



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**DETECCIÓN DE FALLAS DE SENSORES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE
RIEL COMÚN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESION
MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE VIBRACIONES EN EL
BLOQUE MOTOR AL NIVEL DEL CIGÜEÑAL, EN LA UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: CARLOS ISAAC ORELLANA PESÁNTEZ

YORMAN JAHIR YAGUAL VILLACIS

TUTOR: ING. MARCELO XAVIER ESTRELLA GUAYASAMÍN, PhD

Guayaquil – Ecuador

2023

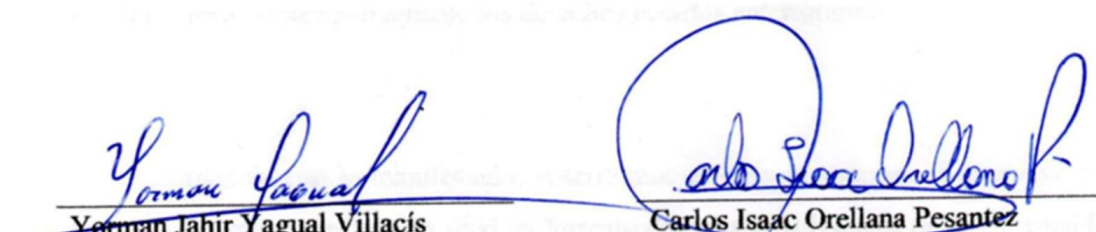
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Yorman Jahir Yagual Villacís con documento de identificación N° 0923777700 y Carlos Isaac Orellana Pesantez con documento de identificación N° 0940958036 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 19 de marzo del año 2023

Atentamente,



Yorman Jahir Yagual Villacís
0923777700

Carlos Isaac Orellana Pesantez
0940958036

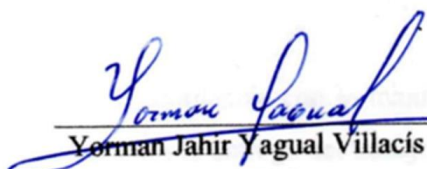
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

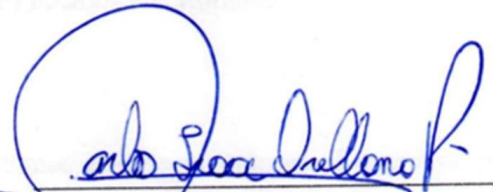
Nosotros, Yorman Jahir Yagual Villacís con documento de identificación N° 0923777700 y Carlos Isaac Orellana Pesantez con documento de identificación N° 0940958036 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Detección de fallas de sensores del sistema de inyección de riel común de un motor de encendido por compresión mediante el análisis del espectro de vibraciones en el bloque motor al nivel del cigüeñal, en la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz , en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de marzo del año 2023

Atentamente,


Yorman Jahir Yagual Villacís
0923777700


Carlos Isaac Orellana Pesantez
0940958036

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ing. Marcelo Xavier Estrella Guayasamín, PhD con documento de identificación N° 1714460761, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DETECCIÓN DE FALLAS DE SENSORES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE RIEL COMÚN DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESION MEDIANTE EL ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE VIBRACIONES EN EL BLOQUE MOTOR AL NIVEL DEL CIGÜEÑAL, EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL, realizado por Yorman Jahir Yagual Villacís con documento de identificación N° 0923777700y por Carlos Isaac Orellana Pesantez con documento de identificación N° 0940958036, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 19 de marzo del año 2023

Atentamente,



Marcelo Xavier Estrella Guayasamín

1714460761

DEDICATORIA

En este trabajo de titulación quiero dedicar mi agradecimiento a mi Padre Celestial quien ha sido ese pilar fundamental en mi vida para seguir avanzando en todo este camino largo de cinco años de estudios y quien me ayudó y respaldó siempre desde el primer semestre hasta este decimo semestre. Este logro fue posible gracias a la ayuda de mi familia, por lo consiguiente quiero extender mi agradecimiento a mi madre Sonia Villacís, mi padre Jorge Yagual, mi tía Lorena Villacís y Fidelina Villacís; quienes desde un principio me brindaron su apoyo y motivación para seguir adelante en mi carrera universitaria, y que es muy gratificante para mí no haberlos defraudado y cumplir con su anhelo de convertirme un profesional.

Yorman Yagual

El siguiente trabajo de titulación se lo dedico a Dios, ya que él fue mi ayuda durante esto cinco años de estudios tanto en lo económico como en lo de conocimiento, a mis padres Nancy Pesantez y Carlos Julio Orellana, quienes día a día me apoyaron a no rendirme y a mi hermana Raquel Orellana que ha sido mi mayor ejemplo de lucha y perseverancia. ¡A Dios sea la gloria por lo que ha hecho en mí!

Carlos Orellana

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento hacia nuestro tutor de tesis, el ingeniero Marcelo Estrella, PHD, por su confianza, guía y correcciones que fueron esenciales para culminar nuestro trabajo de titulación con éxito. Asimismo, agradecemos a la Dra. Mary Vergara por sus consejos, apoyo y sobre todo por su motivación como docente. De igual manera, deseamos expresar nuestra gratitud al Ing. Roberto López por su colaboración y asistencia en todas las etapas del proceso. Su compromiso y dedicación fueron un gran aporte para obtener resultados valiosos y confiables. Por último, queremos reconocer la labor del Ing. Renato Fierro, director de la carrera, quien ha sido un apoyo constante en todo momento. Su orientación, motivación y respaldo fueron fundamentales para alcanzar el éxito en esta etapa académica. Estamos profundamente agradecidos con Dios, quien renovó nuestras fuerzas para no rendirnos y avanzar hasta cumplir esta meta propuesta con excelencia, guiados por Él.

Hubiera yo desmayado, si no creyese que veré la bondad de Jehová En la tierra de los vivientes. (Salmos 24:13)

Carlos Orellana

Yorman Yagual

RESUMEN

El proyecto que presentamos se enfoca en la detección de fallas en componentes electrónicos del motor Diesel CRDI 2.2 a través del análisis de vibraciones producidas. El objetivo es asociar el espectro que se produce por cada tipo de falla específica, para así poder identificar rápidamente el origen de la falla.

Para lograr esto, se establecieron los parámetros del espectro de vibraciones del motor en condiciones normales de funcionamiento, bajo tres regímenes de carga, utilizando como punto de referencia la altura del cigüeñal. Se obtuvieron los espectros de vibraciones inducidos por fallas en el sensor de temperatura del refrigerante del motor, presión del múltiple de admisión y sensor de presión del riel de combustible, mediante la inducción de fallas independientes en cada uno de estos sensores. Posteriormente, se depuraron los datos y se separaron en bloques contadores para mejorar el proceso de análisis en un menor tiempo posible.

Finalmente, se realizó un agrupamiento de datos que reúne las ocho amplitudes a las cuales se calculó una mediana compuesta, para caracterizar los espectros de vibraciones encontrados al inducir las fallas y compararlos con los espectros en condiciones normales del motor. Este análisis permitirá identificar las variaciones existentes entre los espectros y asociarlas con las fallas específicas, lo que resultará en una detección más rápida y precisa de las fallas en los componentes electrónicos del motor Diesel CRDI 2.2.

Palabras Claves: Motor Diesel, sensores, fallas inducidas, espectro de vibración, cigüeñal

ABSTRAC

The project that we present focuses on the detection of faults in electronic components of the CRDI 2.2 Diesel engine through the analysis of vibrations produced. The objective is to associate the spectrum that is produced by each type of specific failure, to quickly identify the origin of the failure.

To achieve this, the parameters of the engine's vibration spectrum were established under normal operating conditions, under three load regimes, using the crankshaft height as a reference point. Vibration spectra induced by failures in the engine coolant temperature sensor, intake manifold pressure, and fuel rail pressure sensor were obtained by inducing independent failures in each of these sensors. Subsequently, the data was purified and separated into counting blocks to improve the analysis process in the shortest possible time.

Finally, a grouping of data was carried out that gathers the five amplitudes at which a composite median was calculated, to characterize the vibration spectra found when inducing the failures and compare them with the spectra under normal engine conditions. This analysis will make it possible to identify the existing variations between the spectra and associate them with specific failures, which will result in a faster and more accurate detection of failures in the electronic components of the 2.2 CRDI Diesel engine.

Keywords: Diesel engine, sensors, induced faults, vibration spectrum, crankshaft.

INDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria	iv
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstrac	viii
Glosario	xi
Índice de figuras	xi
Índice de tablas.....	xiv
Índice de ecuaciones	xv
1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.2 Problema	2
1.3 Objetivos generales y específicos	7
Objetivo general	7
Objetivo específico.....	7
2. CAPÍTULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS	
TEÓRICOS	8
2.1 Motor Diesel.....	8
2.2 Componentes basicos del Motor Diesel	8
2.3 Sistemas del Motor Diesel	9
2.5 Sistema de inyección de combustible de riel común (CRDI)	10
2.6 Funcionamiento del sistema de inyeccion Diesel CRDI.....	11
2.7 Componentes del sistema de inyeccion Diesel CRDI.....	12
2.8 Unidad electrónica de control	13
2.9 Sensores del motor en el sistema de inyeccion	13
2.10 Vibraciones	17
2.11 Normativa.....	18
2.12 Análisis de una señal	21
2.13 Instrumentación y adquisición de datos para la evaluación de la vibración en máquinas	23
2.14 Diseño de experimento.....	24
2.14.1 Fases del diseño de experimento.....	24
3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLOGICO	26
3.1 Diseño de la investigacion	26
3.2 Recoleccion de datos.....	27

3.4 Proceso para la adquisicion de datos.....	33
3.5 Aplicación de la depuración de datos en la análisis del espectro de vibración...	40
3.6 Ajuste del software Minitab para el procesamiento estadístico de datos.....	43
3.7 Caracterización del espectro de vibraciones mediante el uso del software Minitab	47
3.8 Cronograma.....	50
3.9 Presupuesto	50
4. CAPITULO IV.....	52
4.1 ANALISIS DE LOS ESPECTROS CARACTERISTICOS	52
4.1.2 Espectro ca racteristicos en condicion de falla del sensor ECT a 790, 1800 y 2500 RPM	55
4.1.3 Espectro caracteristicos en condicion de falla del sensor MAP a 790, 1800 y 2500 RPM	56
4.1.4 Espectro caracteristicos en condicion de falla del sensor RPS a 790, 1800 y 2500 RPM	58
4.2Comparativa de los espectros de vibracion en condicion normal vs falla	59
4.2.1 Condicion normal vs falla del sensor ECT 790 RPM	59
4.2.1.1 Condicion normal vs falla del sensor ECT 1800 RPM	63
4.2.1.2 Condicion normal vs falla del sensor ECT 2500 RPM	64
4.2.2 Condicion normal vs falla del sensor MAP 790 RPM	65
4.2.2.1 Condicion normal vs falla del sensor MAP 1800 RPM	67
4.2.2.3 Condicion normal vs falla del sensor MAP 2500 RPM	69
4.2.3 Condicion normal vs falla del sensor RPS 790 RPM	71
4.2.3.1 Condicion normal vs falla del sensor RPS 1800 RPM	72
4.2.3.1.1 Condicion normal vs falla del sensor RPS 2500 RPM	74
4.3 Tabla de resultados.....	75
5. CAPÍTULO V.....	77
5.1 Conclusiones	77
5.2 Recomendaciones.....	78
REFERENCIAS	79
ANEXO.....	82
ANEXO 2.....	87

GLOSARIO

ECU: Engine Control Unit

FFT: Transformada Rápida de Fourier

ISO: International Organization for Standardization

RPS: Sensor de presión del riel de combustible

MAP: Sensor de presión del múltiple de admisión

ECT: Sensor de temperatura del refrigerante de motor

CRDI: Inyección directa por conducto común

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Numero de vehículos matriculados durante el periodo 2012 – 2021 en el Ecuador	4
Figura 2 Numero de vehículos matriculados en las principales provincias del Ecuador.....	5
Figura 3 Componentes principales del motor	8
Figura 4 Componentes del sistema common rail	11
Figura 5 Componentes del sistema CRDI	12
Figura 6 Sensor de temperatura del refrigerante ECT	14
Figura 7 Sensor de presión absoluta en el múltiple (MAP).....	15
Figura 8 Sensor de presión del riel (RPS).....	17
Figura 9 Ubicación del sensor en el motor Diesel	20
Figura 10 Representación del tiempo vs frecuencia	22
Figura 11 Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.....	22
Figura 12 Proceso para adquisición de datos	23
Figura 13 Fases del diseño de experimento	24
Figura 14 Fases del diseño de experimento durante el desarrollo del proyecto.....	25
Figura 15 Etapas del diseño experimental	26
Figura 16 Diseño de experimentos	27
Figura 17 Resultado del cálculo de la desviación estándar	30
Figura 18 Tamaño de muestra adecuado para la estimación.....	31
Figura 19 Configuración del software para la obtención del tamaño de muestra.....	31
Figura 20 Resultado del tamaño de muestra	31

Figura 21 Flujograma de procesos para adquisición de datos.....	34
Figura 22 Equipo Dewesoft	36
Figura 23 Punto de referencia para la toma de datos de vibración en el motor	36
Figura 24 Configuración de los canales del software	37
Figura 25 Configuración de los canales de medición del software.....	37
Figura 26 Configuración de la medición del software	38
Figura 27 Configuración de la aceleración los canales de medición del software.....	38
Figura 28 Transformada rápida de Fourier.....	39
Figura 29 Configuración de canales para la adquisición de datos	39
Figura 30 Vista previa de FFT de datos	39
Figura 31 Datos del espectro de vibración.....	40
Figura 32 Datos del espectro de vibración separados por bloques contadores.....	41
Figura 33 Datos del espectro de frecuencia y amplitud.....	42
Figura 34 Prueba de la normalidad en Minitab.....	43
Figura 35 Grafica de la normalidad en Minitab.....	44
Figura 36 Prueba de Wilcoxon en Minitab	45
Figura 37 Selección de datos para realizar la estadística de Wilcoxon en Minitab.....	45
Figura 38 Creador de graficas en Minitab.....	48
Figura 39 Grafica de serie de tiempo en Minitab.....	49
Figura 40 Caracterización del espectro de vibración	49
Figura 41 Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 790 RPM	53
Figura 42 Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 1800 RPM	54
Figura 43 Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 2500 RPM	54
Figura 44 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 790 RPM	55
Figura 45 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 1800 RPM.....	55
Figura 46 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 2500 RPM	56
Figura 47 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor MAP en 790 RPM	56
Figura 48 Caracterización del espectro de en falla del sensor MAP en 1800 RPM	57
Figura 49 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor MAP en 2500 RPM	57

Figura 50 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 790 RPM	58
Figura 51 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 1800 RPM.....	58
Figura 52 Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 2500 RPM.....	59
Figura 53 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor ECT en falla vs normal a 790 RPM.....	60
Figura 54 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor ECT en falla vs normal a 790 RPM.....	60
Figura 55 Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM.....	61
Figura 56 Análisis comparativo 4 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM	61
Figura 57 Análisis comparativo 5 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM.....	62
Figura 58 Desfase de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM	62
Figura 59 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 1800 RPM	63
Figura 60 Análisis comparativo 2 de la amplitud de los sensores en falla ECT vs normal a 1800 RPM	63
Figura 61 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 2500 RPM	64
Figura 62 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 2500 RPM	65
Figura 63 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 790 RPM	66
Figura 64 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500 RPM.....	66
Figura 65 Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 790 RPM	67
Figura 66 Análisis comparativo 1 de la amplitud de los sensores en falla MAP vs normal a 1800 RPM	68
Figura 67 Análisis comparativo 2 de la amplitud de los sensores en falla MAP vs normal	

a 1800 RPM.....	68
Figura 68 Desfase de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 1800 RPM	69
Figura 69 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500RPM	70
Figura 70 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500RPM.....	70
Figura 71 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor RPS en falla vs normal a 790 RPM	71
Figura 72 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor RPS en falla vs normal a 790 RPM	71
Figura 73 Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 790 RPM	72
Figura 74 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 1800 RPM	73
Figura 75 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 1800 RPM	73
Figura 76 Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM	74
Figura 77 Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM	75
Figura 78 Desfase de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación a nivel de Latinoamérica sobre el número de vehículos en circulación.....	4
Tabla 2 Sistemas auxiliares del motor Diesel.....	9
Tabla 3 Descripción de los puntos y dirección de medición.....	20
Tabla 4 Matriz de variables.	27
Tabla 5 Herramientas para recolección de datos.....	28
Tabla 6 Características del Acelerómetro.....	29
Tabla 7 Tamaño de diseño de experimento del sensor ECT.....	32
Tabla 8 Resultados de la estadística de Wilcoxon.....	46

Tabla 9 Mediana compuesta a los datos.....	48
Tabla 10 Cronograma de actividades a desarrollarse.....	50
Tabla 11 Presupuesto referencial para el proyecto.....	50
Tabla 12 Bitácora previo a la toma de datos.....	52
Tabla 13 Tabla de resultados.....	76
Tabla 14 Comparativa de resultados de los 3 sensores a 790 RPM	87
Tabla 15 Comparativa de resultados de los 3 sensores a 1800 RPM	88
Tabla 16 Comparativa de resultados de los 3 sensores a 2500 RPM	89

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	23
--	----

1 CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En 1892, Rudolf Diesel patentó un motor alternativo de encendido por compresión (MEC) en el que sustituyó el combustible de carbón pulverizado por derivados líquidos del petróleo, Hernandez Lopez (2006) menciona que para ello primero modificó algunas partes mecánicas del motor a gasolina. Con este antecedente, Rudolf desarrolló un motor prototipo en 1895. Los motores diésel, al igual que los motores de gasolina, son motores alternativos endotérmicos de combustión interna, es decir, la conversión de energía se realiza dentro del cilindro. Los motores Diesel se caracterizan por su sistema de alimentación, la forma en que efectúan la combustión la cual es mediante compresión, esto permite al motor trabajar a muy altas presiones que se traduce en ventajas relacionadas a, su rendimiento, lo que conlleva a una reducción de consumo de combustible aumentando así su eficiencia en comparación a los motores a gasolina.

