kg), es decir la energía térmica liberada durante la combustión es superior a los otros dos combustibles analizados. En general se demuestra que un combustible más ligero puede tener una mejor eficiencia de combustión, aunque en el sentido de vibraciones puede variar respecto a su valor de índice de cetano.

### 3.2.5. Análisis de frecuencia

Para llevar a cabo el análisis de las frecuencias, se exhiben en la Figura 50 los valores específicos en los que el motor se encuentra operando a lo largo de los distintos ensayos.

**Figura 50**

*Análisis de frecuencias general de los combustibles*



La falta de variabilidad en las frecuencias dentro del espectro de vibraciones sugiere un funcionamiento del motor que es relativamente estable y no presenta problemas notables. La proximidad de valores en los tres armónicos indica que, durante la medición con diésel, B5 y B15, el motor está operando con frecuencias similares en la banda de 22 Hz. Además, en el análisis estadístico la consistencia en los diferentes armónicos indica uniformidad en los resultados, es

decir existen desviaciones estándar y varianzas mínimas que sugieren una baja dispersión de los datos en cada conjunto. Esta interpretación sugiere que, al menos en términos de vibraciones, los diferentes combustibles están afectando de manera similar la dinámica del motor en la banda de frecuencias.

### 3.3. Opacidad

En referencia a los resultados de opacidad, se presentan los datos recabados para los tres combustibles sometidos a análisis en este estudio. Para cada tipo de combustible, se realizaron cinco pruebas, cada una compuesta por cinco datos individuales. Posteriormente, se llevó a cabo un exhaustivo análisis mediante diversas medidas estadísticas, con el propósito de evaluar la variabilidad inherente a cada conjunto de datos y asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Este enfoque metodológico permite no solo identificar tendencias y patrones en los niveles de opacidad, sino también garantizar la robustez y validez de las conclusiones derivadas de este análisis detallado.

#### 3.3.1. Ensayo con diésel

Las pruebas con el combustible diésel se observan en la Tabla 34:

**Tabla 34**

*Resultados de opacidad diésel*

OPACIDAD DIÉSEL (%)					
DIÉSEL	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
OPA 1	2.3	2.3	2.1	2.5	2.7
OPA 2	2.5	2.7	2.9	3.3	3.1
OPA 3	2.7	2.7	2.9	2.5	3.1
OPA 4	2.5	2.5	2.1	3.5	4.5
OPA 5	2.5	2.5	2.1	3.5	4.5
Media	2.50	2.54	2.42	3.06	3.58
Desviación	0.14	0.17	0.44	0.52	0.86

Error típico	0.06	0.07	0.20	0.23	0.38
Varianza	0.02	0.03	0.19	0.27	0.73
Curtosis	2.00	-0.61	-3.33	-3.21	-3.01

Se realizó las pruebas con una temperatura mínima de 85.1°C, con un número de revoluciones de 710 RPM, con un corte de régimen a 3340 RPM.

### 3.3.2. Ensayo con biodiésel (B5)

En la Tabla 35 se observan los resultados de opacidad con el combustible B5:

**Tabla 35**

*Resultados opacidad B5*

B5	OPACIDAD B5 (%)				
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
OPA 1	2.5	1.1	2.1	3.3	3.5
OPA 2	1.3	1.9	1.7	1.7	1.7
OPA 3	1.3	2.1	2.3	1.7	1.7
OPA 4	1.9	1.5	2.5	1.7	1.9
OPA 5	1.7	1.5	2.5	1.7	1.9
Media	1.74	1.62	2.22	2.02	2.14
Desviación	0.50	0.39	0.33	0.72	0.77
Error típico	0.22	0.17	0.15	0.32	0.34
Varianza	0.25	0.15	0.11	0.51	0.59
Curtosis	0.32	-0.82	0.54	5.00	4.66

Para este ensayo se realizó las pruebas con una temperatura mínima de 90.6°C, con un número de revoluciones de 720 RPM, con un corte de régimen a 3170 RPM.

