



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

ESTUDIO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES MEC PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

AUTORES:

Toapanta Mugmal Adrian Jeanpierre

Pule Flores Kevin Hernan

DIRECTOR:

ING. Mafla Yépez Carlos Nolasco PhD.

Ibarra, 2023

CERTIFICADO ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es **"ESTUDIO DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN MOTORES MEC PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO"**, presentado por los señores: **PULE FLORES KEVIN HERNAN** con número de cédula **1004660864**, y **TOAPANTA MUGMAL ADRAIN JEANPIERRE** con número de cédula **1004485604**, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 03 días del mes Agosto del 2023.



Atentamente

Ing. Mafla Yépez Carlos Nolasco MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



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:	1004660864		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Pule Flores Kevin Hernan		
DIRECCIÓN:	El Olivo- General José María Córdoba/ Calle S/N		
EMAIL:	khpulef@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062640091	TELÉFONO MÓVIL:	0989450449

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio de vibraciones mecánicas en motores MEC para el mantenimiento predictivo
AUTOR (ES):	Pule Flores Kevin Hernan, Toapanta Mugmal Adrian Jeanpierre
FECHA: DD/MM/AAAA	03/08/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
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 3 días del mes de agosto de 2023

EL AUTOR:

.....
Pule Flores Kevin Hernan



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:	1004485604		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Toapanta Mugmal Adrian Jeanpierre		
DIRECCIÓN:	Ibarra-San Antonio-San Isidro Labrador/ S/N		
EMAIL:	a:toapantam@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	Ninguno	TELÉFONO MÓVIL:	0986849840

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Estudio de vibraciones mecánicas en motores MEC para el mantenimiento predictivo
AUTOR (ES):	Pule Flores Kevin Hernan, Toapanta Mugmal Adrian Jeanpierre
FECHA: DD/MM/AAAA	03/08/2023
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Mafía 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 3 días del mes de agosto de 2023

EL AUTOR:


.....
Toapanta Mugmal Adrian Jeanpierre

DEDICATORIA

Dedicado a mi querida familia, el camino hasta este logro ha sido largo y lleno de desafíos, pero siempre han estado a mi lado y me han brindado apoyo incondicional, lo que ha sido esencial para llegar a este momento. Este trabajo es el resultado de la combinación de su apoyo y la formación académica que he recibido en la Universidad Técnica Del Norte, y espero que esta tesis sea un valioso aporte al conocimiento en el campo del análisis de vibraciones y refleje mi compromiso con el aprendizaje y la excelencia.

Toapanta Adrian

En primer lugar, este trabajo de grado está dedicado a mis padres, quienes arduamente han luchado día a día para poder salir adelante y otorgarme la mejor educación, valores y respeto, los cuales me han servido para poder cumplir con esta meta, así mismo, dedicar este logro a mis hermanos, quienes me han dado su apoyo incondicional, dándome consejos y palabras de aliento para culminar esta maravillosa etapa universitaria. A mi novia Odalis, quien ha estado conmigo a lo largo de toda mi carrera universitaria, apoyándome diariamente sin cansancio alguno para cumplir mis metas; Por ultimo y no menos importante, dedicarle este logro a Dios, el cual me ha dado la salud y la sabiduría para nunca agachar la cabeza y ser perseverante en lo que me proponga.

Pule Kevin

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a esta institución por darme la oportunidad de desarrollarme intelectualmente y por darme las herramientas necesarias para alcanzar mis objetivos académicos. Agradezco a todos mis profesores y mentores por su orientación y apoyo, ya que los conocimientos adquiridos en estas aulas han sido de un valor incalculable para mi desarrollo profesional y personal.

Toapanta Adrian

Agradecido primordialmente con Dios, quien me ha sabido guiar por el camino del bien y me ha brindado salud a lo largo de todos estos años, agradecer a mis padres y a mi familia, por siempre brindarme su apoyo en cada momento de mi vida sea buena o mala para jamás desistir y no abandonar mis sueños y metas. Quiero agradecer también a todos los ingenieros de la carrera, quienes han realizado sus labores arduamente para otorgar sus conocimientos y hacernos unos profesionales de bien, éticos y justos; así mismo agradecer al área de administración quienes siempre estuvieron pendientes en cualquier problema, y nos ayudaron a solucionar todo tipo de inconveniente.

Pule Kevin

RESUMEN

La investigación se basa en el análisis de las vibraciones de un motor de encendido por compresión. El estudio se centra en los problemas que pueden presentar los sensores FRP y MAF; se realizaron simulaciones de falla en cada sensor y se registraron las vibraciones generadas con un acelerómetro. Para el estudio se utilizó un motor diésel Mazda BT50 2012 propiedad de la Universidad Técnica del Norte. Se hizo uso del simulador de presión GT 508 para simular la falla del sensor FRP y se modificó la señal del sensor MAF con un potenciómetro. Para cada prueba de simulación se realizaron cinco pruebas en días diferentes. Se utilizó el software LabVIEW para obtener los datos de vibración, las muestras tomadas se guardaron en formato xlsx para finalmente transferirlas a Matlab y aplicar la Transformada Rápida de Fourier. En esta investigación se han obtenido resultados para identificar los rangos de funcionamiento del motor durante cada simulación y la severidad del fallo con el fin de proponer una técnica de mantenimiento predictivo.

ABSTRACT

The research is based on the vibration analysis of a compression ignition engine. The study focuses on the problems that the FRP and MAF sensors may present; failure simulations were performed on each sensor and the vibrations generated were recorded with an accelerometer. A 2012 Mazda BT50 diesel engine owned by the Universidad Técnica del Norte was used for the study. The GT 508 pressure simulator was used to simulate the FRP sensor failure and the MAF sensor signal was modified with a potentiometer. For each simulation test, five tests were performed on different days. LabVIEW software was used to obtain the vibration data, the samples taken were saved in xlsx format to finally transfer them to Matlab and apply the Fast Fourier Transform. In this research, results have been obtained to identify the ranges of engine operation during each simulation and the severity of the failure in order to propose a predictive maintenance technique.

INTRODUCCIÓN

El motor de encendido por compresión MEC es uno de los más utilizados en vehículos industriales debido a su bajo consumo de combustible y eficiencia del motor en comparación con los motores de encendido por chispa. En la industria, estos vehículos están sometidos a largas jornadas de trabajo y altas cargas constantes, por lo que están sujetos a fallos y estos suelen ser críticos por falta de mantenimiento, no obstante, estos fallos podrían detectarse antes de que se produzcan con un mantenimiento predictivo.

El objetivo principal de esta investigación es analizar las vibraciones mecánicas de un motor de encendido por compresión. Se propone la aplicación de una técnica de mantenimiento predictivo para prevenir posibles fallos en el sistema de inyección. La investigación consiste en simular diferentes condiciones de fallo para detectar anomalías y caracterizar las vibraciones en términos de amplitud y frecuencia.

El marco metodológico presenta información bibliográfica que proporciona información detallada sobre el funcionamiento de los MEC (motores de encendido por compresión). Se describe detalladamente el sistema electrónico del motor, con especial atención al sistema de inyección, la transformada de Fourier, las características de vibración, así como los tipos de mantenimiento de las máquinas y la importancia de su aplicación.

La metodología de la investigación presenta los procedimientos utilizados para la adquisición de vibraciones mecánicas a través de LabVIEW, se han utilizado equipos para la medición de vibraciones como acelerómetros, chasis cDAQ, cable acelerómetro. Se realizaron simulaciones en los sensores FRP y MAF, se modificó la señal con dispositivos específicos para alterar los parámetros de funcionamiento del motor y finalmente para el procesamiento de los datos de vibración de cada simulación se aplicó la transformada de Fourier en el software Matlab®, la cual a través de la tabulación de los datos nos permite observar el comportamiento en cada simulación.

Las tablas de amplitud y frecuencia muestran el rango de operación del motor durante cada simulación. Esto permite observar el comportamiento del motor y comparar los rangos de operación de cada simulación respecto al estado ideal.

Índice

CERTIFICADO ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR	I
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
INTRODUCCIÓN	VIII
CAPÍTULO I.....	1
Revisión bibliográfica	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Objetivos.....	1
1.2.1 Objetivo General	1
1.2.2 Objetivos Específicos	1
1.3 Justificación	2
1.4 Alcance	2
1.5 Antecedentes.....	3
1.6 Situación Actual	4
1.7 Prospectiva.....	4
1.8 Contexto.....	5
1.9 VIBRACIONES MECÁNICAS.....	5
1.10 Tipos de vibraciones mecánicas.....	7
1.10.1 Vibración Libre.....	7
1.10.2 Vibración Forzada	8
1.10.3 Análisis de vibraciones	8
1.11 Transformada de Fourier.....	9

1.11.1	Transformada continua de Fourier	10
1.11.2	Transformada inversa de Fourier.....	10
1.11.3	Transformadas discretas (DFT).....	10
1.11.4	Transformada rápida de Fourier (FFT).....	11
1.12	Vibraciones en Motores MEC	11
1.13	Normativa de vibraciones.	12
1.14	Normativa internacional de vibraciones	12
1.15	MOTORES DIÉSEL ELECTRÓNICOS.....	15
1.15.1	Ciclos del motor Diésel	16
1.15.2	Ciclo termodinámico Diésel	17
1.15.3	Ciclo termodinámico real	17
1.16	Funcionamiento.....	19
1.17	Gestión electrónica.....	19
1.17.1	Unidad de Control Electrónico (ECU)	19
1.17.2	Sensor del pedal del acelerador	20
1.17.3	Sensor de posición del cigüeñal CKP.....	21
1.17.4	Sensor de flujo de masa de aire (MAF) + sensor de temperatura de aire (IAT) 22	
1.17.5	Sensor de temperatura del refrigerante ECT	22
1.17.6	Sensor CMP.....	23
1.18	SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON RAIL (CRDi)	24
1.18.1	Componentes del sistema CRDi.....	24
1.18.2	Funcionamiento CRDi.....	29
1.19	MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS.....	30
1.19.1	Mantenimiento correctivo.....	31

1.19.2	Mantenimiento preventivo.....	31
1.19.3	Mantenimiento predictivo.....	32
1.20	Fallas comunes en motores MEC	33
1.20.1	Falla en pulverización de inyectores	33
1.20.2	Falta de presión de riel.....	33
1.20.3	Fallas del sensor MAF.....	33
CAPÍTULO II		35
2	MATERIALES Y METODOS	35
2.1	Selección del motor de pruebas	35
2.1.1	Mazda BT50.....	35
2.2	Definición de variables de estudio.....	36
2.2.1	Monitoreo de vibraciones del motor	36
2.3	Campaña experimental de pruebas	38
2.4	Selección de equipos para diagnóstico de vibraciones.....	39
2.4.1	Sensor de vibración	39
2.4.2	Tarjeta de adquisición de datos	41
2.4.3	Cable de acelerómetro.....	41
2.4.4	Equipo para simulación de presión en el Riel Común.	42
2.4.5	Potenciómetro.....	42
2.5	Desarrollo de interfaz en LabVIEW para recolección de datos	43
2.5.1	Herramienta de LabVIEW	44
2.5.2	Drivers.....	44
2.5.3	Programa en LabVIEW.....	44
2.6	Instalación de equipos y pruebas piloto.....	46
2.6.1	Ubicación de acelerómetros	46

2.7	Instalación de cDAQ	47
2.7.1	Pruebas piloto.....	48
2.8	Diseño de simulaciones experimentales	50
2.8.1	Variación de presión del riel de combustible	50
2.8.2	Simulación de Falla en sensor MAF.....	52
2.9	Tratamiento de datos en Matlab	53
2.9.1	Importación de datos	53
2.9.2	Filtración de datos	53
2.9.3	Aplicación de la transformada de Fourier	54
2.9.4	Prueba Piloto	55
2.9.5	Recopilación de datos.....	55
	CAPITULO III.....	57
	3 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	57
3.1	Análisis de sensor vertical (Tapa válvulas)	58
3.1.1	Motor en óptimas condiciones	58
3.1.2	Sensor MAF señal 2.5V	60
3.1.3	Sensor MAF señal 3.5V	62
3.1.4	Sensor FRP presión en 40.7 MPa.....	65
3.1.5	Simulación de presión en 55.7 MPa.....	68
3.2	Análisis sensor horizontal (Block del motor)	71
3.2.1	Motor en óptimas condiciones	71
3.2.2	Simulación de señal de MAF 2.5V	73
3.2.3	Simulación de señal de MAF 3.5 V	76
3.2.4	Simulación de presión Riel 40.7 MPa.....	78
3.2.5	Simulación de presión Riel 55.70 MPa.....	81

3.3	RESULTADOS DE armonicos 2 y 3	84
3.3.1	Sensor vertical	84
3.3.2	Sensor horizontal	88
	Conclusiones	91
	Recomendaciones	92
	Bibliografía	93

Índice de Figuras

Figura 1.1	Representación de una onda senoidal	7
Figura 1.2	Ejemplo de transformada de Fourier	9
Figura 1.3	Ubicación del acelerómetro para motores cilíndricos en línea	13
Figura 1.4	Proceso de combustión ciclo Diésel	16
Figura 1.5	Ciclo termodinámico teórico Diesel	17
Figura 1.6	Diferencias entre ciclo termodinámico real y teórico	18
Figura 1.7	Unidad de control electrónica	20
Figura 1.8	Distribución de pines del sensor APP	21
Figura 1.9	Sensor CKP	21
Figura 1.10	Partes del sensor MAF +IAT	22
Figura 1.11	Sensor ECT	23
Figura 1.12	Sensor CMP	23
Figura 1.13	Componentes del sistema CRDi	25
Figura 1.14	Sensor FRP	26
Figura 1.15	Válvula ZME	27
Figura 1.16	Inyector electrónico de un sistema Common Rail	28
Figura 1.17	Esquema del inyector electrónico Diésel	29

Figura 1.18 Sistema Common Rail	30
Figura 2.1 Marco metodológico del estudio	35
Figura 2.2 Características de vibraciones.....	38
Figura 2.3 Componentes y proceso de investigación.....	38
Figura 2.4 Acelerómetro piezoeléctrico.....	40
Figura 2.5 Imán usado para montaje de sensor sobre el motor	40
Figura 2.6 Tarjeta de adquisición de datos.....	41
Figura 2.7 Cable de sensor acelerómetro	41
Figura 2.8 Simulador GT-508	42
Figura 2.9 Diagrama de potenciómetro.....	43
Figura 2.10 Proceso metodológico para la adquisición de datos a partir de las vibraciones	43
Figura 2.11 Drivers instalados en el Software LabVIEW.....	44
Figura 2.12 Block Diagram del programa LabVIEW	45
Figura 2.13 Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones	45
Figura 2.14 Sensor 0 - horizontal instalado	47
Figura 2.15 Sensor 1-vertical instalado.....	47
Figura 2.16 Información de tarjeta cDAQ1 a través de NI MAX.....	48
Figura 2.17 Señal de vibración con motor frio	49
Figura 2.18 Señal de vibración con motor a temperatura de trabajo	49
Figura 2.19 Simulador GT-508 instalado.....	51
Figura 2.20 Conexión para variación de señal del MAF	52
Figura 2.21 Código en Matlab® para importación de archivos xlsx e ilustración de datos	54
Figura 2.22 Código en Matlab® para aplicación de transformada de Fourier.....	54
Figura 2.23 CoMParación de 2 señales.....	55
Figura 3.1 Espectro del motor en óptimas condiciones; sensor vertical.	58

Figura 3.2 Amplitud promedio de cada prueba de simulación en estado Óptimo; sensor vertical.....	59
Figura 3.3 Frecuencia promedio de cada prueba de simulación en estado Óptimo; sensor vertical.....	59
Figura 3.4 Espectro generado con señal de MAF a 2.5V; sensor vertical	60
Figura 3.5 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 v; sensor vertical.....	61
Figura 3.6 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 2.5V; sensor vertical.....	62
Figura 3.7 Espectro con señal de MAF a 3.5V; sensor vertical	63
Figura 3.8 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 3.5V; sensor vertical.....	64
Figura 3.9 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 3.5V; sensor vertical.....	65
Figura 3.10 Espectro con presión de riel a 40.7 MPa; sensor vertical	66
Figura 3.11 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor vertical	66
Figura 3.12 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7; sensor vertical.....	67
Figura 3.13 Simulación de presión en el riel de 55.7 MPa; sensor vertical.....	68
Figura 3.14 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa; sensor vertical	69
Figura 3.15 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa; sensor vertical	70
Figura 3.16 Espectro del motor en óptimas condiciones; sensor horizontal.....	71
Figura 3.17 Amplitud promedio de cada prueba de simulación en estado Óptimo; sensor horizontal	72

Figura 3.18 Frecuencia promedio de cada prueba de simulación en estado Óptimo; sensor horizontal	73
Figura 3.19 Espectro generado con señal de MAF a 2.5V; sensor horizontal	74
Figura 3.20 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 V; sensor horizontal	75
Figura 3.21 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 V; sensor horizontal	75
Figura 3.22 Espectro con señal de MAF a 3.5V; sensor horizontal.....	76
Figura 3.23 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 3.5 V; sensor horizontal	77
Figura 3.24 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 3.5 V; sensor horizontal	78
Figura 3.25 Espectro con presión de riel a 40.7 MPa; sensor horizontal.....	79
Figura 3.26 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor horizontal	80
Figura 3.27 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor horizontal	81
Figura 3.28 Simulación de presión en el riel de 55.7 MPa; sensor horizontal.....	82
Figura 3.29 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa; sensor horizontal	83
Figura 3.30 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor horizontal	83
Figura 3.31 Promedio de los armónicos 2 de todas las pruebas y ensayos	86
Figura 3.32 Promedio de los armónicos 2 de todas las pruebas y ensayos	89
Figura 3.33 Promedio de frecuencias de pruebas realizadas con sus respectivas simulaciones	90

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Ecuaciones y unidades de las características de la vibración mecánica	6
Tabla 1.2 Grado de severidad de las vibraciones	14
Tabla 1.3 Tabla de valores de voltaje del APP	20
Tabla 1.4 Pines del sensor CKP	21
Tabla 1.5 Pines del sensor MAF	22
Tabla 1.6 Pines de sensor CMP.....	24
Tabla 1.7 Tensión en relación con la carga del motor y la presión.....	27
Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del motor.....	36
Tabla 2.2 Ecuaciones y unidades de las características de la vibración mecánica	37
Tabla 2.3 Valores obtenidos a partir de pruebas piloto de adquisición de datos.	50
Tabla 2.4 Valores del sensor FRP simulados con el equipo GT-508.....	51
Tabla 2.5 Valores usados para simulación de falla en el sensor MAF	53
Tabla 2.6 Ejemplo de recopilación de amplitudes	56
Tabla 2.75 Ejemplo de recopilación de frecuencias.....	56
Tabla 3.1 Temperatura obtenida el día correspondiente a cada prueba	57
Tabla 3.2 Rango de trabajo en óptimas condiciones.....	60
Tabla 3.3 Rango de trabajo en simulación de sensor MAF 2.5 V	62
Tabla 3.4 Rango de trabajo en simulación de sensor MAF 3.5 V	65
Tabla 3.5 Rango de trabajo en simulación de sensor FRP 407 MPa	68
Tabla 3.6 Rango de trabajo en simulación de sensor FRP 55.7 MPa	70
Tabla 3.7 Resumen de simulación en óptimas condiciones.....	73
Tabla 3.8 Resumen de simulación en el sensor MAF a 2.5 V	76
Tabla 3.9 Resumen de simulación en el sensor MAF a 3.5 V	78
Tabla 3.10 Resumen de simulación de presión en el riel a 40.70 MPa.....	81

Tabla 3.11 Tabla resumen de simulación de presión en el riel a 55.70 MPa.....	84
Tabla 3.12 Resultados de amplitudes de cada simulación; sensor vertical.....	85
Tabla 3.13 Resultados de frecuencia de cada simulación; sensor vertical.....	87
Tabla 3.14 Resultados de amplitudes de cada simulación; sensor horizontal.....	88
Tabla 3.15 Resultados de frecuencias de cada simulación; sensor horizontal.....	90

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante generaciones, los motores de combustión interna de encendido por compresión han sido los más utilizados en el sector industrial debido a sus características de eficiencia, pero tienen fallas y las más comunes se deben al uso excesivo y a las diversas cargas a las que son sometidos constantemente. En este sentido, las vibraciones son un síntoma del estado del motor y, si son excesivas, se convierten en un fenómeno que puede causar inconvenientes críticos en el motor debido a la falta de mantenimiento, por lo que estas vibraciones exageradas pueden provocar paradas inesperadas.

Uno de los sistemas más propensos a fallar es el de inyección, pues al tratarse de un sistema complejo y funcionar a alta presión, provoca vibraciones incluso en condiciones normales de funcionamiento, no obstante en nuestro país estas vibraciones pueden ser más intensas y están provocadas por el tipo de combustible que se comercializa, lo que significa que el motor tendrá un mayor desgaste interno, que no sólo afectará a su estado, sino que provocará un aumento de las emisiones, lo que afectará al medio ambiente e incluso será más caro de reparar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar vibraciones de motores de encendido por compresión para establecer fallas electrónicas en el sistema de inyección y obtener el estado actual de los diferentes componentes, para proponer una metodología de mantenimiento predictivo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar fallas electrónicas comunes en sistemas de inyección.
- Medir vibraciones en el cilindro central de la parte superior del block, con software LabVIEW.

- Procesar datos obtenidos mediante Matlab ® simulando averías frecuentes en el sistema de inyección.
- Caracterizar datos de vibraciones adquiridos de un motor en buen y mal estado.
- Proponer una metodología de mantenimiento predictivo a base de vibraciones.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo y la investigación de nuevos sistemas en el sector de la automoción son muy importantes para la conservación y restauración del medio ambiente, ya que la industria automovilística es uno de los principales contaminantes del medio ambiente y se están tomando medidas para mejorar y reducir las exigencias medioambientales que sufre la sociedad (Roque et al., 2018).

De igual forma, la Secretaría Nacional de Planeación (2021) señala en el Objetivo 12: “Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático”. Durante la combustión, una de las sustancias químicas más nocivas es el óxido nitroso (NOx), que se libera al medio ambiente y aumenta el efecto invernadero, con graves repercusiones en los ecosistemas (Elizabeth et al., 2020).

La vibración del motor está causada esencialmente por el sistema de inyección, y su causa principal es el combustible y las fuerzas ejercidas sobre el motor. "La vibración es uno de los efectos del combustible como consecuencia del proceso de combustión, además de los efectos de los cambios en la inercia, los diferenciales de compresión y la posición del pistón" (Gutiérrez, Iñiguez Izquierdo, et al., 2017). Las consecuencias de un fallo del sistema de inyección pueden provocar tiempos de inactividad imprevistos que pueden costar tiempo y dinero a la industria.

1.4 ALCANCE

Esta investigación propone una alternativa al mantenimiento predictivo de los motores de encendido por compresión para prolongar la vida útil del motor y reducir el riesgo de problemas críticos. Por lo tanto, en este proyecto se realizaron simulaciones de fallos en un modelo educativo

de un motor diésel electrónico, que forma parte del plan de estudios de ingeniería de automotriz, utilizando equipos específicos de la disciplina.

Por otro lado, se desarrollará un programa para el análisis de vibraciones, primero identificadas a través de acelerómetros y posteriormente utilizando el software LabVIEW, estos datos serán adquiridos y procesados de forma autónoma utilizando la versión estudiante de Matlab®. La adquisición de datos se basará en mediciones y simulaciones de fallos en el sistema de inyección electrónica y, en última instancia, permitirá determinar el estado del motor en función de la intensidad de las vibraciones que presente en tiempo real.

1.5 ANTECEDENTES

“Los motores diésel son conocidos por su fiabilidad, durabilidad, economía y por su eficiencia en el transporte de largas distancias, usados en máquinas de trabajo pesado y en gran variedad de vehículos comerciales” (Nag et al., 2022). En el país, la mayoría de los vehículos utilizados en el transporte pesado, los autobuses y la industria en general están equipados con motores MEC.

Los motores modernos constan de varios actuadores y sensores en sus sistemas, y según (Noroña & Gómez, 2019) “la electrónica en los automóviles optimiza los sistemas, por ejemplo, la inyección directa en los motores mejora la sincronización de la inyección, lo que conduce a una mayor eficiencia del motor”. Por tanto, la electrónica permite reducir las emisiones contaminantes.

La vibración del motor diésel es causada por muchos factores, uno de ellos es el sistema de inyección (Villanueva Rojas, 2020) establece que existen varias fallas en el sistema de inyección que pueden ocurrir por diferentes razones y que afectan el comportamiento dinámico del motor; las posibles causas de fallas en el sistema de inyección incluyen: Inyección prematura de combustible, retardo de la inyección, baja presión de inyección, sobreinyección, obstrucción del inyector y fallo de la bomba de inyección, por lo que la vibración del motor indica la estabilidad y el estado mecánico del motor.

(Rodríguez Matienzo, 2018) en el artículo científico “Diagnosis of IC Engines using vibrations” explicó que: en máquinas alternativas, no solo se considera la frecuencia de diagnóstico relacionado con la fuerza y momento, también es importante la frecuencia originada por fuerzas como expansión del gas y fuerzas de impacto entre superficies en contacto cuando cambia la dirección de la fuerza normal. La misma concluyó que en máquinas alternativas es necesario tomar frecuencias de diagnóstico en el block natural para obtener el estado mecánico del motor y que las vibraciones son mayores cuando el motor tiene un desgaste en sus pares cinemáticos.

En nuestro país, por lo general las vibraciones se da debido a los combustibles que poseemos en nuestro medio, como consecuencia, afecta el proceso de combustión, generando vibraciones no deseadas en el vehículo y provocando irregularidades de las fuerzas de inercia del motor, afectando la velocidad, potencia y vida útil del mismo (Gutiérrez, Iñiguez, et al., 2017).

1.6 SITUACIÓN ACTUAL

En la actualidad, son muchos los problemas que se producen en el motor de encendido por compresión debido a diversas averías provocadas por diferentes tipos de irregularidades a las que se ve sometido el motor. Esta situación en los vehículos se debe principalmente a la falta de un sistema de mantenimiento predictivo adecuado que ayude a informar al conductor de posibles daños futuros que pueda tener el vehículo.

En la Universidad Internacional del Ecuador se han realizado investigaciones acerca del análisis de vibraciones en motores de combustión interna por medio de ultrasonido, usando métodos basados en temperatura, sonidos fuertes o mal funcionamiento de las partes del motor (Cárdenas Jarrin et al., 2017). Así mismo, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, “se analizó las vibraciones del motor de combustión interna a través de simulación de modos de falla para contribuir al mantenimiento predictivo” (Guevara Gaibor & Landa Diaz, 2018).

1.7 PROSPECTIVA

El objetivo es diagnosticar un fallo en los componentes de los sistemas que forman parte de un motor diésel, en función de las vibraciones que presenta en sus ciclos de trabajo, utilizando varias

herramientas basadas en programación que queremos que representen los resultados obtenidos para determinar el estado del motor en función de las irregularidades que pueda presentar.

Pretendemos reducir los costes de mantenimiento de varios sistemas mediante el análisis de vibraciones, porque en nuestro entorno la situación económica actual es de recesión y este mantenimiento predictivo supondría un importante ahorro para la industria.

1.8 CONTEXTO

En el estudio realizado por (Cabrera Bravo & Ronquillo Ronquillo, 2016) que compara una muestra de un motor en buen estado de funcionamiento con otros defectos encontrados en el motor, los valores de la mediana, la media y el mínimo de las características no son válidos para el análisis porque estos valores no muestran diferencias significativas, por lo que el análisis comparativo entre las normas de funcionamiento y los defectos encontrados muestra más diferencias que la comparación entre los defectos; En este breve estudio fue posible simplificar la señal manteniendo las características originales sin cambiar ni modificar los datos de la muestra y fue posible detectar defectos utilizando este breve método.

Así mismo, en la investigación realizada por (Villanueva Rojas, 2020) señala que una falla en un sistema de inyección Diesel puede ser detectada utilizando vibraciones torsionales aplicando la transformada de Fourier frente a la respuesta de vibración en los diferentes casos estudiados, fue posible determinar patrones de vibración utilizando el sensor Revoduino desarrollado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la PUCV, el cual es capaz de extraer de manera precisa y visual los cambios de velocidad angular en un corto tiempo, mostrando claramente las vibraciones torsionales que se ven afectadas en cada caso de falla.

1.9 VIBRACIONES MECÁNICAS

Es un fenómeno físico, un movimiento vibratorio de un sistema mecánico o de sus componentes, una oscilación de las partículas que componen la materia, es decir, las vibraciones se transmiten o propagan desde su origen a través de cualquier medio físico y, salvo en el caso de los fenómenos de resonancia, la transmisión de las vibraciones suele conllevar una amortiguación que depende de la naturaleza del medio en el que se propagan (Santuano Díaz et al., 2003).