Eduardo (2010) indica que el mantenimiento de los motores es fundamental puesto que, con un correcto plan de mantenimiento, el motor podría alcanzar una larga vida útil sin reducir su eficiencia. Estos planes de mantenimiento (preventivo, predictivo y correctivo) no son independientes entre sí, sino que pueden complementarse entre ellos. Teniendo en cuenta que todo el proceso se basa en la probabilidad de falla.

Todas las máquinas tienen su propia señal de vibración y estas contienen información sobre cada componente. Por tanto, la señal de vibración captada por un acelerómetro es la suma vectorial de las vibraciones de sus componentes. Sarmiento (2004) indica que la base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales, que representan la forma más simple de oscilación pura. En ingeniería, las vibraciones por lo general ocurren espontáneamente, representan un comportamiento dinámico libre y natural y, a menudo, son forzadas a entrar en los sistemas por alguna forma de excitación.

El análisis de señales de vibración en el dominio de la frecuencia es una alternativa para este proyecto de tesis, debido a que, mediante las fallas provocadas en los sensores, se producirá un espectro de vibración donde se lo asociará con su origen, donde la amplitud está relacionada con la frecuencia, lo que se denomina espectro de frecuencia. Tal como indican Angamarca y Soto (2015) en el análisis, las muestras se pasan a través de varios filtros para obtener una serie de señales sinusoidales simples, representadas en el eje x de

la frecuencia, que se obtienen mediante una transformada rápida de Fourier (FFT). Granda y Granda (2022) mencionan que la transformada rápida de Fourier (FFT) es un proceso donde una porción limitada en el tiempo de la señal se descompone en sus componentes. Estas componentes son oscilaciones sinusoidales simples de frecuencias discretas cuya amplitud y fase están determinadas, permitiendo así ver la señal en el dominio de la frecuencia.

Por lo tanto, en el siguiente trabajo de investigación se busca detectar fallas mediante el análisis de vibraciones producidas por fallas inducidas en los componentes electrónicos del motor Diesel CRDI 2.2 de una maqueta didáctica de la Universidad Politécnica Salesiana con el fin de determinar el espectro que se produce por su origen específico y de esta manera proveer una herramienta para la localización de fallas. Para esto, primero se establecerá los parámetros del espectro de vibraciones que caracterizan al motor en las condiciones normales de funcionamiento, después se establecerá los parámetros del espectro de vibraciones que se obtienen al inducir una falla en los sensores de: temperatura del refrigerante de motor (ECT), presión del múltiple de admisión (MAP) y sensor de presión del riel de combustible (RPS). Finalmente, se analizará las variaciones existentes del espectro de vibraciones encontradas al inducir las fallas en los componentes electrónicos versus las condiciones normales del motor y de esta manera caracterizar el espectro que servirá como herramienta para la localización de estas fallas. Para el análisis se utilizará métodos estadísticos. Cabe indicar que los datos del espectro de vibración serán tomados a partir de las fallas mencionadas de manera independiente y colocando el sensor del acelerómetro a la altura del cigüeñal, como lo indica la normativa ISO 10816-6. Todo lo mencionado se realizará en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

1.2 PROBLEMA

Descripción del problema

Los motores Diesel son frecuentemente utilizados en el transporte de mercancías debido a sus características de alta confiabilidad, durabilidad y alto torque a baja velocidad. Por este motivo, es primordial mantenerlos en óptimas condiciones con el fin de evitar el paro innecesario de la cadena de suministro. Los fallos más comunes en los motores modernos son los que se producen en el sistema de inyección, debido a que por su trabajo están sujetos a vibraciones de todo tipo que afectan el conexionado de los sistemas de control,

lo que afecta el funcionamiento normal y genera fallas en la dosificación de combustible. (BOSCH, 2005)

Leónidas (2012) en su estudio referente a sistemas de mantenimiento, indica que al producirse un paro no programado (averías mecánicas) de una unidad de transporte se interrumpe la cadena de suministro, lo que conlleva a pérdidas económicas, aumentando el costo de reparaciones. Por tal razón, una de las propuestas para poder extender la vida útil de los equipos, mejorar su confiabilidad y eficiencia, es disponer y ejecutar planes de mantenimientos. Tal como menciona Duffuaa (2013) en ellos se lleva a cabo los tres tipos de mantenimientos más conocidos que son: los mantenimientos preventivos, predictivos y correctivos.. En el estudio realizado por Guevara (2019), él considera que, debido al avance tecnológico, el análisis de vibraciones es una herramienta que permite diagnosticar el estado de las máquinas y sus componentes a través del estudio de los espectros de frecuencia y así poder llevar a cabo un diagnóstico predictivo de la pieza que está siendo evaluada permitiendo programar el paro respectivo para su reparación. Al entender cómo se comporta un espectro de vibraciones y cada uno de sus componentes, nos podría ayudar en el mantenimiento de un motor, ya que una falla en alguno de los sensores del sistema de inyección podría producir una variación de los espectros de frecuencia, la misma que podría ser identificada y caracterizada con el fin de facilitar el diagnóstico. Si analizamos el comportamiento de una falla del sensor de presión del riel de combustible (RPS), sea que no envía señal a la ECU o envía una señal errónea esta no podrá realizar la dosificación exacta de combustible generando así un desbalance de los cilindros, que se traduce en pérdida de potencia y vibración (avance, 2019) Por otra parte, una falla en el sensor de presión absoluta en el múltiple (MAP) podría informar una entrada de cantidad de aire incorrecta a la ECU, produciendo un aumento del consumo del combustible, y nuevamente un desbalance en los cilindros (Automotriz S. M., 2020)

Finalmente, una falla en el sensor de temperatura del refrigerante (ECT) notificará valores erróneos a la ECU , haciendo que esta determine que el motor se encuentra en etapa de enfriamiento, lo que se traduce en un incremento en los tiempos de inyección y, por lo tanto, un aumento en el consumo de combustible (Automotriz S. E., 2019).

- **Antecedentes**

El parque automotor en el Ecuador ha alcanzado valores muy altos, tanto así que el INEC en su estudio muestra que actualmente somos el cuarto país con mayor número de

vehículos por cada 1000 habitantes en toda Latinoamérica, como se puede observar en la Tabla 1. (INEC, 2022).

Tabla 1

Comparación a nivel de Latinoamérica sobre el número de vehículos en circulación

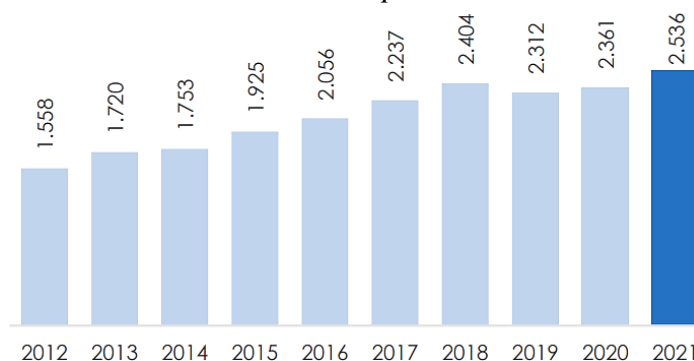
País	Parque automotor	Población total	Vehículos por 1.000 habitantes
Colombia	17.020.451	51.265.841	332
Chile	6.102.351	19.212.362	318
Bolivia	2.226.662	11.832.936	188
Ecuador	2.535.853	17.751.277 ³	143
Perú	3.186.730	33.359.416	96

Tomado de (INEC, 2022)

Así mismo, la investigación realizada por el Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censo (INEC) durante el periodo 2012-2021 reportó un crecimiento promedio anual del 5,6% del parque automotor en el Ecuador, lo que representa la cantidad de 977.695 unidades, alcanzando así un total de 2.535.853 vehículos matriculados en el Ecuador durante este periodo, Figura 1. (INEC, 2022)

Figura 1

Número de vehículos matriculados durante el periodo 2012 – 2021 en el Ecuador



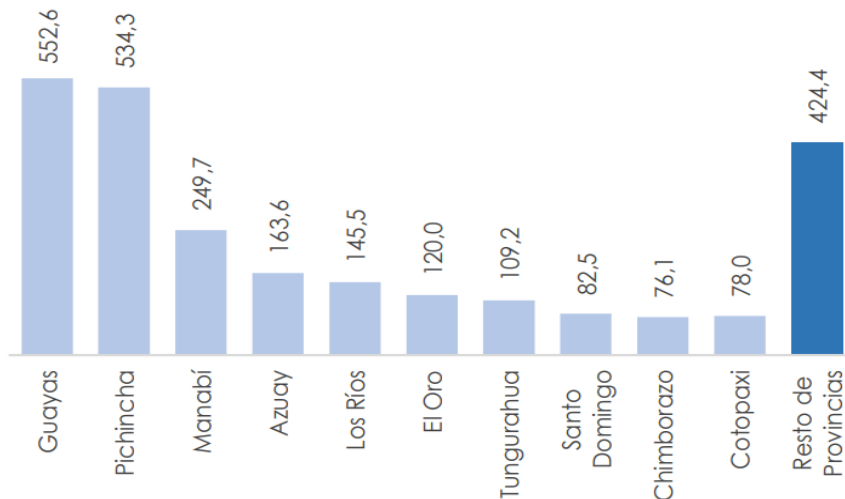
Tomado de (INEC, 2022)

Por otra parte, la Agencia Nacional de Tránsito reporta que el número de vehículos matriculados en la provincia del Guayas al término del año 2021 alcanzó el 21,8% del total nacional, con 552.569 vehículos motorizados (Figura 2), convirtiéndose en la provincia con mayor número de vehículos en el país, seguido por la provincia de

Pichincha con un total de 534.278 vehículos. (ANT, 2021).

Figura 2

Número de vehículos matriculados en las principales provincias del Ecuador



Tomado de (ANT, 2021)

Según Guevara (2019) el sector del transporte automotor es muy importante para la economía del país, puesto que abarca un sector con la mayor rentabilidad debido a la relación costo-distancias. Por ello, es imprescindible llevar a cabo inspecciones periódicas y realizar el mantenimiento adecuado de los equipos, vehículos o maquinaria, para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. En el trabajo elaborado por Pernia (2004), se describen las diferentes técnicas e instrumentación que existen en la actualidad para realizar mediciones de vibraciones mecánicas en diferentes sistemas o maquinaria. En este sentido, el dispositivo más común encontrado para la detección de vibraciones es el acelerómetro, que realiza mediciones espaciales o de desplazamiento/aceleración en los ejes X, Y, Z.

Las fallas causadas por las vibraciones producen un mayor desgaste acelerado en los rodamientos, desgaste en el soporte y en otros componentes. Rao (2012) menciona que causando la reducción de la vida útil en los motores alternativos. Es por lo que el estudio de las vibraciones es sumamente relevante como herramientas para un mantenimiento predictivo.

- **Importancia y alcances**

Es importante destacar la necesidad de caracterizar los espectros de vibraciones a diferentes niveles de carga del motor en condiciones normales de funcionamiento, con la finalidad de identificar las variaciones en sus espectros y de esta manera identificar los espectros de fallas específicas, proporcionando una base de datos que permitirá la rápida localización de averías sin una mayor intervención en el motor y así contribuir con herramientas para realizar un buen diagnóstico por parte de los involucrados en el área del mantenimiento.

En el presente proyecto se analizará los espectros de vibración producido por fallas independientes inducidas en los siguientes sistemas: Sensor de temperatura del refrigerante de motor (ECT), Sensor de presión del múltiple de admisión (MAP) y sensor de presión del riel de combustible (RPS).

Estos resultados se obtendrán en condiciones de funcionamiento normal y con fallo On – Off, es decir funciona o no funciona el componente, considerando tres regímenes de carga: ralentí, media carga y carga completa. El presente estudio de investigación será de beneficio primero para los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Guayaquil que deseen relacionarse al estudio investigativo experimental referente a las vibraciones. Segundo, los docentes de la materia de ingeniería de mantenimiento, puesto que proveerá una base de datos para el análisis y prevención de fallas en este tipo de motores Diésel. Finalmente, la información podrá ser de utilidad para las personas involucradas en el área de mantenimiento preventivo y/o correctivo.

- **Delimitación**

Espacial

En el siguiente proyecto se requiere analizar el espectro de vibraciones provocadas en el motor Diesel CRDI 2.2 para identificar los parámetros que caracterizan las fallas producidas en el banco de prueba de la Universidad politécnica Salesiana, sede Guayaquil. Campus Centenario.

Temporal

La implementación del proyecto técnico está prevista a elaborarse desde noviembre 2022 a marzo 2023 dentro del periodo académico número 61.

Académico

El presente proyecto propuesto de investigación se llevará a cabo en cumplir con lo exigido por la Universidad Politécnica Salesiana con el grado investigativo, técnico y estructural para la debida presentación del trabajo de titulación requerido por la carrera de Ingeniería Automotriz.

1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar las fallas de sensores del sistema de inyección de un motor de encendido por compresión de riel común (CRDI), a través del análisis del espectro de vibraciones que se producen en él, al nivel del cigüeñal.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Desarrollar una metodología para la medición del espectro de vibraciones que caractericen al motor de encendido por compresión de riel común (CRDI), en condiciones normales de funcionamiento y falla, tomadas en el bloque de motor al nivel del cigüeñal, bajo tres condiciones de carga.
- Obtener los espectros de vibraciones del motor de encendido por compresión de riel común (CRDI) al inducir una falla en los sensores de temperatura del refrigerante de motor (ECT), presión absoluta del múltiple de admisión (MAP) y sensor de presión del riel de combustible (RPS), según la metodología desarrollada.
- Analizar y caracterizar los espectros de vibraciones en el dominio de la frecuencia, en función de la falla inducida, en los sensores MAP, ECT y RPS del motor de encendido por compresión de riel común (CRDI).