### 3.3.3. Ensayo con biodiésel (B15)

En la Tabla 36, se observan los resultados de la opacidad con el combustible B15:

**Tabla 36***Resultados opacidad B15*

OPACIDAD B15 (%)					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
OPA 1	2.1	1.9	1.9	1.3	1.7
OPA 2	1.7	1.1	1.7	1.7	2.1
OPA 3	2.1	2.1	1.7	1.1	1.7
OPA 4	1.7	1.7	2.7	1.3	1.9
OPA 5	1.1	1.5	1.9	1.1	1.9
Media	1.74	1.66	1.98	1.30	1.86
Desviación	0.41	0.38	0.41	0.24	0.17
Error típico	0.18	0.17	0.19	0.11	0.07
Varianza	0.17	0.15	0.17	0.06	0.03
Curtosis	0.92	-0.02	3.88	2.00	-0.61

Con respecto al biodiésel B15 se realizó las pruebas con una temperatura mínima de 88.8°C, con un número de revoluciones de 720 RPM, con un corte de régimen a 3170 RPM.

#### **3.3.4. Análisis general de opacidad con los diferentes combustibles**

Con el fin de tener una visión más detallada de las tablas presentadas anteriormente, en este apartado se analiza las medidas estadísticas generales de los tres tipos de combustibles es decir es una media general por cada medida estadística, esta información se presenta con detalle en la Tabla 37. El objetivo es proporcionar una visión integral de las propiedades estadísticas de estos combustibles, estableciendo las bases para un análisis detallado de sus características distintivas.

**Tabla 37***Análisis estadístico general de los combustibles*

	Diésel	B5	B15
Media	2.82	1.95	1.71
Desviación	0.42	0.54	0.32
Error típico	0.19	0.24	0.15
varianza	0.25	0.32	0.12
Curtosis	-1.63	1.94	1.23

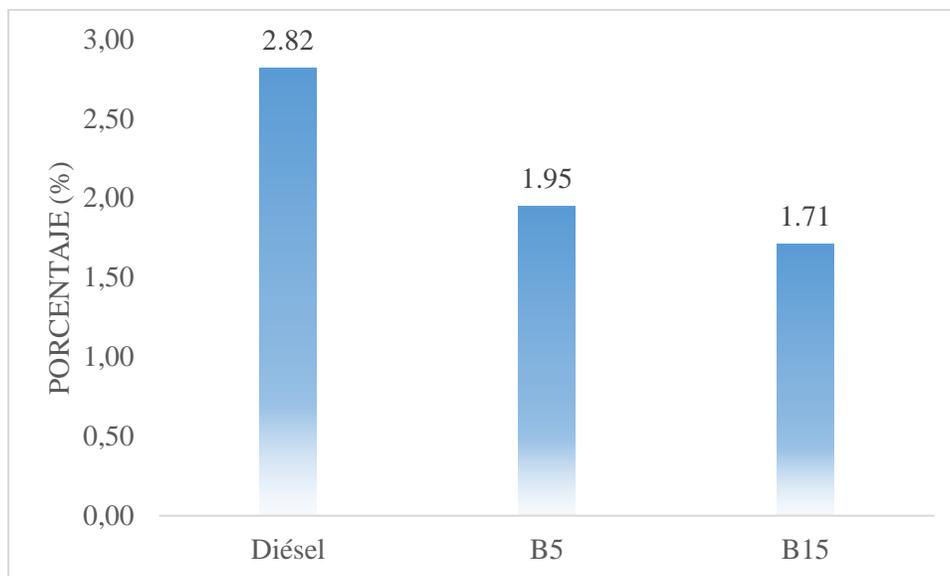
Los resultados de opacidad al ser analizados estadísticamente arrojan resultados que muestran de manera clara la veracidad de los datos obtenidos en la investigación, una desviación y error típico denotan que no hay presencia de valores atípicos indicando que las muestras tomadas se encuentran cercanas a la media, la varianza en diésel, mezcla B5 y B15 es muy pequeña y cercana a cero indicando así que las muestras individualmente son cercanas a la media, es decir no tiene gran variabilidad.

La curtosis en el caso de la prueba con diésel arroja un valor negativo esto indica que existen valores atípicos en los datos o datos alejados de la media, estos resultados en el estudio pueden ser ignorados porque son producidos por la dificultad de mantener un régimen de revoluciones constantes como resultado se obtiene valores anormales. Mientras que, la curtosis en las mezclas B5 y B15 son positivos esto es debido a que el motor con biocombustible tenía una mayor estabilidad y se redujo el error en las pruebas produciendo datos más acertados y con poca variabilidad.