A continuación, se enumeran las principales características que presentan las vibraciones generadas por la máquina:

- Frecuencia: Representa la cantidad de veces que ocurre un ciclo de movimiento en una unidad de tiempo.
- Período: Indica la duración de un ciclo y se calcula como el inverso de la frecuencia, es decir, el tiempo por ciclo.
- Amplitud: Es una medida de la máxima distancia alcanzada respecto a la posición de reposo durante el ciclo de movimiento.
- Frecuencia Natural: Representa la frecuencia a la cual un sistema vibrará cuando se le perturbe y no esté sujeto a fuerzas externas.

En la **Tabla 1.1** se muestra las ecuaciones y unidades de las características de la vibración mencionadas anteriormente.

Tabla 1.1 Ecuaciones y unidades de las características de la vibración mecánica

Características	Ecuación	Unidades
Frecuencia	$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{RPM}{60}$	Hertzio [Hz]
Periodo	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$	Segundos [s]
Velocidad angular	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	RPM
Frecuencia natural	$F_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}$	Hertzio [Hz]
Donde: f = Frecuencia T = Tiempo ω = Velocidad angular F_n = Frecuencia natural K = Constante de resorte o rigidez m = Masa		

(Jara Niveló & Rodríguez Romero, 2014).

Las vibraciones pueden ser un movimiento angular puro (rotación), un movimiento lineal puro (desplazamiento) o, como es habitual, un movimiento complejo en el que intervienen la rotación y el desplazamiento, que puede describirse mediante la aceleración de la velocidad o el desplazamiento real de la masa implicada, pero la magnitud más utilizada para describir los efectos de la vibración es la aceleración (Santuario Díaz et al., 2003).

La **Figura 1.1** muestra gráficamente una onda sinusoidal en función del tiempo (espectro temporal).

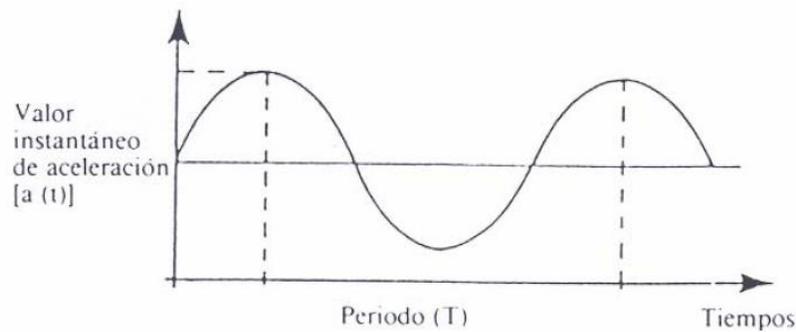


Figura 1.1 Representación de una onda sinusoidal

(Santuario Díaz et al., 2003).

1.10 TIPOS DE VIBRACIONES MECÁNICAS

Existen varios tipos de vibración mecánica, cuyos detalles se describen brevemente a continuación:

1.10.1 VIBRACIÓN LIBRE

Cualquier cuerpo elástico es capaz de oscilar libremente después del impulso inicial y su movimiento se mantiene sólo por las fuerzas de restauración inherentes al sistema. Un sistema que oscila libremente lo hace a una o varias frecuencias naturales en función de la distribución de masas, la rigidez y los grados de libertad (Galarza Vega, 2014).

Esta vibración puede dividirse en vibración libre no amortiguada y amortiguada, cuyos detalles se describen de forma resumida a continuación:

- Vibración libre no amortiguada

Este tipo de vibración se produce cuando no hay fuerzas perturbadoras que actúen sobre el sistema, es decir, sólo fuerzas inherentes al sistema, y no hay amortiguación, es decir, no existe ningún elemento que absorba la energía de la vibración.

- Vibración libre amortiguada

Esta clase de vibración se produce en sistemas con elementos de absorción de energía, llamados amortiguadores, cuya capacidad de absorber energía viene dada por el factor de amortiguación "c".

1.10.2 VIBRACIÓN FORZADA

Cuando se aplica una fuerza perturbadora externa a un sistema, éste se ve obligado a vibrar. Si la excitación es oscilante, el sistema se ve obligado a vibrar a la frecuencia de la excitación, sea ésta periódica o no.

Las vibraciones forzadas pueden dividirse en dos categorías: vibraciones forzadas no amortiguadas y vibraciones forzadas amortiguadas, que se describen a continuación:

- Vibración forzada no amortiguada

Este tipo de vibración se produce cuando un sistema está sometido a una fuerza perturbadora externa, suponiendo que esta fuerza sea oscilante, en el sistema se producen vibraciones forzadas de la misma frecuencia que la fuerza externa, pero sin amortiguación, porque ninguno de los componentes absorbe energía.

- Vibración forzada amortiguada

Estas vibraciones se producen en sistemas que además de estar sometidos a fuerzas externas, tienen elementos que absorben energía.

1.10.3 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de las vibraciones es una de las principales herramientas para el diagnóstico de averías basado en mediciones mecánicas, ya que es fácil de medir y las vibraciones específicas generadas por cada máquina están directamente relacionadas con su diseño y estado. A medida que el estado de la máquina cambia, la magnitud de la vibración también cambiará, de modo que el cambio en la vibración puede utilizarse para determinar el fallo inicial de la máquina antes de que se convierta en un fallo crítico (Jara Niveló & Rodríguez Romero, 2014).

El desarrollo de la electrónica y la computación ha permitido el avance de las técnicas para el análisis de señales y su aplicación al procesamiento de señales de vibración, lo que ha hecho posible el uso de herramientas basadas en sistemas de adquisición de datos para recoger y analizar las vibraciones y su estructura (Estupiñán et al., 2006).

1.11 TRANSFORMADA DE FOURIER

Las transformadas de Fourier se utilizan ampliamente en muchas áreas de la ciencia como herramienta matemática y física para modificar problemas y transformarlos en problemas más trazables, con aplicaciones en el análisis de sistemas lineales, el estudio de antenas ópticas, la modelización de procesos aleatorios, la teoría de la probabilidad y la física cuántica (Arbel & Kopeika, 2005). En otras palabras, la transformada de Fourier descompone y divide una forma de onda o función en sinusoides de diferentes frecuencias, que pueden añadirse a la forma de onda original.

La **figura 1.2** muestra cómo funciona la transformada de Fourier. Así se separan las señales complejas en señales más simples, lo que facilita el análisis de las señales.

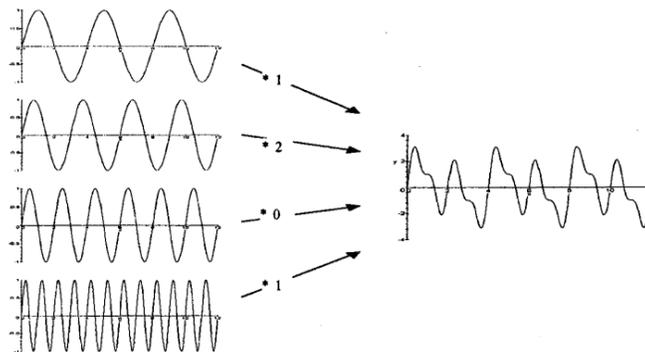


Figura 1.2 Ejemplo de transformada de Fourier

(Bernal et al., 199 C.E.).

Por lo tanto, la transformada de Fourier puede utilizarse para detectar y distinguir las diferentes frecuencias y amplitudes de las ondas sinusoidales. A continuación, se indican las distintas ecuaciones de la transformada de Fourier.

1.11.1 TRANSFORMADA CONTINUA DE FOURIER

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad [1.1]$$

Donde:

t: Tiempo

f: Frecuencia en Hz

x(t): señal de prueba

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

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

Ecuación 1.1 Transformada discreta de Fourier (Cáceres, 2007).

1.11.2 TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER

A partir de la transformada, podemos recuperar la señal original tomando la transformada inversa de Fourier.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad [1.2]$$

Donde:

t: Tiempo

f: Frecuencia en Hz

x(t): señal de prueba

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

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

[1.2]

Ecuación 1.2 Transformada inversa de Fourier (Cáceres, 2007).

1.11.3 TRANSFORMADAS DISCRETAS (DFT)

El equivalente en tiempo y frecuencia de la transformada Discreta de Fourier (DFT)

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi j}{N} kn} \quad [1.3]$$

Donde:

N : Número de Samplers en $x[n]$

$x[n]$: Señal de prueba discreta (con índice n)

$x[k]$: Espectro en función de la frecuencia discreta (con índice k)

$e^{-\frac{2\pi jkn}{N}}$: Fasor de Sondeo discreto (kernel Funtion)

Ecuación 1.3 Transformada discreta de Fourier (Cáceres, 2007).

1.11.4 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

$$F[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \left(w_N^{nk} * f(k) \right) \quad [1.4]$$

Donde:

$f(k)$: Señal de la corriente

N : Secuencia de datos

$F[n]$: Función FFT

n y k : Forman los armónicos que la función presentará

w_N^{nk} : Matriz transformada simétrica

Ecuación 1.4 Transformada rápida de Fourier (Pacheco Guerrero, 2023).

1.12 VIBRACIONES EN MOTORES MEC

Los motores térmicos generan vibraciones incluso en condiciones normales de funcionamiento. En otras palabras, la combustión genera vibraciones que se producen en varios sistemas del motor, pero que deben mantenerse dentro de límites aceptables. Según (Taghizadeh-Alisaraei & Mahdavian, 2019), “Para una combustión ideal, el valor máximo de aceleración de la vibración debe estar dentro del rango de 0-10 kHz en el gráfico de tiempo-frecuencia”, los factores más importantes son:

- Detonación del combustible
- Sistema de inyección
- Apertura y cierre de válvulas
- Cigüeñal – biela- pistón
- Turbo

1.13 NORMATIVA DE VIBRACIONES.

Todas las normas deben incluir comparaciones con normas acordadas, procedimientos de medición comunes e información para la evaluación de los datos. En función del ámbito de desarrollo y aplicación, hay una serie de organizaciones que han establecido normas para la evaluación de la gravedad de las vibraciones, entre ellas ANSI, ISO, BS (British Standards, Normas Internacionales) y VDI, así como API y AGMA, que corresponden a asociaciones industriales, y organizaciones (Criollo Jadan & Matute Bravo, 2014). En cuanto a la medición y evaluación de las vibraciones, las máquinas se clasifican básicamente en cuatro categorías:

- Motores alternativos con partes giratorias y recíprocas (motores Diésel, algunas bombas y compresores).
- Máquinas rotativas con rotores rígidos (algunos tipos de motores eléctricos, bombas de una etapa, bombas de baja velocidad).
- Máquinas rotativas con rotores flexibles (grandes generadores de turbinas de vapor, bombas multietapa y compresores).
- Máquinas rotativas con rotores semirrígidos (turbinas de vapor de baja presión, compresores de flujo axial, ventiladores)

1.14 NORMATIVA INTERNACIONAL DE VIBRACIONES

La norma ISO-1086-1 es una interpretación de una norma internacional que se refiere a los pistones con una potencia superior a 100 kW en la parte 6. La norma especifica los procedimientos y las directrices generales para la medición y la clasificación de las vibraciones en las máquinas recíprocas y también ofrece recomendaciones detalladas sobre el uso de los criterios de medición y evaluación.

- **Puntos y dirección de medición**

La norma especifica la posición del acelerómetro en función del tipo de motor utilizado en la prueba. Esta posición garantiza la uniformidad de la medición y, por lo tanto, debe tomarse en el punto especificado y en las tres direcciones principales, como se muestra en la figura 2.3, que señala los puntos específicos para los motores de cilindros en línea.

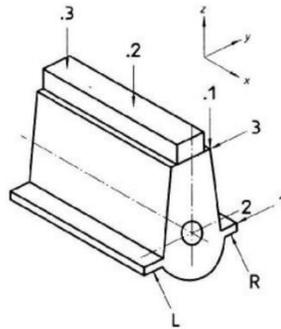


Figura 1.3 Ubicación del acelerómetro para motores cilíndricos en línea

(ISO 10816, 2017).

- **Condiciones de Operación**

Según la norma sobre vibraciones 10816 -6, las mediciones deben realizarse cuando la máquina haya alcanzado una condición de funcionamiento estable (por ejemplo, temperatura de funcionamiento normal) y la gravedad de la vibración de la máquina debe determinarse en función de la vibración máxima que se produzca en toda la gama de potencia y velocidad en condiciones de funcionamiento normales.

- **Severidad Vibracional**

De acuerdo con la norma (ISO 10816, 2017) “es un término genérico que designa un valor, o conjunto de valores, tales como el valor máximo, promedio o RMS, u otros parámetros que describen la vibración. También pueden referirse a valores instantáneos o valores promedios”, la tabla muestra el grado de severidad de la vibración, que puede utilizarse para cuantificar la

vibración midiendo la vibración RMS total en el rango de frecuencia de 2 Hz a 1000 Hz; en desplazamiento, velocidad y aceleración.

Tabla 1.2 Grado de severidad de las vibraciones

Vibration severity grade	Limiting values of overall vibration measured on the machine structure		
	Displacement μm (r.m.s)	Velocity mm/s (r.m.s)	Acceleration m/s^2 (r.m.s)
1,1	$\leq 17,8$	$\leq 1,12$	$\leq 1,76$
1,8	$\leq 28,3$	$\leq 1,78$	$\leq 2,79$
2,8	$\leq 44,8$	$\leq 2,82$	$\leq 4,42$
4,5	$\leq 71,0$	$\leq 4,46$	$\leq 7,01$
7,1	≤ 113	$\leq 7,07$	$\leq 11,1$
11	≤ 178	$\leq 11,2$	$\leq 17,6$

18	≤ 283	$\leq 17,8$	$\leq 27,9$
28	≤ 448	$\leq 28,2$	$\leq 44,2$
45	≤ 710	$\leq 44,6$	$\leq 70,1$
71	≤ 1125	$\leq 70,7$	≤ 111
112	≤ 1784	≤ 112	≤ 176
180	> 1784	> 112	> 176
NOTE-the values were derived from constant displacement in the range 2 Hz to 10 Hz, constant velocity from 10 Hz to 250 Hz and constant acceleration from 250 HZ to 1000 Hz.			

(ISO 10816, 2017).

1.15 MOTORES DIÉSEL ELECTRÓNICOS

Los motores Diésel son motores de combustión interna de encendido por compresión, según (Liu et al., 2022) es la principal fuente de energía para el sector del transporte en aplicaciones automotrices, agrícolas e industriales debido a sus bajos costos de operación, alta eficiencia de conversión de combustible y durabilidad.

Los motores Diésel son motores de combustión interna de encendido por compresión, según (Liu et al., 2022) “es la principal fuente de energía para el sector del transporte en aplicaciones automotrices, agrícolas e industriales debido a sus bajos costos de operación, alta eficiencia de conversión de combustible y durabilidad”.

En los últimos años, los motores diésel han evolucionado hasta convertirse en una alternativa más eficiente para diversas aplicaciones de automoción, gracias a avances tecnológicos como la inyección directa (CRDi), la recirculación de los gases de escape (EGR) y la sobrealimentación, que hacen que estos motores sean más eficientes y potentes (Dond & Gulhane, 2021).

El proceso de combustión en los motores diésel (MEC) difiere de los motores de encendido por chispa (MEP) en que las RPM de motor es controlada mediante la cantidad de combustible inyectado, mientras que en los motores de encendido por chispa (MEP) es controlada por la cantidad de aire que entra en la cámara de combustión y esta se controla mediante una válvula de mariposa en el colector de admisión.

1.15.1 CICLOS DEL MOTOR DIÉSEL

El motor de encendido por compresión tiene un ciclo ideal llamado ciclo ideal Diésel, el cual está conformado por varios procesos termodinámicos.

- El primer ciclo es la etapa de la Admisión, el pistón se desliza del punto muerto superior al punto muerto inferior mientras la válvula de admisión se abre haciendo que el aire pase hacia el cilindro con una presión constante.
- El segundo ciclo es la etapa de compresión, en esta etapa el pistón se desliza del punto muerto inferior al punto muerto superior, realizando una compresión isotrópica con ambas válvulas cerradas, gracias a esto se forma un proceso adiabático reversible.
- La tercera etapa es el proceso de combustión, en este punto el inyector inyecta el combustible presurizado generando así un proceso isobárico.
- El cuarto ciclo es la expansión donde debido a la gran temperatura que se genera después de la explosión de la mezcla el pistón se desplaza hacia el punto muerto inferior realizando un proceso isentrópico.
- El último ciclo es el de escape, en este ciclo la válvula de escape se abre y el pistón se desplaza hacia el punto muerto superior generando un descenso de presión, expulsando los gases de la combustión.

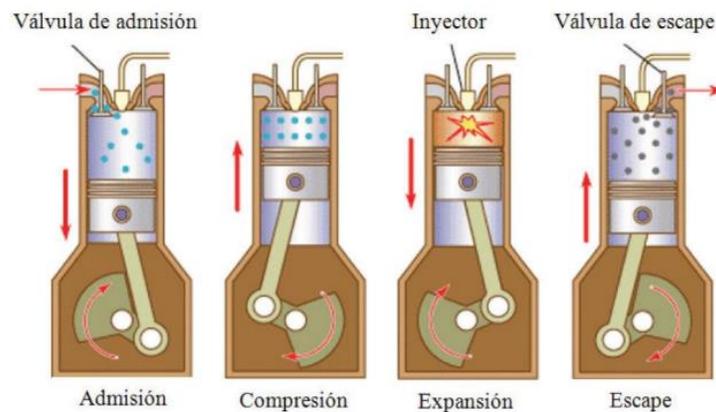


Figura 1.4 Proceso de combustión ciclo Diésel

(Blanco Rios & Camacho Pèrez Jonathan De Jesùs, 2018).

1.15.2 CICLO TERMODINÁMICO DIÉSEL

Un ciclo termodinámico es una serie de procesos termodinámicos en un sistema en el que un fluido realiza una determinada cantidad de trabajo antes de volver a su estado original. Los procesos termodinámicos son cambios en las propiedades termodinámicas como la presión, la entropía, el volumen, la entalpía y la temperatura.

1.15.2.1 Ciclo termodinámico teórico

A continuación, se muestra el diagrama teórico del ciclo termodinámico del motor Diesel. Consta de cuatro procesos internamente reversibles. (1) Un proceso de compresión, llamado compresión isentrópica porque este proceso no produce ningún cambio en su propia entalpía; (2) conduce a un aumento de calor a presión constante, lo que significa que es una transición isobárica; (3) es un proceso de expansión isotrópica, donde la entalpía = 0; y, por último, (4) es un proceso en el que la liberación de calor se produce a volumen constante y es por tanto una conversión isocórica (Albarracín Méndez & Huiñisaca Quizhpe, 2015). El ciclo del diésel es un sistema cerrado sin cambio de energía o potencial.

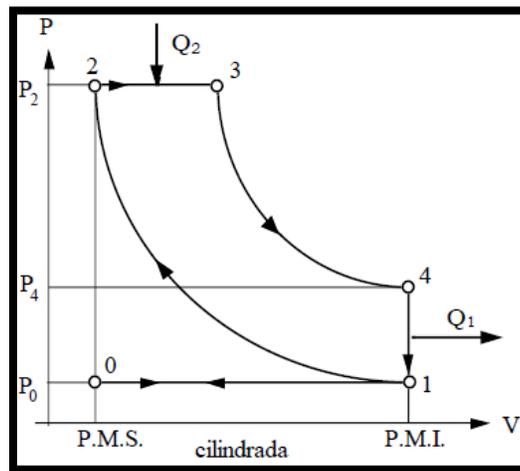


Figura 1.5 Ciclo termodinámico teórico Diesel

(Draghi Roberto Filgueira, 2015).

1.15.3 CICLO TERMODINÁMICO REAL

El ciclo real es el que muestra las condiciones reales de funcionamiento del motor, y cuando se visualiza en un diagrama P-V, se denomina diagrama indicado porque puede obtenerse con un

indicador, es el instrumento que registra los cambios en la presión y el volumen del motor en cada punto del ciclo (Draghi & Filgueira, 2015).

La figura 2.6 muestra las diferencias entre los ciclos termodinámicos real y teórico y pone de relieve las principales diferencias entre ambos ciclos, algunas de las cuales se analizarán en detalle a continuación.

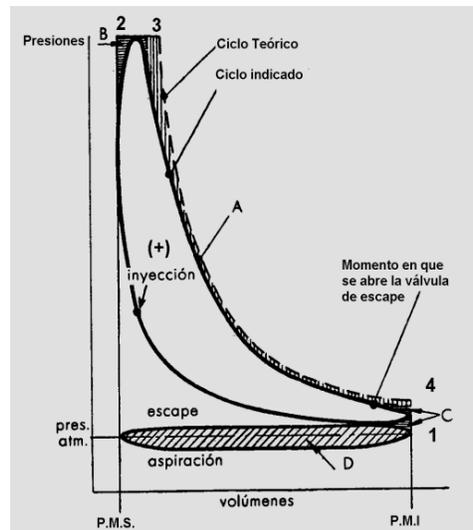


Figura 1.6 Diferencias entre ciclo termodinámico real y teórico (Draghi & Filgueira, 2015).

- Pérdidas de calor (A): Son inexistentes en un ciclo ideal; sin embargo, en un ciclo real, juegan un papel importante. Esto se debe a que el cilindro se enfría para garantizar el buen funcionamiento del pistón y, además, gran parte del calor del fluido se transfiere a las paredes del cilindro, lo que resulta en una pérdida de trabajo en comparación con un ciclo ideal.
- Calor específico del fluido: Aumenta con el incremento de la temperatura. En otras palabras, el calor específico del gas real a presión constante (C_p) y volumen constante (C_v) no es constante, sino que aumenta con el aumento de la temperatura. Como consecuencia de esto, la relación $\gamma = C_p/C_v$ disminuye. Esto tiene como resultado que las presiones y temperaturas máximas alcanzadas sean menores en comparación con un ciclo ideal.
- Tiempo de apertura de las válvulas de escape: Es otro aspecto para tener en cuenta. En un ciclo teórico, se asume que la apertura y el cierre de las válvulas son

instantáneos en el PMS o el PMI; sin embargo, en la práctica, estas acciones tardan un tiempo relativamente largo y están relacionadas con el tiempo de la carrera del pistón.

- Respecto a la combustión, en el ciclo teórico se considera que ocurre instantáneamente siguiendo el proceso de conversión a presión constante. No obstante, en el ciclo real, la combustión lleva su tiempo, por lo que no es instantánea ni se produce a presión constante. Para compensar este retraso en la combustión, se adelanta la inyección de combustible.

1.16 FUNCIONAMIENTO

Es un motor de combustión interna en donde el encendido se consigue por la alta temperatura resultante de la compresión del aire en el interior del cilindro, funciona encendiendo la mezcla de aire y combustible sin chispa; la temperatura que inicia la ignición procede del aumento de presión que se produce en la segunda fase del motor, durante la compresión, el Diésel se inyecta en la parte superior de la cámara de compresión a alta presión para ser atomizado y mezclado con el aire a alta temperatura y presión. Como resultado, el gas de la cámara se expande, lo que impulsa el pistón hacia abajo; el vástago del pistón transmite este movimiento al cigüeñal, que gira, transformando el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación (Consuegra Pacheco, 2007).

1.17 GESTIÓN ELECTRÓNICA

En los motores modernos es cada vez más habitual que un ordenador conocido como ECU, recoja los datos de los sensores y actúe directamente sobre los actuadores del motor para controlar todo el sistema sin la intervención del conductor, a continuación, se presentan los sensores y actuadores utilizados en esta modalidad.

1.17.1 UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO (ECU)

La unidad de control es la responsable de recoger y procesar toda la información necesaria para calcular las variables del motor, para así realizar el accionamiento correcto de los componentes del motor para su función final, de igual forma debe estar protegida de influencias externas como el ruido, la humedad, las fluctuaciones de temperatura o las subidas de tensión para evitar daños por averías (Castro Zambrano, 2021).



Figura 1.7 Unidad de control electrónica

(Pedro José, 2012).

1.17.2 SENSOR DEL PEDAL DEL ACELERADOR

La función principal de la APP es medir la posición del pedal del acelerador, dicho sensor consta de dos potenciómetros que modifican la tensión de entrada del módulo de control en función de la posición del ángulo del eje del sensor, para identificar la posición del pedal, este sensor convierte el movimiento en una señal electrónica, que activa la apertura y el cierre del cuerpo de aceleración (Erazo & Sisalema, 2019).

Tabla 1.3 Tabla de valores de voltaje del APP

Condición	Potenciómetro 1	Potenciómetro 2
Ralentí	0.6 – 0.9 V	0.25 – 0.6 V
Carga	3.6 – 4.6 V	1.6 -2.5 V

(Erazo & Sisalema, 2019)

- **Distribución de pines**

En la siguiente grafica se encuentra la distribución de pines que conforman el sensor de posición del pedal del acelerador APP:

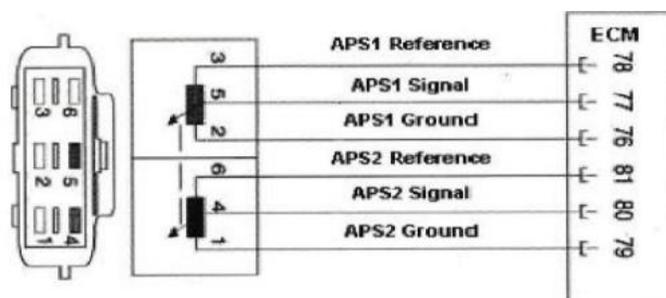


Figura 1.8 Distribución de pines del sensor APP

(Erazo & Sisalema, 2019).

1.17.3 SENSOR DE POSICIÓN DEL CIGÜEÑAL CKP.

Diseñado como un componente para indicar la posición correcta del cigüeñal, este sensor funciona juntamente con el volante de inercia y coordinado con el sensor de velocidad, al mismo tiempo el volante de inercia carece de dos dientes que son detectados por el campo magnético del sensor y generan pulsos que se transmiten a la unidad de control, los dientes que faltan determinan la posición del cigüeñal, como resultado se determina el momento de inyección (Castro Zambrano, 2021).

Tabla 1.4 Pines del sensor CKP

Número de terminales	Cable	Características
Terminal 1	Negro/Amarillo	Masa
Terminal 2	Azul	Señal
Terminal 3	Verde	Alimentación

(Erazo & Sisalema, 2019)



Figura 1.9 Sensor CKP

(Reyes Cualchi, 2018a).

1.17.4 SENSOR DE FLUJO DE MASA DE AIRE (MAF) + SENSOR DE TEMPERATURA DE AIRE (IAT)

La tarea principal del sensor de flujo de masa es medir el flujo y la temperatura del aire que entra en el motor y ayuda a determinar la cantidad de combustible necesaria para la combustión, su material es de tipo plomo con un elemento resistivo sensible a la temperatura donde la sección de medición está situada en el centro del conducto (Erazo & Sisalema, 2019).

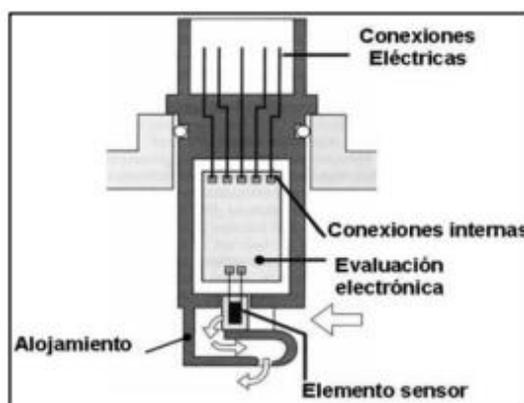


Figura 1.10 Partes del sensor MAF +IAT

(Erazo & Sisalema, 2019).

- **Sensor MAF+IAT**

Tabla 1.5 Pines del sensor MAF

	En contacto	Ralentí	Plena carga
Alimentación	12 V	Pin 1	12 V
Señal MAF	5 V	Pin 2	4 V a 4.5 V
Señal IAT	2.5 V a 4 V	Temperatura	Ambiente

(Erazo & Sisalema, 2019)

1.17.5 SENSOR DE TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE ECT

Es el encargado de monitorear la temperatura del líquido refrigerante del motor, su funcionamiento se basa en la composición interna del sensor donde se encuentra un resistor que

depende de la temperatura con un coeficiente de temperatura negativo (NTC), la caída de voltaje en el resistor es enviado a la computadora y mediante un convertidor análogo digital el computador puede interpretar la temperatura registrada en el motor (Reyes Cualchi, 2018a).