2. CAPÍTULO II REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 MOTOR DIESEL

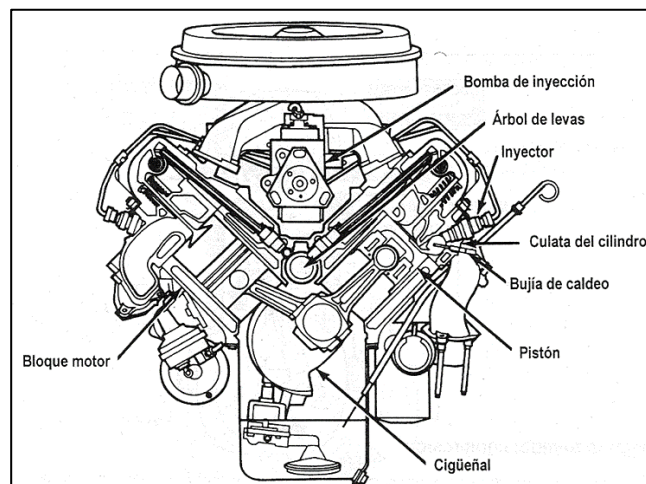
Según Pacheco (2007), Un motor Diesel es un motor térmico de combustión interna cuyo encendido se logra por el incremento de la temperatura producto de la compresión del aire en el cilindro, la temperatura alcanzada supera la temperatura de autoignición del combustible siendo innecesario una chispa para que se produzca. La temperatura que inicia la combustión proviene del incremento de presión que se produce durante la compresión en la segunda carrera del motor. En la parte superior de la cámara de compresión se inyecta Diesel a alta presión, el cual se atomiza y se mezcla con aire a alta temperatura y presión. Esta combustión hace que los gases en la cámara de combustión se expandan, empujando el pistón hacia abajo. La biela transmite este movimiento al cigüeñal, que gira, convirtiendo el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación.

2.2 COMPONENTES BASICOS DEL MOTOR DIESEL

Como menciona Caiza Jacome (2007), los principales componentes necesarios para llevar a cabo el proceso de combustión, como se ve en la Figura 3 ,son: bloque motor, culata o culata, brazos de biela, cigüeñal, pistones, camisas de cilindros, conjunto de tren de válvulas y volante de inercia.

Figura 3

Componentes principales del motor.



Nota. Tomado de (Caiza Jacome, 2007)

El bloque motor es el principal elemento estructural que alberga el resto de los componentes y sistemas que componen el motor. Este bloque proporciona la forma básica del cilindro, sobre el cual se encuentra la culata. La culata contiene las válvulas de admisión y escape, los inyectores de combustible y los árboles de levas. Cuando se produce la combustión se crea una onda de expansión que genera empuje en la zona superior del pistón. Esto transfiere movimiento a la biela, que a su vez transfiere movimiento al cigüeñal. Según señala Caiza Jacome (2007), el conjunto del tren de válvulas controla alternativamente la apertura y el cierre de la válvula de admisión y la válvula de escape, lo que permite que entre aire en la cámara de combustión y descargue el gas quemado. La bomba de inyección es aquella que produce alta presión para que así el combustible sea pulverizado cuando pasa a través del inyector el cual está ubicado en la culata.

2.3 SISTEMAS AUXILIARES DEL MOTOR DIESEL

De acuerdo con Acosta y Torrado (2000) el motor Diesel para su proceso de combustión requiere tres elementos que son el combustible, oxígeno (aire) y calor. El funcionamiento del motor se realiza a través de unos mecanismos y componentes, que debido a las funciones diversas que realizan, se denominan sistemas, como se aprecia en la Tabla 2 y estos son:

Tabla 2

Sistemas auxiliares del motor Diesel

SISTEMA	FUNCIÓN
Admisión de aire	Proporcionar aire limpio para ayudar a la combustión.
Combustible	Suministrar el suficiente combustible en el momento preciso, de acuerdo con las condiciones de funcionamiento del motor.
Escape	Constituye el conducto por el cual salen los gases de combustión a la atmosfera.
Lubricación	Disminuir la fricción entre los componentes móviles del motor. Enfriar y limpiar los componentes móviles.
Enfriamiento	Extraer del motor el calor producido por la combustión y por la fricción de los componentes móviles del motor.

2.4 SISTEMA DE INYECCION ELECTRONICA

Según Gil (2002), el sistema de inyección electrónica consiste en un sistema controlado electrónicamente que regula la dosificación del diésel y la mezcla de aire y combustible. A diferencia de los sistemas de inyección accionados por el motor, este sistema utiliza un encendido digital que permite el funcionamiento sincronizado con las diferentes condiciones de trabajo del motor. Su principal objetivo es proporcionar un equilibrio óptimo a través del riguroso control de la mezcla de aire y combustible y del ángulo de encendido en cualquier situación. El uso de este sistema mejora el rendimiento, facilita el arranque y reduce las emisiones de gases contaminantes.

2.5 SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE DE RIEL COMÚN (CRDI)

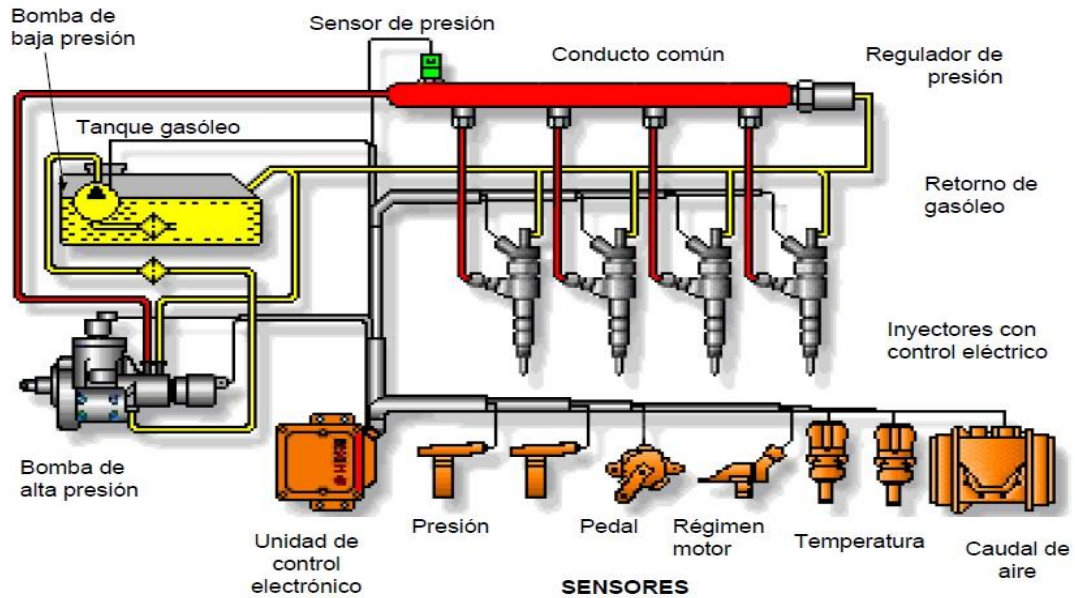
Navarrete y Bolaños (2014), señalan que el sistema de inyección de combustible electrónica denominado Common Rail o riel común, es una tecnología empleada en motores diésel. Este sistema permite extraer el combustible directamente del depósito y llevarlo a una bomba de alta presión, la cual lo suministra a un conducto común que alimenta a los inyectores del motor. Encalada y Zhinin (2022) mencionan que la inyección directa, mediante el sistema Common Rail, permite ajustar la presión del combustible de acuerdo con las exigencias del motor. En estos sistemas, la creación de presión y la inyección de combustible se llevan a cabo de manera independiente. De este modo, se logra generar una alta presión de manera constante sin depender de la velocidad del motor ni de la cantidad de combustible que se está inyectando.

De este modo, Molina (2019) afirma que se logra mantener una presión constante en el riel mediante una válvula reguladora que evita que la presión sea demasiado baja o alta. Esto asegura que la presión del sistema se mantenga en niveles óptimos para el correcto funcionamiento del motor. Como indica Castro (2018) el sistema de inyección CRDI emplea sensores para monitorear constantemente las condiciones del motor en tiempo real. Esta información es procesada por la gestión electrónica del motor, lo que permite determinar la cantidad adecuada de combustible a inyectar y la sincronización precisa, logrando así un rendimiento óptimo del motor. Tal como menciona Alarcón y Jaramillo (2007), para conseguir una mejor atomización a la que se tenía en los sistemas de bomba inyector de los tiempos antiguos, es necesario alcanzar presiones de trabajo entre los 15 y 200 MPa, y una temperatura de 500°C al instante de la apertura del inyector. En la

Figura 4 se muestra como está constituido el sistema de riel común y sus componentes.

Figura 4

Componentes del sistema de riel común



Nota. Tomado de (Alarcón y Jaramillo, 2007)

2.6 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE INYECCION DIESEL CRDI

Sarmiento y Núñez (2018) menciona que la manera en que opera este mecanismo es mediante la introducción de una cantidad precisa de combustible a una elevada presión, lo cual debe cumplir con diversos parámetros, como la velocidad y los requerimientos de torque del motor. Para llevar a cabo este proceso, el sistema cuenta con una bomba de alimentación de baja presión encargada de suministrar una cantidad determinada de combustible a la bomba de alta presión. Es esta última la responsable de incrementar la presión del fluido entre 500 y 2.000 bar antes de almacenarlo en el riel de combustible.

Asimismo, Sarmiento y Núñez (2018) mencionan que la Unidad de Control Electrónico (ECU) es la encargada de calcular la presión y cantidad de inyección, así como la sincronización del sistema de Inyección Common Rail Directa (CRDI), empleando señales de distintos sensores para operar y controlar diferentes actuadores. La tecnología de inyección de combustible de alta presión y precisión permite una inyección controlada electrónicamente en los cilindros del motor, con una sincronización flexible para adaptarse a las condiciones del motor y el rendimiento del vehículo. Además, se logra

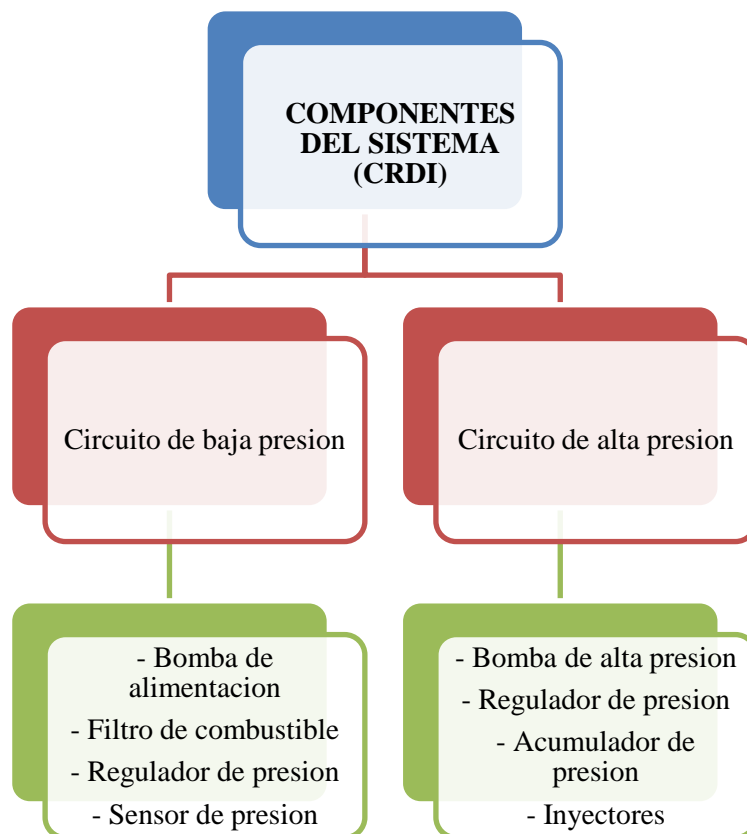
una presión estable, lo que mejora la eficiencia del motor y reduce las emisiones.

2.7 COMPONENTES DEL SISTEMA DE INYECCION DIESEL CRDI

Bosch, (2015) detalla los componentes del sistema de alimentación del Diesel lo cuales son presentado en la Figura 5.

Figura 5

Componentes del sistema CRDI



Nota. Tomado de Bosch, 2015

El sistema está compuesto por varios elementos clave, incluyendo la bomba de alta presión, el acumulador de combustible, la unidad de mando, los inyectores, la bomba de engranajes, la válvula reguladora de presión y el sensor de presión de combustible. La bomba de alta presión comprime el diésel para obtener las presiones de inyección necesarias, mientras que el acumulador de combustible almacena el diésel a alta presión y lo distribuye a todos los inyectores. La unidad de mando procesa la información de los sensores y determina la cantidad y el tiempo de inyección para cada cilindro. Los inyectores, a su vez, inyectan el Diesel a alta presión en los cilindros del motor. La bomba

de engranajes transporta el combustible desde el tanque hasta la bomba de alta presión, mientras que la válvula reguladora de presión regula la presión en el acumulador de acuerdo con el régimen de operación del motor. Por último, el sensor de presión de combustible informa sobre la presión del Diesel en el riel común.

2.8 UNIDAD ELECTRÓNICA DE CONTROL

Crouse (2001) detalla que la Unidad de Control Electrónico (ECU) es un conjunto de componentes electrónicos instalados en una placa de circuito impreso, protegidos por una carcasa de aluminio y equipados con disipadores de calor. En primer lugar, la ECU recibe varias señales acerca del funcionamiento del motor transmitidas por diferentes sensores, las cuales son evaluadas y posteriormente procesadas para calcular las señales que activan los elementos actuadores. El programa de control se guarda en la memoria y es ejecutado por un microcontrolador. Las señales de entrada y salida de los diversos sensores y actuadores se envían a la unidad de control a través de un conector múltiple.

2.9 SENSORES DEL MOTOR EN EL SISTEMA DE INYECCION

Los sensores del motor en el sistema de inyección son componentes que recogen información sobre el funcionamiento del motor y la transmite a la unidad de control electrónica (ECU) para su procesamiento y toma de decisiones.

Sensor de Temperatura del Refrigerante (ECT)

El sensor de temperatura del refrigerante ECT es un componente crucial en el funcionamiento del motor de un automóvil. Según Chauca y Guerrero (2015), este sensor se encarga de enviar una señal eléctrica a la unidad de control del motor (ECU) para informar la temperatura actual del motor. La información que proporciona el ECT es utilizada por la ECU para preparar la mezcla aire-combustible adecuada.

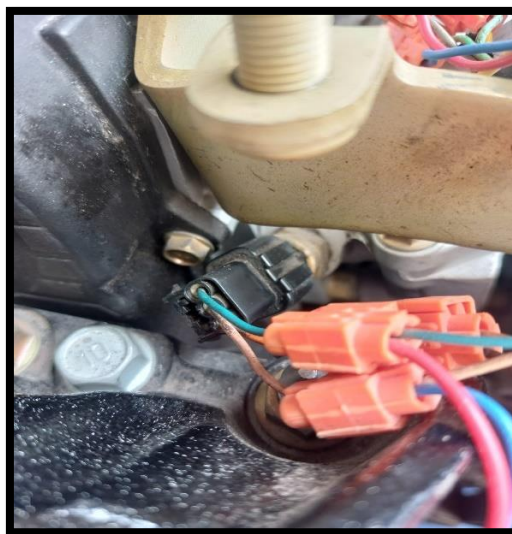
Es importante destacar que el ECT es un sensor con coeficiente de temperatura negativo, lo que significa que su resistencia interna aumenta a medida que la temperatura ambiente disminuye. Además, los sensores ECT son necesarios para llevar a cabo diversas funciones críticas de la ECU, como la sincronización del encendido, la inyección de combustible, la sincronización variable de válvulas y los cambios de transmisión. Alonso (2002) explica que el sensor de temperatura (ECT) generalmente suele ubicarse en el

bloque del motor, cerca de la manguera superior que conduce el agua desde el motor al radiador. Es común encontrarlo junto al termostato, lo que permite una medición precisa y sencilla de la temperatura del refrigerante del motor.

La ECU utiliza la información del ECT para realizar un ajuste en el tiempo de inyección base. Este ajuste se basa en el régimen y la masa de aire que ingresa al motor. En la figura 6 se muestra la ubicación del sensor ECT.