En la Figura 51, se presenta la media aritmética de los niveles de opacidad en comparación con el diésel, biodiésel B5 y B15.

**Figura 51**

*Análisis de la media con respecto a la opacidad*



Los niveles de opacidad están estrechamente vinculados al índice de cetano mencionado previamente. Durante las pruebas, se observa claramente una coloración opaca en los gases de escape, siendo considerablemente elevada en el caso del diésel. Como se observa en la Figura 52, el nivel de opacidad del B5 muestra una reducción de aproximadamente del 31% a comparación con el diésel Premium utilizado en esta investigación, el B15 exhibe una disminución de aproximadamente el 39%, estos porcentajes destacan la tendencia de reducción en la opacidad a medida que aumenta el contenido de biodiésel en las mezclas.

Cuando se consigue un índice de cetano más alto en la mezcla B15, se optimiza el proceso de combustión. Como resultado, se produce una notable disminución de los hidrocarburos presentes en los gases de escape, ya que se favorece una quema más uniforme del combustible. Este hallazgo evidencia que las mezclas con biocombustible ofrecen notables ventajas medioambientales en comparación con el diésel.

Las características fisicoquímicas de los biocombustibles influyen directamente en el tipo de combustión que se produce en el motor, provocando la reducción del consumo de combustible y decrecimiento en la opacidad de los gases de escape. Además, el aumento de eficiencia energética de los biocombustibles puede ser aprovechada por el motor produciendo un mejor rendimiento.

### 3.4. Parámetros de funcionamiento de la gestión electrónica del motor Diésel

La gestión electrónica del motor Diésel implica la consideración de varios parámetros para garantizar su funcionamiento óptimo. Se han observado diferencias significativas en el rendimiento del motor al utilizar diésel Premium y mezclas B5 y B15, como se muestra en la Tabla 38. Los datos presentados en la tabla reflejan variaciones asociadas al cambio en las propiedades del combustible utilizado.

**Tabla 38**

*Parámetros de funcionamiento del banco de estudio con los combustibles*

<b>Parámetro</b>	Diésel	B5	B15	<b>Unidad de medida</b>
Temperatura del refrigerante	73	85	86	°C
Temperatura de admisión de aire	41	50	51	°C
Presión del riel de combustible	37 580	39 110	39 550	kPa
Flujo de masa de aire	6.05	7.83	7.94	g/seg
Temperatura combustible	52	64	66	°C

Las propiedades fisicoquímicas ya explicadas anteriormente tienen una influencia directa en los cambios producidos en el motor, el índice de cetano influye directamente en la variación de los parámetros expuestos. Una combustión más eficiente y con mayor liberación de calor producen todos estos cambios.

La temperatura del refrigerante en la mezcla B5 aumenta 15 °C y para la muestra B15 16°C a comparación del diésel esto es a causa de la eficiencia y la liberación de calor en la combustión, esto influye también en la temperatura ambiente lo que vuelve el aire más caliente causando que la temperatura del aire de admisión aumente, elevándose en un 22% y 24% para mezclas B5 y B15 respectivamente a comparación del diésel común.

Las mezclas de biocombustible tienen presencia de ácidos grasos volviéndolos más densos, esto produce una reacción diferente en el riel de combustible a comparación del diésel, elevando la presión y obteniendo un valor de 39 550kPa como es el caso de la muestra B15 todo esto produce una reacción en cadena, al elevarse la presión se inyectara más combustible en el cilindro y como consecuencia la mezcla deberá ser compensada aumentando el flujo de aire en este caso a un régimen de 7.94 g/seg, todo esto tiene influencia en la temperatura del combustible, este parámetro de igual manera aumenta ya que al comprimir un fluido este se eleva en la escala térmica hasta llegar a los 66°C a diferencia de la muestra de biocombustible B5 y el diésel.