Figura 1.11 Sensor ECT

(Reyes Cualchi, 2018a)

1.17.6 SENSOR CMP

El sensor del árbol de levas utiliza ondas electromagnéticas para determinar la posición del árbol de levas, el árbol de levas controla las válvulas de admisión y escape del motor y gira a la mitad de la velocidad del cigüeñal, así mismo, cuando el pistón se mueve en la dirección del PMS, la posición del árbol de levas determina si está en la fase de compresión o de escape (Erazo & Sisalema, 2019)



Figura 1.12 Sensor CMP

(Erazo & Sisalema, 2019)

- **Voltajes del sensor CMP**

Tabla 1.6 Pines de sensor CMP

Medición en	Voltaje
Masa	0.01 V
Señal	0 V a 0.5 V
Alimentación	12 V

(Erazo & Sisalema, 2019)

1.18 SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON RAIL (CRDI)

De acuerdo con (Madaan et al., 2021) el Common Rail, un sistema de inyección electrónica directa, es un sistema avanzado porque modifica los parámetros de inyección para que la cantidad de combustible inyectado varíe en función de la presión y el caudal de combustible, lo que contribuye a mejorar la combustión reduciendo las emisiones contaminantes y el consumo, así como a aumentar la potencia y a reducir el ruido y las vibraciones, en comparación con los motores Diésel convencionales.

Este sistema CRDi inyecta el combustible en el cilindro cerca del punto muerto superior (PMS), rociando el combustible a alta velocidad y la principal ventaja de este sistema es la capacidad de variar la presión y la sincronización de la inyección, funcionando a presiones de inyección de hasta 2.500 bares para una dosificación precisa del combustible, además de la pre y post inyección para garantizar una combustión eficiente (Bosch GmbH, 2022).

1.18.1 COMPONENTES DEL SISTEMA CRDI

Los componentes del sistema CRDi se subdividen en dos partes, el circuito de alta presión y el circuito de baja presión; cada grupo se indica a continuación.

a) Circuito de baja presión

- Depósito de combustible con filtro previo.
- Bomba de baja presión.
- Filtro de combustible.

- Tuberías de combustible de baja presión.
- b) Circuito de alta presión**
- Bomba de alta presión con válvula reguladora de presión.
- Tuberías de combustible de alta presión.
- Rail como acumulador de alta presión con sensor de presión del Rail,
- válvula limitadora de la presión y limitador de flujo.
- Inyectores.
- Tuberías de retorno de combustible.

La **Figura 1.13** muestra el diagrama de un sistema CRDi, podemos observar los componentes anteriormente mencionados y más adelante se describe el funcionamiento de cada uno de ellos en detalle.

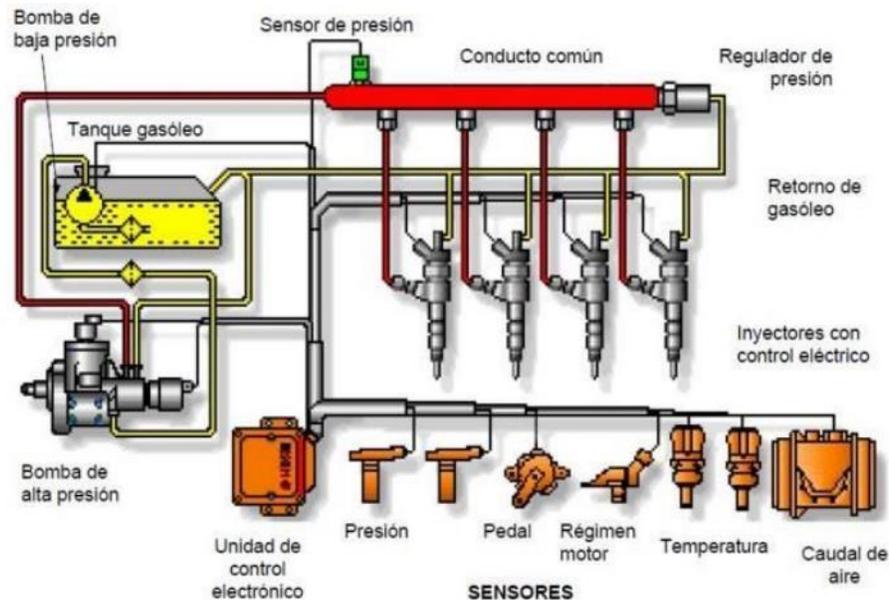


Figura 1.13 Componentes del sistema CRDi

(CADENA RAMÍREZ, 2022).

1.18.1.1 Bomba de alta presión

La función de esta bomba es suministrar la cantidad necesaria de combustible al common rail, por lo que se considera el elemento más importante del sistema de combustible, existiendo

actualmente bombas con presiones superiores a los 1.500 bar, este componente está situado entre las zonas de alta y baja presión y es accionado por un engranaje o correa conectada directamente al motor y no requiere lubricación ya que el propio combustible se encarga de esta tarea, la bomba de alta presión consiste en un pistón radial que comprime el combustible para entregarlo al rail de combustible (S. J. E. Quintana & Flores Basantes, 2022).

1.18.1.2 Sensor de presión del riel de combustible FRP

El sensor de presión del raíl es piezoeléctrico y es el componente que determina la presión del combustible en el sistema de raíl común, la señal del sensor permite a la ECU interpretar y calcular el momento y la cantidad de inyección de combustible y funciona como retroalimentación para controlar la presión del sistema (Erazo Espinosa & Sisalema Ibarra, 2019).

Al estar conectado directamente al raíl de inyección de combustible, es susceptible a los cambios de temperatura y puede provocar fallos en la señal debido a la obstrucción de los filtros de combustible o la contaminación de este.

Su funcionamiento se debe a un cambio de tensión a través de la resistencia de la membrana deformante, cuando la presión en la cubeta alcanza los 1500 bar, la deformación de la membrana es de 1 mm, y la deformación de la membrana provoca un cambio en la resistencia eléctrica, que suministra 5 V, caso contrario, si la señal del sensor es inferior a 0,3 V o superior a 4,76 V, el sistema entra en fase de emergencia y la presión de combustible en el raíl será constante a 400 bar de presión (Cueva Bedón & Geovanny Rolando, 2016).



Figura 1.14 Sensor FRP

(Erazo Espinosa & Sisalema Ibarra, 2019).

- **Tabla de voltaje con relación a la carga del motor y presión del riel.**

Tabla 1.7 Tensión en relación con la carga del motor y la presión

Carga (RPM)	Presión (Bar)	Voltaje(V)
Contacto dado	0	0,5
Ralentí	300	1,2
300	600	2,0
Plena carga	1 300	4,3

(Erazo Espinosa & Sisalema Ibarra, 2019).

1.18.1.3 Válvula ZME

La válvula dosificadora de combustible proporcional es un dispositivo que opera como actuador para regular la presión del combustible en el riel de alta presión y se controla a través de la salida PWM (señal modulada por ancho de pulso), el dosificador se apaga con una relación de duración y ciclo del 100% (sobrealimentación), al contrario, cuando la relación y la duración del ciclo es del 0%, el dosificador está abierto (suministro máximo de combustible) (Ortiz Sanmartín, 2014).

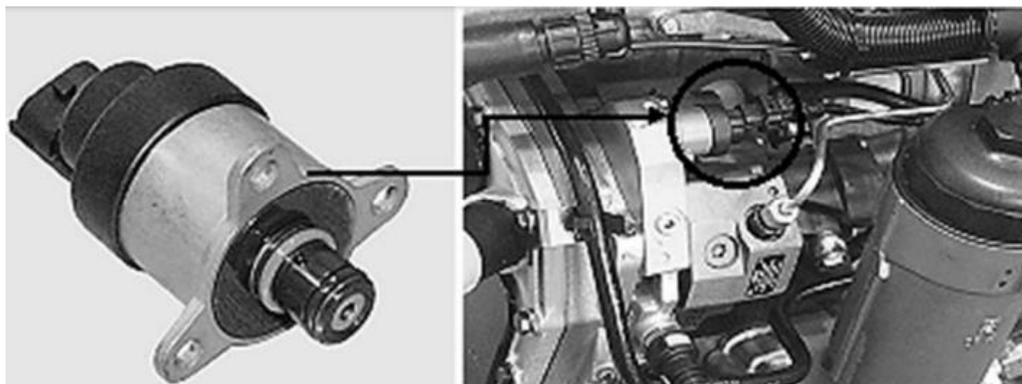


Figura 1.15 Válvula ZME

(Ortiz & Barros, 2014)

1.18.1.4 Inyector electrónico

Los inyectores son electroválvulas que se encargan de proporcionar combustible pulverizado y a alta presión dentro del cilindro de forma homogénea, son capaces de abrirse y cerrarse en tiempos

muy cortos y de forma precisa, son activados a través de pulsos electrónicos enviadas por el sistema de control (Blanco Rios & Camacho Pèrez Jonathan De Jesùs, 2018).

Los inyectores electrónicos diésel utilizan un electroimán que genera un campo magnético, debido al cual la aguja del interior del inyector tiende a abrirse, en el momento en que se obstruye el flujo de corriente, la aguja se cierra e impide el paso de combustible a la cámara de combustión, los sensores se encargan de regular el flujo de corriente al electroimán, reciben parámetros que son procesados por el sistema de control de inyección de combustible (EDC), que calcula la cantidad de corriente eléctrica enviada para mantener una combustión adecuada (Reyes Cualchi, 2018b).



Figura 1.16 Inyector electrónico de un sistema Common Rail

(Bosch GmbH, 2022).

En un sistema Common rail, los inyectores están conectados al Common rail a través de una línea de alta presión. Mediante juntas, los inyectores mantienen su sistema sellado contra fugas y caídas de presión. La figura 2.15 muestra un esquema del interior del inyector, seguido de los detalles de sus componentes.

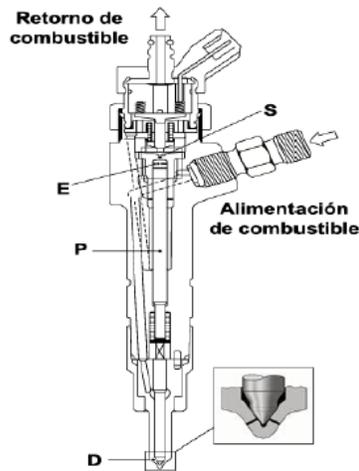


Figura 1.17 Esquema del inyector electrónico Diésel

(Guerrero Quintana, 2018).

- La tobera de orificios y el resorte presiona la aguja contra su asiento D.
- La varilla P, se desplaza juntamente con la aguja de la tobera durante el proceso de inyección.
- El orificio E, suministra combustible a un volumen de control.
- El orificio S, de salida del volumen de control es controlado por el solenoide para su apertura y cierre.

1.18.2 FUNCIONAMIENTO CRDI

El funcionamiento del sistema comienza con la bomba de baja presión, ya que es la encargada de suministrar el combustible a la bomba de alta presión, que pasa por un filtro a la bomba de alta presión. Esta bomba es la encargada de suministrar el caudal y la presión necesarios al circuito de alta presión, donde el combustible se almacena en un acumulador de alta presión y finalmente se inyecta en la cámara de combustión mediante un inyector electrónico en el momento indicado por el sistema de control. Además, cuenta con suficientes sensores y actuadores para mantener la presión adecuada para la combustión.

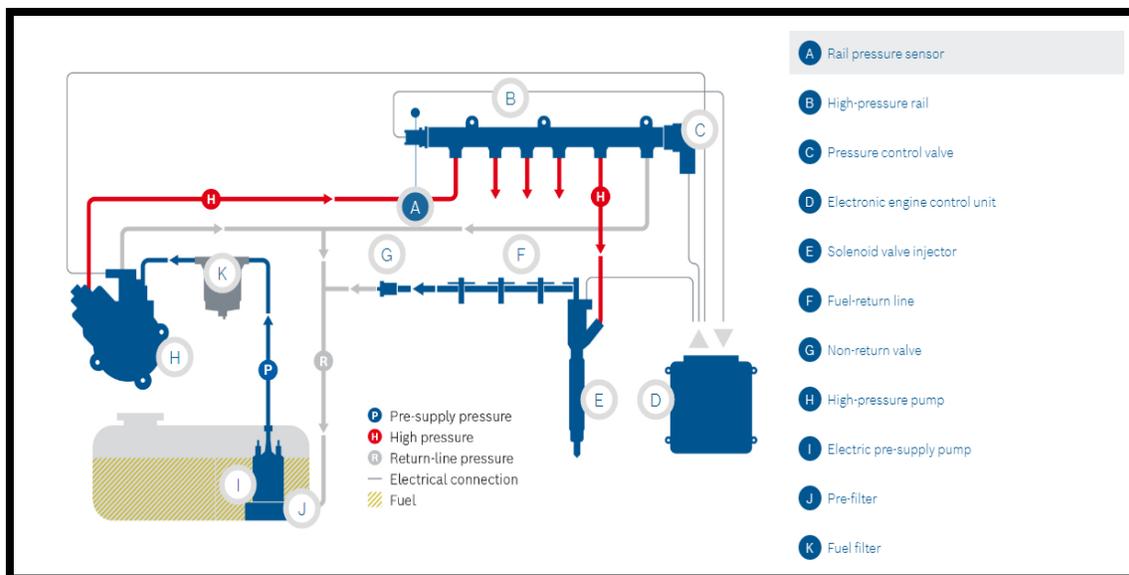


Figura 1.18 Sistema Common Rail

(Bosch GmbH, 2022).

Nota: La línea de alta presión se identifica con el color rojo, todos los componentes azules son la línea de baja presión.

Este sistema puede mantener la presión del raíl independientemente del régimen del motor, lo que permite la inyección en varias etapas y, junto con la EGR (recirculación de los gases de escape), una combustión a baja temperatura que reduce las emisiones de NOx sin sacrificar el ahorro de combustible (Biswas & Mukhopadhyay, 2021).

1.19 MANTENIMIENTO DE MÁQUINAS

El mantenimiento es una actividad destinada a mantener las máquinas en buen estado y a prolongar su vida útil, por ello es importante considerar una política de mantenimiento ya que es esencial para tener máquinas fiables. Una estrategia de mantenimiento mal definida y aplicada tendrá poco éxito y provocará inevitablemente fallas en los sistemas, causando así importantes pérdidas de producción y graves riesgos para la seguridad.

En la industria existen diferentes estrategias de mantenimiento, pero su coste y eficacia están relacionados con el tipo de mantenimiento. Por lo tanto, es importante elegir la estrategia adecuada y equilibrada para evitar fallos comunes y frecuentes de los vehículos, lo que nos ayuda a reducir el porcentaje de equipos averiados. Esto ayuda a mantener un control eficaz, reduciendo los costes de mantenimiento del vehículo (Deighton, 2016).

Dentro de los tipos de mantenimiento que existen para asegurar la vida útil del motor del automóvil, encontramos tres tipos de mantenimiento de los cuales dos son ejecutados antes de tener algún tipo de percance mayor que afecte de forma irreversible al motor mediante un tipo de diagnóstico que advierte a todo el sistema si algún mecanismo está en mal estado, y el otro mantenimiento es aquel que se lo realiza para corregir las averías del motor una vez detectada la misma. A continuación, se explica a detalle cada tipo de mantenimiento mencionado anteriormente.

1.19.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Este mantenimiento correctivo tiene lugar de forma indefinida y consiste en sustituir o reparar equipos o sistemas después de que hayan fallado. En caso de avería, la producción se ve directamente afectada, ya que el vehículo está fuera de la carretera mientras dura la reparación. Además, se necesitan piezas de repuesto y el manual del fabricante para hacer la corrección adecuada, una reparación que lleva tiempo y puede ser más costosa (Deighton, 2016). El principal inconveniente de este tipo de mantenimiento es que la producción del vehículo se interrumpe indefinidamente.

1.19.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Es una opción de mantenimiento más barata y eficaz, ampliamente aplicada en los ámbitos industriales, ya que se trata de un mantenimiento programado para determinar la salud de la máquina, que incluye pruebas periódicas y un mantenimiento activo (sustitución de una pieza) para garantizar que el sistema se mantenga en un estado normal antes de que el equipo falle. Sin embargo, es difícil determinar un periodo de mantenimiento justo antes de que falle el sistema, por

lo que el mantenimiento preventivo se adopta con información procedente de los registros de la empresa, los archivos de la máquina y los manuales del fabricante (Peng et al., 2022).

1.19.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Es una estrategia de mantenimiento basada en el estado real de funcionamiento del sistema, a través de la monitorización continua para evaluar el estado de las piezas clave, las actividades de mantenimiento se realizan cuando hay evidencia de que el sistema necesita mantenimiento, lo que nos permite anticiparnos a los fallos, permitiendo reducir los costes de mantenimiento y aumentar la eficiencia de la producción.

1.19.3.1 Tipos de mantenimiento predictivo

- **Análisis de vibraciones**

Todas las máquinas vibran en cierta medida durante su funcionamiento normal, y cuando un sistema o componente del motor falla, los niveles de vibración cambian, indicando que algo no está funcionando correctamente. Esto significa que el comportamiento dinámico del motor cambia y el comportamiento de las vibraciones también. (Sánchez Gómez, 2017).

- **Análisis de termografía**

La termografía infrarroja (TIR) es una tecnología basada en la teoría de la radiación térmica que permite al ojo humano detectar el espectro infrarrojo en longitudes de onda entre 1 mm y 750 nm; esta técnica produce una imagen térmica, llamada termograma, que permite determinar instantáneamente la distribución térmica de todos los componentes de un sistema y la temperatura en cada punto, mientras el sistema está en pleno funcionamiento (Enriquez Ugalde, 2020).

- **Análisis por ultrasonido**

Se analizan las ondas sonoras generadas por el funcionamiento de la máquina y cuando una máquina funciona mal, el sonido se convierte en vibraciones mecánicas de alta frecuencia, por encima del rango sonoro audible para el oído humano, y se propaga por el entorno físico; la corta longitud de estas ondas hace que decaigan rápidamente, lo que contribuye a la rápida detección de la falla (Sánchez Gómez, 2017).

- **Análisis de Aceite**

Se toman muestras del aceite de los vehículos y se analizan para determinar el estado y el grado de deterioro del lubricante, así como el grado de contaminación y deterioro de los componentes, para evaluar las causas de los fallos del sistema que se han producido y para predecir futuros fallos con el fin de evitarlos o prevenirlos, hay que tener en cuenta los límites de tolerancia del fabricante para determinar de forma fiable el estado del lubricante y si es necesario un cambio de aceite (Rojas et al., 2019).

1.20 FALLAS COMUNES EN MOTORES MEC

1.20.1 FALLA EN PULVERIZACIÓN DE INYECTORES

En los motores de encendido por compresión, la atomización del combustible en la cámara de combustión es muy importante, y los inyectores se encargan de controlar la atomización del combustible y la detonación, de modo que el fallo de los inyectores puede provocar el golpeteo y el mal funcionamiento del motor, ocasionando una reducción de la eficiencia, daños y ruido (Taghizadeh-Alisaraei & Mahdavian, 2019). Pueden producirse problemas como una presión insuficiente, un mal sellado y una mala atomización del combustible.

1.20.2 FALTA DE PRESIÓN DE RIEL

En el sistema de presión de combustible, específicamente en el riel, se utiliza un sensor llamado Fuel Rail Pressure (FRP), el cual es el encargado de medir la presión del riel de combustible en tiempo real y transferir esta información a la computadora mediante una señal. La señal obtenida se transporta por medio de cables hacia la ECU.

La falla que puede presentar este sensor repercute en una inestabilidad del motor generando más vibración de este, perjudicando sus componentes y acortando su vida útil.

1.20.3 FALLAS DEL SENSOR MAF

El sensor MAF, abreviatura de Mass Air Flow en inglés que se traduce como "flujo de masa de aire", desempeña un papel fundamental al medir la cantidad de aire necesaria para ingresar al motor, la computadora del vehículo requiere esta información para calcular la carga del motor basándose en el volumen de aire que entra (E. Quintana & Flores, 2022).

Las fallas más comunes que pueden tener este tipo de sensores son malas lectura de señal o interferencia debido a un corto en los cables o daño en el sensor propiamente, repercutiendo en inestabilidad en el motor y jaloneos.

CAPÍTULO II

2 MATERIALES Y METODOS

El mantenimiento preventivo se convierte en una opción, ya que diagnostica el vehículo en tiempo real y predice posibles anomalías, lo que nos permite tomar contramedidas antes de que el motor alcance un punto crítico. Es importante mencionar que existen varios tipos de mantenimiento preventivo, sin embargo, este estudio se centrará en el análisis de vibraciones. La **figura 2.1** ilustra la metodología utilizada para desarrollo de esta investigación.

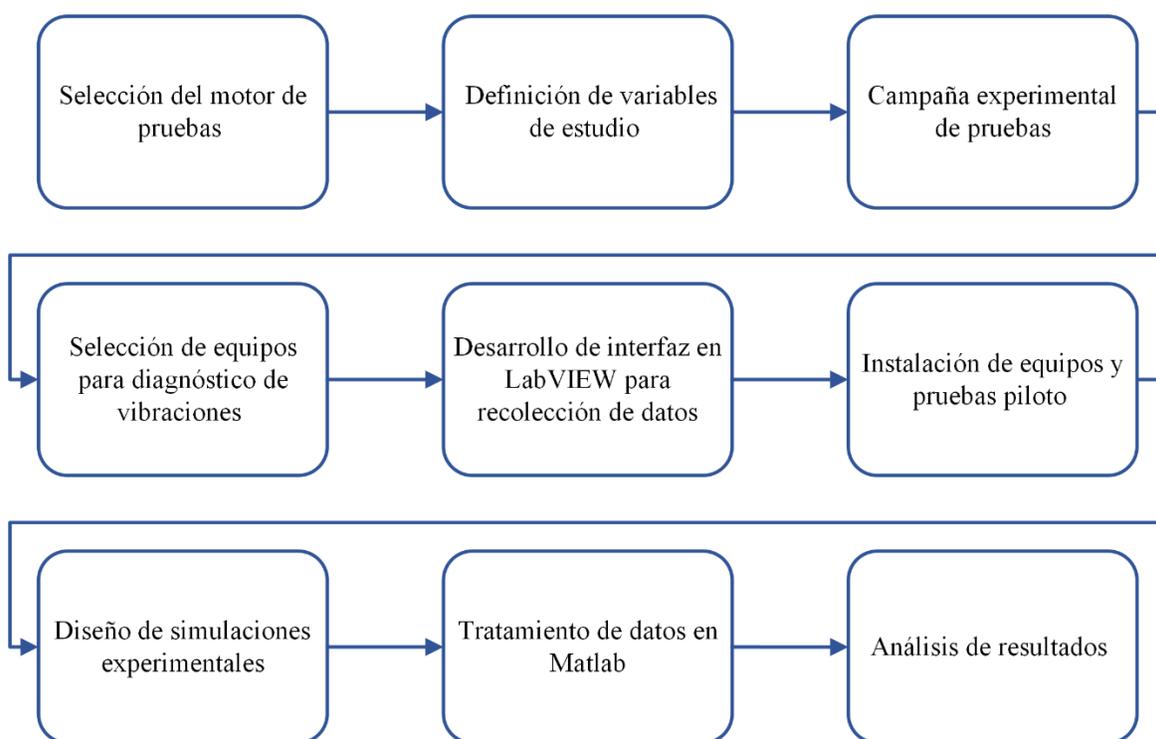


Figura 2.1 Marco metodológico del estudio.

2.1 SELECCIÓN DEL MOTOR DE PRUEBAS

2.1.1 MAZDA BT50

El motor elegido para el desarrollo de este estudio fue el de una camioneta Mazda BT50 año 2012, propiedad de la Universidad Técnica del Norte. Es importante mencionar que el motor se encuentra en un módulo de aprendizaje en óptimas condiciones, lo que lo hace apto para las

pruebas. Este es un motor diésel de 4 cilindros en línea, cuyo estado y funcionalidad corresponden a lo que se espera de un vehículo de este tipo. La **Tabla 2.1** muestra las especificaciones técnicas del motor utilizado para la prueba experimental del estudio.

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del motor

Ítem	Motor 2.5 MZR-CD
Motor	4 cilindros en línea, DOHC 16 válvulas, turbo cargado
Desplazamiento	2499cm ³
Diámetro x carrera	93x92mm
Índice de compresión	18,0: 1
Máx. energía	105 kW (143 CV) a 3500 min-1
Máx. esfuerzo de torsión	330 Nm a 1800 min-1
Estándar de emisión	EURO IV
Transmisión	Manual de 5 velocidades (S15M(X)-D)

Fuente (MAZDA TRAINING MANUAL, 2006)

2.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO

2.2.1 MONITOREO DE VIBRACIONES DEL MOTOR

Para el diagnóstico del motor se utilizó el método de análisis de vibraciones, para el que se emplearon variables como la amplitud y la frecuencia de las señales de vibración, siendo estas variables las que se obtienen de la medición de los espectros de vibración. En la **Tabla 2.2** se describen las principales variables con sus respectivas ecuaciones de cálculo, así como las unidades en las que se expresan.

Tabla 2.2 Ecuaciones y unidades de las características de la vibración mecánica

Características	Ecuación	Unidades
Frecuencia	$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{RPM}{60}$	Hertzio [Hz]
Periodo	$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$	Segundos [s]
Velocidad angular	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	RPM
Frecuencia natural	$F_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}$	Hertzio [Hz]
Donde: f = Frecuencia T = Tiempo ω = Velocidad angular F_n = Frecuencia natural K = Constante de resorte o rigidez m = Masa		

(Jara Niveló & Rodríguez Romero, 2014).

Además, existen otros tipos de variables secundarias aplicadas a las mediciones de vibraciones en este estudio, como son:

- **Amplitud pico (0-PK):** Es la distancia máxima de la onda al punto cero o de equilibrio.
- **Amplitud pico- pico (PK- PK):** es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva.

La **Figura 2.2** muestra un ejemplo gráfico de una prueba piloto de lectura de vibraciones, utilizada únicamente para ilustrar la medición de las variables secundarias explicadas anteriormente.



Figura 2.2 Características de vibraciones

(White, 2010).

2.3 Campaña experimental de pruebas

Esta sección muestra el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo del estudio, para ello se presenta en la **Figura 2.3** un diagrama esquemático de las actividades experimentales desarrollada. Posteriormente se describirán en detalle las características de los equipos y métodos utilizados para la obtención y procesamiento de los datos.

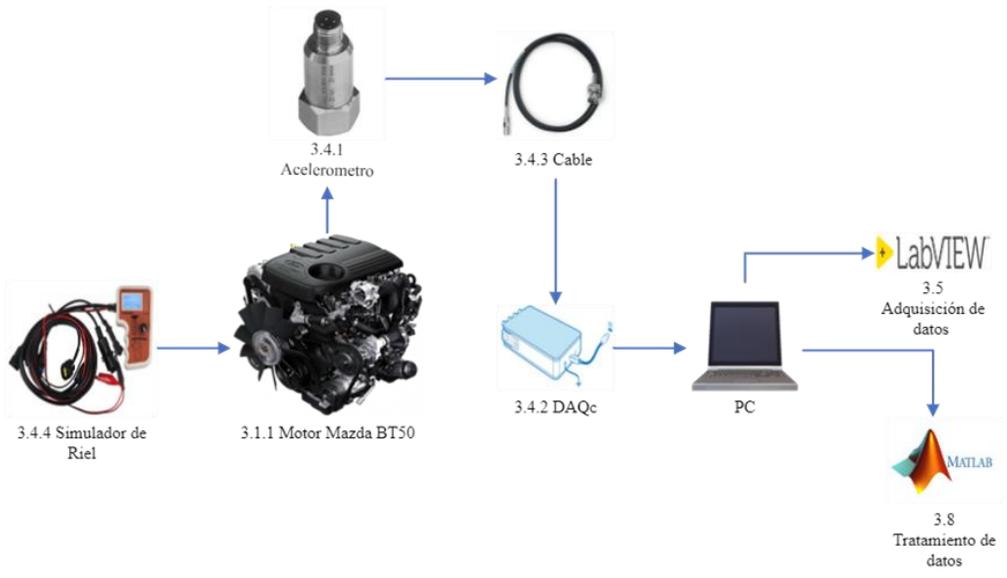


Figura 2.3 Componentes y proceso de investigación.

Para monitorear la vibración del motor, primero se deben instalar los sensores en áreas específicas del motor. A continuación, se prepara el equipo para la adquisición de vibraciones, lo que incluye el equipo de medición adecuado. Seguidamente, con el motor en marcha y ejecutando el programa desarrollado en LabVIEW, se procede a tomar los datos de vibración. Es importante señalar que los datos recogidos se analizarán posteriormente en el software MATLAB®. En el análisis de los datos se utiliza la transformada de Fourier para procesar las señales y evaluar las características obtenidas en cada prueba realizada.

Para realizar el experimento, hubo que llevar a cabo tres escenarios diferentes: el primero con el motor en condiciones óptimas, el segundo simulando un fallo en el sensor FRP realizado con un equipo especial para variar la presión del raíl, y el tercero simulando un fallo en el sensor MAF, donde se utilizó un potenciómetro para variar la señal del sensor.

Es importante mencionar que se realizaron 200 pruebas para cada situación en diferentes días para recopilar datos sobre diferentes condiciones ambientales; el análisis de los datos determinará la intensidad de las vibraciones producidas en cada situación. El equipo utilizado para llevar a cabo el experimento se detalla en el siguiente apartado, y la metodología de aplicación del experimento se explica a lo largo del documento.