Figura 6

Sensor de temperatura del refrigerante ECT



Fallas y Consecuencias en el Sensor ECT

El sensor ECT es un componente crítico en el sistema de enfriamiento del motor. Si el sensor está dañado debido al uso prolongado o al final de su vida útil, puede afectar el rendimiento del combustible y enviar un mensaje de error a la computadora. Esto puede dar lugar a una regulación incorrecta de la presión del combustible y, en consecuencia, a un mal funcionamiento del motor.

Además, si el sensor ECT está sucio, puede proporcionar una señal de temperatura incorrecta al ECU, lo que a su vez puede resultar en una mezcla inadecuada de combustible y un mal funcionamiento del motor. Es importante tener en cuenta que el voltaje del sensor ECT debe ser correcto para que el ventilador de enfriamiento pueda regular la temperatura del motor adecuadamente. Si hay una señal incorrecta del sensor, puede llevar a un sobrecalentamiento del motor, lo que puede ser muy peligroso. (Automotriz, 2019). Es importante destacar que el ECT es un sensor con coeficiente de temperatura negativo, lo que significa que su resistencia interna aumenta a medida que la

temperatura ambiente disminuye. Además, los sensores ECT son necesarios para llevar a cabo diversas funciones críticas de la ECU, como la sincronización del encendido, la inyección de combustible, la sincronización variable de válvulas y los cambios de transmisión.

El ECT suele ubicarse en el bloque del motor, cerca de la manguera superior que conduce el agua desde el motor al radiador. Es común encontrarlo junto al termostato, lo que permite una medición precisa y sencilla de la temperatura del refrigerante del motor. (Prueba de ruta, 2022)

Sensor de Presión Absoluta en el Múltiple (MAP)

Según Chauca y Guerrero (2015), el sensor MAP (Figura 7) es un sensor clave en los sistemas de inyección de combustible de los motores de combustión interna, ya que proporciona una señal de presión a la ECU para calcular la carga del motor y ajustar la cantidad de combustible inyectado, el sensor se encuentra en el múltiple de admisión y su función principal es proporcionar una señal a la ECU que corresponde a la presión absoluta en el múltiple.

Figura 7

Sensor de presión absoluta en el múltiple (MAP)



Si la presión es baja, entonces la carga del motor también será baja, lo que resulta en una inyección de combustible mínima por parte de la ECU. Por otro lado, si la presión en el múltiple es alta, la ECU inyectará una cantidad mayor de combustible para mantener el motor en funcionamiento adecuado. El sensor de presión absoluta en el múltiple de

admisión también puede estar integrado en la ECU o alojado directamente sobre el múltiple de admisión, como menciona Alonzo (2002).

Fallas y Consecuencias en el Sensor MAP

El sensor MAP es un componente crucial en los sistemas de inyección de combustible, y su falla puede producir varios síntomas notables. Estos incluyen fallo en el encendido, detonación excesiva, pérdida de potencia, aumento del consumo de combustible, posible detención del motor y la activación de la luz de "Check Engine". Además, cuando el sensor MAP no funciona correctamente, también puede causar consecuencias más graves. Por ejemplo, se puede producir una mayor cantidad de gases contaminantes y un aumento en el consumo de combustible. En algunos casos, el motor puede incluso detenerse y aparecer el fenómeno del "cascabeleo", que se refiere a la vibración que ocurre cuando el combustible no se quema adecuadamente en el motor debido a una mezcla incorrecta de aire-combustible, un ángulo de encendido incorrecto o una inyección de combustible tardía. (Automotriz S. M, 2020)

Sensor de Presión del Riel (RPS)

Guillen y Moscoso (2011) señalan que el sensor de presión del riel de combustible (Figura 8) es responsable de detectar la presión de combustible en el riel mediante un sistema piezoeléctrico. Este sistema cambia el voltaje reportado a la ECU en función de la presión existente. Generalmente, estos sensores se ubican en el costado del riel de combustible. Cuando la presión del combustible actúa a través del conducto, empuja el elemento piezoeléctrico que contiene en su interior, generando así la señal eléctrica que es enviada a la ECU. (Autosoporte, 2021)

Así mismo, Guillen y Moscoso (2011) menciona que los fabricantes de sistemas Diesel common rail, como Bosch, Delphi y Siemens, han adoptado valores de referencia para el voltaje procesado por el sensor de presión del riel. Según estos valores, 0.5V corresponde a la presión mínima y 4.5V corresponde a la presión máxima. La señal generada por este sensor es fundamental para calcular el tiempo de inyección base en un sistema common rail. Si consideramos que la presión en el múltiple de admisión puede fluctuar entre 0 y 1600 bar, entonces la señal eléctrica producida tendrá un voltaje alto de 4.5V cuando la presión alcance su valor máximo, y un voltaje de 0.5V para valores mínimos de presión. Además, mencionan que el sensor de presión del riel opera mediante la aplicación de una resistencia eléctrica en capas sobre la membrana del sensor, la cual varía en función de los cambios en la forma de la membrana. Por tanto, cualquier alteración en la presión del

sistema producirá una variación en la forma de la membrana y, por consiguiente, en el valor de la resistencia eléctrica, lo que se traducirá en un cambio de tensión.

Figura 8

Sensor de presión del riel (RPS)



Fallas y Consecuencias en el Sensor RPS

El sensor de presión del riel de combustible (RPS) puede presentar fallos que afectan el correcto funcionamiento del sistema. Entre los síntomas de fallas del RPS se encuentran problemas con el encendido del vehículo, llegando incluso a la imposibilidad de encender el auto. Además, presiones elevadas pueden ser indicativas de una falla en el sensor. Es importante tener en cuenta que durante la instalación del RPS se requiere un torque especial y se desaconseja la instalación de sensores usados debido a que pueden haber sufrido deformaciones que afecten su correcto desempeño. (AutoAvance, 2019)

2.10 VIBRACIONES

La vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetido de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. White (2010) menciona que la posición de equilibrio es la posición que alcanzará cuando la fuerza que actúa sobre él es nula. El movimiento vibratorio de un cuerpo se puede describir completamente como una combinación de 6 tipos diferentes de movimientos individuales. Estas son traslaciones a lo largo de las tres direcciones ortogonales x, y, z, y rotaciones alrededor de los ejes x, y, z.

Según Ideara (2014), los parámetros que definen completamente una vibración son su amplitud, frecuencia y fase. La amplitud es una medida de la intensidad de la vibración y se expresa en unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración. Para el desplazamiento, se mide en valor pico a pico, mientras que, para la velocidad y la aceleración, se mide en valor pico y RMS (raíz cuadrática media). El valor pico a pico indica el recorrido total de una pieza y se considera cuando el desplazamiento es crítico. Ideara (2014) también indica que el valor pico es la amplitud máxima de vibración de la posición de referencia y es útil para indicar niveles de choque de corta duración. La frecuencia indica la rapidez con la que se repite la vibración y se mide en Hertz o revoluciones por minuto. Por último, la fase mide la separación temporal de dos señales, que puede ser relativa o absoluta, y se mide en grados

2.11 NORMATIVA ISO PARA LA EVALUACION DE LA VIBRACIÓN

La normativa ISO para la evaluación de la vibración de la maquinaria es un conjunto de estándares internacionales que proporcionan un marco para evaluar la condición de vibración de la maquinaria en los rangos de frecuencia 0,5 a 150 Hz. Robles(2018) menciona que estos estándares se aplican a toda clase de maquinaria y establecen límites de vibración aceptables para diferentes tipos de maquinaria según su función, tamaño y tipo de carga. La normativa ISO también incluye recomendaciones para la medición y análisis de la vibración y para la determinación de la causa de cualquier vibración anormal. Se utiliza comúnmente para evaluar la condición de la maquinaria y para detectar problemas que puedan afectar su rendimiento y vida útil.

Así mismo, Robles (2018) menciona las diferencias entre las diferentes partes de la normativa ISO 10816. La norma se aplica a una amplia gama de maquinarias con pesos que van desde 0,5 hasta 150 toneladas. Cada parte de la normativa establece los límites de vibración aceptables para diferentes tipos de maquinarias en función de su tamaño y función específica. La primera parte de la normativa, ISO 10816-1, se aplica a las máquinas más grandes, mientras que la cuarta parte, ISO 10816-4, se aplica a las máquinas más pequeñas, con pesos que van desde 0,5 hasta 1 tonelada. La norma ISO 10816-5 se aplica a máquinas rotativas con sistemas de medición en el punto de operación y establece los requisitos para la evaluación de la vibración en situaciones de operación real. Esta norma proporciona orientación sobre cómo realizar mediciones precisas y fiables de la vibración en las máquinas rotativas y cómo evaluar la vibración de acuerdo

con los límites aceptables establecidos en la normativa. La normativa ISO 10816 es un estándar internacional que establece los criterios para evaluar la condición de vibración de maquinaria en los rangos de frecuencia 0,5 a 150 Hz, proporcionando límites de vibración aceptables para diferentes tipos de maquinaria según su función, tamaño y tipo de carga. Esta normativa es una herramienta esencial para la evaluación temprana de problemas, permitiendo decisiones informadas sobre el mantenimiento y reparación de la maquinaria, y estableciendo objetivos de rendimiento para minimizar el riesgo de fallos. Además, la normativa ISO 10816 también incluye recomendaciones para la medición y análisis de la vibración y para la determinación de la causa de cualquier vibración anormal, lo que la convierte en un marco completo para el control de la vibración en la maquinaria.

Rodesprex (2020) destaca la importancia de la preparación adecuada del equipo de medición. Para lograr una evaluación adecuada, es necesario considerar un amplio rango de frecuencias, desde 2 Hz hasta 1000 Hz. Además, debido a la complejidad de la señal de vibración total, se recomienda utilizar valores totales en RMS de desplazamiento, velocidad y aceleración con una precisión del $\pm 10\%$ en el rango de 10 Hz a 1000 Hz y del $+10\%/-20\%$ en el rango de 2 Hz a 10 Hz. Los sensores utilizados para medir la vibración deben ser cuidadosamente colocados para garantizar resultados precisos.

Ubicación el Acelerómetro para Medición según la ISO 10816-6

Según lo establecido por Rodesprex (2020), es comúnmente recomendado realizar las mediciones en los puntos y direcciones principales indicados en la Tabla 3, y se debe prestar especial atención a la correcta fijación del transductor de vibración en la estructura principal de la máquina. Además, es importante considerar las posiciones de los componentes montados sobre la estructura principal de la máquina al establecer los valores referenciales para las mediciones de vibración. Al tomar estas medidas adecuadas, se puede obtener información satisfactoria para prevenir fallas en la maquinaria y garantizar su óptimo funcionamiento.

Tabla 3

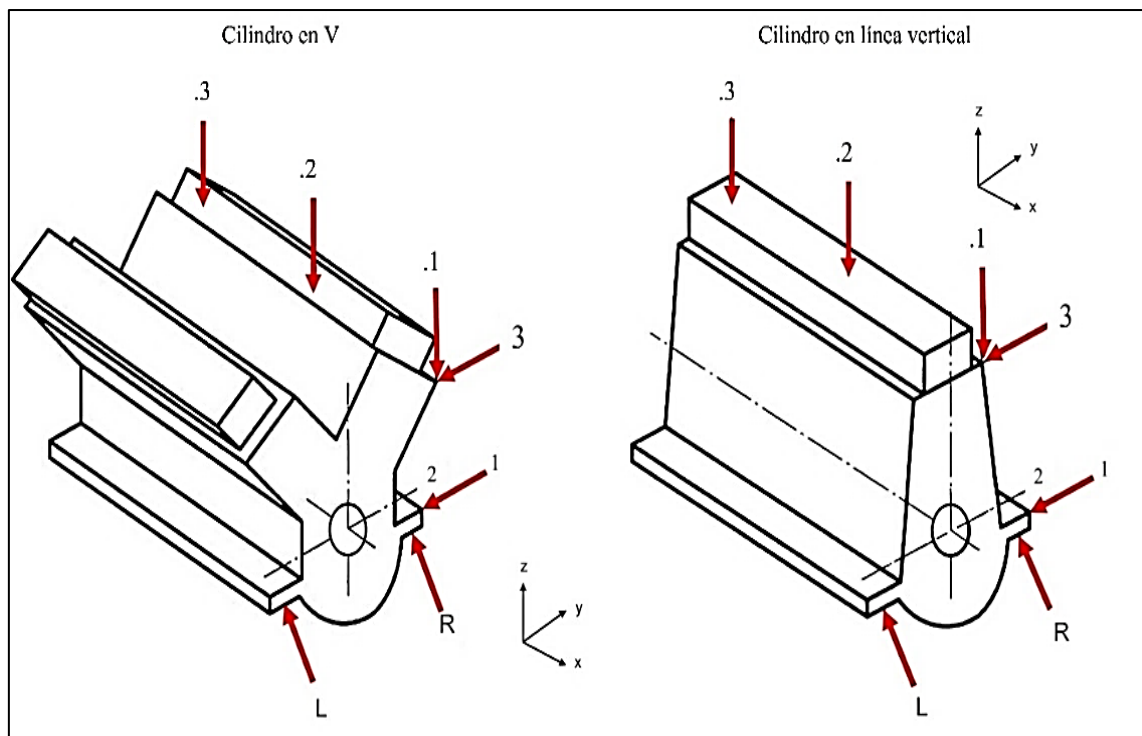
Descripción de los puntos y dirección de medición

Lados de medida	L	Izquierda cuando se enfrenta a la brida de acoplamiento
	R	Derecha frente a la brida de acoplamiento
Niveles de medida	1	Extremo de montaje de la máquina
	2	Nivel del cigüeñal
	3	Borde superior del marco
Puntos de medición relacionados con la longitud de la máquina	.1	Extremo de acoplamiento
	.2	máquina intermedia
	.3	Extremo libre de la máquina

Nota. En la siguiente tabla se describe los puntos y las direcciones de mediciones en el motor según la norma ISO 10816-6. Tomado de: (ISO10816-6, 2015)

Figura 9

Ubicación del sensor en el motor Diesel



Nota. El grafico representa la ubicación en donde poder colocar el sensor según la norma ISO 10816-6. Tomado de: (ISO10816-6, 2015)

En la Figura 9, podemos observar los distintos modos de tomar las medidas de vibración, dónde los lados de medida del motor se determinan en relación con la brida de acoplamiento. La medida en el lado "L" (izquierdo) se toma al enfrentarse a la brida de acoplamiento, mientras que la medida en el lado "R" (derecho) se toma frente a ella. Los niveles de medida se toman en tres puntos diferentes de la máquina: el "1" (extremo de montaje de la máquina), el "2" (nivel del cigüeñal) y el "3" (borde superior del marco). Los puntos de medición relacionados con la longitud de la máquina son el ".1" (extremo de acoplamiento), el ".2" (máquina intermedia) y el ".3" (extremo libre de la máquina). (ISO10816-6, 2015)

2.12 ANÁLISIS DE UNA SEÑAL

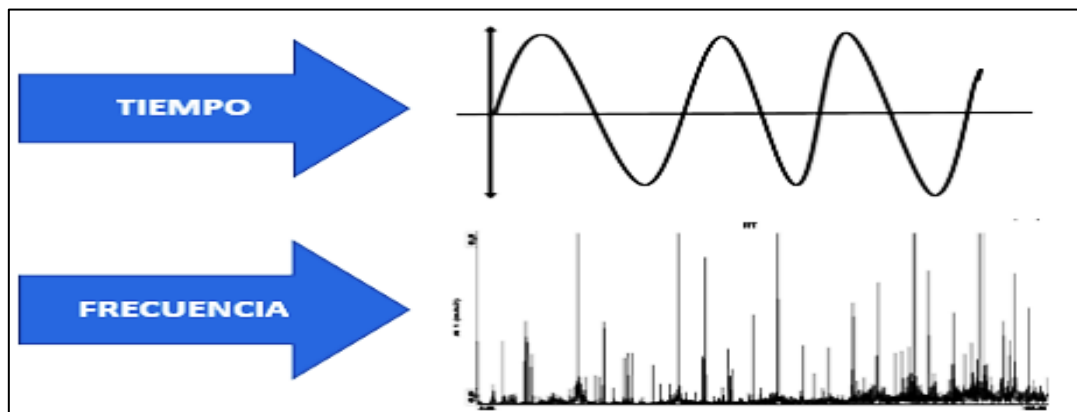
Análisis de una Señal con Respecto a su Dominio

El objetivo del análisis de señales en el dominio del tiempo es examinar la información contenida en la señal. Granda y Granda (2022) mencionan que una técnica comúnmente utilizada para detectar problemas en los sistemas es el análisis de frecuencia, que se utiliza a menudo en el mantenimiento predictivo de vehículos para diagnosticar fallas.