## CAPÍTULO IV

### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. Conclusiones

- A partir del análisis precedente, el estudio detallado de las propiedades fisicoquímicas, como el punto de inflamación, el poder calórico bruto y el índice de cetano en las mezclas de biodiésel B5 y B15 en el motor electrónico Mazda BT-50 CRDi, revela un conjunto de cambios significativos. Mientras que el aumento del 61% (B5) y 63% (B15) en el punto de inflamación de los biocombustibles podría plantearse en consideraciones de seguridad respectivamente, el incremento en el poder calórico bruto en un 26% (B5) y 24% (B15) se puede traducir en un potencial beneficio en términos de eficiencia energética. Además, el índice de cetano, se mantiene en niveles aceptables con un 48.3 (B5) y 48.5 (B15), indicando que las mezclas son viables para su uso en el motor. En conjunto, estos hallazgos amplían la comprensión sobre el impacto de los biocombustibles en los motores Diésel, destacando la necesidad de evaluaciones integrales al buscar opciones más sostenibles en la industria automotriz.
- El análisis de vibraciones en combustibles revela variabilidad en niveles vibratorios. El diésel destaca con amplitud de 483.764 en armónico 01, seguido por B5 (442.142) y B15 (378.478). Aunque las amplitudes difieren, la variabilidad en frecuencias no es notable, con todos los combustibles trabajando en la banda de 22 Hz. Patrones consistentes en armónicos 02 y 03 respaldan coherencia en comportamiento vibratorio. Estos hallazgos son clave para optimizar motores y maquinaria, enfatizando la importancia de un enfoque integral que considere tanto la eficiencia de combustión como los efectos vibratoriales para lograr un rendimiento sostenible.

- En conclusión, en el estudio de la opacidad los resultados indican que el diésel presenta la mayor opacidad con un valor de 2.82% mientras que el B5 y B15 muestran reducciones significativas, con valores de 1.95% y 1.71% respectivamente. La evidencia respalda la idea de que la opacidad, como indicador general de la visibilidad a través de las emisiones, disminuye significativamente al optar por combustibles más sostenibles. Este hallazgo sugiere que la implementación de biocombustibles en la industria automotriz puede contribuir de manera efectiva a la reducción de la contaminación atmosférica y, por consiguiente, al bienestar ambiental.
- En términos generales, con respecto a la gestión electrónica del motor, se evidencia que las mezclas de biodiésel, inducen a cambios notables en varios parámetros de funcionamiento. El aumento en la temperatura del refrigerante en los biocombustibles en un 16.4% (B5) y 17.8% (B15), la temperatura de admisión de aire en 21.9% (B5) y 24.4% (B15), y la temperatura del combustible en 23.1% (B5) y 26.9% (B15), junto con una leve elevación en la presión del riel de combustible 4.1% (B5) y 5.2% (B15) y el flujo de masa de aire, sugiere una respuesta adaptativa del motor ante estas mezclas respectivamente. La capacidad de estas mezclas para optimizar la temperatura y presión, así como incrementar el flujo de masa de aire, sugieren una combustión más eficiente. Estos hallazgos respaldan la viabilidad de la transición hacia biocombustibles, destacando su capacidad para no solo reducir emisiones, sino también mejorar la eficiencia y rendimiento global de los motores diésel.
- La evaluación integral de la opacidad, vibraciones y propiedades fisicoquímicas permite una selección más precisa del combustible óptimo en términos de rendimiento y eficiencia. Aunque el biodiésel al 15% muestra una reducción en opacidad y vibraciones, el análisis

detallado, considerando las propiedades fisicoquímicas, selecciona al B5 como una elección destacada. Con un punto de inflamación de 82°C y un poder calorífico de 45.102 MJ/kg, este combustible demuestra eficiencia térmica y facilidad de encendido. Estos atributos consolidan al B5 como una opción atractiva en rendimiento y eficiencia, subrayando su capacidad para equilibrar factores ambientales, mecánicos y energéticos de manera óptima en diversas aplicaciones prácticas.