2.4 SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES

2.4.1 SENSOR DE VIBRACIÓN

Para este estudio se utilizó un acelerómetro industrial de la serie ICP 603 C01 con certificación ISO-9001. Se eligió este sensor porque incorpora elementos de cristal de cuarzo, esta característica garantiza una estabilidad a largo plazo y una fluctuación mínima de la salida debido a los cambios de temperatura, tiene una excelente resolución y durabilidad en entornos ruidosos para mediciones de baja y alta frecuencia, por lo tanto, este sensor era el más adecuado para este tipo de estudio. A continuación, se muestra un esquema del sensor para definir su estructura interna.

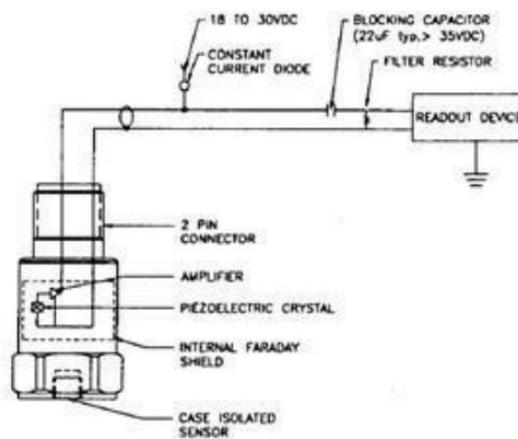


Figura 2.4 Acelerómetro piezoeléctrico

(PCB Piezotronics, 2019).

Nota: El funcionamiento de este acelerómetro es a través de dos hilos con amplificación interna, en el que el primer hilo es necesario para la alimentación y la señal del sensor, mientras que el segundo hilo es para la señal global y la realimentación.

Existen varios métodos de montaje, sin embargo, al tratarse de mediciones portátiles, se optó por el método de los imanes, ya que se trata de monitorear el motor en tiempo real y, por lo tanto, tiene altas variaciones de frecuencia y temperatura, por lo que los imanes eran los más adecuados para este estudio. La **Figura 2.5** muestra los imanes utilizados para el montaje en el motor.



Figura 2.5 Imán usado para montaje de sensor sobre el motor

2.4.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Se utilizó una placa de adquisición de datos de National Instruments para conectar las señales emitidas por el sensor de vibraciones al ordenador. En concreto, se usó la placa de la serie cDAC 9171, conocida como chasis, que se conecta al ordenador mediante USB. Esta placa, que no requiere configuración para funcionar, se alimenta a través del bus USB, por lo que no es necesaria una fuente de alimentación externa. La función principal de esta placa es convertir las señales físicas en señales eléctricas, que luego pueden interpretarse como gráficos. En la **Figura 2.6** se muestra la estructura del chasis que se utilizó en este estudio.

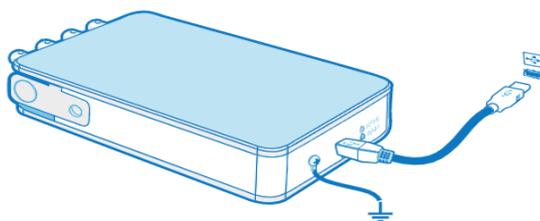


Figura 2.6 Tarjeta de adquisición de datos

(National Instruments, 2011).

2.4.3 CABLE DE ACELERÓMETRO

El acelerómetro y la tarjeta de adquisición de datos cDAC se conectan mediante un cable de tres metros con un pin BNC macho en un extremo y un pin SMB hembra en el otro. El pin macho se conecta a la tarjeta de adquisición de datos, mientras que el pin SMB hembra se conecta directamente al sensor. Es importante mencionar que la resistencia del cable debe ser de 50 ohmios según el fabricante y debe comprobarse antes de cada prueba.



Figura 2.7 Cable de sensor acelerómetro

(National Instruments, 2022).

2.4.4 EQUIPO PARA SIMULACIÓN DE PRESIÓN EN EL RIEL COMÚN.

Para conseguir configurar la presión del acumulador del Common rail, se utilizó el simulador GT-508, se trata de un equipo portátil diseñado específicamente para probar y simular la presión del combustible en un motor diésel Common rail y admite un rango de presión de 0-200 MPa, además de ser un dispositivo de autodetección, es decir, identifica automáticamente la marca y el tipo de sensor. A continuación, se muestra una imagen del dispositivo en uso.



Figura 2.8 Simulador GT-508

(Aline Electronics, 2016).

Nota: El dispositivo está equipado con dos cables de alimentación y 3 conectores diferentes para distintas bombas de alta presión, las cuales son: Bosch, Delphi y Denso.

El simulador puede medir y simular la presión del raíl de alta presión. Para la primera opción, el selector debe colocarse en la prueba de presión de combustible, que muestra la presión del riel en funcionamiento en tiempo real. Para la segunda opción, el selector debe colocarse en la marca de la bomba de alta presión utilizada por el vehículo que simula la presión, lo que significa que podemos ajustar la presión utilizando la perilla en el dispositivo.

2.4.5 POTENCIÓMETRO

Un potenciómetro es un componente que cambia la resistencia de un circuito para controlar la intensidad de la corriente. Consta de tres pines: el pin central tiene una resistencia variable y ambos extremos están conectados a una resistencia fija y éstas se conectan a una alimentación para encender el potenciómetro. Los contactos móviles del interior del potenciómetro permiten variar

esta resistencia. Este ajuste permite modificar la tensión de salida. Los potenciómetros son muy utilizados en circuitos que tienen corrientes bajas. La **Figura 2.9** muestra la figura y diagrama de un potenciómetro de 3 pines.

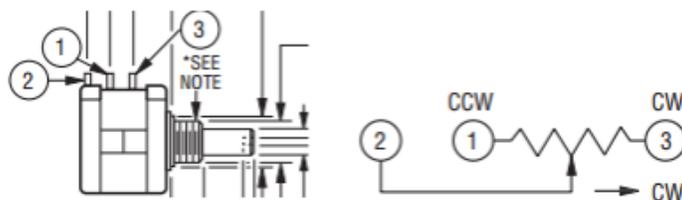


Figura 2.9 Diagrama de potenciómetro

(Hernández Pérez, 2015).

Nota: Los pines 1 y 2 están conectados a la resistencia fija los cuales se conectan a una alimentación, el pin 2 es el pin de salida de voltaje modificado.

2.5 DESARROLLO DE INTERFAZ EN LABVIEW PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

El proceso de recolección de datos se detalla a continuación. En primer lugar, se instala los sensores en el motor y se conecta al chasis cDAQ utilizando el cable homologado mencionado anteriormente. A continuación, se conecta la tarjeta al ordenador y se ejecuta el programa desarrollado en LabVIEW para comenzar a registrar las medidas en tiempo real. Estos datos se guardan en un archivo xlsx para su posterior procesamiento. La **Figura 2.10** muestra el proceso para la adquisición de datos de vibraciones.



Figura 2.10 Proceso metodológico para la adquisición de datos a partir de las vibraciones

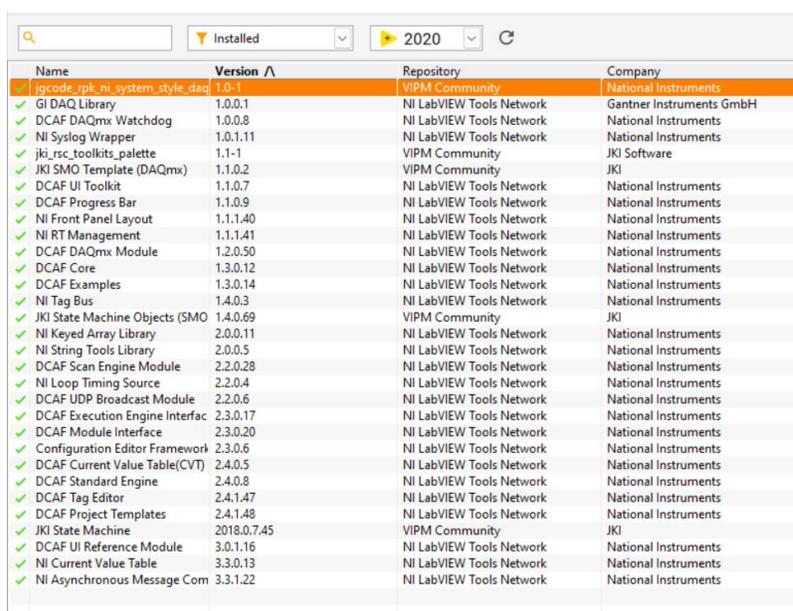
(Agüero, 2017).

2.5.1 HERRAMIENTA DE LABVIEW

Para este estudio se instaló LabVIEW 2020 desde la página oficial de National Instruments. Además, LabVIEW tiene una variedad de herramientas, pero en este caso se usó la herramienta específica de vibración llamada Sound and Vibration Toolkit, esta permite conectar el software con el hardware mencionado, esta herramienta también se puede descargar desde la página oficial de National Instruments.

2.5.2 DRIVERS

Para asegurar el correcto reconocimiento de los equipos, es imprescindible descargar e instalar una serie de drivers que el propio LabVIEW proporciona, y que se pueden descargar de NI, estos drivers se muestran en la siguiente **Figura 2.11**



Name	Version	Repository	Company
igcode_rpk_ni_system_style_daq	1.0-1	VIPM Community	National Instruments
GI DAQ Library	1.0.0.1	NI LabVIEW Tools Network	Gantner Instruments GmbH
DCAF DAQmx Watchdog	1.0.0.8	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Syslog Wrapper	1.0.1.11	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
jki_rsc_toolkits_palette	1.1-1	VIPM Community	JKI Software
JKI SMO Template (DAQmx)	1.1.0.2	VIPM Community	JKI
DCAF UI Toolkit	1.1.0.7	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Progress Bar	1.1.0.9	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Front Panel Layout	1.1.1.40	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI RT Management	1.1.1.41	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF DAQmx Module	1.2.0.50	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Core	1.3.0.12	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Examples	1.3.0.14	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Tag Bus	1.4.0.3	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
JKI State Machine Objects (SMO)	1.4.0.69	VIPM Community	JKI
NI Keyed Array Library	2.0.0.11	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI String Tools Library	2.0.0.5	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Scan Engine Module	2.2.0.28	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Loop Timing Source	2.2.0.4	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF UDP Broadcast Module	2.2.0.6	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Execution Engine Interfac	2.3.0.17	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Module Interface	2.3.0.20	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
Configuration Editor Framework	2.3.0.6	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Current Value Table(CVT)	2.4.0.5	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Standard Engine	2.4.0.8	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Tag Editor	2.4.1.47	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
DCAF Project Templates	2.4.1.48	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
JKI State Machine	2018.0.7.45	VIPM Community	JKI
DCAF UI Reference Module	3.0.1.16	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Current Value Table	3.3.0.13	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments
NI Asynchronous Message Com	3.3.1.22	NI LabVIEW Tools Network	National Instruments

Figura 2.11 Drivers instalados en el Software LabVIEW.

2.5.3 PROGRAMA EN LABVIEW

Investigaciones previas de análisis de vibraciones en la Universidad Técnica del Norte proporcionaron el programa LabVIEW que se utilizó en esta investigación. La **Figura 2.12** muestra la programación realizada en el diagrama de bloques creado en LabVIEW, y el panel frontal del programa se muestra en la **Figura 2.13**, también detalla el funcionamiento del programa y sus componentes.

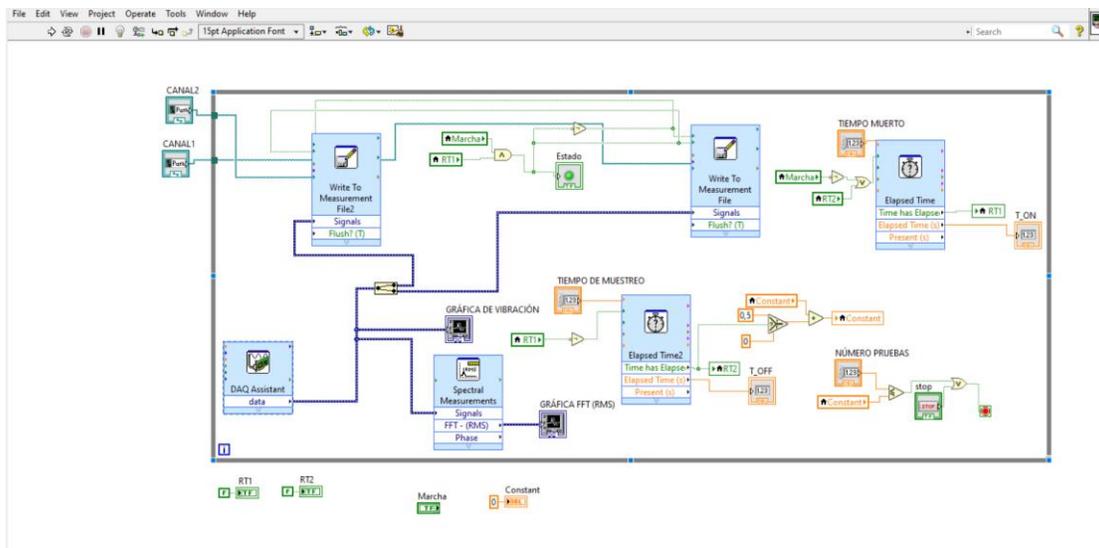


Figura 2.12 Block Diagram del programa LabVIEW

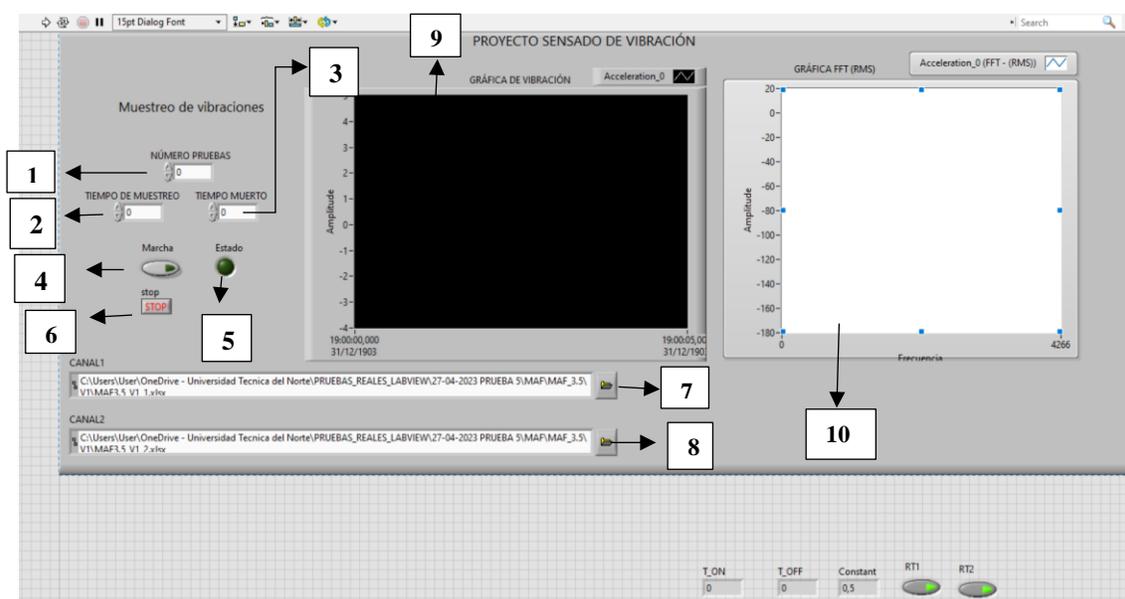


Figura 2.13 Panel frontal del programa de muestreo de vibraciones

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

2.6 INSTALACIÓN DE EQUIPOS Y PRUEBAS PILOTO

2.6.1 UBICACIÓN DE ACELERÓMETROS

Los dos sensores se instalaron de acuerdo con la norma ISO-5348, un sensor se colocó horizontalmente en el centro superior del bloque motor y el segundo sensor se colocó en la tapa de la válvula en dirección a la culata. En cada prueba se comprobó que los sensores y los cables estuvieran correctamente instalados, es decir, que no se aflojaran por las vibraciones generadas por el motor; las **Figuras 2.14 y 2.15** muestran los sensores denominados 0 y 1, respectivamente.



Figura 2.14 Sensor 0 - horizontal instalado



Figura 2.15 Sensor 1-vertical instalado

2.7 INSTALACIÓN DE CDAQ

La herramienta NI DAQmx de LabVIEW debe reconocer automáticamente el dispositivo después de conectar la tarjeta cDAQ al ordenador. Esto nos permite acceder a los datos del dispositivo conectado y comprobar que todo funciona correctamente. Como se muestra en la siguiente **Figura 2.16**, la tarjeta en este ejemplo fue reconocida como cDAQ1.

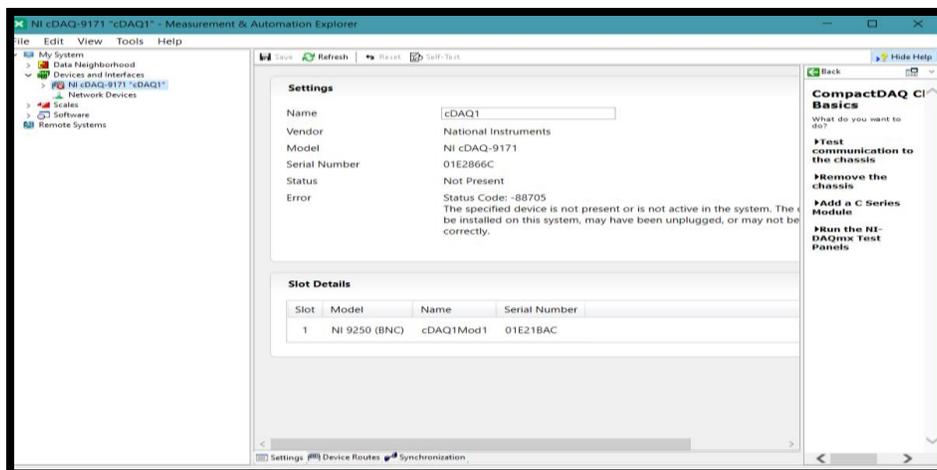


Figura 2.16 Información de tarjeta cDAQ1 a través de NI MAX

2.7.1 PRUEBAS PILOTO

Para demostrar que el equipo y el software instalados funcionaban correctamente, se realizaron 2 pruebas piloto, que consistieron en adquirir datos con el motor frío, cuando las vibraciones eran elevadas, y después tomar medidas con el motor a temperatura de trabajo, es decir, cuando las vibraciones eran menores, a continuación, se muestran los pasos a seguir para la obtención de datos de las vibraciones:

Paso 1: Instalar los acelerómetros en los puntos ya mencionados.

Paso 2: Conectar los acelerómetros en los puertos 0 y 1 de la DAQ con el cable BNC/SMW

Paso 3: Conectar el DAQ al pc a través del cable USB y ejecutar LabVIEW para verificar que el software reconoce los equipos conectados.

Paso 4: Ejecutar el programa desarrollado en LabVIEW y configurar la carpeta donde se guardarán los datos que se obtendrán en ese momento.

Paso 5: Arrancar el motor y ejecutar el programa para visualizar el gráfico de las oscilaciones de las vibraciones en tiempo real.

A partir del archivo XLSX obtenido de LabVIEW, se transfiere a Matlab para observar gráficamente los datos obtenidos cuando el motor está frío y cuando el motor ya ha alcanzado la

temperatura de funcionamiento; las **Figuras 2.17 y 2.18** muestran las señales de cuando el motor está frío y a temperatura de funcionamiento respectivamente, cabe recalcar que estas figuras son únicamente de material de demostración, para poder comprobar el buen funcionamiento del sensor y comprender la representación de la gráfica.

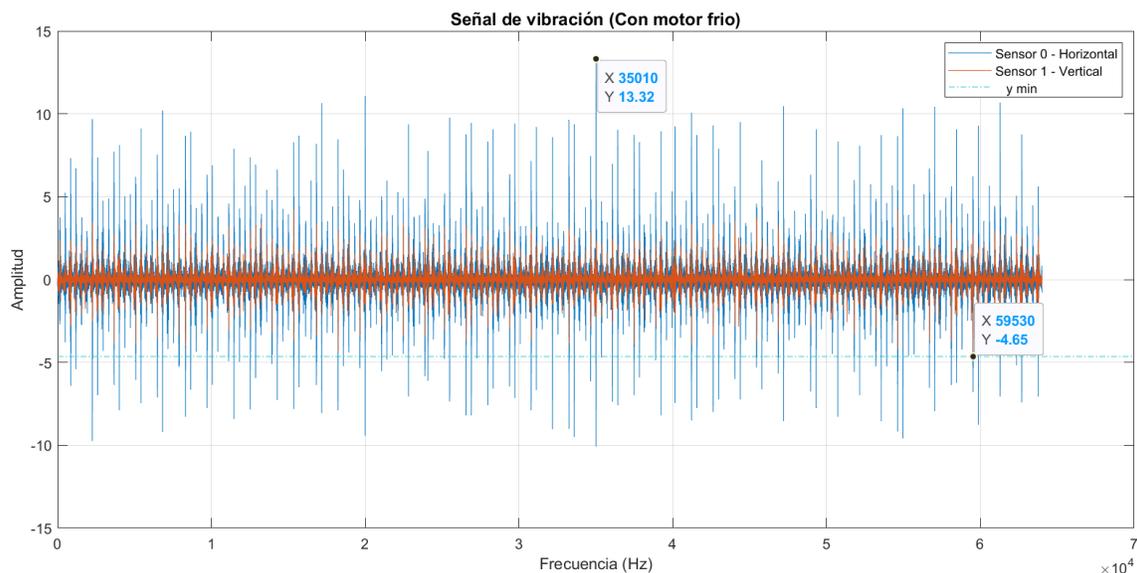


Figura 2.17 Señal de vibración con motor frío

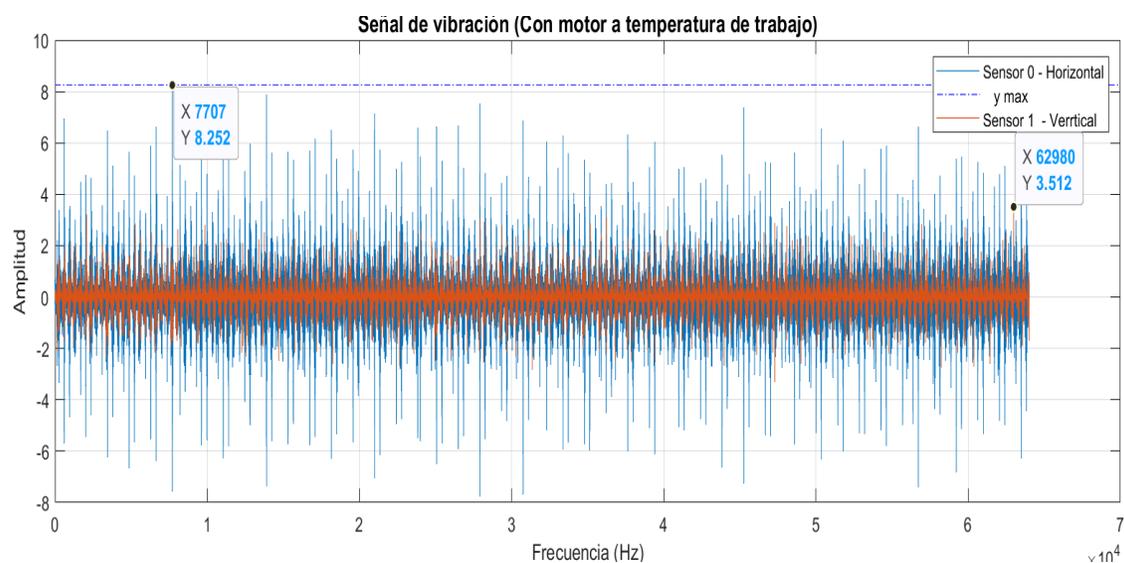


Figura 2.18 Señal de vibración con motor a temperatura de trabajo

Como se puede observar en estas dos imágenes, el rango de amplitudes es mucho mayor cuando el motor está frío y estas amplitudes disminuyen cuando el motor alcanza la temperatura de funcionamiento, por lo que en la **Tabla 2.3** se muestran los puntos más altos del sensor 0 y 1 de cada circunstancia. Cabe señalar que se realizaron un total de 60 pruebas para cada caso y se eligió la prueba número 30 como representación gráfica de los dos sensores correspondientes a cada caso.

Tabla 2.3 Valores obtenidos a partir de pruebas piloto de adquisición de datos.

Señal de vibración		
		Amplitud
Motor Frío	Sensor 0	13.32
	Sensor 1	4.65
Motor a temperatura de trabajo	Sensor 0	8.52
	Sensor 1	3.15

A partir de esta prueba piloto se demostró que el equipo para el diagnóstico de vibraciones y los softwares funcionan correctamente, por lo que en el siguiente apartado se muestran los experimentos que se llevaron a cabo para el desarrollo de esta investigación.

2.8 DISEÑO DE SIMULACIONES EXPERIMENTALES

En esta sección se describen los métodos utilizados para simular las averías de varios componentes del motor utilizando los equipos mencionados anteriormente con el fin de alterar la vibración del motor. Es importante señalar que el estudio se realizó con dos acelerómetros, uno de ellos instalado horizontalmente en la parte superior central del bloque motor y el otro sensor en la tapa de válvulas en sentido vertical, los cuales se instalaron de acuerdo con la norma ISO-5348 para minimizar la contaminación y evitar lecturas erróneas durante la toma de datos.

2.8.1 VARIACIÓN DE PRESIÓN DEL RIEL DE COMBUSTIBLE

Para ajustar la presión en el Common rail se utilizó el simulador GT-508. En este caso, el vehículo está equipado con una bomba de alta presión Bosch, por lo que utilizamos un conector específico Bosch de la unidad. Este conector se conecta directamente a la toma del sensor FRP y el otro extremo se conecta al propio sensor FRP. La instalación y el funcionamiento del equipo en el motor pueden verse en la **Figura 2.19**.



Figura 2.19 Simulador GT-508 instalado

En primer lugar, puede utilizar el dispositivo para ver en tiempo real el rango de presión con el que está trabajando. Para ajustar la presión real, es necesario elegir la marca que corresponde a la bomba, en este caso Bosch.

Las pruebas se centraron únicamente en valores superiores al ralentí para no poner en peligro el estado del motor, ya que éste no está diseñado para funcionar a presiones inferiores al ralentí. El rango funcional utilizado para simular el fallo del sensor FRP se muestra en la **Tabla 2.4**. También es importante mencionar que durante la simulación la unidad no puede mantener el valor seleccionado debido a la desestabilización del funcionamiento del motor, esto tiene un margen de ± 3 .

Tabla 2.4 Valores del sensor FRP simulados con el equipo GT-508

Valores del sensor FRP	
Ralentí	38.70 MPa
Sobre el valor de ralentí	± 40.70 MPa
	± 55.70 MPa
Debajo del valor de ralentí	36.70 MPa

Nota: Dado que el motor experimenta vibraciones excesivas y fuertes golpes que podrían dañar su estado, se optó por realizar una única prueba y operar sólo a 2 MPa por debajo del ralentí durante un breve periodo de tiempo para valores por debajo del ralentí.

2.8.2 SIMULACIÓN DE FALLA EN SENSOR MAF

Para regular la señal de este sensor se utilizó un potenciómetro. En el caso de este vehículo, se trata de un sensor MAF de 5 hilos porque incorpora el sensor IAT. En consecuencia, se identificó cada cable y se realizaron conexiones puente en todos ellos excepto en el cable de señal. Este último se conectó al cable de señal del potenciómetro para ajustar la tensión a los valores deseados. La **Figura 2.20**, muestra las conexiones realizadas para llevar a cabo esta simulación.



Figura 2.20 Conexión para variación de señal del MAF

Nota: El potenciómetro se alimenta directamente de la batería y la señal se envía al contacto correspondiente de la ECU.

Previamente, se investigó el rango de funcionamiento de este sensor, es decir, desde los rpm al ralentí hasta la aceleración máxima. Dado que los valores obtenidos oscilaban entre 2,0 y 3,7 V, se determinó que los rpm al ralentí se mantendrían a 2 V y la aceleración máxima se alcanzaría a 3,7 V. Los valores específicos utilizados en las pruebas se muestran en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5 Valores usados para simulación de falla en el sensor MAF

Simulación de falla sensor MAF	
Simulación 1	2.5 V
Simulación 2	3.5 V

2.9 TRATAMIENTO DE DATOS EN MATLAB

El software LabVIEW se configuro para generar archivos en formato xlsx, que es un formato utilizado para el almacenamiento de datos tabulares, Por otro lado, Matlab es un entorno de programación y análisis numérico ampliamente utilizado que cuenta con una amplia gama de herramientas para importar y procesar datos, esto significa que los datos contenidos en los archivos xlsx generados por LabVIEW pueden ser utilizados como entrada en Matlab, permitiendo que se ejecuten operaciones y cálculos sobre ellos.