Análisis Matemático de Señales Para la Evaluación de la Vibración en Máquinas

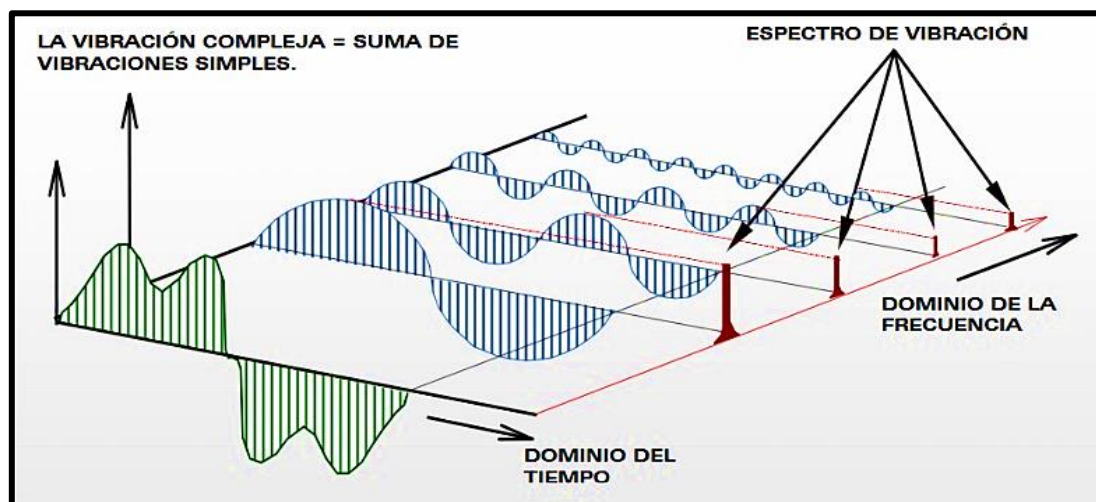
Jaramillo y Chuquimarca (2022) mencionan que existen varias técnicas al momento de analizar el procesado de señales digitales, siendo la transformada rápida de Fourier (FFT) la más usada. Así mismo Angamarca y Soto (2015) mencionan que para analizar un espectro de vibración se requiere que se transforme la señal dominio-tiempo a señal dominio-frecuencia, como se muestra en la Figura 10 , permitiendo la identificación de señales características de cualquier sistema.

La Transformada Rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés Fast Fourier Transform) es un algoritmo utilizado para calcular la Transformada de Fourier de una señal o función matemática. La Transformada de Fourier es una técnica matemática utilizada para analizar y representar funciones o señales en el dominio de la frecuencia en lugar del dominio del tiempo, especialmente cuando se trata de señales discretas con un número elevado de datos. (A-MAQ, 2005).

Figura 10*Representación del tiempo vs frecuencia*

Nota. Tomado de (Granda Gallardo y Granda Gallardo , 2022)

La transformada rápida de Fourier (FFT) , mediante el analizador de espectro, calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja para finalmente mostrarla en forma individual en el eje x de la frecuencia. En la Figura 11 se puede observar en una vista de tres dimensiones , la señal compleja representada de color verde que ha sido capturada desde un acelerómetro, a dicha señal se le calcula las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo, siendo representado con la vista en color azul y finalmente se muestra cada una en el dominio de la frecuencia, representado con la vista en color rojo (A-MAQ, 2005)

Figura 11*Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia*

Nota. Tomado de (A-MAQ, 2005)

Para poder interpretar los resultados obtenidos en la transformada rápida de Fourier, Jaramillo y Chuquimarca (2022) mencionan que solo se requiere tener un conocimiento bien fundamentado en la transformada discreta de Fourier. Por eso, es necesario calcular la secuencia de $X(n)$ en N valores complejos, que es dada por la secuencia $x_0(k)$ de longitud N , como se aprecia en la siguiente formula:

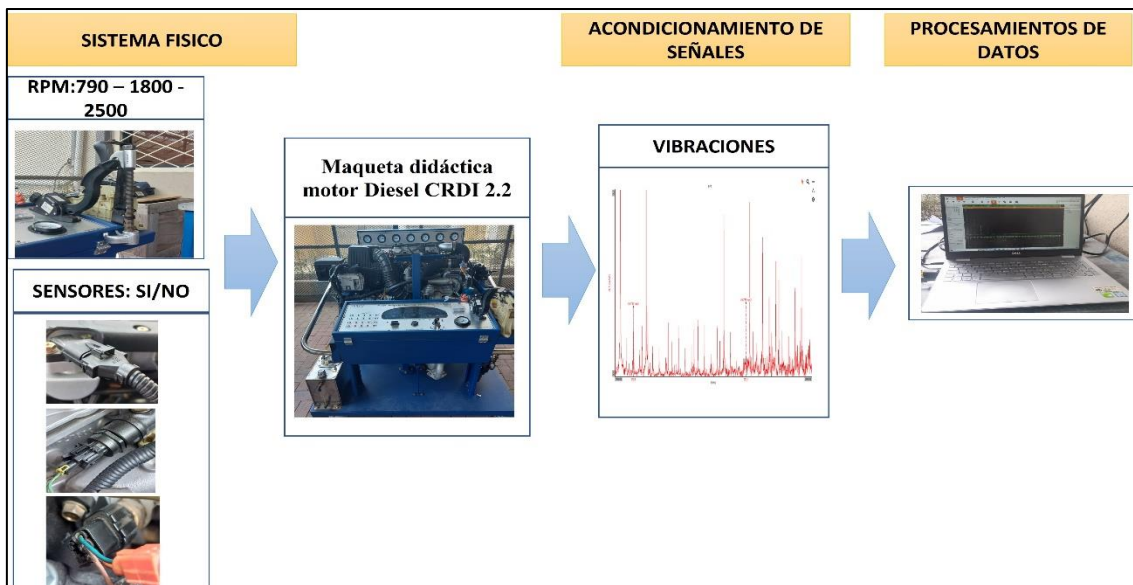
$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) e^{-j2\pi nk/N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

2.13 INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIBRACIÓN EN MÁQUINAS

Los sistemas de adquisición de datos consisten en un conjunto de interconexiones que facilitan la comunicación entre señales analógicas y digitales, y se componen de múltiples etapas, incluyendo la etapa transductora, la etapa de acondicionamiento de señales y la etapa de adquisición y procesamiento de información, como se puede apreciar en la Figura 12.

Figura 12

Proceso para adquisición de datos



La etapa transductora se encarga de establecer la relación entre la entrada y la salida del fenómeno físico que se está midiendo, convirtiendo la señal analógica en una señal eléctrica que el sistema interpreta como datos. Para capturar señales dinámicas, como las

vibraciones, se utilizan principalmente convertidores analógico-digital y digital-analógico. Una vez adquiridos los datos, estos son registrados, procesados y finalmente visualizados en la pantalla.

2.14 DISEÑO DE EXPERIMENTO

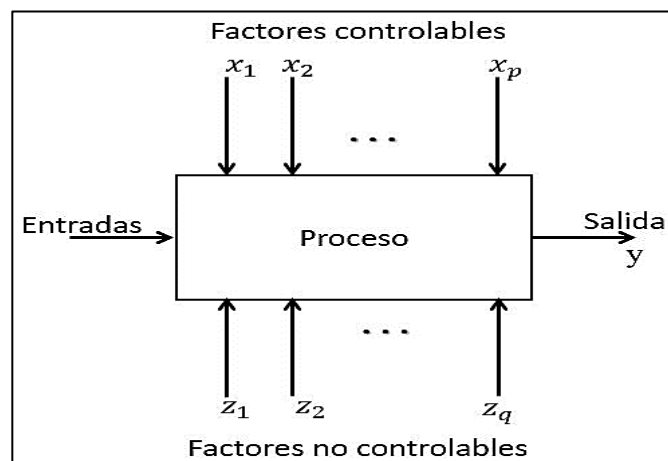
El Diseño de experimentos se lo puede definir a un proceso el cual consiste en el proponer los pasos que serán necesarios a seguir, la secuencia de dichos pasos para poder recolectar los datos y posteriormente se procede a analizar la información necesaria para una pregunta de investigación. Tal como lo indican Melo et. al (2018), el objetivo del diseño de experimentos es el de obtener la máxima información necesaria durante la elaboración del experimento con el menor costo y con la máxima eficiencia. Elegir un buen diseño experimental ayuda a proporcionar con precisión el tipo correcto de información, que es más eficiente cuando se proporciona en una cantidad menor de puntos de datos. Sin embargo, es necesario saber lo que se está buscando, lo que no siempre puede parecer obvio.

2.14.1 FASES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTO

Según Montgomery (2007), expresa que el proceso puede, por lo general, visualizarse como una combinación de máquinas, métodos, personas u otros recursos que transforman cierta entrada (con frecuencia un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables.

Figura 13

Fases del diseño de experimento

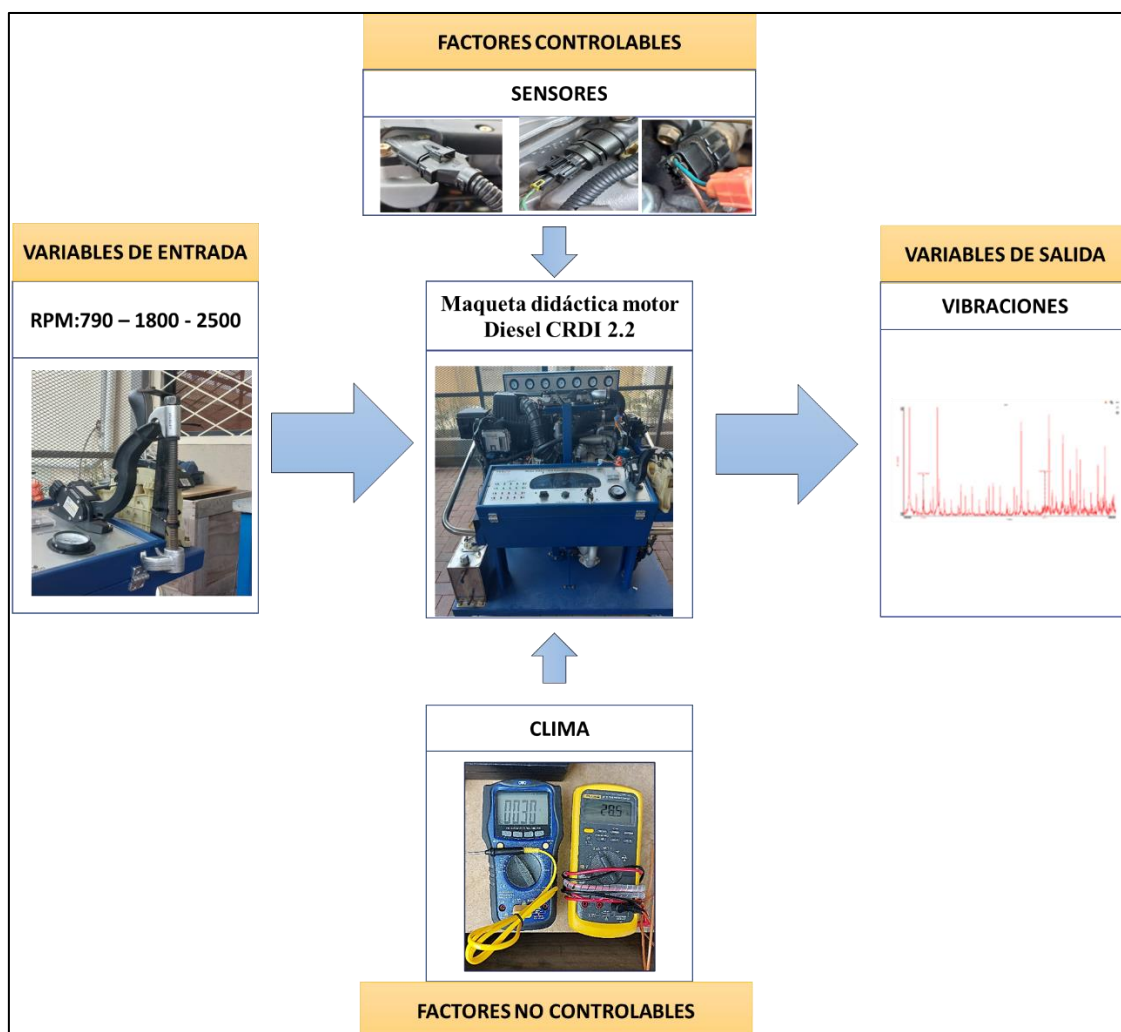


Tomado de (Montgomery, 2007)

Algunas variables del proceso: x_1, x_2, \dots, x_p son controlables, mientras que otras: z_1, z_2, \dots, z_q son no controlables. Así mismo Montgomery (2007) indica que, para desarrollar el trabajo propuesto, se utilizaron investigaciones teóricas previas, esto ayudará a definir el análisis de las fallas mencionadas anteriormente como se visualiza en la Figura 13. Para establecer el diseño experimental, se consideró la maqueta del motor Diesel como unidad experimental. Las RPM se definieron como variables de entrada, mientras que los sensores de estudio se identificaron como factores controlables. El clima (temperatura ambiente y humedad) durante la recopilación de datos se consideró como una variable no controlable. Por último, las variables de salida se asociaron con los resultados obtenidos, los cuales corresponden a los espectros de vibración. Esta estructura experimental se ilustra en la Figura 14.

Figura 14

Fases del diseño de experimento durante el desarrollo del proyecto

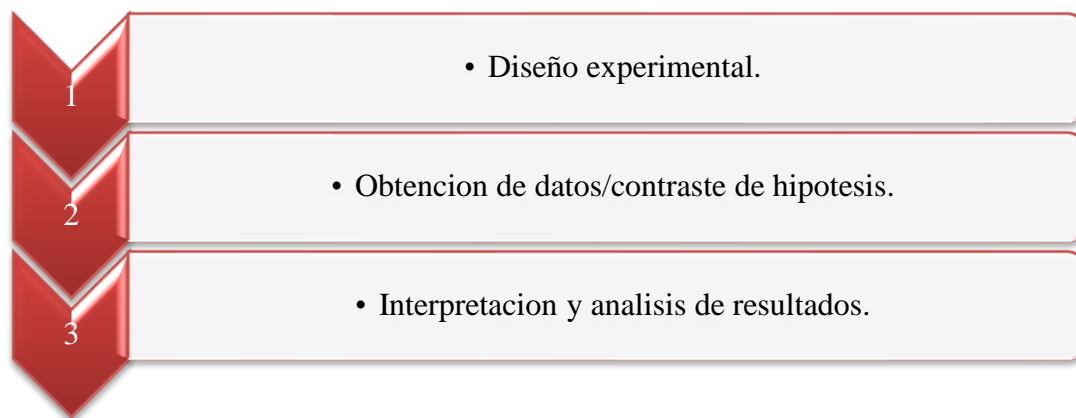


3. CAPÍTULO III: MARCO METODOLOGICO

Para el diseño factorial de experimentos se utilizan dos o más variables, ya que estos son más eficientes. Según Bao (2020), el propósito fundamental del diseño factorial es de investigar la mayor combinación que sean posibles entre los niveles de los factores como se ilustra en la Figura 15.