- El combustible B15 se destaca como una opción superior en términos de vibraciones, aportando amplitudes menos exuberantes respecto al B5 y diésel. Mientras que el B15 destaca por su suavidad inherente debido a su elevado índice de cetano (48.5), el aumento de las vibraciones en B5 se puede asociar a su poder calorífico (45.102 MJ/kg), es decir a una liberación de energía más intensa, reflejándose también en valores intermedios de opacidad (1.95%). La gestión electrónica, destaca la ventaja del B15 al influir positivamente en la presión del riel (39 550 kPa) y ajustar el flujo de aire (7.94 g/seg), es decir existe una mejor adaptabilidad del motor a este combustible. Este análisis resalta la importancia de considerar no solo propiedades fisicoquímicas, sino también la compleja interacción entre factores como poder calorífico, índice de cetano, opacidad y gestión electrónica al evaluar el comportamiento del motor con diferentes combustibles.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda implementar un procedimiento de medición más detallado para evaluar las vibraciones en motores Diésel electrónicos. Este protocolo debería abordar diversas condiciones operativas, considerando variaciones en la carga y la velocidad del motor. Se sugiere realizar mediciones específicas

durante la combustión para obtener información más precisa sobre las vibraciones asociadas a este proceso.

- Con base en los argumentos presentados en este estudio, se sugiere ampliar el rango de características fisicoquímicas evaluadas para cada tipo de combustible. Al integrar estas variables en la estimación, se conseguirá una comprensión más completa de la relación entre las vibraciones del motor y los gases de escape. Asimismo, se propone la implementación de una sincronización temporal esto facilitará la identificación de correlaciones y permitirá una interpretación más precisa de cómo los tipos de combustible impactan directamente en los patrones vibracionales y gases de escape.
- Considerando la rigurosidad metodológica empleada y los resultados derivados, se aconseja llevar a cabo experimentos adicionales que permitan caracterizar más a fondo las vibraciones que se presentan con los diferentes combustibles, permitiendo una comprensión más completa de la influencia del tipo de combustible en las oscilaciones del motor.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. D. Báez Chamorro, *Análisis de la eficiencia energética en un motor diésel usando biodiesel*, Ibarra, Imbabura: UTN, 2015.
- [2] Academy, Ocsaly, «Ocsaly,» 19 03 2023. [En línea]. Available: <https://ocsaly.com/electronic-diesel-control-edc-advancing-diesel-engine-technology-for-improved-efficiency-and-performance/>. [Último acceso: 15 01 2024].
- [3] J. Guasumba, D. Oramas, H. Galeano y E. Vergara, «El control y la gestión de la inyección electrónica de combustible para los motores de encendido provocado,» *Dialnet*, vol. 7, n° 4, pp. pp. 1869-1887, 2021.
- [4] G. Erazo y G. F. Recalde, *Diagramas electronicos Autotrónica III - Ingeniería Automotriz*, Latacunga, Cotopaxi: ESPE L, 2019.
- [5] J. Perez, *Técnicas del Automovil*, Madrid: Paraninfo, S.A.Código:629.2504/.A56/Tec, 2009.
- [6] G. Reyes, D. Guanuche, S. Perez, A. Garcia y C. Silva, «Análisis de los parámetros de atomización en inyectores crdi2 según su mantenimiento,» *UNANCHAY*, vol. 2, n° 1, pp. p. 61-77, 2023.
- [7] KISHO, «kisho-nano-coating,» 29 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.kisho-nano-coating.com/news/the-importance-of-fuel-injection-advance-angl-57772629.html>. Recuperado el 14 de febrero de 2023.
- [8] S. Escudero, *Motores*, Macmillan Iberia, S.A., 2011.
- [9] Oborudow, «oborudow.ru,» 2021. [En línea]. Available: <https://oborudow.ru/es/tips/vprysk-topлива-v-dizelnom-dvigatele-i-ego-regulirovka-operezhenie/>. Recuperado el 14 de febrero de 2023.