2.9.1 IMPORTACIÓN DE DATOS

El software LabVIEW crea archivos xlsx que son totalmente compatibles con Matlab®. Por lo tanto, el código en Matlab ha sido diseñado específicamente para importar directamente archivos xlsx. De este modo, se puede acceder a los datos contenidos en el archivo y utilizarlos para realizar cálculos y trazar gráficos.

2.9.2 FILTRACIÓN DE DATOS

Se disponía de un total de 200 muestras de cada ensayo realizado. Sin embargo, para realizar un análisis de datos más eficiente, se decidió seleccionar aleatoriamente sólo 30 muestras de cada ensayo. Es esencial señalar que las 50 primeras y 50 últimas muestras de cada ensayo se excluyeron del proceso de selección aleatoria.

Este enfoque se basa en una selección de 30 pruebas de cada ensayo, para garantizar un análisis de datos más centrado y representativo y tener una interpretación significativa y homogénea de los datos. Al excluir los puntos inicial y final de cada ensayo, se puede reducir la influencia potencial de las condiciones iniciales y finales que pueden diferir de las condiciones estables durante el ensayo, lo que significa que este enfoque proporciona resultados fiables y precisos para el análisis realizado.

2.9.3 APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

El programa utilizado en este estudio se basó en investigaciones anteriores realizadas por la Universidad del Norte en el campo del análisis de vibraciones. Cabe señalar que este programa se diseñó específicamente para utilizar la transformada rápida de Fourier mostrada en la **Ecuación 1.4**, una técnica clave en el análisis del sonido y las vibraciones. Por consiguiente, se ha adaptado y utilizado en el contexto de esta investigación.

```

3      clear all
4      filename_1='55.70_H0_130.xlsx'; %Sensor H0
5      filename_2='55.70_H0_130.xlsx'; %Sensor H0
6
7      Fs_1=7000; % frecuencia de muestreo
8      Fs_2=7000; % frecuencia de muestreo
9
10     data_1 = xlsread(filename_1);
11     data_1 = data_1(1:56000);
12     n1=length(data_1);
13
14     [f_1, P_1] = Hcalc_PSD(data_1,Fs_1);
15
16     data_2 = xlsread(filename_2);
17     data_2 = data_2(1:56000);
18
19     n2=length(data_2)
20
21     [f_2, P_2] = Hcalc_PSD(data_2,Fs_2);
22
23     figure(1)
24     subplot(2,1,1)
25     plot(f_1(2:820),P_1(2:820),'b')
26     xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
27     ylabel('Amplitud','FontSize',11,'Fontname','Arial');
28     title('Señal de sensor Horizontal','FontSize',12,'Fontname','Arial');
29     grid on
30     subplot(2,1,2)
31     plot(f_2(2:820),P_2(2:820),'r')
32     xlabel('Frecuencia (Hz)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
33     ylabel('Amplitud','FontSize',11,'Fontname','Arial');
34     title('Señal de sensor Horizontal ','FontSize',12,'Fontname','Arial');
35     grid on

```

Figura 2.21 Código en Matlab® para importación de archivos.xlsx e ilustración de datos

```

Hcalc_PSD (1).m  Adrian_MatLab.m  +
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

```

Figura 2.22 Código en Matlab® para aplicación de transformada de Fourier

2.9.4 PRUEBA PILOTO

Se eligieron dos ejemplos para garantizar la precisión del tratamiento de los datos. La primera muestra corresponde al motor funcionando en condiciones óptimas, mientras que la segunda es del motor funcionando a 55,7 MPa de presión en el raíl de inyección común. La **Figura 2.23** representa el gráfico de cada muestra y con él se puede evidenciar el comportamiento del motor en cada prueba.

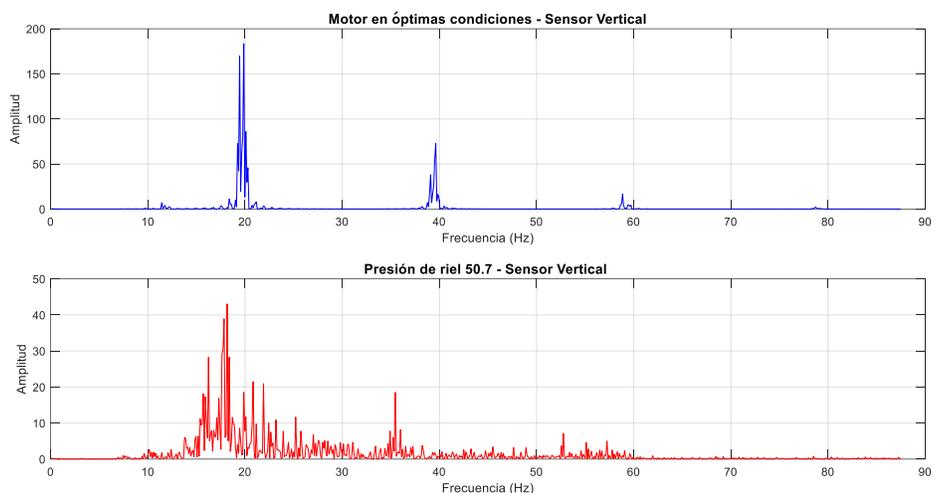


Figura 2.23 Comparación de 2 señales

Comparando los resultados de las dos demostraciones, se llevó a cabo un análisis detallado para evaluar la calidad y la precisión del procesamiento de los datos. Esta comparación determinó que los datos procesados reflejaban con precisión los cambios y el comportamiento característico del motor en diferentes condiciones, por tanto, permitieron confirmar la exactitud del tratamiento de los datos y garantizar la fiabilidad de los resultados del estudio.

2.9.5 RECOPIACIÓN DE DATOS

Para la recopilación de datos se utilizó principalmente Excel. En esta herramienta se registraron los armónicos más prominentes generados en los gráficos de Matlab tras aplicar la transformada de Fourier, es decir, los de mayor amplitud y la frecuencia cuando se generó el armónico. A continuación, se muestran ejemplos de la hoja de cálculo utilizada para tabular los datos; este fue el método de tabulación y se realizó para cada prueba y simulación.

Tabla 2.6 Ejemplo de recopilación de amplitudes

Prueba 1	Amplitud				
Muestra	Armónico	1	2	3	4
107	Ensayo óptimas condiciones	5,909	257,6	67,94	10,97
109		5,665	241,6	64,56	14,21
112		4,983	213,3	166,4	20,21
114		4,927	291,1	96,27	13,74
121		6,394	213,8	79,94	9,419
122		5,114	231,7	126	23,92
124		3,617	253,4	61,13	22,45
125		5,673	270,9	96,69	18,53
	Promedio	5,29	246,68	94,87	16,68

Tabla 2.71 Ejemplo de recopilación de frecuencias

Prueba 1	Frecuencia				
Muestra	Armónico	1	2	3	4
107	Ensayo óptimas condiciones	12,07	19,87	39,73	58,96
109		11,96	19,76	39,84	59,17
112		11,86	19,55	39,52	59,17
114		11,32	19,65	39,41	59,17
121		11,86	20,08	39,31	58,96
122		12,07	19,97	39,52	59,28
124		11,86	19,97	39,09	59,28
125		11,86	19,65	39,63	58,75
	Promedio	11,86	19,81	39,51	59,09

Al finalizar la recopilación de datos de las frecuencias y armónicos de cada simulación de falla, se calculan los promedios de cada una de ellas y estos promedios se presentan en una sola gráfica que muestra el promedio de las cinco pruebas realizadas, estas se presentan en el siguiente capítulo para su análisis y determinación del nivel de impacto en el desempeño del motor.

CAPITULO III

3 ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis de datos se centró en analizar los armónicos y las frecuencias producidas durante cada prueba, lo que permitió determinar el comportamiento del motor en cada simulación realizada. Es importante mencionar que este análisis se realizó de manera individual para cada sensor, tanto vertical como horizontal, para aumentar la precisión de la evaluación, es decir, para obtener una visión más precisa y detallada del motor en diferentes direcciones, de modo que fuera posible identificar cualquier variación o patrón.

El método consiste en graficar los resultados de las medias de los 5 ensayos de una misma simulación, es decir, los datos de amplitud y frecuencia. Este método facilita la recogida de datos de cada sensor y permite identificar posibles anomalías entre simulaciones. Además, se pueden encontrar tendencias y patrones que indican la coherencia del comportamiento motor observado en cada prueba.

Es importante señalar que las pruebas se realizaron en el mismo lugar, es decir, la altitud fue siempre de 2457 metros sobre el nivel del mar, el motor siempre estuvo bajo las mismas condiciones de trabajo, en cuanto a combustible, refrigerante, aceite, pero se llevaron a cabo en días diferentes, por tanto, la temperatura si fue diferente cada día como se muestra en la **Tabla 3.1**, que muestra las temperaturas registradas en cada día de prueba.

Tabla 3.1 Temperatura obtenida el día correspondiente a cada prueba

Temperatura Prueba	Temp °C
Prueba 1	14°C
Prueba 2	12°C
Prueba 3	17°C
Prueba 4	16°C
Prueba 5	17°C

3.1 ANÁLISIS DE SENSOR VERTICAL (TAPA VÁLVULAS)

3.1.1 MOTOR EN ÓPTIMAS CONDICIONES

La **figura 3.1** muestra las características del espectro generado por el motor en condiciones ideales. Se observan claramente cuatro armónicos con amplitudes completamente diferentes, el mayor de los cuales alcanza una amplitud de 272.9. También se observa que la frecuencia se repite a partir del segundo armónico, produciéndose cada 20 Hz. Esto significa que el motor funciona normalmente y que las frecuencias entre los armónicos son periódicas. La gráfica mostrada es una de todas las pruebas, pero permite observar el comportamiento del motor y durante todas las muestras tomadas las gráficas son similares.

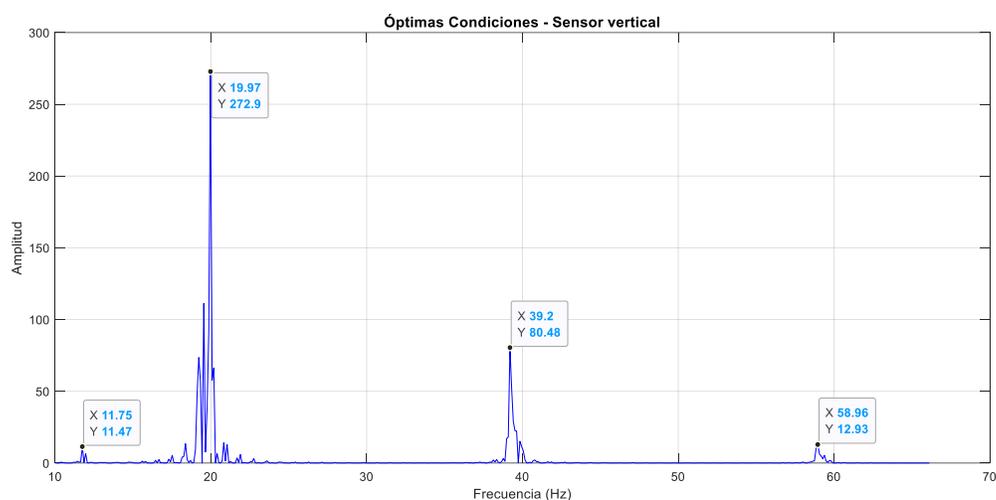


Figura 3.1 Espectro del motor en óptimas condiciones; sensor vertical.

La amplitud se mantiene dentro de un rango determinado, como se muestra en la **Figura 3.2** se observan diferencias entre las cinco pruebas realizadas, pero, los armónicos de mayor amplitud y variación son el segundo y tercer armónico, para el caso del segundo armónico se observa que es el de mayor variación, y este se mantiene dentro de un rango de 200 a 243, estos se mantienen de un rango que se analizará posteriormente.

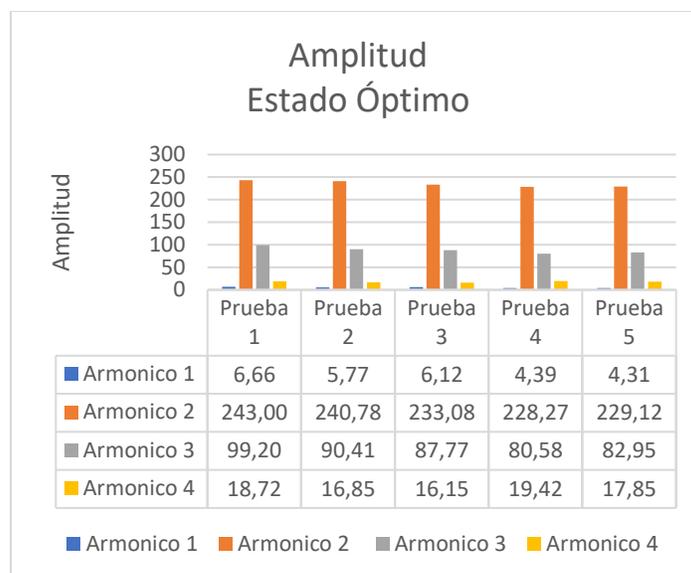


Figura 3.2 Amplitud promedio de cada prueba de simulación en estado óptimo; sensor vertical

La **Figura 3.3** muestra claramente que, durante las cinco pruebas realizadas, la frecuencia de los cuatro armónicos ha sido absolutamente constante. Estos armónicos muestran una variación mínima, lo que indica que mantienen una frecuencia estable de 20 Hz a partir del segundo armónico. Este resultado sólido y coherente demuestra sin duda que el motor en cuestión mantiene un régimen de ralentí excepcionalmente estable en sus frecuencias.

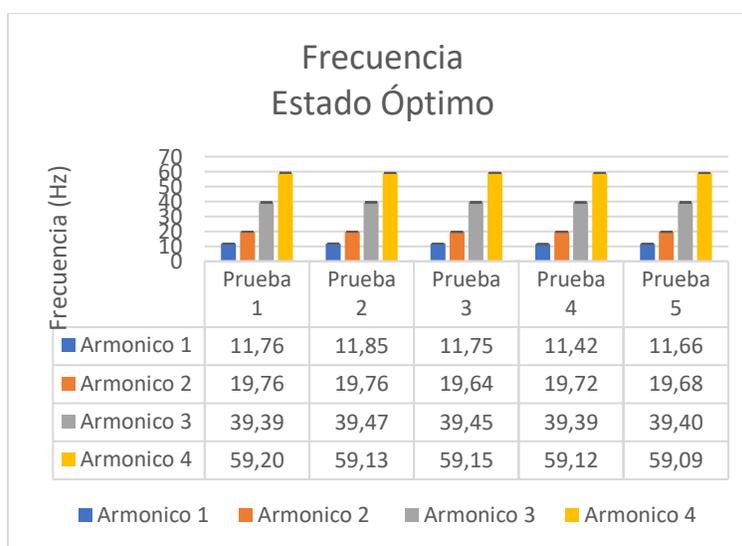


Figura 3.3 Frecuencia promedio de cada prueba de simulación en estado óptimo; sensor vertical

La **tabla 3.2** muestra el rango de funcionamiento del motor en términos de frecuencia y amplitud durante el funcionamiento en óptimas condiciones, se tuvieron en cuenta los armónicos 2 y 3 porque sus amplitudes son las más pronunciadas.

Tabla 3.2 Rango de trabajo en óptimas condiciones

Resumen de simulación en óptimas condiciones		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.64 – 19.726 Hz	228.08 - 243
Armónico 3	39.39 Hz - 39.47 Hz	80.58 – 99.20

3.1.2 SENSOR MAF SEÑAL 2.5V

La simulación del sensor MAF con una señal de 2,5 voltios produce una señal similar a la de las condiciones óptimas, con cuatro armónicos evidentes, pero con amplitudes diferentes, aparentemente ligeramente inferiores. No obstante, la **Figura 3.4** ilustra el comportamiento del motor durante esta prueba, donde observamos que el armónico de mayor amplitud es 234,7, el cual es inferior al resultado en condiciones ideales. Cada armónico tiene varios picos adicionales cerca, y también encontramos un patrón periódico a partir del segundo armónico, lo que sugiere que los armónicos se producen cada 20 Hz.

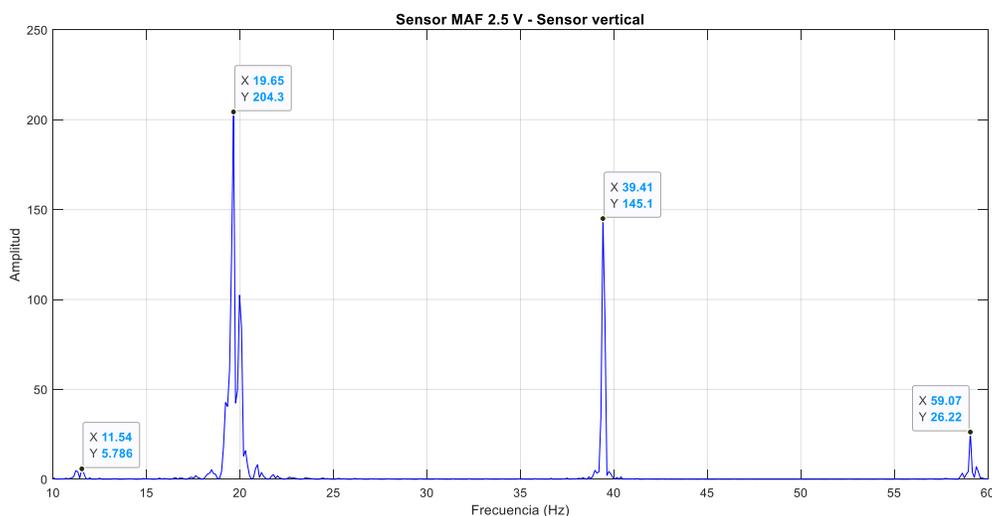


Figura 3.4 Espectro generado con señal de MAF a 2.5V; sensor vertical

Como se aprecia en la **Figura 3.5**, los valores de amplitud obtenidos en esta simulación presentan variaciones significativas; se produce un ligero descenso de las amplitudes respecto al ensayo en condiciones ideales, hecho que se aprecia en el armónico 2, que es el de mayor amplitud. Aunque no presenta cambios visibles ni audibles, sí se aprecia una diferencia en su comportamiento, ya que la amplitud oscila entre 211 y 248, lo que resulta un poco inferior a lo ideal.

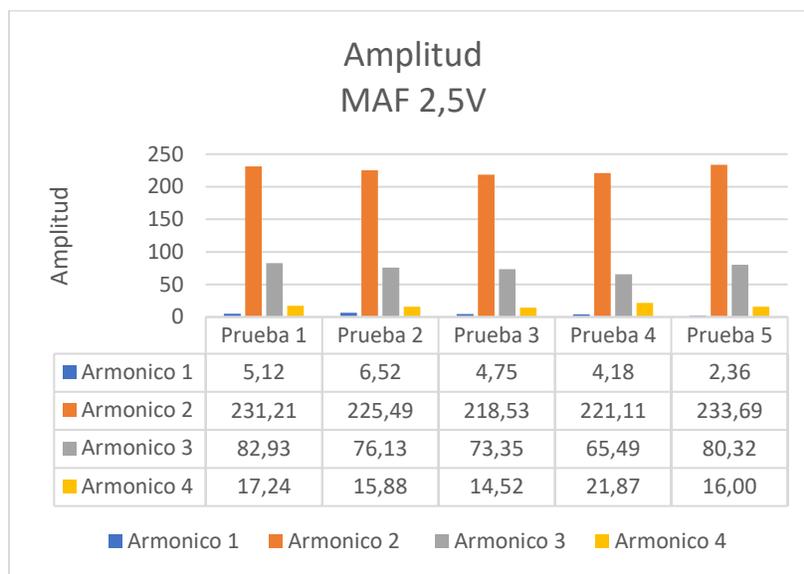


Figura 3.5 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 v; sensor vertical

En cuanto a la frecuencia muestra una notable estabilidad, comparable a la observada en la prueba en condiciones óptimas. La variación máxima entre cada prueba es de sólo 0,5 Hz, también mantiene una frecuencia constante de 20 Hz a partir del segundo armónico, lo que indica que el motor se mantiene en un estado notablemente estable. Es importante señalar que el valor en ralentí del sensor MAF es de 2,1 V y que esta pequeña variación del sensor MAF no muestra ningún cambio significativo en la frecuencia. Cabe señalar que el motor no ha sufrido ningún cambio visible o audible durante las pruebas de esta simulación.

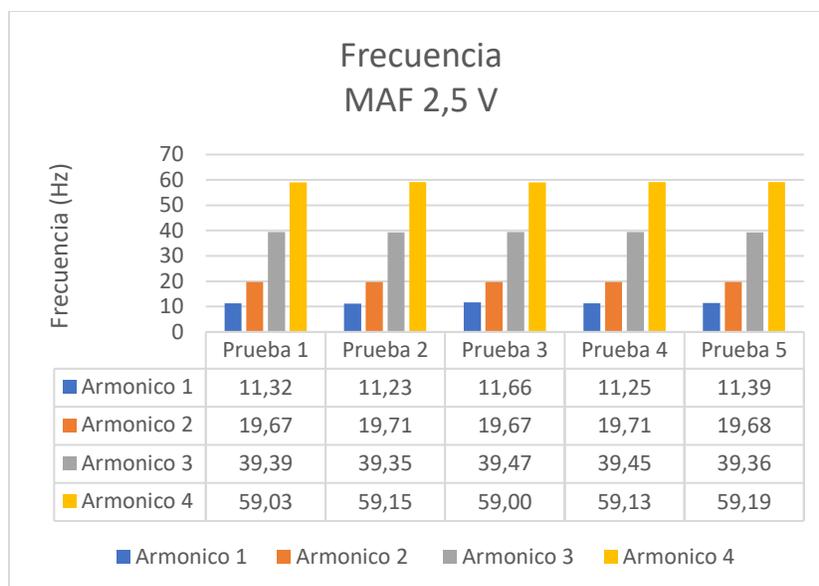


Figura 3.6 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 2.5V; sensor vertical

La **tabla 3.3** muestra el rango de funcionamiento del motor en términos de frecuencia y amplitud durante el funcionamiento con la señal del sensor MAF a 2,5V, se tuvieron en cuenta los armónicos 2 y 3 porque sus amplitudes son las más pronunciadas.

Tabla 3.3 Rango de trabajo en simulación de sensor MAF 2.5 V

Resumen de simulación en sensor MAF 2.5 V		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.68 Hz – 19.71 Hz	218.53 – 233.69
Armónico 3	39.35 Hz – 39.45 Hz	65.49 – 82.93

3.1.3 SENSOR MAF SEÑAL 3.5V

A lo largo de la simulación. el funcionamiento del motor no cambió significativamente. No obstante. el comportamiento del sensor MAF durante esta simulación a 3.5 voltios se muestra en la **Figura 3.7**. Podemos ver qué de los cuatro armónicos. el armónico con mayor amplitud es sólo 167. que es significativamente menor que los resultados de las pruebas anteriores. La señal también muestra un mayor número de picos cerca de cada armónico. lo que indica que el motor es inestable.

Podemos ver que el patrón periódico se mantiene a partir del segundo armónico. lo que indica que los armónicos se producen cada 20 Hz.

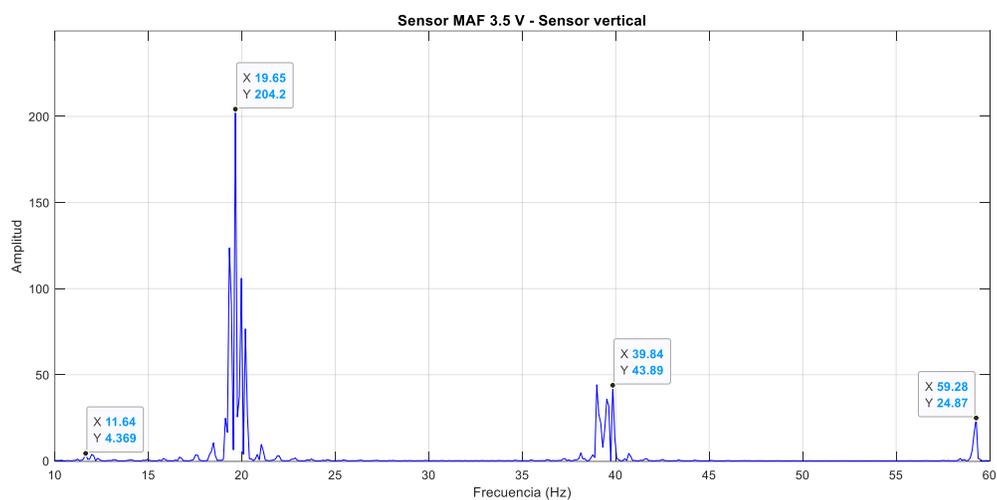


Figura 3.7 Espectro con señal de MAF a 3.5V; sensor vertical

La **figura 3.8** muestra una disminución de las amplitudes en comparación con las pruebas realizadas en condiciones ideales y con el sensor MAF de 2.5 V. También es importante señalar que los resultados no se repiten exactamente en todas las pruebas porque las amplitudes de cada una de ellas son muy diferentes. La amplitud del segundo armónico el más notable de los cuatro oscila entre 204 mm y 374 mm. lo que indica que el motor no funciona correctamente.

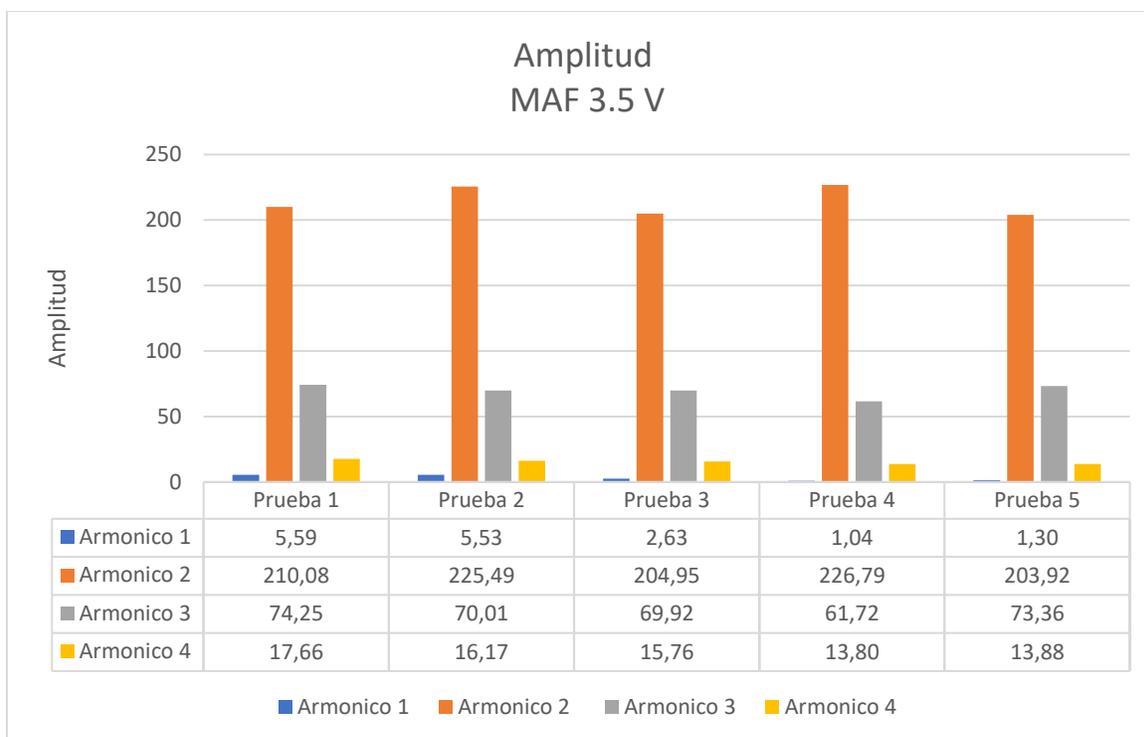


Figura 3.8 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 3.5V; sensor vertical

El patrón periódico de 20 Hz se mantiene después del segundo armónico. como se muestra en la **Figura 3.9**. que muestra la menor diferencia entre las cinco pruebas. Una vez más. no se produjeron cambios evidentes o audibles en esta prueba; la señal de 3.5 voltios del sensor MAF indica la estabilidad en cuanto a la frecuencia.