Figura 15

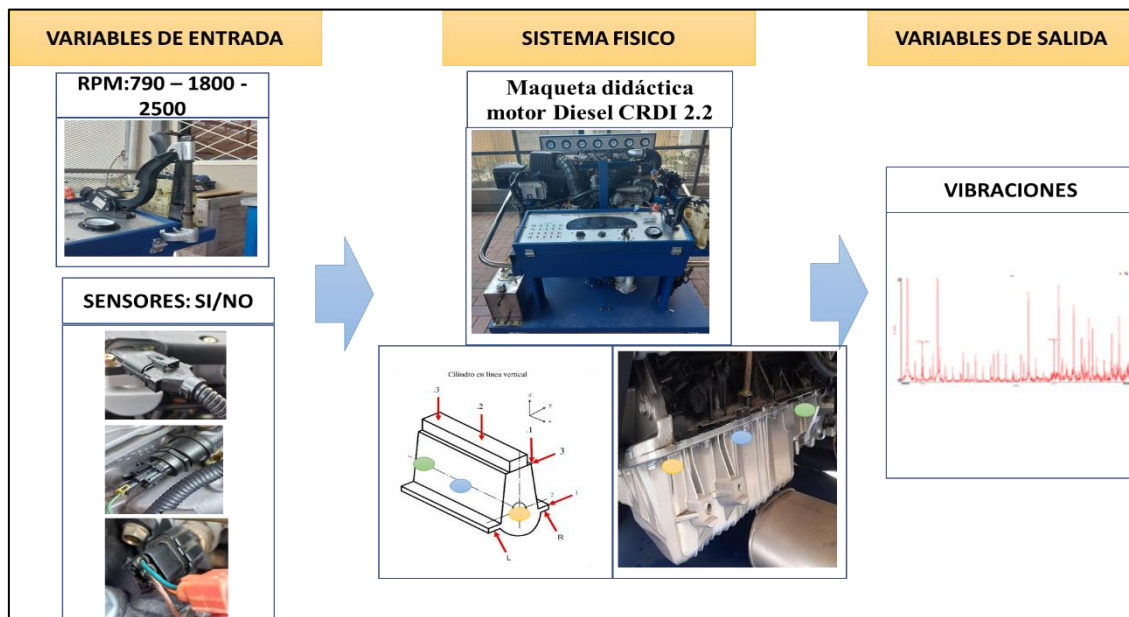
Etapas del diseño experimental



Tomado de (Granda Gallardo y Granda Gallardo , 2022)

3.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACION

El proyecto se basa en un diseño experimental factorial general para analizar las fallas en los sensores de temperatura del refrigerante del motor (ECT), presión del múltiple de admisión (MAP) y sensor de presión del riel de combustible (RPS) del motor diésel a través de vibraciones. La Figura 16 muestra el proceso identificado e implementado en el proyecto, incluyendo variables de entrada en los sensores que simularán un fallo. Estas variables constan de dos niveles denominados "SI" y "NO". Por ejemplo, en el sensor de presión del riel de combustible (RPS), el término "SI" significa que la ECU recibe una señal correcta del sensor RPS y realiza una buena dosificación de combustible, mientras que "NO" indica que el sensor está defectuoso o averiado y envía una señal errónea a la ECU, impidiendo que realice una dosificación exacta de combustible y causando pérdida de potencia y vibración. Todo esto se lleva a cabo en las revoluciones 790, 1800 y 2500 RPM, obteniendo como variables de salida las aceleraciones en espectros de frecuencia Hz representadas en el dominio del tiempo.

Figura 16*Diseño de experimentos*

En la Tabla 4 se muestra las variables de entrada y los niveles a los cuales estará sometido el motor.

Tabla 4*Matriz de variables.*

N°	Variables de entrada	Niveles		
		1	RPM	790
2	Sensor (RPS)	SI		NO
3	Sensor (MAP)			
4	Sensor (ECT)			

3.2 RECOLECCION DE DATOS

Las herramientas específicas para la recolección de datos y medición de variables de salida necesarias en el proyecto son: El acelerómetro Dewesoft que se utiliza para registrar la vibración del motor en términos de aceleraciones. Para el control del funcionamiento del motor se utiliza el escáner de automóvil G-SCAN2, el cual permite

el monitoreo de los niveles de variables como las RPM, y los códigos de errores de los sensores MAP, ECT y RPS. La Tabla 5 muestra un resumen de las herramientas utilizadas en el proyecto.

Tabla 5

Herramientas para recolección de datos

EQUIPOS PARA RECOLECCION DE DATOS																															
Maqueta didáctica YESSA 3300 (Motor diésel CRDI 2.2)																															
Acelerómetro DEWESoft																															
Scanner G-SCAN 2	 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nombre del sensor</th> <th>Valor</th> <th>Unidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sensor de temperatura del aire de admisión</td> <td>45.7</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Régimen del motor</td> <td>2517</td> <td>RPM</td> </tr> <tr> <td>Temperatura del refrigerante del motor</td> <td>95.1</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Accionador del EGR</td> <td>4.7</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Sensor de Presión Barométrica</td> <td>1002</td> <td>hPa</td> </tr> <tr> <td>Interrupción del embrague (cambio manual)</td> <td>ON</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Interrupción punto muerto < cambio manual</td> <td>OFF</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Interrupción del freno 2</td> <td>ON</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Interrupción del freno 1</td> <td>ON</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>	Nombre del sensor	Valor	Unidad	Sensor de temperatura del aire de admisión	45.7	°C	Régimen del motor	2517	RPM	Temperatura del refrigerante del motor	95.1	°C	Accionador del EGR	4.7	%	Sensor de Presión Barométrica	1002	hPa	Interrupción del embrague (cambio manual)	ON	-	Interrupción punto muerto < cambio manual	OFF	-	Interrupción del freno 2	ON	-	Interrupción del freno 1	ON	-
Nombre del sensor	Valor	Unidad																													
Sensor de temperatura del aire de admisión	45.7	°C																													
Régimen del motor	2517	RPM																													
Temperatura del refrigerante del motor	95.1	°C																													
Accionador del EGR	4.7	%																													
Sensor de Presión Barométrica	1002	hPa																													
Interrupción del embrague (cambio manual)	ON	-																													
Interrupción punto muerto < cambio manual	OFF	-																													
Interrupción del freno 2	ON	-																													
Interrupción del freno 1	ON	-																													
Sujetador de Pedal (Acelerador)																															

Paquete computacional	
-----------------------	--

Hardware de Adquisición de Datos - Iolite

Tal como menciona Smith (2015) cuando se habla de proceso de adquisición de datos - DAQ, se está haciendo referencia al proceso de realizar mediciones de fenómenos físicos y registrarlos de alguna manera para analizarlos. Los sistemas modernos de adquisición de datos digitales se componen de cuatro elementos fundamentales que conforman toda la cadena de medición de los fenómenos físicos.

En primer lugar, están los sensores, que se encargan de capturar las señales de los fenómenos físicos. A continuación, se encuentra el acondicionamiento de señal, que prepara las señales para su conversión analógico-digital. Seguidamente, están los convertidores analógico-digital, que llevan a cabo la conversión de las señales al formato digital. Por último, está la computadora con software de adquisición de datos, que registra y analiza las señales convertidas.

En la Tabla 6 se presentan las características hardware DAQ - Dewesoft, el cual fue utilizado para la medición de la vibración. Esta tabla describe las especificaciones técnicas relevantes del dispositivo, tales como la velocidad de datos, el tipo de conector que usa y la alimentación.

Tabla 6

Características del Hardware de Adquisición de Datos - Iolite

Características del Hardware de Adquisición de Datos	
Marca	Dewesoft
Modelo	Iolite Single Channel
Fabricación	Eslovenia
Conectores	Ethernet Rj45
Data interface	Ethercat
Alimentación	9-48voltios
Velocidad de datos	100Mbps

Acelerómetro Piezo-Electrico

Para adquirir datos de las señales de vibración de la maqueta didáctica, es necesario utilizar un acelerómetro piezoeléctrico, a este se lo llama acelerómetro y es el encargado de medir la aceleración y la vibración. Los acelerómetros piezoeléctricos convierten la aceleración de la gravedad o del movimiento en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al mecanismo sometido a vibración o aceleración. (Pernia-Márquez, 2004)

3.3 TAMAÑO DE MUESTRA

En un diseño de experimento, el tamaño de muestra se refiere al número de unidades de análisis incluidas en el estudio. Es importante tener en cuenta que el tamaño de muestra afecta directamente a la precisión de los resultados, ya que cuanto mayor sea el tamaño de muestra, menor será la variabilidad y, por lo tanto, mayor será la precisión. Sin embargo, también es importante tener en cuenta que un tamaño de muestra demasiado grande puede ser costoso y poco práctico. Por otro lado, las repeticiones de tomas de datos ayudan a aumentar la precisión de los resultados mediante la reducción de la variabilidad dentro de la muestra. Es importante destacar que el tamaño de muestra se determinará directamente mediante el software Minitab, ya que nos ofrece la posibilidad de hacerlo de manera efectiva. Para ello primero se evalúa la desviación estándar de una muestra seleccionada, como puede verse en la figura 17

Figura 17

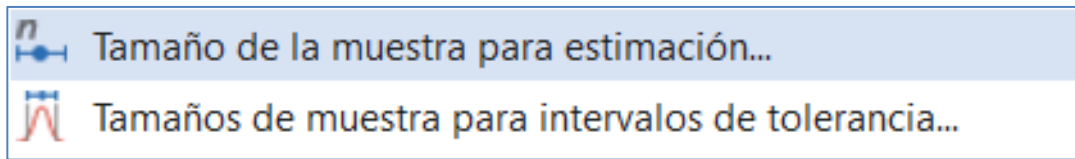
Resultado del cálculo de la Desviación Estándar

Estadísticas	
<u>Variable</u>	<u>Desv.Est.</u>
AMPLITUD	1,6720

Para determinar el tamaño de muestra utilizando el software Minitab, se debe utilizar la opción "Tamaño de muestra adecuado para la estimación", la cual se encuentra ubicada en la sección de estadística básica, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Tamaño de muestra adecuado para la estimación



La configuración para el cálculo del tamaño de muestra se puede observar en la Figura 19 y se describe a continuación: Primero, en la sección Parámetros, se selecciona la opción: "Media". Luego, en la casilla de Desviación estándar, se ingresa el valor anteriormente calculado (en este caso 1,6720 Fig. 17). Por último, se define el margen de error para los intervalos de confianza, en nuestro caso se establecerá el valor de 1,5.

Figura 19

Configuración del Software para la obtención del tamaño de muestra

Como resultado, se obtuvo que el tamaño de la muestra es de 8 repeticiones, como se puede observar en la Figura 20.

Figura 20

Resultado del tamaño de muestra

Resultados	
Margen de error	Tamaño de la muestra
1,5	8

En la Tabla 7 se presenta el tamaño de diseño de experimento correspondiente al sensor ECT. La primera columna indica el orden aleatorio en que se tomarán los datos, mientras que la segunda columna muestra el orden de la corrida. En la tercera columna, se identifica el número de bloque, que corresponde al tamaño de muestra en el que se encuentra el sensor. La cuarta columna especifica las RPM del motor en las que se realizará la medición, mientras que la última columna indica si el sensor se encontrará en estado normal o de falla.

Tabla 7

Tamaño de diseño de experimento del sensor ECT

OrdenEst	OrdenCorrida	Bloques	Rpm	Estado
15	1	3	1800	SI
17	2	3	2500	SI
14	3	3	790	NO
16	4	3	1800	NO
18	5	3	2500	NO
13	6	3	790	SI
4	7	1	1800	NO
6	8	1	2500	NO
2	9	1	790	NO
5	10	1	2500	SI
1	11	1	790	SI
3	12	1	1800	SI
44	13	8	790	NO
43	14	8	790	SI
47	15	8	2500	SI
45	16	8	1800	SI
46	17	8	1800	NO
48	18	8	2500	NO
34	19	6	1800	NO
33	20	6	1800	SI
31	21	6	790	SI
32	22	6	790	NO
35	23	6	2500	SI

36	24	6	2500	NO
42	25	7	2500	NO
37	26	7	790	SI
41	27	7	2500	SI
39	28	7	1800	SI
38	29	7	790	NO
40	30	7	1800	NO
20	31	4	790	NO
21	32	4	1800	SI
22	33	4	1800	NO
24	34	4	2500	NO
19	35	4	790	SI
23	36	4	2500	SI
28	37	5	1800	NO
26	38	5	790	NO
25	39	5	790	SI
29	40	5	2500	SI
30	41	5	2500	NO
27	42	5	1800	SI
12	43	2	2500	NO
11	44	2	2500	SI
9	45	2	1800	SI
7	46	2	790	SI
8	47	2	790	NO
10	48	2	1800	NO

Nota: Es importante destacar que tamaño de diseño de experimento también se aplicará a los sensores MAP y RPS.

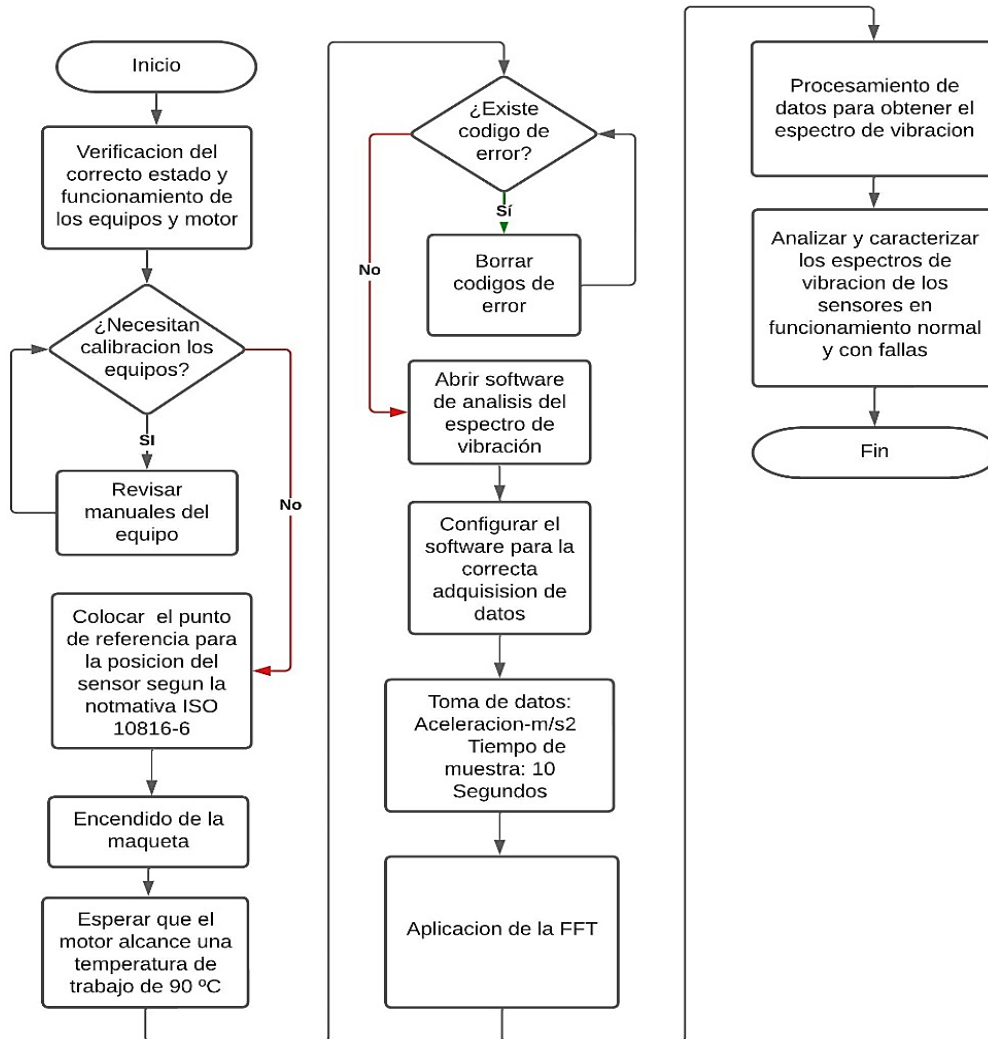
3.4 PROCESO PARA LA ADQUISICION DE DATOS

El flujograma de procesos detallado en la Figura 21 muestra el proceso para la adquisición de datos. En primer lugar, se selecciona el equipo de estudio, la maqueta didáctica de motor Diesel CRDI 2.2 proporcionada por el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana. Con el fin de mantener el rigor científico se llevará a cabo un protocolo previo a la adquisición de datos, utilizando las herramientas adecuadas y verificando el correcto

funcionamiento de los equipos. En caso de ser necesario, se buscará soporte técnico utilizando los manuales del laboratorio.