- [10] Grupo prointex, «grupo prointex,» [En línea]. Available: [https://www.grupoprointex.com/el-triangulo-y-el-tetraedro-del-fuego/#:~:text=El%20tri%C3%A1ngulo%20del%20fuego%20representa,energ%C3%ADa%20de%20activaci%C3%B3n%20\(calor\).&text=El%20comburente%20\(normalmente%20el%20ox%C3%ADgeno,componente%20oxidante%20de%20](https://www.grupoprointex.com/el-triangulo-y-el-tetraedro-del-fuego/#:~:text=El%20tri%C3%A1ngulo%20del%20fuego%20representa,energ%C3%ADa%20de%20activaci%C3%B3n%20(calor).&text=El%20comburente%20(normalmente%20el%20ox%C3%ADgeno,componente%20oxidante%20de%20)
- [11] Renting Finders , «Renting Finders,» 13 09 2022. [En línea]. Available: <https://rentingfinders.com/glosario/camara-de-combustion/>. [Último acceso: 16 01 2024].
- [12] Corporativo Ubicalo, «Corporativo Ubicalo,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ubicalo.com.mx/blog/4-tiempos-diesel/#:~:text=Un%20motor%20de%204%20tiempos,%E2%80%94o%20ignici%C3%B3n%E2%80%94y%20escape>. Recuperado el 14 de febrero de 2023.
- [13] Departamento de física aplicada III, «Universidad de Sevilla,» 9 Junio 2021. [En línea]. Available: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo\\_Diesel](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Diesel). Recuperado el 11 de febrero de 2023.
- [14] O. Criollo y H. Matute, *Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos a diésel por análisis de vibraciones*, Cuenca: UPS, 2014.
- [15] S. E. Diaz, «Medicion y analisis de vibraciones,» de *Diaz, S. E*, 2000, pp. 11-12.
- [16] J. Pintor, *Apuntes de la asignatura elementos de maquinas TEMA 10 - dinamica de los motores de pistones*, 1999.
- [17] C. Guerra, M. Carrola y J. Villalobos, «Fundamentos de las vibraciones mecánicas,» pp. 1-78.
- [18] V. Meruane, *Vibraciones mecánicas apuntes para el curso ME4701*, Universidad de Chile, 2014.
- [19] F. SCHUCH, *Manual de la tecnica del automovil*, SAE International, 1999.
- [20] G. White, *Introducción al Análisis de Vibraciones*, Azima DLI, 2010.

- [21] Chong, Y.D., «Grupo de Investigación YD Chong,» 2021. [En línea]. Available: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www1.spms.ntu.edu.sg/~ydchong/teaching/10\\_fourier\\_transform.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www1.spms.ntu.edu.sg/~ydchong/teaching/10_fourier_transform.pdf). [Último acceso: 30 Noviembre 2023].
- [22] H. Rojas, C. Cortés y D. Ramírez, «Implementación Computacional de la Transformada Fraccional de Fourier Discreta,» *Scielo*, vol. 25, nº 6, pp. 143-156, 2014.
- [23] A. Schmidt, «UNS,» 2013. [En línea]. Available: <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Schmidt%20Ana%20Luc%C3%ADa.pdf>.
- [24] MathWorks Inc, «MathWorks,» Noviembre 2023. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/dspdata.psd.html>. [Último acceso: 27 Noviembre 2023].
- [25] S. Cerdeira, H. Ceretti y E. Reciulschi, *Biocombustibles*, Educ.ar, 2014.
- [26] C. Chávez, *Identificación de las emisiones de gases de escape en motores diésel con normativa euro 3 a diferentes alturas sobre el nivel del mar*, Ibarra, Imbabura: UTN, 2018.
- [27] S. Pérez, L. Aguilera, M. Castañeda y N. Gallardo, «Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción,» *Scielo*, vol. 25, 2022.
- [28] INEN, *NTE INEN 2 207:2002*, Quito, Pichincha: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2207.pdf>. Recuperado el 12 de Febrero de 2023, 2002.
- [29] INEN, «Instituto Ecuatoriano de Normalización,» 17 Marzo 2002. [En línea]. Available: [https://www.ant.gob.ec/wpfd\\_file/norma-tecnica-ecuatoriana-nte-inen-2-207-2002/](https://www.ant.gob.ec/wpfd_file/norma-tecnica-ecuatoriana-nte-inen-2-207-2002/).