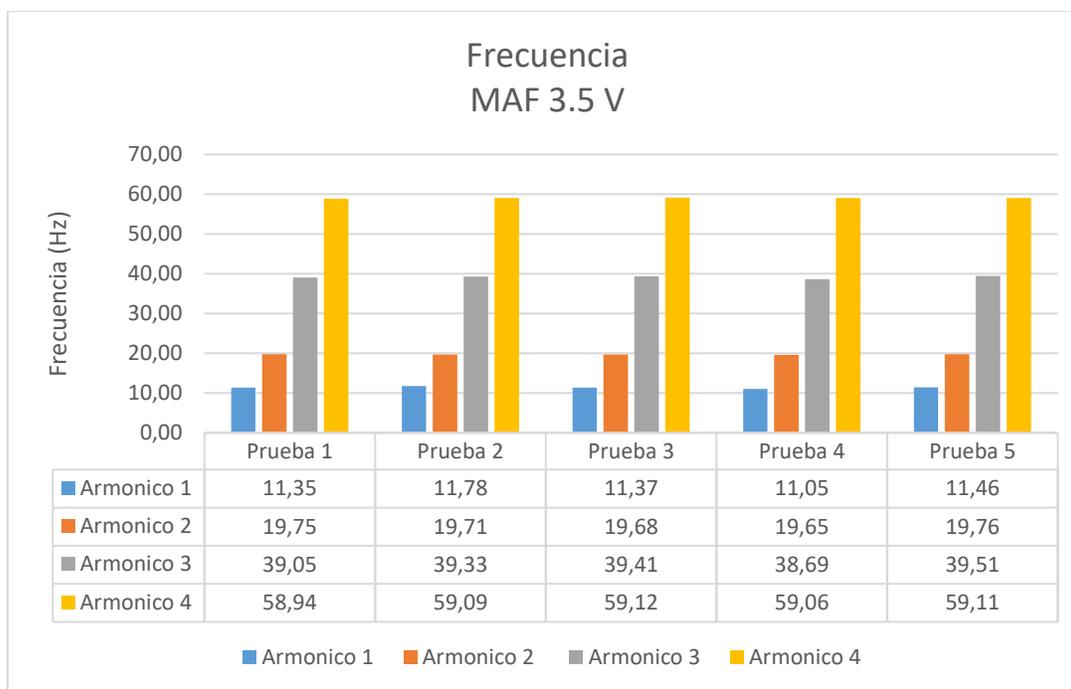


Figura 3.9 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor MAF 3.5V; sensor vertical

Tabla 3.4 Rango de trabajo en simulación de sensor MAF 3.5 V

Resumen de simulación en sensor MAF 3.5 v		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.65 Hz – 1976 Hz	203.92 – 225.49
Armónico 3	39.05 Hz – 39.51 Hz	69.72 – 74.25

3.1.4 SENSOR FRP PRESIÓN EN 40.7 MPA

La simulación con una presión en el raíl de 40.7 MPa mostró una clara desestabilización visual y acústica. ya que el motor no mantiene una velocidad de ralentí constante. La **Figura 3.10** ilustra el comportamiento del motor. El mayor armónico tiene un tamaño de 82.64. que es significativamente menor que el ideal. Esta medida indica que la vibración del motor fue más intensa. y la presencia de múltiples picos cerca de cada armónico indica una mayor inestabilidad del motor. A diferencia de las pruebas anteriores con el sensor MAF. en esta simulación ya no se trata de un patrón cíclico. lo que significa que las frecuencias no son tan regulares. es decir. ya no se producen cada 20 Hz.

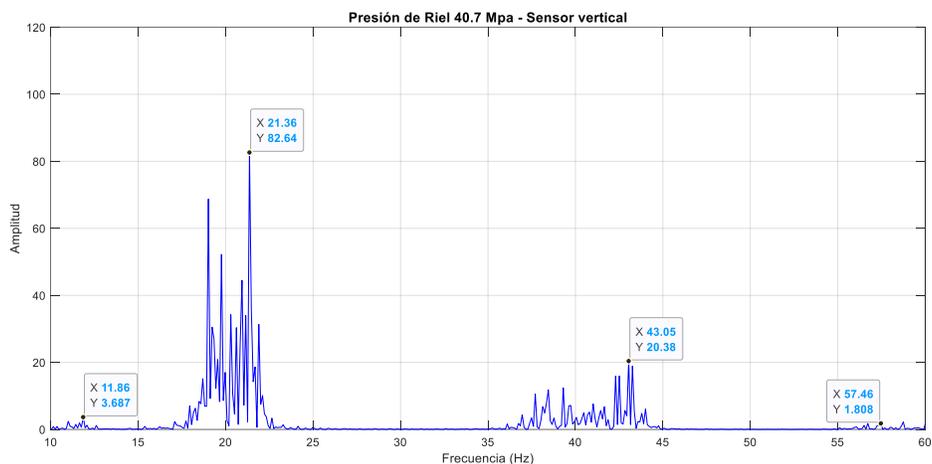


Figura 3.10 Espectro con presión de riel a 40.7 MPa; sensor vertical

Debido a las vibraciones más fuertes, nuestra amplitud media es mucho menor que la de las demás simulaciones. Como se muestra claramente en la **Figura 3.11** adjunta, las amplitudes registradas del segundo armónico oscilan entre 44.57 y 105.30. Además, obtiene resultados diferentes en cada prueba, pero en todas ellas tiene una amplitud mucho menor que en las demás. Esto se debe a la inestabilidad inherente a las condiciones en las que funciona el motor.

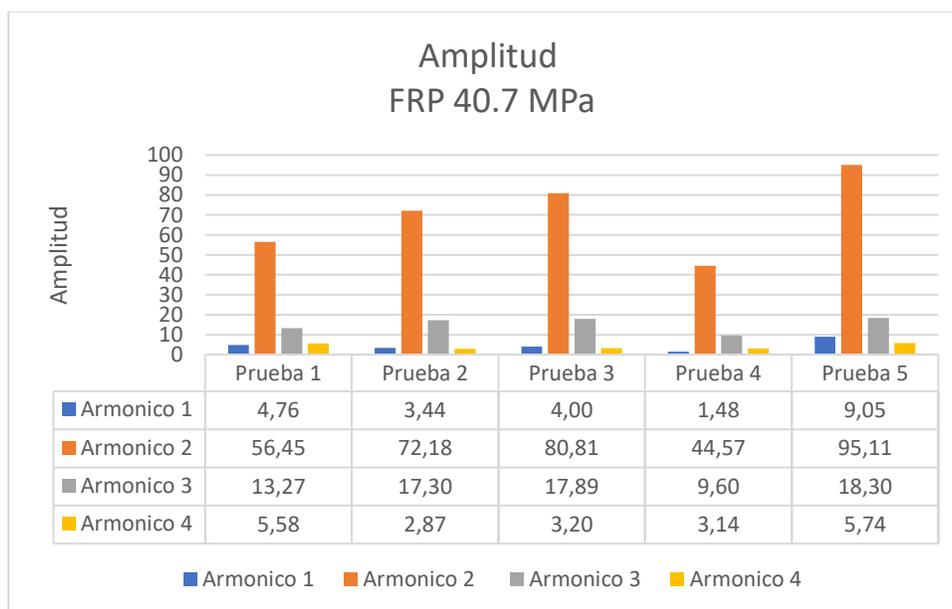


Figura 3.11 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor vertical

El aumento de la presión en el riel a 40.7 MPa también afecta a las frecuencias. Como puede verse en la **Figura 3.12**, la estabilidad de las frecuencias se vio afectada y la desestabilización del motor se hizo evidente durante las pruebas, ya que se produjeron aceleraciones y deceleraciones significativas; Los resultados de frecuencia de cada prueba han cambiado completamente, lo que indica que ya no tienen un comportamiento constante. La diferencia entre la frecuencia más alta y la más baja es de aproximadamente 5 Hz en el caso del segundo armónico, lo cual es crucial porque indica que el comportamiento del motor es totalmente inestable.

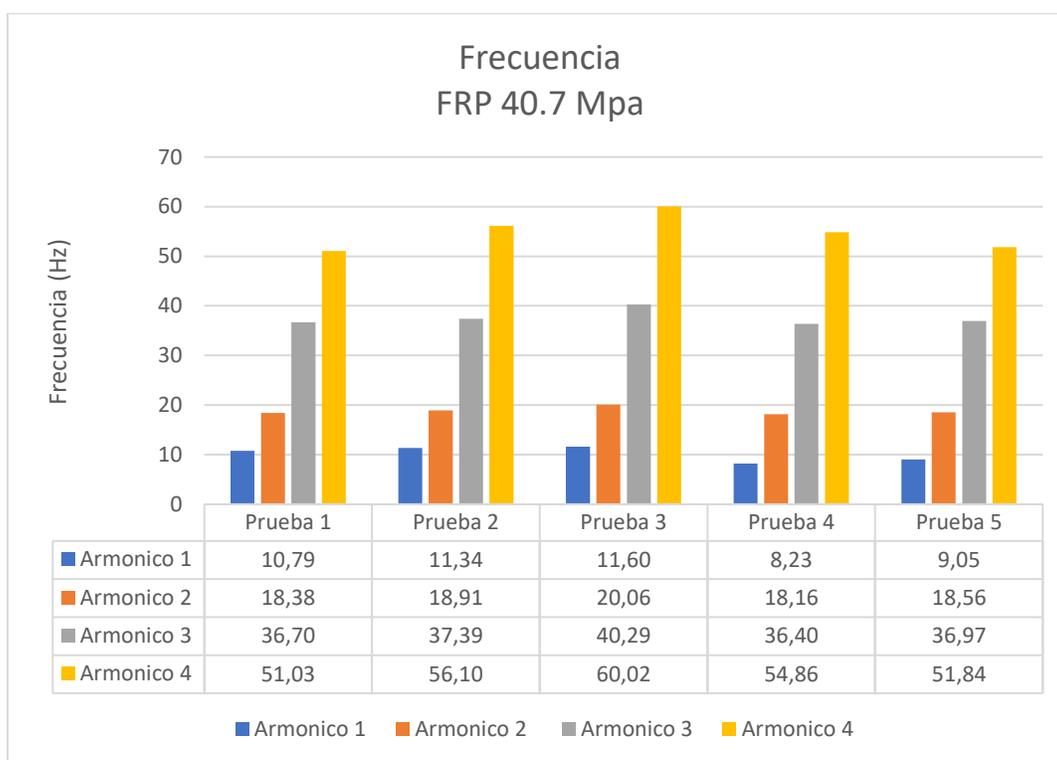


Figura 3.12 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7; sensor vertical

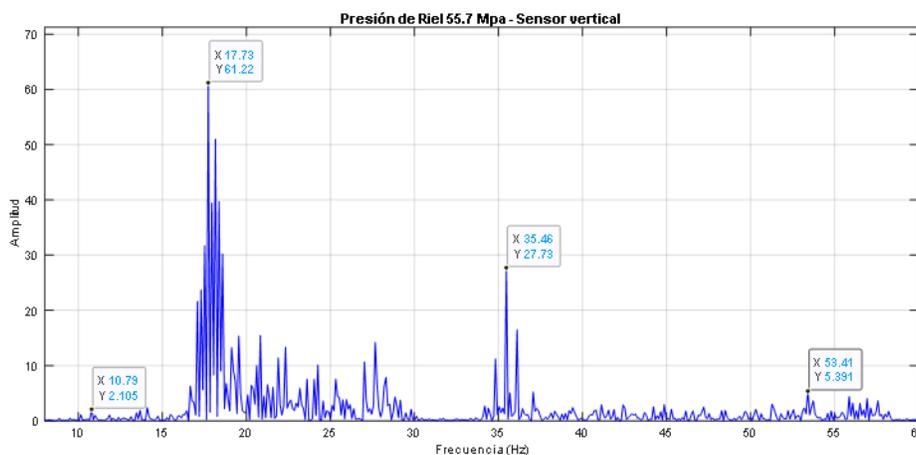
La **Tabla 3.5** muestra el rango de funcionamiento del motor en términos de frecuencia y amplitud durante el funcionamiento con la señal del sensor FRP en 40.7 MPa. se tuvieron en cuenta los armónicos 2 y 3 porque sus amplitudes son las más pronunciadas.

Tabla 3.5 Rango de trabajo en simulación de sensor FRP 407 MPa

Resumen de simulación en sensor FRP 40.7 MPa		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	18.16 Hz – 20.6 Hz	44.57 – 95.11
Armónico 3	36.40 Hz - 40.29 Hz	9.60 – 18.30

3.1.5 SIMULACIÓN DE PRESIÓN EN 55.7 MPA

Cuando la presión en el Common rail se situó en 55.7 MPa. se produjo una vibración que mostró la desestabilización más visible y audible. El motor no podía mantener el régimen de ralentí y se producían aceleraciones y deceleraciones muy pronunciadas. La **Figura 3.13** muestra el comportamiento del motor durante esta simulación. donde podemos ver dos armónicos superiores. La amplitud del armónico superior es de 61.22, que es significativamente inferior a la de todas las simulaciones lo que indica que se trataba de una mayor vibración del motor. También se observa que las frecuencias ya no son periódicas ni regulares.

**Figura 3.13** Simulación de presión en el riel de 55.7 MPa; sensor vertical

La **Figura 3.14** muestra que, en esta simulación, cada prueba tiene un alcance mucho menor que las demás. El intervalo se mantiene entre 54.80 y 68.31 para el armónico 2, que es el mayor. Además, podemos ver que todas las pruebas muestran una gran discrepancia entre los armónicos.

pero las amplitudes son muy bajas en comparación con el buen estado. lo que indica que se trató de una intensidad de vibración excesiva.

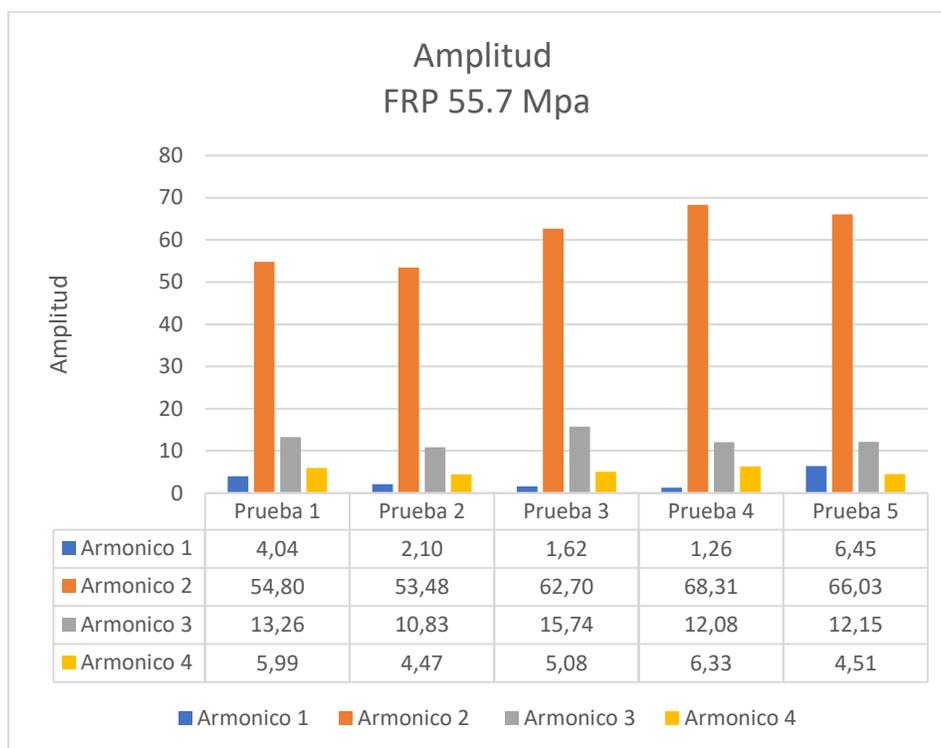


Figura 3.14 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa; sensor vertical

En esta prueba. se produjo un aumento de la inestabilidad acústica y visual. Los valores de frecuencia de los cuatro armónicos son completamente diferentes. como muestra la figura. Esto significa que ya no mantienen una frecuencia de 20 Hz ni tienen un comportamiento cíclico. Esto se debe a que. durante la prueba. el motor experimentó aceleraciones y deceleraciones significativas debido a una presión excesiva en el common rail. lo que provocó una gran inestabilidad. Como resultado. no se trata de un comportamiento cíclico evidente en las frecuencias; en todos los casos. el rango de frecuencias entre armónicos es inferior a 20Hz.

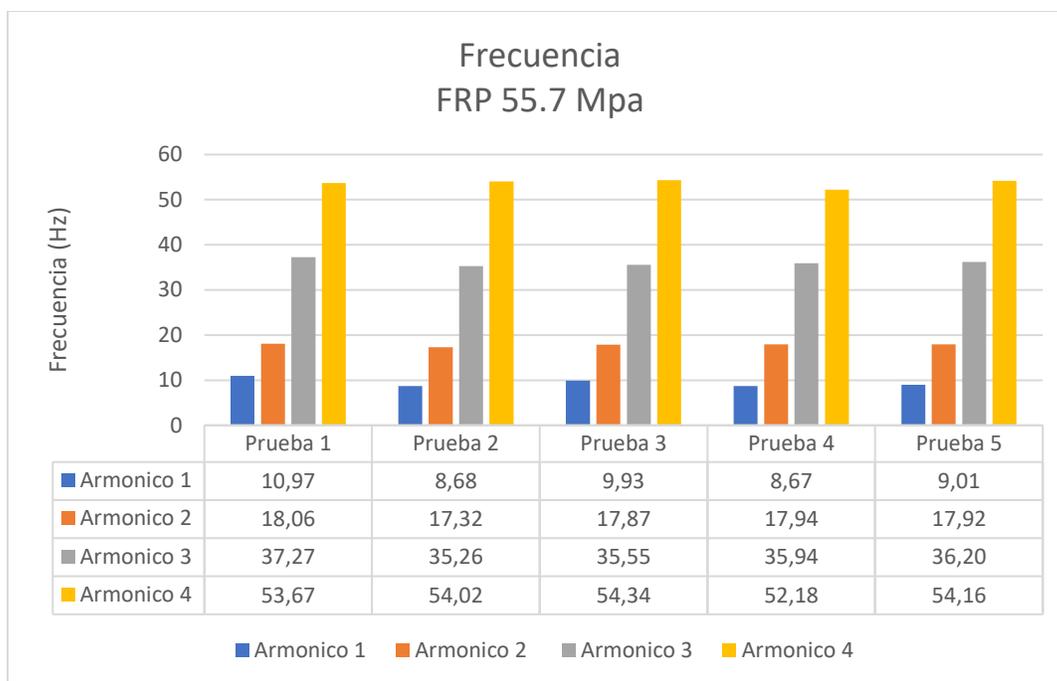


Figura 3.15 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa; sensor vertical

La **Tabla 3.6** muestra el rango de funcionamiento del motor en términos de frecuencia y amplitud durante el funcionamiento con la señal del sensor FRP en 55.7 MPa. se tuvieron en cuenta los armónicos 2 y 3 porque sus amplitudes son las más pronunciadas.

Tabla 3.6 Rango de trabajo en simulación de sensor FRP 55.7 MPa

Resumen de simulación en sensor FRP 40.7 MPa		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	17.32 Hz – 18.06 Hz	53.48 – 68.31
Armónico 3	35.26 Hz – 37.27 Hz	10.83 – 15.74

3.2 ANÁLISIS SENSOR HORIZONTAL (BLOCK DEL MOTOR)

3.2.1 MOTOR EN ÓPTIMAS CONDICIONES

La **Figura 3.16** muestra las características del espectro generado por el motor en condiciones óptimas. Se identifican cuatro armónicos con diferentes amplitudes, los cuales son prominentes en la gráfica. Además, se observa una repetición de la frecuencia a partir del segundo armónico, con una periodicidad aproximada de 20 Hz. En todas las pruebas, se puede notar que las frecuencias de los armónicos más altos se repiten consistentemente durante el ensayo del motor en su estado óptimo. Esta representación gráfica de vibración exhibe claros armónicos sin un exceso de ruido que pueda afectar la precisión de la medición.

En la **Figura 3.16** se observa los armónicos de solo una prueba del motor en óptimas condiciones, esto para conocer bien el comportamiento de la gráfica.

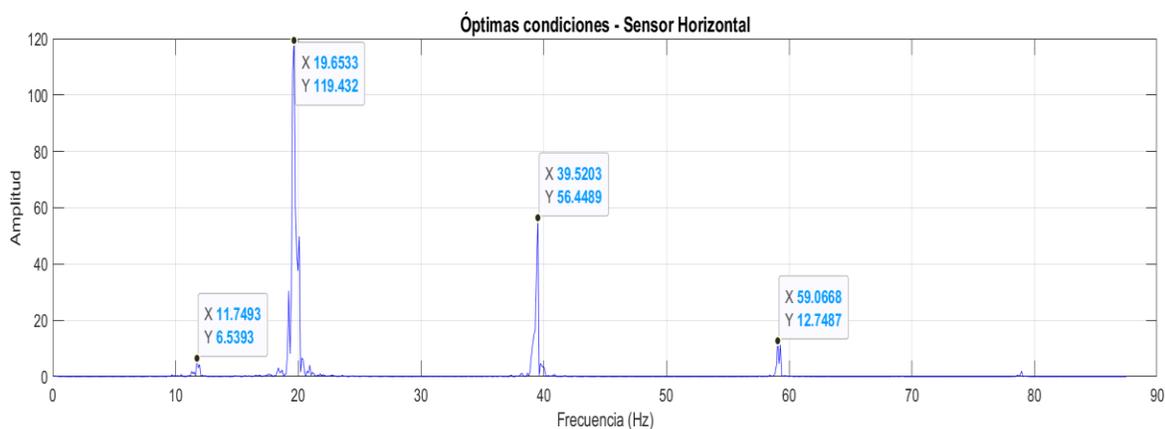


Figura 3.16 Espectro del motor en óptimas condiciones; sensor horizontal

En el análisis de datos sobre las medidas de amplitud en estado óptimo, la **Figura 3.17** muestra los armónicos más destacados de cada prueba. Estos armónicos representan las etapas de tiempo del motor, y se observa que este patrón se repite en todas las lecturas. Es importante señalar que el armónico más prominente (Armónico 2) corresponde a la fase de combustión del motor, lo cual se refleja en una amplitud mucho más pronunciada que las demás etapas. Este armónico permanece en un rango de entre 131.96 a 138.61.

Con respecto a la amplitud de cada gráfica. estas tienen un cambio no tan significativo debido a que se tomaron en días distintos. en este caso. en la vibración no se logra identificar un gran cambio. esta pequeña variación es debido al clima o estado climático en el que se realizó la prueba. así mismo. la altitud y latitud del lugar donde estaba ubicado el motor.

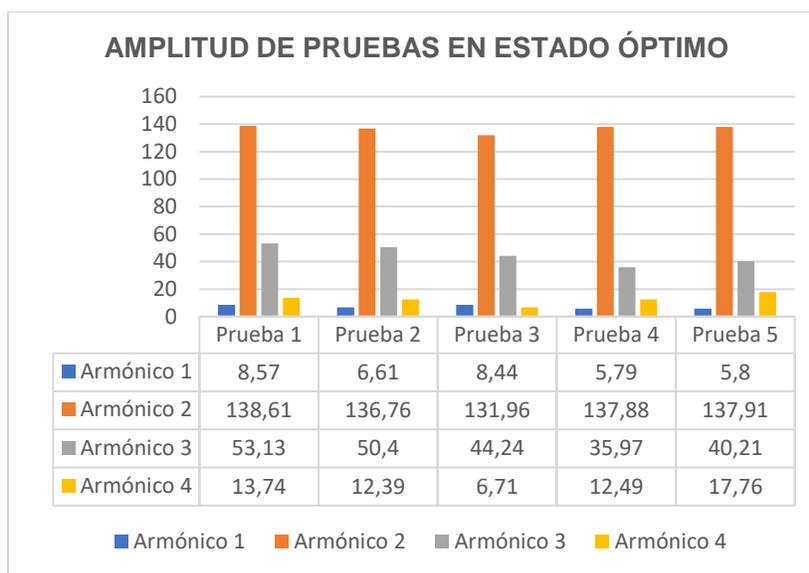


Figura 3.17 Amplitud promedio de cada prueba de simulación en estado óptimo; sensor horizontal

A continuación. se presenta la **Figura 3.18** que muestra el promedio de frecuencias obtenido en las pruebas del motor en su estado óptimo. En esta figura. se puede observar que la frecuencia se mantiene constante a lo largo de toda la prueba. con cambios de frecuencia muy mínimos. Es decir. no se obtuvo ninguna variación significativa con respecto a los distintos días en los que se realizaron las pruebas. Esto indica una alta estabilidad en el comportamiento del motor en condiciones óptimas. encontrándose dentro del rango de frecuencia establecido.

Cabe recalcar que la frecuencia se repite cada 20 Hz aproximadamente a partir del segundo armónico.

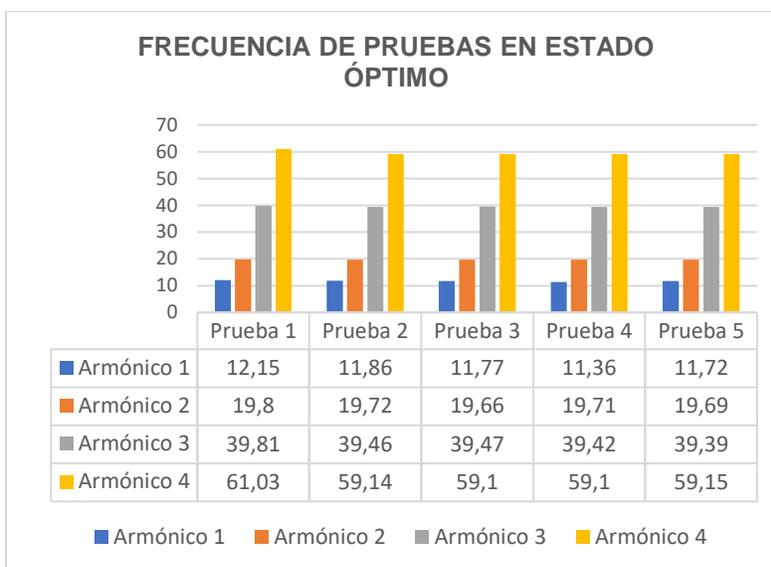


Figura 3.18 Frecuencia promedio de cada prueba de simulación en estado óptimo; sensor horizontal

A continuación. se muestra el rango de frecuencia y amplitud que existe entre el armónico 2 y 3. los cuales son los más prominentes en cada gráfica.

Tabla 3.7 Resumen de simulación en óptimas condiciones

Resumen de simulación en óptimas condiciones		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.66 Hz -19.8 Hz	131.96 - 138.61.
Armónico 3	39.39 Hz – 39.81 Hz	35.97 - 53.13

3.2.2 SIMULACIÓN DE SEÑAL DE MAF 2.5V

En esta simulación. al modificar la señal del MAF a 2.5V. se genera un espectro similar al de la prueba anterior. como se muestra en la **Figura 3.19** Se observan cuatro armónicos destacados. los cuales presentan similitudes con los de la prueba previa. aunque con amplitudes diferentes. Es importante destacar que. al igual que en la prueba del motor en estado óptimo. la frecuencia sigue un patrón constante. Además. alrededor de cada armónico. se observan pequeños picos de señal. indicando un ligero aumento en el cascabeleo. aunque en menor medida. Al considerar la amplitud del armónico más alto. se puede apreciar que es menor que en la prueba anteriormente realizada.

En la **Figura 3.19** se observa los armónicos de solo una prueba del motor con la simulación de señal del sensor MAF a 2.5 V. esto para conocer bien el comportamiento de la gráfica.

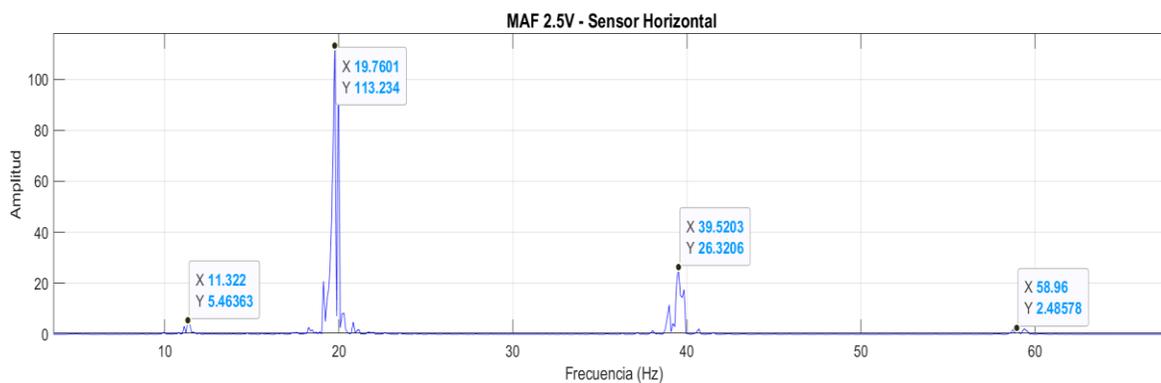


Figura 3.19 Espectro generado con señal de MAF a 2.5V; sensor horizontal

En el análisis de los datos de las medidas de amplitud con variación de señal del MAF a 2.5 V. se observa los armónicos más destacados en cada caso. Es evidente que este patrón se repite en todas las lecturas.