Figura 21

Flujograma de procesos para adquisición de datos.



A continuación, se coloca el acelerómetro en el punto de referencia, el cual según estudios previos realizados por Narváez (2015), Mena (2019), Matienzo (1997) y la propia ISO10816-6 (2015) indican que para motores en línea la posición óptima para colocar el sensor piezoeléctrico es R1.1 (figura 9). Antes de tomar los datos, se encenderá el motor hasta llegar a temperatura de funcionamiento para luego verificar si existen códigos de error, los cuales serán eliminados con la ayuda del Scanner G-SCAN 2. Es importante alcanzar la temperatura de trabajo del motor (90 grados centígrados) antes de tomar los

datos, ya que la temperatura del motor afecta significativamente las características de funcionamiento de este, como el rendimiento, la emisión de gases y la vibración. Alcanzadas las condiciones anteriormente mencionadas, se conecta el equipo de adquisición de datos y se abre el software Dewesoft. El software debe ser configurado de acuerdo con las necesidades del proyecto, esto incluye, el rango de medición (10V), forma de medición (IEPE - interfaz de excitación de corriente constante), unidades (m/s^2) y la resolución de adquisición (1.000 datos por segundo) durante un periodo de tiempo de muestra de 10 segundos.

Estudios previos realizados por Gutiérrez (2018), Angamarca y Soto (2015) y Salas Ibarra (2022) establecen que el tiempo óptimo para la toma de datos es de 10 segundos por tratamiento, lo que equivale aproximadamente obtener 10.000 datos por cada tratamiento descrito. Finalmente, se utiliza la FFT para analizar los espectros en condiciones normales y con fallas. La configuración de la resolución en la FFT incluye un bloque contador, que es un componente clave de la resolución del equipo y afecta su relación con el tiempo previamente establecido para el análisis de la FFT. Se lleva a cabo 8 ensayos por cada tratamiento descrito y para cada sensor en los tres regímenes de carga.

3.7 PROCESO PARA LA CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE Y ANALIZADOR DE VIBRACIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN

El proceso de análisis de vibraciones en motores se realiza mediante la conexión del analizador de vibraciones al computador, en donde se almacena toda la información necesaria para evaluar las vibraciones del motor tanto en condiciones normales como en caso de fallas inducidas.

El dispositivo cuenta con 3 puertos, una entrada de datos por parte del sensor piezoeléctrico, el cual recolecta toda la información de las vibraciones generadas como se puede apreciar en la Figura 22. Cuenta con una conexión de salida mediante un cable de red, conectado a una laptop, para enviar la información que fue adquirida y procesada a través del sensor y finalmente un puerto para conectar la corriente.

Figura 22
Equipo Dewesoft



Es importante mencionar que el software cuenta con una licencia previamente adquirida para llevar a cabo esta tarea. Una vez conectado, se abre el software Dewesoft X para analizar los datos recolectados y emitir un informe detallado del estado del motor. Se procede a verificar las posibles ubicaciones del sensor, de acuerdo con lo establecido en la normativa ISO 1816-6. Una vez definida la posición del sensor piezoeléctrico en el motor, se procede a configurar el software Dewesoft para la adquisición de datos de vibración del motor diésel CRDI 2.2. En este trabajo de titulación, se optó por colocar el sensor en la ubicación 1-1-R. En la Figura 23, se puede apreciar el sensor piezoeléctrico ubicado en el motor

Figura 23
Punto de referencia para la toma de datos de vibración en el motor



A continuación, en la Figura 24 se muestra la configuración de canales que ofrece el software. Para nuestro estudio y por la naturaleza de la señal, se opta por la entrada analógica, luego se ajusta el ancho de banda a 1000 Hz (este valor lo indica la Norma ISO 10816-6), que es la velocidad de adquisición dinámica.

Figura 24
Configuración de los canales del software

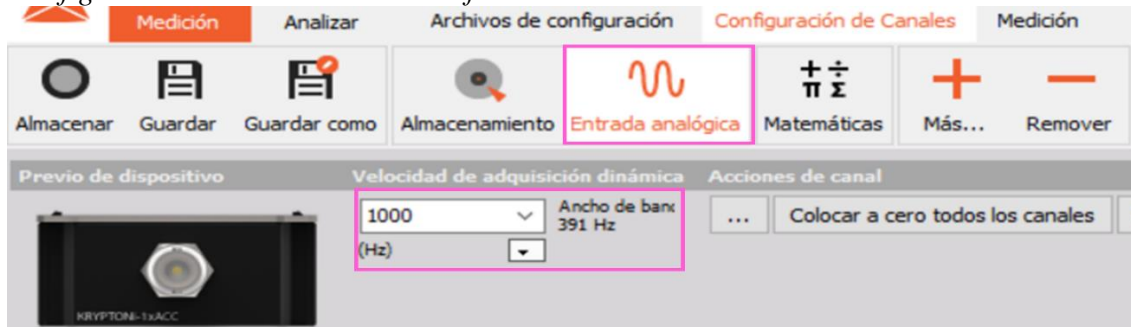


Figura 25
Configuración de los canales de medición del software



Se configura el software Dewesoft para la adquisición de datos, seleccionando la interfaz de excitación de corriente constante (IEPE) como se muestra en la figura 25, esto garantiza la correcta operación del sensor acelerómetro piezoeléctrico. Luego, se ajusta el ancho de banda a 1000 Hz, que es la velocidad de adquisición dinámica, para obtener una mayor precisión en los datos de vibración del motor diésel CRDI 2.2. Se configura la entrada analógica en la plataforma del software para poder visualizar los datos obtenidos y en la opción de Rango se selecciona 1000 mv, como se muestra en la figura 26.

En el ajuste del canal se procede a configurar los datos que se van a tomar; Cantidad física= Aceleración y en Unidad= $\frac{m}{s^2}$ las demás configuraciones van por defecto del software, como se muestra en la Figura 27

Figura 26 Configuración de la medición del software

Configuración de la medición del software

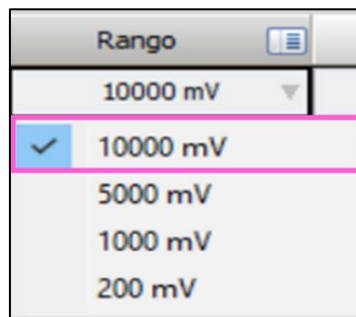
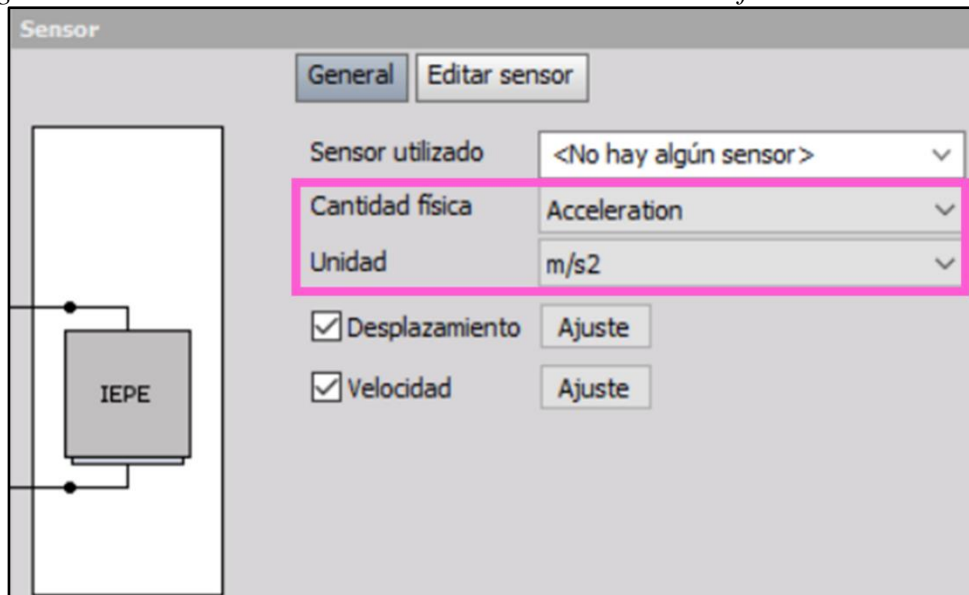


Figura 27

Configuración de la aceleración los canales de medición del software



Una vez configuradas las opciones de canales, se procede a la implementación del componente matemático del software previa a la recolección de datos. Se selecciona la opción "Agregar matemática" en la pestaña correspondiente, y dentro de ella, se opta por utilizar la "Transformada Rápida de Fourier (FFT)" que se encuentra en la sección de "Análisis en dominio de frecuencia" con un marcado de color naranja, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28
Transformada rápida de Fourier



Se configuró el software para que el analizador de vibraciones efectúe la adquisición de los espectros de vibración como se ilustra en la Figura 29.

Figura 29
Configuración de canales para la adquisición de datos

Utilizado	C	Nombre	Min	Valor	Max	Uni...
Utilizado		FFT		Ejecutando FFT; Líneas=1024; Ventana=Blackman		
	Yellow	FFT block count	-5,00	29333	5,00	co...
	Red	AI 1/AmplFFT	0,00		10000,00	m/s2

Una vez obtenida la primera toma de datos, se selecciona la opción "Diseño" y se agrega la pestaña "Widgets", eligiendo "Vista previa de FFT" dentro de la sección "Análisis en el dominio de frecuencia" para poder examinar el comportamiento del espectro, tal y como se ilustra en la Figura 30.

Figura 30
Vista previa de FFT



3.5 DEPURACIÓN DE DATOS EN LA ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN

La depuración de datos es un proceso crucial en la caracterización del espectro de vibración. Esta técnica permite la eliminación de valores anómalos, repetitivos o inconsistentes en los datos de vibración, lo que puede tener un impacto negativo en la precisión de los resultados y el tiempo de procesamiento. La depuración de datos también es importante para garantizar la calidad de los datos y evitar errores en las conclusiones y decisiones basadas en ellos.

El proceso de depuración de datos inicia con la importación de los datos de vibración del software Dewesoft a un archivo de Excel con extensión “.xlsx”. Tal como se mencionó dicho archivo cuenta con un total de 10.000 datos captados por el sensor piezoeléctrico durante el tiempo de 10 segundos. En la Figura 31 se muestra un extracto de los datos generados por el software.

Figura 31
Datos del espectro de vibración

Time s	AI 1 m/s2	FFT block count counts	AI 1/AmplFFT (0,00 Hz) m/s2 (Z, peak)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz) m/s2 (Z, peak)	AI 1/AmplFFT (0,98 Hz) m/s2 (Z, peak)	AI 1/AmplFFT (1,46 Hz) m/s2 (Z, peak)	AI 1/AmplFFT (1,95 Hz) m/s2 (Z, peak)
0	-9,9975662	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,001	-2,9505367	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,002	-8,9368496	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,003	-14,883605	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,004	-7,6607656	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,005	-11,308812	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,006	-10,385813	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,007	-24,529684	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,008	-19,123543	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,009	-22,352577	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,01	-33,89447	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,011	-30,978962	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,012	-36,515495	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,013	-43,616734	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,014	-35,35955	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,015	-47,392242	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,016	-40,249981	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,017	-22,918098	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,018	-11,374741	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,019	10,850508	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,02	18,800026	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,021	57,305233	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543
0,022	53,544373	1	0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954	0,003191543

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos que fueron generados por el software Dewesoft ya que contienen 10,000 datos por experimento.

Para poder realizar la depuración de los 10.000 datos se procede a realizar la separación

en bloques contadores, en nuestro caso el software generó 4 bloques contadores. Los bloques contadores es una metodología utilizada en análisis de datos y estadística con el fin de organizar y facilitar el manejo de grandes cantidades de información, y de esta manera mejorar la eficiencia en el proceso de análisis y reducir el tiempo y los recursos requeridos para realizar operaciones complejas en la base de datos. Este proceso consiste en segmentar los datos en grupos más pequeños y manejables, Esta segmentación se realiza a partir de la existencia de un cambio en las amplitudes de la vibración en función de la frecuencia en cada experimento, como se aprecia en la figura 32.

Figura 32

Datos del espectro de vibración separados por bloques contadores

Time	AI 1	FFT block count	AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	...	AI 1/AmplFFT (498,54 Hz)	AI 1/AmplFFT (499,02 Hz)	AI 1/AmplFFT (499,51 Hz)
s	m/s ²	counts	m/s ² (Z _{peak})	m/s ² (Z _{peak})	...	m/s ² (Z _{peak})	m/s ² (Z _{peak})	m/s ² (Z _{peak})
0	-9,9975662	1	0,07389725	0,091767743	...	0,31718811	0,6144191	0,97317344
0,001	-2,9505367	1	0,07389725	0,091767743	...	0,31718811	0,6144191	0,97317344
0,002	-8,9368496	1	0,07389725	0,091767743	...	0,31718811	0,6144191	0,97317344
4,096	-0,99758637	2	0,029532682	0,035178281	...	0,063354678	0,79620039	1,2932779
4,097	-7,7398796	2,0004883	0,029532682	0,035178281	...	0,063354678	0,79620039	1,2932779
4,098	0,68578941	2,0009766	0,029532682	0,035178281	...	0,063354678	0,79620039	1,2932779
6,143	10,607305	2,9995117	0,029532682	0,035178281	...	0,063354678	0,79620039	1,2932779
6,144	3,554414	3	0,020153837	0,028477242	...	0,21133493	0,3636176	1,0273905
6,145	0,65502274	3,0004883	0,020153837	0,028477242	...	0,21133493	0,3636176	1,0273905
6,146	-1,1162578	3,0009766	0,020153837	0,028477242	...	0,21133493	0,3636176	1,0273905
8,191	24,843477	3,9995115	0,020153837	0,028477242	...	0,21133493	0,3636176	1,0273905
8,192	2,0951953	4	0,037288345	0,04792352	...	0,055991877	0,66010946	1,1269737
8,193	9,3839636	4,0004883	0,037288345	0,04792352	...	0,055991877	0,66010946	1,1269737
8,194	-5,7664185	4,0009766	0,037288345	0,04792352	...	0,055991877	0,66010946	1,1269737
8,195	9,956809	4,0014648	0,037288345	0,04792352	...	0,055991877	0,66010946	1,1269737
9,999	-38,069946	4,8823242	0,037288345	0,04792352	...	0,055991877	0,66010946	1,1269737

AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,98 Hz)	AI 1/AmplFFT (1,46 Hz)
0,07389725	0,091767743	0,025562761	0,009161954
AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,98 Hz)	AI 1/AmplFFT (1,46 Hz)
0,029532682	0,035178281	0,005271865	0,00439978
AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,98 Hz)	AI 1/AmplFFT (1,46 Hz)
0,020153837	0,028477242	0,008164967	0,00164647
AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	AI 1/AmplFFT (0,98 Hz)	AI 1/AmplFFT (1,46 Hz)
0,037288345	0,04792352	0,012058405	0,004144813

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos que fueron generados por el software Dewesoft ya que contienen 10,000 datos por experimento.

Al momento de transponer cada uno de los bloques contadores, como se aprecia en la

Figura 33, en nuevos libros de Excel obtenemos lo siguiente:

La primera columna será la frecuencia que capto el sensor piezoeléctrico al momento de la toma de datos, La frecuencia es la cantidad de ciclos completos de vibración que ocurren en un segundo. Se mide en Hertz (Hz) y representa la rapidez con la que un objeto vibra. La segunda columna será la amplitud que capto el sensor piezoeléctrico al momento de la toma de datos. La amplitud es la medida de la magnitud de la vibración, es decir, la distancia máxima que un objeto se desplaza desde su posición de equilibrio en un ciclo de vibración.