- [30] Y. J. Yagual Villacís y C. I. Orellana Pesantez, «Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil,» 2023. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24726>. [Último acceso: 21 11 2023].
- [31] Rodesprex, «Norma ISO 10816,» 25 Julio 2020. [En línea].
- [32] Norma Cubana, «NC ISO 10816-1:2005,» 2005. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ftp.isdi.co.cu/Biblioteca/BIBLIOTECA%20UNIVERSITARIA%20DEL%20ISDI/COLECCION%20DIGITAL%20DE%20NORMAS%20CUBANAS/2005/NC%20ISO%2010816-1%20%20a2005%2026p%20rwp.pdf>.
- [33] Auto Data 24, «AutoData24,» 2024. [En línea]. Available: <https://es.autodata24.com/mazda/bt-50/bt-50/25-td-143-hp/details>. [Último acceso: 15 01 2024].
- [34] VIRTUAL EXPO GROUP, «Direct Industry,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/pcb-piezotronics-gmbh/product-111589-2541278.html>.
- [35] NATIONAL INSTRUMENTS, «NI-9250 Specifications,» 14 08 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9250-specs/page/specs.html>. [Último acceso: 18 01 2024].
- [36] INEN, «Norma Técnica Ecuatoriana INEN,» 2012. [En línea]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.bomberosquito.gob.ec/wp-content/uploads/adminftp/comunicacion4ci.pdf>.
- [37] BOSCH, «BOSCH,» 2021. [En línea]. Available: <https://am.boschaftermarket.com/pa/es/equipos/servicio-de-motor/analizadores-de-sistemas-de-veh%C3%ADculos/fsa-740-sin-kts-560>.
- [38] J. Shepard, «Digikey Articles,» 15 02 2022. [En línea]. Available: <https://www.digikey.es/es/articles/how-to-build-a-compact-data-acquisition-system>.

- [39] «Adler,» 16 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.adler-instrumentos.es/actualidad/sistemas-de-adquisicion-de-datos/>.
- [40] «National Instruments,» 04 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/labview/hardware-integration-with-ni-labview.html>.
- [41] Á. Masaquiza y J. Vizúete, *Estudio técnico de un sistema integral de revisión vehicular para la provincia de Chimborazo en la ESPOCH*, Riobamba, Chimborazo: ESPOCH, 2012.
- [42] A. Azam, A. Shoukat y i. Adnan, *Emissions from Diesel Engine and Exhaust After Treatment Technologies*, EESD, 2016.
- [43] P. Veintimilla, *Análisis de resultados de la medición de emisiones de gases contaminantes de fuente móviles a partir de la implementación de la revisión técnica vehicular en el cantón Cuenca*, Cuenca, Azuay: UPS, 2015.
- [44] R. Fidalgo, «Autocasión,» 7 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/como-reducen-las-emisiones-los-coches>. Recuperado el 11 de Febrero de 2023.
- [45] L. Pozo, *Caracterización tecnológica del parque automotor con motor a diésel del distrito metropolitano de Quito y propuesta de reforma a la norma de opacidad de vehículos con motor diésel*, Quito, Pichincha: EPN, 2020.
- [46] MAHA, *Manual de Instrucciones MAHA*, MAHA, 2011.
- [47] Autoexpress, «Euro 6 emissions standards: what do they mean for you?,» 26 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.autoexpress.co.uk/tips-advice/90816/euro-6-emissions-standards-what-do-they-mean-you>. Recuperado el 12 de Febrero de 2023.
- [48] D. Marcos, «Autocasión,» 2 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.autocasion.com/actualidad/noticias/entra-en-vigor-la-normativa-euro-6>. Recuperado el 11 de Febrero de 2023.

- [49] SEGOB, «Diario oficial de la federacion,» 5 Septiembre 2017. [En línea]. Available: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5496105&fecha=05/09/2017#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5496105&fecha=05/09/2017#gsc.tab=0). Recuperado el 13 de febrero de 2023.
- [50] Comisión Nacional Para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), «Derivados Del Petróleo,» *Movilidad y transporte*, p. 4, 2016.
- [51] R. Braun, M. Pumarino y S. Tolvett, *MOTORES DIESEL: TECNOLOGÍAS PARA SU FUTURO*, Santiago: Universidad de Chile, 2005.

## ANEXOS

### Anexo 1

*Mantenimiento del sistema eléctrico del banco de estudio*



### Anexo 2

*Proceso de creación de las mezclas de biodiésel*



a.



b.

### Anexo 3

#### *Adquisición de datos vibratorios*