En la **Figura 3.20**, las amplitudes en cada gráfica no son idénticas. dado que cada prueba se llevó a cabo en días diferentes. Se observa que el armónico 2 de cada prueba es el más prominente. esto debido a que en esa frecuencia el motor está en el proceso de combustión. Principalmente se logra apreciar un cambio significativo en el armónico 2. el cual tiene una mayor amplitud con respecto a los otros 3 armónicos. Se puede apreciar que la amplitud del armónico 2 con respecto a cada prueba se encuentra en un rango de 122.06 a 135.40.

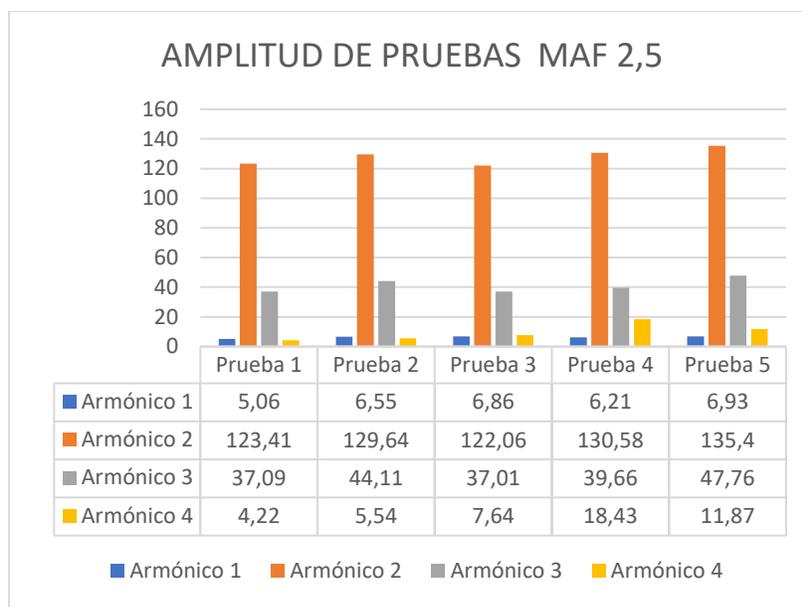


Figura 3.20 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 V; sensor horizontal

En la **Figura 3.21**, se puede observar cómo la frecuencia en cada una de las pruebas se repite, lo cual sugiere que la vibración no tiene un impacto significativo en el ralentí o la estabilidad del motor, es decir, no existe una mayor diferencia entre pruebas realizadas. Cabe recalcar que la frecuencia tiene un patrón constante de 20 Hz a partir del segundo armónico.

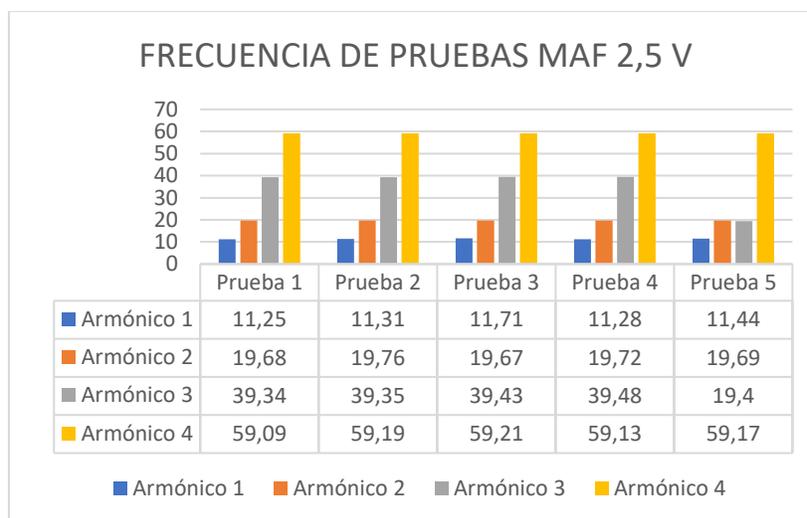


Figura 3.21 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 2.5 V; sensor horizontal

A continuación, se muestra el rango de frecuencia y amplitud que existe entre el armónico 2 y 3, los cuales son los más prominentes en cada gráfica.

Tabla 3.8 Resumen de simulación en el sensor MAF a 2.5 V

Resumen de simulación en el sensor MAF a 2.5 V		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.67 Hz -19.76 Hz	122.06 - 135.40
Armónico 3	39.34 Hz – 39.48 Hz	37.01 - 47.76

3.2.3 SIMULACIÓN DE SEÑAL DE MAF 3.5 V

Al ajustar la señal del MAF a 3.5V, tal como se muestra en la **Figura 3.22**, se genera un espectro similar al obtenido en la prueba anterior con el MAF a 2.5V. Los cuatro armónicos destacados se mantienen reconocibles, aunque presentan amplitudes diferentes. En este caso, al considerar la amplitud del armónico más alto, se observa una disminución con respecto a la prueba previa. Es importante resaltar que, al igual que en las pruebas anteriores (motor en estado óptimo y MAF a 2.5V), la frecuencia sigue un patrón constante. Sin embargo, se aprecian picos de señal (ruido) alrededor de cada armónico, lo cual indica un aumento de vibración del motor.

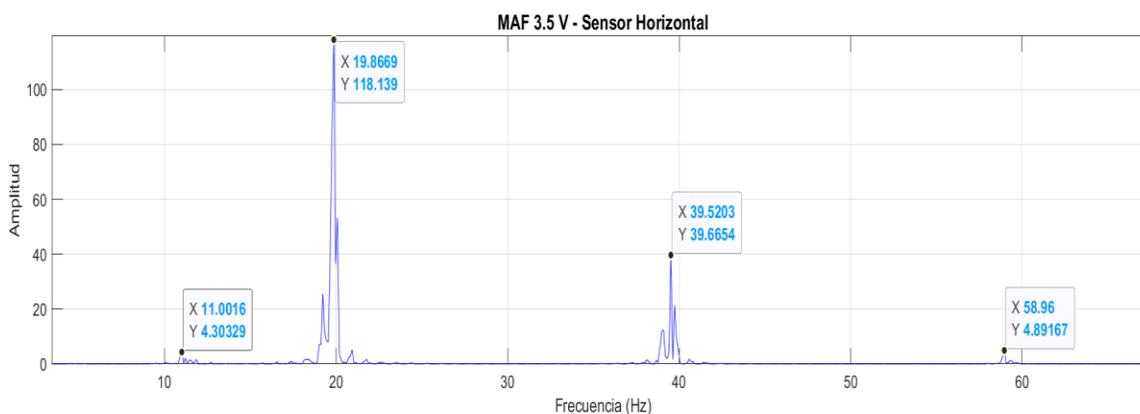


Figura 3.22 Espectro con señal de MAF a 3.5V; sensor horizontal

En el análisis de datos de las medidas de amplitud con variación de señal del MAF a 3.5 V, se obtuvieron 4 armónicos en cada prueba, los cuales se presentan en la **Figura 3.23**, mostrando los más destacados en cada caso. Es evidente que este patrón se repite en todas las lecturas.

Es importante señalar que las amplitudes en cada gráfica no son idénticas. ya que las pruebas se realizaron en días diferentes. mostrando claramente un aumento de amplitud en el segundo armónico en cada caso. Se aprecia en la **figura 3.23** que en la prueba 4 y 5 la amplitud del armónico 2 se despega. esto es debido al clima y el viento que se presencié en el lugar que se realizó la prueba. Es por eso por lo que se tomara como referencia las pruebas 1. 2 y 3. En estas pruebas se observa que el rango de amplitud del armónico 2 en estas pruebas es de 111.02 a 136.55.

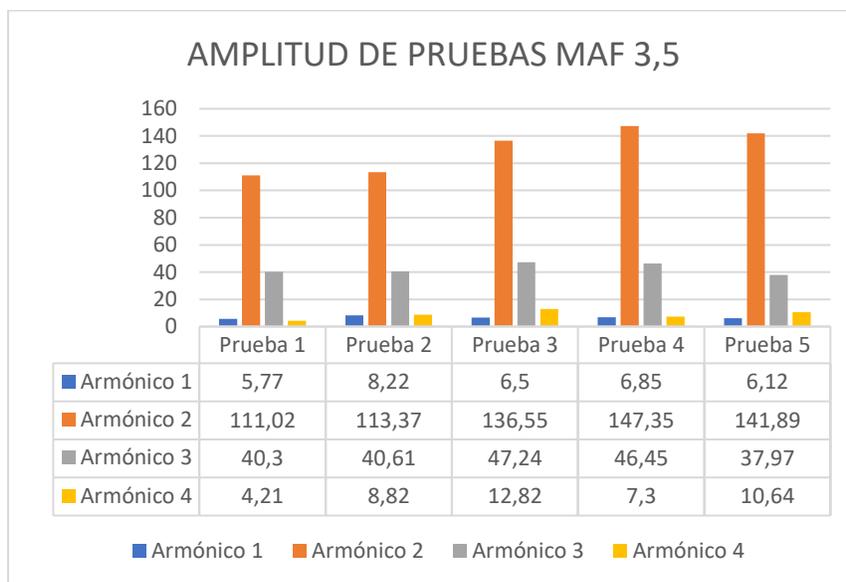


Figura 3.23 Amplitud promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 3.5 V; sensor horizontal

Al igual que en los casos ya vistos anteriormente. se puede apreciar claramente en la **Figura 3.24** que la frecuencia de dichos armónicos en cada prueba se sigue manteniendo iguales. es decir. una vez más la vibración ocasionada en esta simulación no está interfiriendo o alterando el ralenti del motor. Cabe recalcar que existe un patrón de 20 Hz de frecuencia a partir del segundo armónico en cada prueba.

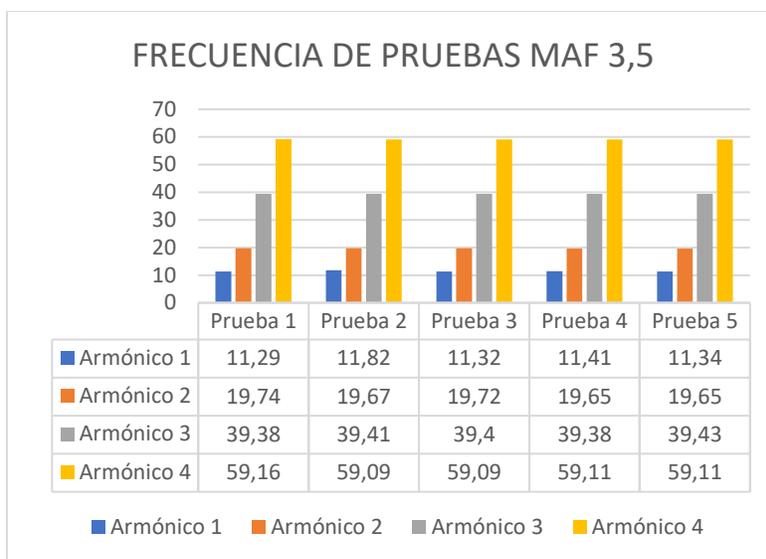


Figura 3.24 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación de sensor MAF 3.5 V; sensor horizontal

A continuación. se muestra el rango de frecuencia y amplitud que existe entre el armónico 2 y 3. los cuales son los más prominentes en cada gráfica.

Tabla 3.9 Resumen de simulación en el sensor MAF a 3.5 V

Resumen de simulación en el sensor MAF a 3.5 V		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	19.65 Hz -19.74 Hz	111.02 - 147.55
Armónico 3	39.38 Hz – 39.43 Hz	37.97 – 47.24

3.2.4 SIMULACIÓN DE PRESIÓN RIEL 40.7 MPA

En esta simulación. se realizó un cambio en la presión del riel de inyección. pasando de 38.70 MPa (Ralentí) a 40.70 MPa. En la **Figura 3.25**. se muestra el espectro resultante. donde se pueden identificar los cuatro armónicos previamente observados en las pruebas anteriores. Sin embargo. en esta prueba los armónicos ya no se presentan de manera nítida. Se han considerado los armónicos más prominentes de la gráfica para su análisis. Aunque los cuatro armónicos destacados siguen siendo reconocibles. presentan amplitudes diferentes. Debido a una mayor vibración en el motor. se observa que la amplitud del segundo armónico es menor que en las pruebas anteriores.

La frecuencia ya no sigue un patrón constante, ya que el motor no puede mantenerse en ralentí. Además, en esta gráfica se aprecia un aumento notable en el ruido, evidenciado por la presencia de múltiples picos de señal alrededor de cada armónico. Esto se debe a la mayor vibración del motor.

La siguiente figura fue tomada únicamente para una mejor comprensión del comportamiento de la gráfica de vibración.

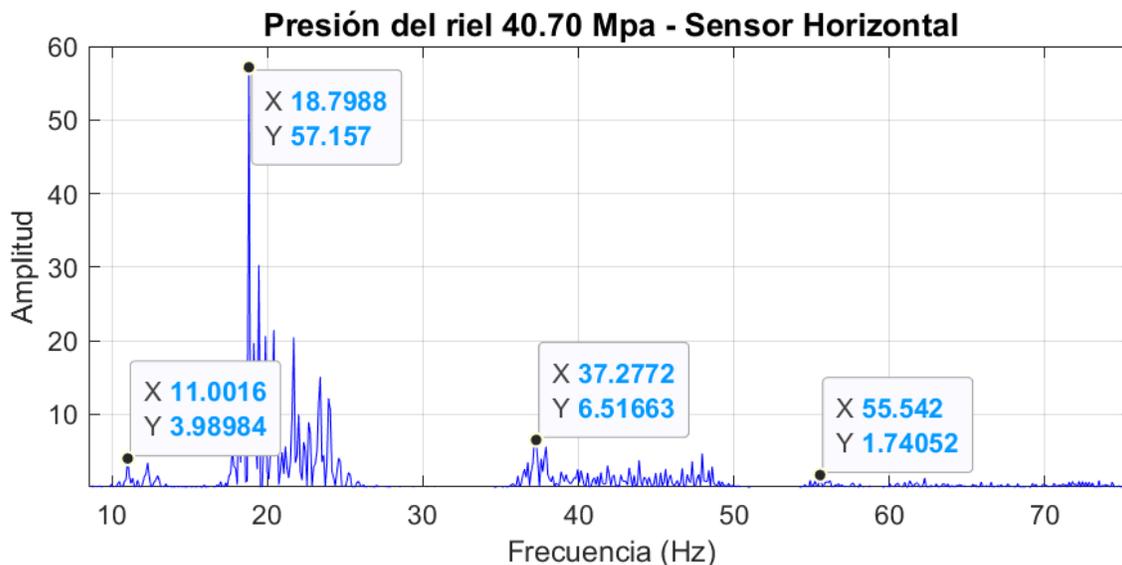


Figura 3.25 Espectro con presión de riel a 40.7 MPa; sensor horizontal

En los datos de medidas de amplitud con variación de presión en el riel a 40.70 MPa, se obtuvieron 4 armónicos en cada prueba, los cuales se presentan en la **Figura 3.26**.

Se puede observar claramente que las amplitudes en cada gráfica son distintas debido a que las pruebas se llevaron a cabo en días diferentes. Además, se evidencia un aumento de la amplitud en el segundo armónico en cada caso. Estos resultados sugieren que la vibración tiende a variar levemente debido a factores como la temperatura ambiente, así como la altitud y latitud del lugar donde se ubicó el motor.

Por otro lado, se observa que en este caso las medidas de amplitud del armónico 2 disminuyen repentinamente. Esto se debe al aumento de la vibración en el motor, consecuencia de que el motor.

al operar a una mayor presión en el riel. no mantiene el ralentí. y las RPM tienden a subir o bajar debido a aceleraciones o desaceleraciones del motor.

Gracias a estos hallazgos. se puede concluir que a medida que se incrementa la vibración presente en el sistema. la medida del dato obtenido desciende a comparación del motor en óptimas condiciones.

En la **figura 3.26** se puede observar que con respecto a las pruebas del motor en estado óptimo. los armónicos tienden a disminuir. esto debido a que la vibración es mayor y el motor no es capaz de mantener un ralentí estable. En este caso la amplitud del armónico 2 se mantiene en un rango de entre 20.11 a 53.20.

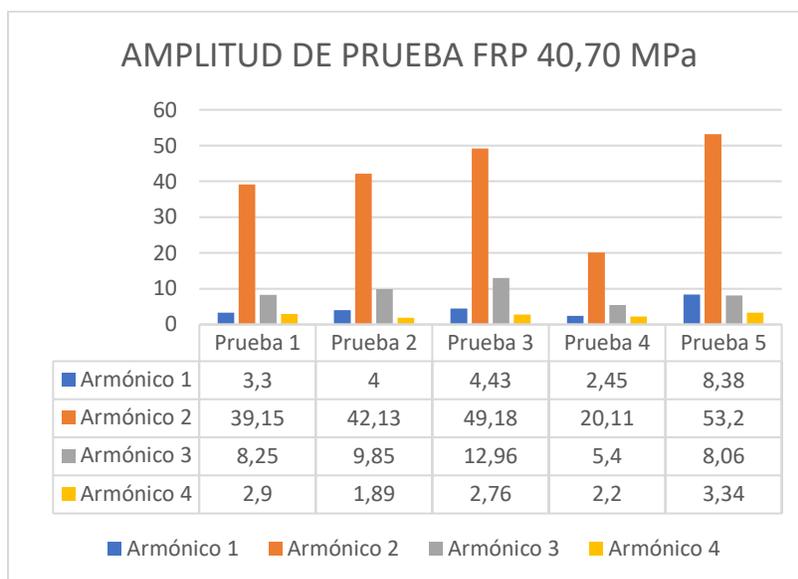


Figura 3.26 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor horizontal

En el caso de la frecuencia. con respecto a la prueba de estado óptimo e incluso con las demás pruebas. se percata que la frecuencia tiende a disminuir en cada armónico. esto supone una mayor inestabilidad en el motor. alterando así la frecuencia obtenida de cada uno de estos. A pesar de esto se presencia que ya existe un patrón aproximado de 18 Hz entre armónicos a partir del segundo armónico.

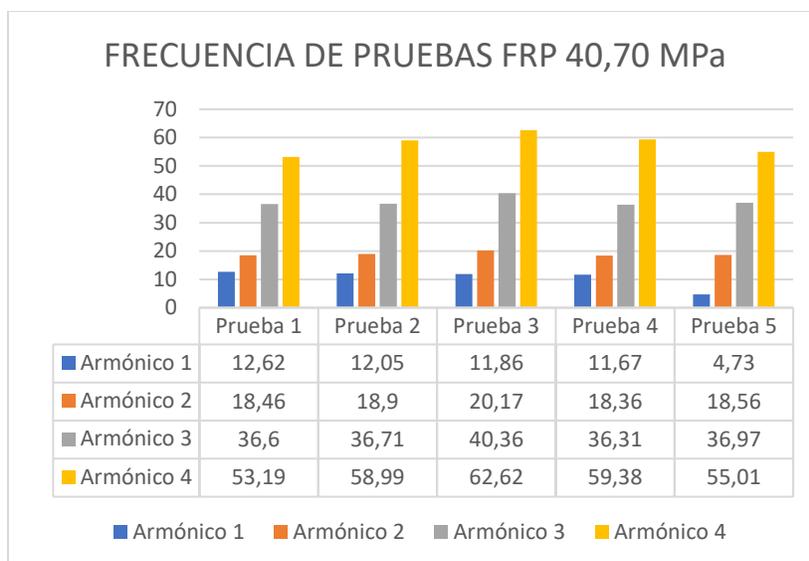


Figura 3.27 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa; sensor horizontal

A continuación, se muestra el rango de frecuencia y amplitud que existe entre el armónico 2 y 3, los cuales son los más prominentes en cada gráfica.

Tabla 3.10 Resumen de simulación de presión en el riel a 40.70 MPa

Resumen de simulación de presión en el riel a 40.70 MPa		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	18.36 Hz - 20.17 Hz	20.11 - 53.20
Armónico 3	36.31 Hz - 40.36 Hz	5.4 - 12.96

3.2.5 SIMULACIÓN DE PRESIÓN RIEL 55.70 MPa

En la simulación de presión del riel de inyección a 55.70 MPa, se destaca un aumento significativo en el ruido presente en el espectro obtenido. En esta situación, resulta más difícil identificar los armónicos claramente, ya que se observa una gran cantidad de picos de señal que eclipsan los armónicos mencionados anteriormente. Este fenómeno se debe al incremento de la vibración del motor debido a su incapacidad de mantenerse en ralentí y a los constantes acelerones. La información correspondiente a esta condición se muestra en la **Figura 3.28** la cual fue tomada únicamente para una mejor comprensión del comportamiento de la gráfica de vibración.

Es importante señalar que la medida de amplitud del segundo armónico es menor en comparación con las otras simulaciones realizadas.

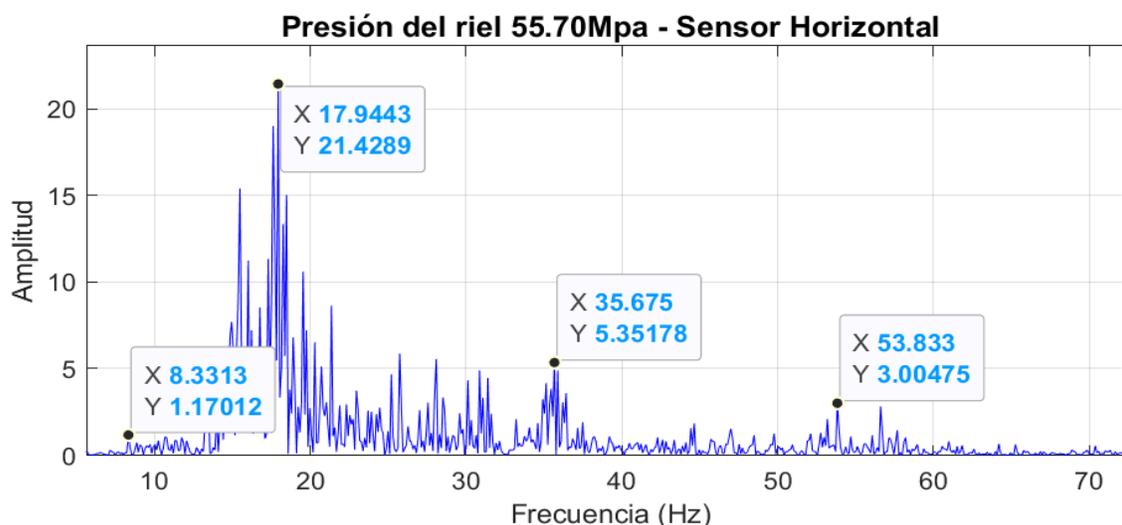


Figura 3.28 Simulación de presión en el riel de 55.7 MPa; sensor horizontal

Durante las pruebas con variaciones de presión en el riel a 55.70 MPa. se obtuvieron consistentemente 4 armónicos en cada caso. como se muestra en la **Figura 3.29**.

En particular. en este caso. se observó una disminución repentina en las mediciones de amplitud de los armónicos. en comparación con la prueba anterior a 40.70 MPa. Este comportamiento es atribuible al incremento en la vibración del motor al operar a una mayor presión en el riel. Como consecuencia. el motor no se mantiene estable en ralentí. y las RPM tienden a fluctuar debido a aceleraciones o desaceleraciones del motor.

Estos hallazgos indican claramente un aumento en la vibración del sistema. lo que lleva a una disminución en la calidad del dato obtenido en comparación con un motor en condiciones óptimas y con respecto a otras pruebas realizadas.

En resumen. los resultados apuntan a la importancia de mantener el motor en condiciones estables para evitar la variación en la vibración y garantizar mediciones más precisas. Dentro del rango obtenido de las medidas del armónico 2. este está establecido entre 28.09 a 39.54.

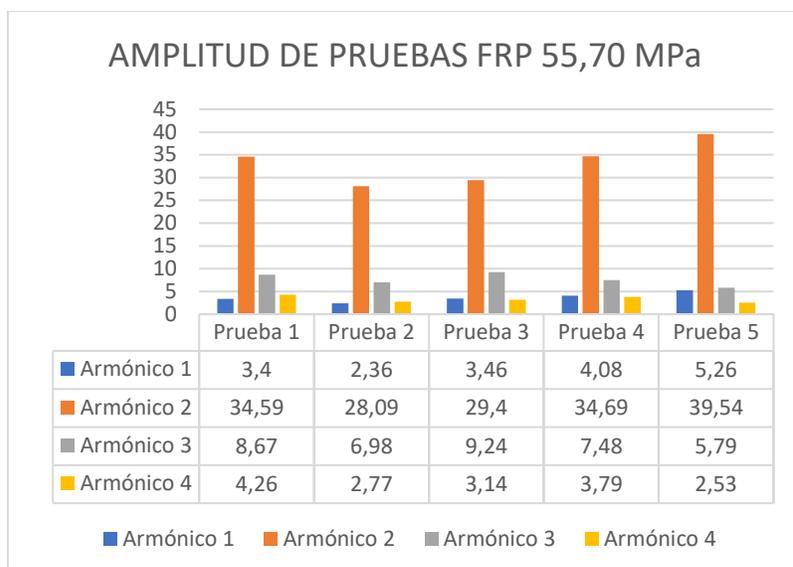


Figura 3.29 Amplitud promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 55.7 MPa;
sensor horizontal

Al igual que en la frecuencia del FRP a 40.70 MPa. se puede notar que la frecuencia aquí cambia con respecto al motor en óptimas condiciones. esto debido a la mala estabilidad del motor en ralentí como se explicó anteriormente. Se puede apreciar que el patrón a partir del segundo armónico viene a ser de aproximadamente de 15 Hz.

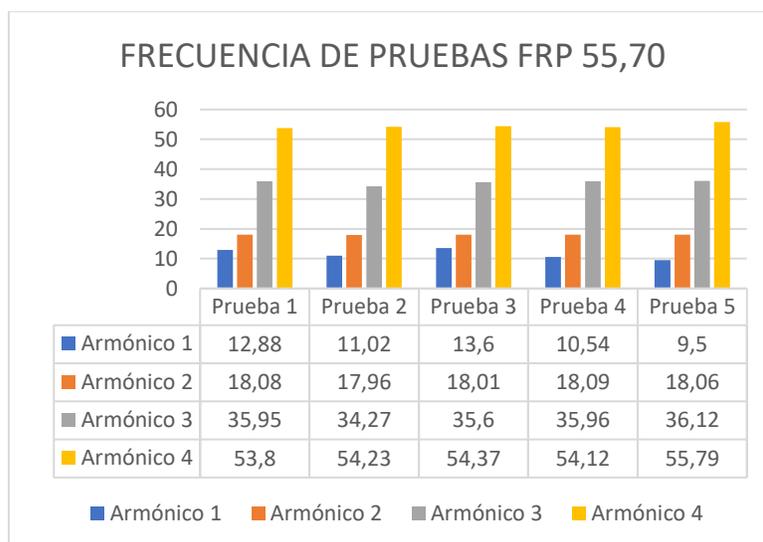


Figura 3.30 Frecuencia promedio de cada prueba en simulación del sensor FRP a 40.7 MPa;
sensor horizontal

A continuación, se muestra el rango de frecuencia y amplitud que existe entre el armónico 2 y 3, los cuales son los más prominentes en cada gráfica.

Tabla 3.11 Tabla resumen de simulación de presión en el riel a 55.70 MPa

Tabla resumen de simulación de presión en el riel a 55.70 MPa		
	Frecuencia	Amplitud
Armónico 2	17.96 Hz -18.09 Hz	28.09 - 39.54
Armónico 3	34.27 Hz – 35.96 Hz	5.79 – 9.24

3.3 RESULTADOS DE ARMONICOS 2 Y 3

Para determinar el impacto de las simulaciones en el rendimiento del motor, se tuvo en cuenta el rango de funcionamiento en cada simulación, tanto en amplitud como en frecuencia. Utilizando los datos recopilados durante el análisis, podemos determinar el impacto en el motor cuando funciona con los distintos parámetros de funcionamiento simulados en los sensores MAF y FRP, para lo cual se realizaron tablas comparativas para cada sensor (vertical y horizontal) que se mostrarán más adelante en el presente capítulo.

3.3.1 SENSOR VERTICAL

La siguiente **Tabla 3.12** muestra los rangos de comportamiento del motor en términos de amplitud en las diferentes simulaciones realizadas en la investigación, permitiendo observar los intervalos en los que opera el motor con las diferentes configuraciones.

Tabla 3.12 Resultados de amplitudes de cada simulación; sensor vertical

Resultados de amplitudes	
Simulación	Armónico 2
Óptimas condiciones	228.08 -243
MAF 2.5 V	218.53 – 233.69
MAF 3.5 V	203.92 – 225.49
FRP 40.7 MPa	44.57 – 95.11
FRP 55.7MPa	53.48 – 68.31
	Armónico 3
Óptimas condiciones	80.58 – 99.20
MAF 2.5 V	65.49 – 82.93
MAF 3.5 V	69.72 – 74.25
FRP 40.7 MPa	9.60 – 18.30
FRP 55.7MPa	10.83 – 15.74

Para entender el funcionamiento del motor en las diferentes simulaciones. se determinaron los rangos de amplitud en los que el motor funciona en las diferentes simulaciones para el armónico 2. que es el armónico con mayor amplitud. es decir. el armónico que señala que el motor está en su fase de combustión. Estos resultados aseguran que si el armónico 2 se mantiene entre 228.08 y 243 el motor está en buenas condiciones; para la simulación del sensor MAF con señal de 2.5V no hay una gran diferencia. pero sí una ligera reducción respecto al ideal. es decir. sí está en el rango de 218.53-233.69 el daño no es tan grave. pero la diferencia es mayor si la señal MAF es de 3.5V; entonces podemos ver que el rango baja a 203.95 – 225.49; por lo tanto, muestra un daño más notorio. lo que significa que modifica el funcionamiento del motor. pero en las simulaciones hechas con el sensor MAF la diferencia no es muy grande. en cambio, en las simulaciones hechas con el sensor FRP la diferencia es muy significativa. cuando el riel está a 40.7 MPa. se mantiene entre 44.57 y 95.11. lo que significa un daño muy grave. pero el daño es crítico cuando tenemos una presión en el rail de 55.7 MPa. ya que se mantiene entre 53.48 y 68.31; lo que significa que la vibración es muy intensa.

En el caso del tercer armónico. tenemos que las amplitudes en condiciones óptimas se mantienen en un rango de 80.58 a 90.20 y con el sensor MAF a 2.5V se mantiene de 65.49 a 83.93, es decir,

el daño no es muy grave. con la señal del sensor MAF a 3.5V el rango de trabajo se mantiene de 69.72 a 75. 25. el daño aparentemente no es muy grave en relación con las condiciones ideales. sin embargo. cuando presenta valores más bajos. en el caso del sensor FRP tenemos que cuando la presión es de 40.7 MPa en el rango de amplitud se mantiene de 9.60 a 18.30. lo que significa que el motor es muy inestable. es decir. el daño es grave y es mucho menor. cuando la presión es de 55.7 MPa el rango de trabajo es de 10.83 a 15.74. esto representaría la situación más crítica del motor.

Como se observa en la **Figura 3.31**, la tendencia de los resultados en cuanto al armónico dos es negativa. es decir. disminuyen en cada simulación. en el caso de las simulaciones en el sensor MAF 2.5V la disminución no es apreciable respecto al estado ideal y en la simulación MAF 3.5V los resultados son ligeramente inferiores respecto al estado ideal. pero en el caso de las simulaciones en el sensor FRP la diferencia es muy grande. con la presión 40.7 MPa está muy por debajo de los resultados del estado ideal. estos caen por debajo de 70 en el caso del segundo armónico y en este mismo armónico en la simulación de 55.7 MPa llega a 61. lo cual es demasiado bajo. mostrando una inestabilidad absoluta en el funcionamiento del motor.

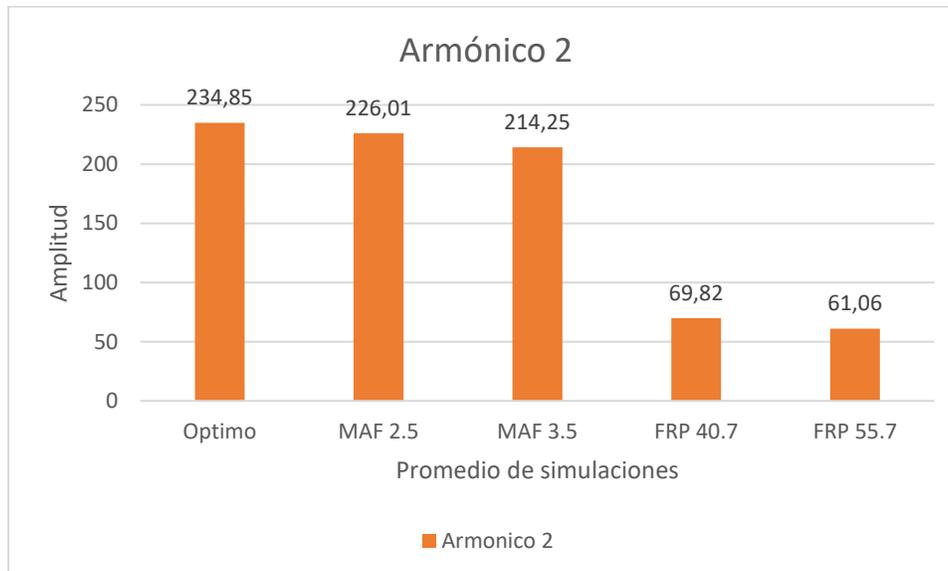


Figura 3.31 Promedio de los armónicos 2 de todas las pruebas y ensayos

La siguiente **Tabla 3.13** muestra los rangos de comportamiento del motor en términos de frecuencia en las diferentes simulaciones realizadas en la investigación. permitiendo observar los intervalos en los que opera el motor con las diferentes configuraciones.

Tabla 3.13 Resultados de frecuencia de cada simulación; sensor vertical

Resultados de frecuencias	
Simulación	Armónico 2
Óptimas condiciones	19.64 Hz – 19.76 Hz
MAF 2.5 V	19.68 Hz – 19.71 Hz
MAF 3.5 V	19.65 Hz – 19.76 Hz
FRP 40.7 MPa	18.16 Hz – 20.6 Hz
FRP 55.7MPa	17.32 Hz – 18.06 Hz
	Armónico 3
Óptimas condiciones	39.39 Hz – 39.47 Hz
MAF 2.5 V	39.35 Hz – 39.45 Hz
MAF 3.5 V	39.05 Hz – 39.51 Hz
FRP 40.7 MPa	36.40 Hz – 40.29 Hz
FRP 55.7MPa	35.26 Hz – 37.27 Hz

En el caso de las frecuencias en el estado óptimo se mantienen dentro del rango de 19.64 Hz a 19.76 Hz para el segundo armónico y en el tercer armónico oscilan entre 39.39 Hz y 39.47 Hz. pero también se observa cierta estabilidad en los dos armónicos durante las simulaciones del sensor MAF. tanto en la señal de 2.5V como en la de 3.5V no muestran diferencias significativas. es decir. se mantienen dentro del rango de 19.64 Hz a 19.76 Hz para el segundo armónico en el tercer armónico se mantiene dentro del rango de 39.05 a 39.51. pero en las simulaciones del sensor FRP muestran una tendencia negativa para los dos armónicos. es decir. a medida que aumenta la presión en el carril la frecuencia disminuye; en el caso de la presión a 40.7 MPa se mantiene dentro del rango de 18.16 a 20.6 en el segundo armónico y el tercer armónico va de 36.40 hasta 40.29. en la última simulación a 55.7 MPa de presión la frecuencia disminuye aún más ya que en el segundo armónico tenemos de 17.32 Hz a 18 Hz en el segundo armónico y en el tercer armónico tenemos de 35.26 Hz a 37.27 Hz.

Como resultado. si el motor se mantiene dentro de un rango de frecuencias de 19.64 Hz a 19.76 Hz en el segundo armónico y de 39.39 Hz a 39.47 Hz en el tercer armónico. el motor está en buenas condiciones para mantener un funcionamiento correcto. pero si éstas caen hasta los 18 Hz en el segundo armónico y bajan en el tercer armónico hasta los 36 Hz. el motor ya es inestable en su funcionamiento. es decir. la avería es grave. mientras que. si la frecuencia cae a 17 Hz en el segundo armónico y a 35 Hz en el tercer armónico. podemos estar seguros de que el motor no puede mantener el ralentí. presenta aceleraciones y deceleraciones muy significativas. es decir. la avería es crítica.

3.3.2 SENSOR HORIZONTAL

A continuación. se presentan la **Tabla 3.14** que muestra los rangos de comportamiento del motor en términos de amplitud en las diferentes simulaciones realizadas en la investigación. permitiendo observar los intervalos en los que opera el motor con las diferentes configuraciones.

Tabla 3.14 Resultados de amplitudes de cada simulación; sensor horizontal

Resultados de amplitudes	
Simulación	Armónico 2
Óptimas condiciones	131.96 - 138.61
MAF 2.5 V	122.06 - 135.40
MAF 3.5 V	111.02 - 147.55
FRP 40.7 MPa	20.11 - 53.20
FRP 55.7MPa	28.09 - 39.54
	Armónico 3
Óptimas condiciones	35.97 - 53.13
MAF 2.5 V	37.01 - 47.76
MAF 3.5 V	37.97 - 47.24
FRP 40.7 MPa	5.4 - 12.96
FRP 55.7MPa	5.79 - 9.24

En la **Figura 3.32**. se ha calculado el promedio de amplitudes para cada una de las simulaciones. Se aprecia que dicho promedio se encuentra mayormente dentro del rango de amplitud expresado en la **Tabla 3.14**.

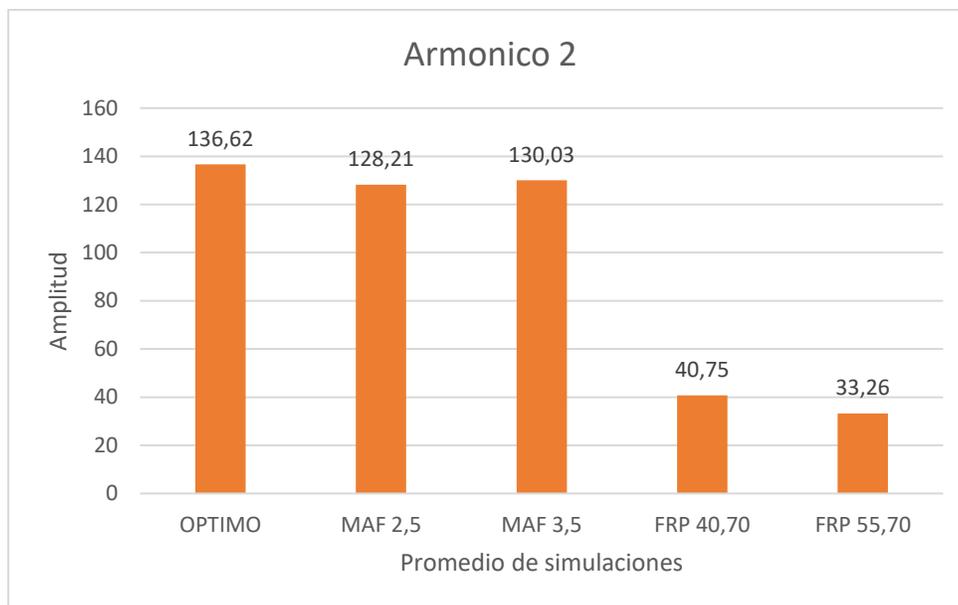


Figura 3.32 Promedio de los armónicos 2 de todas las pruebas y ensayos

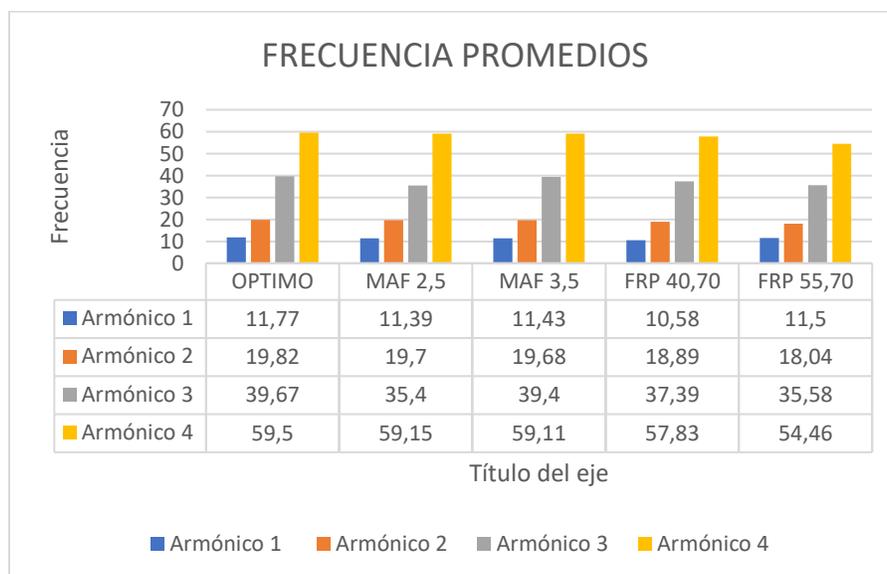
Asimismo. al analizar el armónico 2 de cada prueba. se constata claramente que existen cambios significativos de amplitud entre las distintas simulaciones. Es importante destacar que se observa una marcada diferencia en comparación con las pruebas del FRP ya que. en estas últimas. el ralentí del motor no era estable. lo que generó cambios notorios tanto visuales como sonoros.

En la **Tabla 3.15** se presenta un rango de las frecuencias de los armónicos 1 y 2 de cada una de las simulaciones. permitiendo una mejor lectura del comportamiento de datos al momento de obtener espectros de vibración.

Tabla 3.15 Resultados de frecuencias de cada simulación; sensor horizontal

Resultados de frecuencias	
Simulación	Armónico 2
Óptimas condiciones	19.66 Hz -19.8 Hz
MAF 2.5 V	19.67 Hz -19.76 Hz
MAF 3.5 V	19.65 Hz -19.74 Hz
FRP 40.7 MPa	18.36 Hz -20.17 Hz
FRP 55.7MPa	17.96 Hz -18.09 Hz
	Armónico 3
Óptimas condiciones	39.39 Hz – 39.81 Hz
MAF 2.5 V	39.34 Hz – 39.48 Hz
MAF 3.5 V	39.38 Hz – 39.43 Hz
FRP 40.7 MPa	36.31 Hz – 40.36 Hz
FRP 55.7MPa	34.27 Hz – 35.96 Hz

A continuación, en la **Figura 3.33**, se presentan los promedios de frecuencia obtenidos en cada una de las pruebas realizadas. Se puede observar que estos datos se encuentran dentro de los rangos obtenidos en la **tabla 3.15**, lo que permite diferenciar el nivel de frecuencia específico para cada prueba.

**Figura 3.33** Promedio de frecuencias de pruebas realizadas con sus respectivas simulaciones

CONCLUSIONES

En conclusión, el motor no puede soportar presiones por debajo del ralenti establecido en 38,70 MPa, ya que la falta de presión provoca vibraciones muy elevadas y fuertes sacudidas que pueden dañar los componentes internos y provocar graves averías en el motor.

Se concluye que el motor está en condiciones óptimas si la amplitud del segundo armónico se mantiene entre 228 y 243 para el sensor vertical y entre 131 y 138 para el sensor horizontal, en cuyo caso la frecuencia debe estar entre 19,66 Hz y 19,8 Hz. Cabe señalar que las frecuencias son las mismas para ambos sensores.

Las simulaciones del sensor MAF no mostraron cambios significativos, no obstante, tras el análisis se llegó a la conclusión de que el segundo armónico muestra una tendencia negativa en las amplitudes. Cuando la señal MAF es de 2,5 V, la amplitud del sensor vertical se reduce hasta un 3,9%, quedando en un rango de 218 a 233, mientras que la del sensor horizontal se reduce un 6,5%, quedando en un rango de 122 a 135, respecto a la señal en condiciones óptimas. En cuanto a la frecuencia, no muestra ninguna tendencia, manteniéndose en un rango de 19,65 Hz a 19,76 Hz, lo que indica que es la misma que en condiciones ideales.

En el caso de la señal MAF a 3,5 V, se puede concluir que tiene un mayor efecto porque se reduce el rango de amplitudes, ya que el sensor vertical se reduce un 9,6%, quedando en un rango de 203 a 225, y el sensor horizontal se reduce un 5,06%, quedando en un rango de 111 a 147, estas reducciones son relativas al estado óptimo, lo que indica una clara anomalía en cuanto a amplitudes. Las frecuencias se mantienen en el intervalo de 19,65 Hz a 19,76 Hz, lo que indica que no hay cambios significativos en comparación con el estado ideal.

Las simulaciones con el sensor FRP muestran cambios inmediatos en el motor, esta prueba muestra un fallo obvio del sistema; a una presión de 40.7 MPa, el armónico dos muestras que el motor funciona en un rango de amplitud de 44 y 95 en el sensor vertical y 20 y 53 en el sensor horizontal, estos valores son mucho más bajos que la condición ideal, y en cuanto a las frecuencias trabajan en un intervalo de 18.16 Hz a 20.6 Hz el cual es un rango mucho más amplio y es una muestra que hay inestabilidad en el motor, como resultado no puede mantener una velocidad de ralenti constante.

En conclusión, la simulación más crítica es la del sensor FRP a una presión de 55.7 MPa, este opera en un rango muy bajo en relación con la condición ideal, se mantiene entre 53.48 - 68.31 en el sensor vertical y 28.09 - 39.54, obviamente es muy bajo por lo que el motor acelera y desacelera para mantener la velocidad de ralentí, también la frecuencia se reduce a un rango de 17.32 - 18.09, lo que resulta ser un alto riesgo de falla debido a la inestabilidad del motor.

RECOMENDACIONES

Para implementar un programa de monitoreo basado en vibraciones, se recomienda continuar investigando los diversos sensores en el motor MEC, esto permitirá recopilar más información en tiempo real durante la operación y ayudar a identificar patrones anormales que puedan indicar problemas, para una propuesta de mantenimiento predictivo.

Dado que los resultados de este tipo de investigación son fiables y ayudan a mejorar el mantenimiento de los vehículos, reducir los costes de mantenimiento y evitar averías inesperadas del motor, se recomienda que la industria adopte un mantenimiento preventivo basado en el análisis de vibraciones.

Se recomienda que los datos obtenidos en esta investigación se utilicen en futuros estudios para crear una base de datos que permita diagnosticar el estado del motor en tiempo real con fines de mantenimiento predictivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Agüero, M. (2017). *Sistema de adquisición de datos*.
- Albarracín Méndez, Á. R., & Huiñisaca Quizhpe, J. B. (2015). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA [Mecánica Automotriz]*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Aline Electronics. (2016). *CR508 Common Rail Pressure Tester And Simulator | Aline Electronics Co., Limited*. CR508 Common Rail Pressure Tester and Simulator. <https://www.aline-electronics.com/products/cr508-simulator/>
- Arbel, D., & Kopeika, N. S. (2005). OPTICAL PROCESSING SYSTEMS. *Encyclopedia of Modern Optics, Five-Volume Set*, 69–77. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369395-0/00729-6>
- Bernal, J., Gómez, P., & Bobadilla, J. (199 C.E.). *UNA VISIÓN PRÁCTICA EN EL USO DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER COMO HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL DE LA VOZ*.
- Biswas, S., & Mukhopadhyay, A. (2021). Emission and performance characteristics of CRDI diesel engine using Quadruple injection strategy with different pilots and post injection timing. *Engineering Research Express*, 3(4). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac27fe>
- Blanco Rios, D., & Camacho Pèrez Jonathan De Jesùs. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE INYECTORES A DIESEL*. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.
- Bosch GmbH, R. (2022). *Common-rail system with solenoid injectors*. <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/powertrain/diesel/common-rail-system-solenoid/>
- Cabrera Bravo, P. E., & Ronquillo Ronquillo, R. R. (2016). *Detección de fallas incipientes a través del análisis de vibraciones mediante tiempos cortos en un motor de combustión interna Hyundai Sonata EF 2.0*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Cáceres, J.-P. (2007). *Transformada de Fourier*.

- CADENA RAMÍREZ, W. A. (2022). *ANÁLISIS TERMOGRÁFICO EN MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN*.
- Cárdenas Jarrin, P. P., Cevallos Márquez, A. H., & Moyano Romero, J. C. (2017). *ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA POR MEDIO DE ULTRASONIDO*.
- Castro Zambrano, A. C. (2021). *Diagnóstico y mantenimiento de inyección electrónica diésel Common Rail* [Electromecánica]. Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.
- Consuegra Pacheco, S. (2007). *GUÍA DE ESTUDIO Y ASIGNATURA MOTORES DIESEL*. Instituto Tecnológico de Soledad Atlántico.
- Criollo Jadan, O. R., & Matute Bravo, Héctor M. (2014). *Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diésel por análisis de vibraciones* [Mecánica Automotriz]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Cueva Bedón, J. L., & Geovanny Rolando, P. Z. (2016). *IMPLEMENTACIÓN DE UN TABLERO DIDÁCTICO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL DE RIEL COMÚN APLICADO A LOS CAMIONES PARA EL LABORATORIO DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ*. [Escuela De Ingeniería Automotriz]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Deighton, M. G. (2016). Maintenance Management. *Facility Integrity Management*, 87–139. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801764-7.00005-X>
- Dond, D. K., & Gulhane, N. P. (2021). Effect of a turbocharger and EGR on the performance and emission characteristics of a CRDI small diesel engine. *WILEY*, 1–16. <https://doi.org/10.1002/htj.22350>
- Draghi, L., & Filgueira, R. (2015). *MOTORES DIESEL: CICLO IDEAL Y DIAGRAMA INDICADO*.
- Draghi Roberto Filgueira, L. (2015). *MOTORES DIESEL: CICLO IDEAL Y DIAGRAMA INDICADO*.

- Elizabeth, A., Ramírez, C., Antonio, I. E., & Cedeño, L. (2020). *EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EXPERIMENTAL CON DIFERENTES TIPOS DE GASOLINAS MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS* ii “EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA EXPERIMENTAL CON DIFERENTES TIPOS DE GASOLINAS MEDIANTE PRUEBAS ESTÁTICAS.”
- Enriquez Ugalde, J. M. (2020). *Diagnóstico multi-falla en cadena cinemática utilizando termografía infrarroja y análisis de componentes principales* [Mecatrónica]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Erazo Espinosa, O. E., & Sisalema Ibarra, J. N. (2019). *ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO DEL SISTEMA CRDI DEL MOTOR KIA 2.0L TIPO D4EA.*
- Erazo, O., & Sisalema, J. (2019). *ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO DEL SISTEMA CRDI DEL MOTOR KIA 2.0L TIPO D4EA.*
- Estupiñán, E., San Martín, C., & Solaligue, R. (2006). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS. Rev. Fac. Ing.- Univ. Tarapacá, 14(1), 7–15.*
- Galarza Vega, M. D. (2014). *ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE VIBRACIONES EN VEHÍCULOS LIVIANOS DE COMBUSTIÓN INTERNA.* Escuela Politécnica Nacional.
- Guerrero Quintana, L. M. (2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS INYECTORES MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS DE MOTORES DIÉSEL, CON EL USO DE BIODIÉSEL. CON MEZCLAS B5 Y B1.* [Carrera de Ingeniería en mantenimiento automotriz]. Universidad Técnica Del Norte .
- Guevara Gaibor, M. C., & Landa Díaz, L. M. (2018). *Análisis de vibraciones en el motor de combustión interna J20-A a través de simulación de modos de falla para contribuir el mantenimiento predictivo.*

- Gutiérrez, M., Iñiguez, F. J., Cadena, X., & Santiana, G. (2017). Análisis De Las Vibraciones De Un Motor Ciclo Otto Con Una Mezcla Combustible A Base De Gasolina Y De Etanol. *INNOVA* , 2(10), 138–146.
- Gutiérrez, M., Iñiguez Izquierdo, F., Cadena, X., & Santiana, G. (2017). Análisis De Las Vibraciones De Un Motor Ciclo Otto Con Una Mezcla Combustible A Base De Gasolina Y De Etanol. *INNOVA Research Journal*, 2(10), 138–146.
- Hernandez Perez, C. (2015). *INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ TRABAJO PROFESIONAL Informe Técnico de Residencia Profesional: INGENIERO ELECTRÓNICO PRESENTA*.
- ISO 10816. (2017). *INTERPRETACION DEL ESTANDAR ISO (10816)*.
- Jara Niveló, V. S., & Rodríguez Romero, J. D. (2014). *ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS* [Carrera De Ingeniería Mecánica]. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Liu, J., Li, Y., Zhang, C., & Liu, Z. (2022). The effect of high altitude environment on diesel engine performance: Comparison of engine operations in Hangzhou, Kunming and Lhasa cities. *Chemosphere*, 309, 136621. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.136621>
- Madaan, A., Goel, T., Gupta, B. L., Srivastava, R., & Fuskele, V. (2021). Effect of Pilot and Post Injection Timing on Combustion, Emission and Performance of a Diesel Engine. *RARES* , 1–9.
- MAZDA TRAINING MANUAL. (2006). *Training manual- Mazda BT-50*.
- Nag, S., Dhar, A., & Gupta, A. (2022). Hydrongen-diesel-co-combustion characteristics, vibro- acoustics and unregulated emissions in EGR assited dual fuel engine. *ELSIEVER*, 1–13.
- National Instruments. (2011). *Manual chasis DAQ* (NI cDAQc; 9171).

- National Instruments. (2022, January 12). *SMB-BNC Coaxial Cable - NI*. SMB-BNC Coaxial Cable. <https://www.ni.com/es-cr/support/model.smb-bnc-coaxial-cable.html>
- Noroña, M., & Gómez, M. (2019). *Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil. I*, 117–127. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>
- Ortiz, H., & Barros, M. (2014). *ANÁLISIS DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIRECTA COMMON RAIL EN UN MOTOR MAN*.
- Ortiz Sanmartín, H. F. (2014). *Análisis del sistema de inyección Directa Common Rail En Un Motor Man* [Ingeniería Mecánica]. Universidad del Azuay.
- Pacheco Guerrero, J. P. (2023). *Detección de desbalance y desalineamiento en motores de inducción bajo cargas oscilantes usando corriente y transformada rápida de Fourier*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- PCB Piezotronics, I. (2019). *Model 603C91 Industrial ICP® Accelerometer Installation and Operating Manual* (SN LW244298; 6063C01). www.pcb.com.
- Pedro José, G. M. (2012). *Reprogramación de la Memoria EPROM del vehículo Chevrolet Corsa*.
- Peng, H., Wang, Y., Zhang, X., Hu, Q., & Xu, B. (2022). Optimization of preventive maintenance of nuclear safety-class DCS based on reliability modeling. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(10), 3595–3603. <https://doi.org/10.1016/J.NET.2022.05.011>
- Quintana, E., & Flores, K. (2022). *SIMULACIÓN DE SEÑALES PARA UN DIAGNÓSTICO EN LOS SENSORES Y ACTUADORES DE FLUJO DE AIRE Y COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DIÉSEL*.
- Quintana, S. J. E., & Flores Basantes, K. A. (2022). *SIMULACIÓN DE SEÑALES PARA UN DIAGNÓSTICO EN LOS SENSORES Y ACTUADORES DE FLUJO DE AIRE Y COMBUSTIBLE DE UN MOTOR DIÉSEL*. [Ingeniería En Mantenimiento Automotriz]. Universidad Técnica Del Norte.

- Reyes Cualchi, J. P. (2018a). *DIAGNÓSTICO DE MOTORES DIÉSEL ELECTRÓNICOS, A BASE DE PRESIONES EN EL RIEL COMÚN (CRDI)*.
- Reyes Cualchi, J. P. (2018b). *DIAGNÓSTICO DE MOTORES DIÉSEL ELECTRÓNICOS, A BASE DE PRESIONES EN EL RIEL COMÚN (CRDI)* [CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ]. Universidad Técnica Del Norte.
- Rodríguez Matienzo, J. (2018). Diagnosis of IC Engines using vibrations. *Ingeniería Mecánica*, 21(2), 82–92.
- Rojas, L., Engativá, L., & Andrea Ramírez, M. (2019). *Análisis de Aceite un Enfoque Explicativo en Muestras Reales*.
- Roque, D. I., Casallas Morales, A. I., Comayan, J., & Ospina, cristian. (2018). *EMPRESA RECTIFICADORA DE MOTORES (BOGOTA-COLOMBIA) EDESING A SYSTEM OF ENVIROMENTAL MANAGEMENT IN THE COMPANY RECTIFER MOTORS IN BOGOTA COLOMBIA*.
- Sánchez Gómez, A. M. (2017). *TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. METODOLOGIA DE APLICACIÓN EN LAS ORGANIZACIONES* [Ingeniería Industrial]. Universidad Católica de Colombia .
- Santuario Díaz, J. M., Ferrera Cuervo, A., & López Arias, V. M. (2003). *EXPOSICIÓN A VIBRACIONES GLOBALES EN MAQUINARIA DE OBRA PÚBLICA*.
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades-2021-2025 Aprobado*.
- Taghizadeh-Alisarai, A., & Mahdavian, A. (2019). Fault detection of injectors in diesel engines using vibration time-frequency analysis. *Applied Acoustics*, 143, 48–58. <https://doi.org/10.1016/J.APACOUST.2018.09.002>
- Villanueva Rojas, J. I. (2020). *DETECCIÓN DE FALLAS EN SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN MOTOR DIÉSEL, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES TORSIONALES EN EL EJE CIGÜEÑAL*.
- White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. www.AzimaDLI.com