Este procedimiento se repetirá en los siguientes ocho experimentos, que involucran a los tres sensores considerados en el desarrollo del estudio, y se llevarán a cabo en los tres regímenes distintos de carga, tanto en estado normal como en modo de falla. Para llevar a cabo la prueba de Wilcoxon en el software MINITAB, será necesario reunir y agrupar las amplitudes correspondientes a cada sensor, en ambos estados normal y falla, obtenidas a partir de los resultados de los ocho experimentos realizados en los tres regímenes de carga

Figura 33

Datos del espectro de frecuencia y amplitud

FRECUENCIA	AMPLITUD
AI 1	-9,9975662
FFT block count	1
AI 1/AmplFFT (0,00 Hz)	0,0738973
AI 1/AmplFFT (0,49 Hz)	0,0917677
AI 1/AmplFFT (0,98 Hz)	0,0255628
AI 1/AmplFFT (1,46 Hz)	0,009162
AI 1/AmplFFT (1,95 Hz)	0,0031915
AI 1/AmplFFT (2,44 Hz)	0,0054116
AI 1/AmplFFT (2,93 Hz)	0,0077978
AI 1/AmplFFT (3,42 Hz)	0,0063411
AI 1/AmplFFT (3,91 Hz)	0,0062434
AI 1/AmplFFT (4,39 Hz)	0,0045847
AI 1/AmplFFT (4,88 Hz)	0,0054738
AI 1/AmplFFT (5,37 Hz)	0,0212413
AI 1/AmplFFT (5,86 Hz)	0,1290531
AI 1/AmplFFT (6,35 Hz)	0,3391342
AI 1/AmplFFT (6,84 Hz)	0,3140709
AI 1/AmplFFT (7,32 Hz)	0,0853182
AI 1/AmplFFT (7,81 Hz)	0,020978
AI 1/AmplFFT (8,30 Hz)	0,0243688
AI 1/AmplFFT (8,79 Hz)	0,0177417
AI 1/AmplFFT (9,28 Hz)	0,0335534

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos que fueron generados por el software Dewesoft ya que contienen 10,000 datos por experimento.

3.6 AJUSTE DEL SOFTWARE MINITAB PARA EL PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

Para llevar a cabo el procesamiento de datos en el software estadístico, es fundamental establecer una configuración óptima que permita el desarrollo de esta tesis de manera eficiente. Cabe destacar que esta configuración puede variar en función de las necesidades específicas del investigador

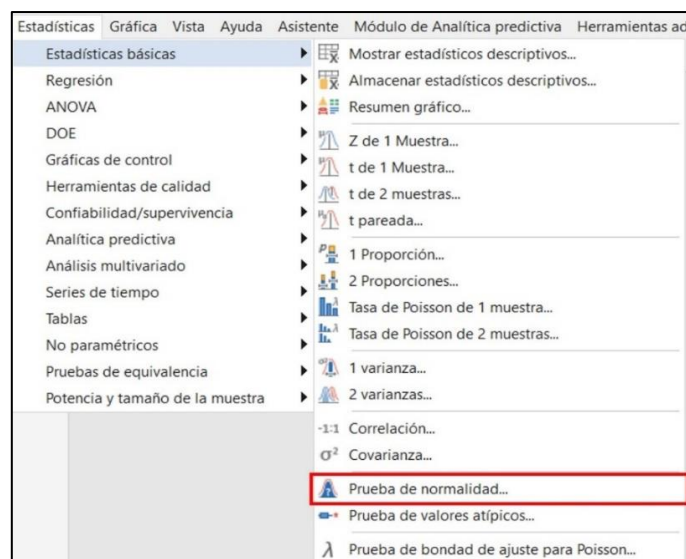
Prueba de Normalidad

La normalización en el espectro de vibración es una técnica para evaluar la intensidad y la distribución de las vibraciones producidas en el motor. Este proceso consiste en ajustar los valores de amplitud de las vibraciones a una escala estándar, lo que permite comparar y analizar fácilmente las vibraciones. La normalización permite obtener una representación uniforme de los datos de vibración facilitando la toma de decisiones en la resolución de problemas mecánicos.

Se procede a extraer las columnas de las amplitudes de estado normal y se le realizara la prueba de normalidad, en la barra de tareas buscaremos la opción “estadísticas básicas” y después seleccionaremos la opción de “prueba de normalidad”, como se aprecia en la Figura 34.

Figura 34

Prueba de la normalidad en Minitab



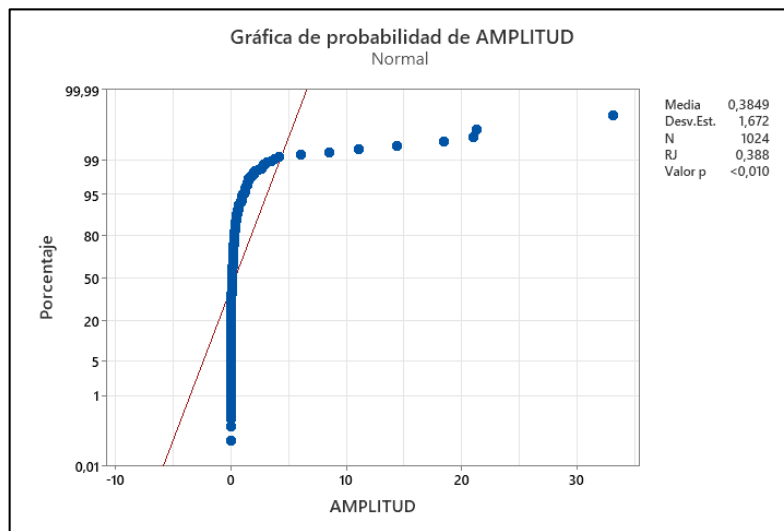
Se analiza la gráfica que nos da el software estadístico. En la Figura 35, se puede observar

que los datos numéricos evaluados no cumplen una distribución normal

Para nuestro caso de estudio de tesis, se intentó utilizar el método de Johnson para convertir los datos obtenidos a una distribución normal con el objetivo de aproximar el valor de la variable aleatoria en una situación ideal. Sin embargo, debido a que los resultados del experimento eran datos no paramétricos, no fue posible evaluar el método de Johnson. Quispe Andía et al (2019) indica que , los datos no paramétricos son un tipo de datos que no se ajustan a una distribución conocida o paramétrica. Por lo tanto, no pueden ser descritos mediante un conjunto finito de parámetros.

Figura 35

Grafica de la normalidad en Minitab



Prueba de Wilcoxon

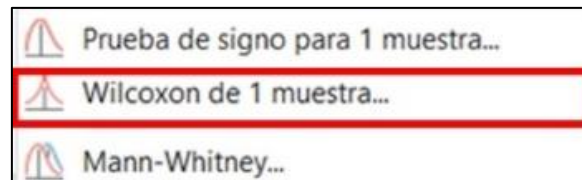
La prueba de los rangos con signo de Wilcoxon es una forma de comparar dos grupos de datos relacionados y ver si hay diferencias entre ellos. Quispe Andía et al (2019) menciona que es una opción a la prueba cuando no se puede suponer que los datos sigan una distribución normal. Se usa cuando los datos son continuos (pero no necesariamente numéricos) y no se asume ningún tipo de distribución en particular. Quispe Andía et al (2019) indica que en la prueba de Wilcoxon, la mediana se utiliza para comparar dos grupos de datos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Al ser una prueba no paramétrica, no se requiere asumir una distribución particular para los datos, lo que la hace útil cuando la distribución no es normal.

Para llevar a cabo la prueba de Wilcoxon en Minitab, se procede de la siguiente manera:

Primero, se realiza una resta entre la amplitud de un sensor en una RPM específica en estado normal y estado de falla para cada uno de los 4 bloques contadores. Los resultados de la resta se almacenan en una columna diferente en el software Minitab. A continuación, en la barra de herramientas de Minitab, se selecciona la opción de "Estadística básica" y "No paramétricos". Una vez dentro de esta sección, se elige la opción "Wilcoxon de 1 muestra" para realizar la prueba de Wilcoxon como se puede apreciar en la Figura 36.

Figura 36

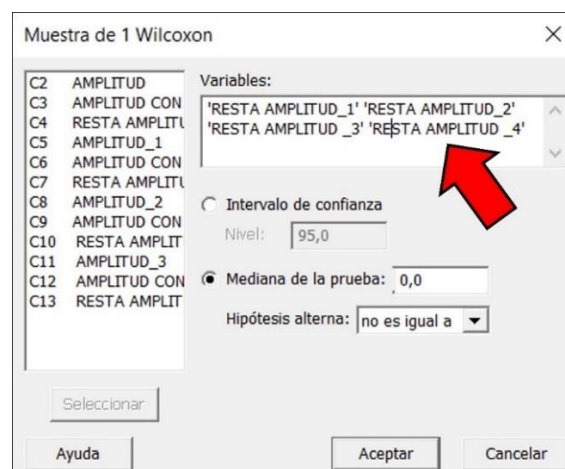
Prueba de Wilcoxon en Minitab



Se selecciona la columna en la que se haya realizado la resta de las amplitudes y se selecciona la opción de "mediana de la prueba" con valor 0.0 y en la opción de hipótesis se seleccionara la opción "de no es igual", el cual comparara y hará la respectiva evaluación de wilcoxon, como se puede apreciar en la Figura 37.

Figura 37

Selección de datos para realizar la estadística de Wilcoxon en Minitab



En la Tabla 8 se presenta el resultado de la aplicación del estadístico de Wilcoxon en el primer experimento con el sensor ECT y una revolución de 790. Se llevó a cabo una resta

entre la amplitud en condición normal y falla, y este procedimiento se realizó en cada uno de los experimentos en los tres regímenes de carga en los tres sensores del estudio. Se puede observar que cada valor de p es menor a 0.05 llegando a la conclusión de que la diferencia entre las medianas es estadísticamente significativa y se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 8

Resultados de la estadística de Wilcoxon

Método	η : mediana de RESTA_AB1; RESTAA_B2; RESTAA_B3; RESTAA_B4			
Estadísticas descriptivas				
Muestra	N	Mediana		
RESTA_AB1	1024	-0,0143595		
RESTAA_B2	1024	-0,0085324		
RESTAA_B3	1024	-0,008144		
RESTAA_B4	1024	-0,0065129		
Prueba				
Hipótesis nula	$H_0: \eta = 0$			
Hipótesis alterna	$H_1: \eta \neq 0$			
Muestra	Número de prueba	de Estadística Wilcoxon	de	Valor p
RESTA_AB1	1024	220397		0
RESTAA_B2	1024	239652		0,016
RESTAA_B3	1024	240253		0,019
RESTAA_B4	1024	243778		0,049

Nota: Este procedimiento se repetirá en los siguientes ocho experimentos, que involucran a los tres sensores considerados en el marco de estudio, y se llevarán a cabo en tres regímenes distintos de carga, tanto en estado normal como en modo de falla.

Las hipótesis nula y alternativa son postulados que se presentan en oposición el uno al otro y que describen la naturaleza de una población. La realización de una prueba de hipótesis implica la evaluación de los datos empíricos obtenidos a partir de una muestra, con el objetivo de determinar si es posible refutar la hipótesis nula.

La determinación de la significancia (p) se lleva a cabo a través de la comparación del valor p con un nivel de significancia previamente establecido. En la mayoría de los casos, un nivel de significancia de 0.05 es adecuado. Si el valor p es menor o igual al nivel de

significancia, y se rechaza la hipótesis nula.

Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, no se puede rechazar la hipótesis nula. En este caso, no hay evidencia suficiente para concluir que la mediana de la población es estadísticamente diferente de la mediana hipotética.

Hipótesis:

Existe una variación en el espectro de vibración en condiciones normales y en modo de falla cuando se desconecta el sensor en un régimen determinado de carga.

Hipótesis nula:

No existe una variación en el espectro de vibración cuando se desconecta el sensor en un régimen determinado de carga.

Hipótesis alternativa:

Existe una variación en el espectro de vibración cuando se desconecta el sensor en un régimen determinado de carga.

El valor de $p = 0.016$, 0.019 y 0.049 son menores que 0.05 , se llega a la conclusión de que la diferencia entre las medianas es estadísticamente significativa, entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

3.7 CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIONES MEDIANTE EL USO DEL SOFTWARE MINITAB

El proceso de caracterizar un espectro de vibración consiste en medir y analizar las vibraciones en un sistema para producir una representación gráfica de las frecuencias y amplitudes de las vibraciones. Para realizar esta caracterización, se lleva a cabo el "agrupamiento de datos". Este proceso implica en reunir las 8 amplitudes y luego seleccionar las ocho amplitudes, se procederá a calcular una "mediana compuesta", que permite resumir la información contenida en un conjunto de datos en un solo valor que describe la tendencia central de dichos datos como se aprecia en la Tabla 9. La utilización de la mediana en este contexto permite obtener una medida robusta y fiable de las amplitudes de las vibraciones en el sistema, lo cual es fundamental para la caracterización precisa del espectro de vibración.

Luego, se aplicará una mediana a cada una de las medianas compuestas con el fin de obtener una única mediana compuesta. Estos valores resultantes representarán la amplitud y permitirán caracterizar el espectro de vibración de manera precisa y confiable.

Tabla 9 Mediana compuesta a los datos

Mediana compuesta a los datos

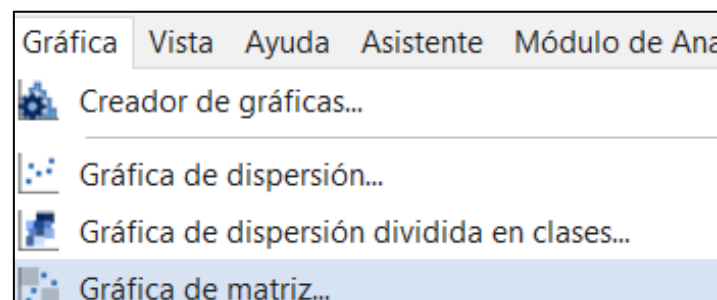
Frecuencia	Amplitud1	Amplitud2	Amplitud3	Amplitud4	Amplitud5	Amplitud6	Amplitud7	Amplitud8	Mediana compuesta_1
0	0,0739	0,0526	0,0158	0,0739	0,0526	0,0158	0,0739	0,0526	0,0526
0,49	0,0918	0,0677	0,0139	0,0918	0,0677	0,0139	0,0918	0,0677	0,0677
0,98	0,0256	0,0173	0,0114	0,0256	0,0173	0,0114	0,0256	0,0173	0,0173
1,46	0,0092	0,0036	0,0120	0,0092	0,0036	0,0120	0,0092	0,0036	0,0092
1,95	0,0032	0,0028	0,0026	0,0032	0,0028	0,0026	0,0032	0,0028	0,0028
2,44	0,0054	0,0073	0,0013	0,0054	0,0073	0,0013	0,0054	0,0073	0,0054
2,93	0,0078	0,0098	0,0122	0,0078	0,0098	0,0122	0,0078	0,0098	0,0098
3,42	0,0063	0,0271	0,0202	0,0063	0,0271	0,0202	0,0063	0,0271	0,0202
3,91	0,0062	0,0274	0,0078	0,0062	0,0274	0,0078	0,0062	0,0274	0,0078
4,39	0,0046	0,0096	0,0032	0,0046	0,0096	0,0032	0,0046	0,0096	0,0046
4,88	0,0055	0,0121	0,0119	0,0055	0,0121	0,0119	0,0055	0,0121	0,0119
5,37	0,0212	0,0273	0,0141	0,0212	0,0273	0,0141	0,0212	0,0273	0,0212
5,86	0,1291	0,0849	0,1430	0,1291	0,0849	0,1430	0,1291	0,0849	0,1291

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos, ya que contienen 10,000 datos por experimento.

Para caracterizar el espectro de vibración en Minitab se realizará, seleccionando la opción de “Creador de graficas”, tal como se aprecia en la Figura 34.

Figura 38

Creador de graficas en Minitab



Para caracterizar el espectro de vibración se seleccionaran los datos de “frecuencia”, “amplitud en estado normal” y la “amplitud en falla” con el tipo de gráfica: “Serie de tiempo”, como se representa en la Figura 39.

Figura 39

Gráfica de serie de tiempo en Minitab

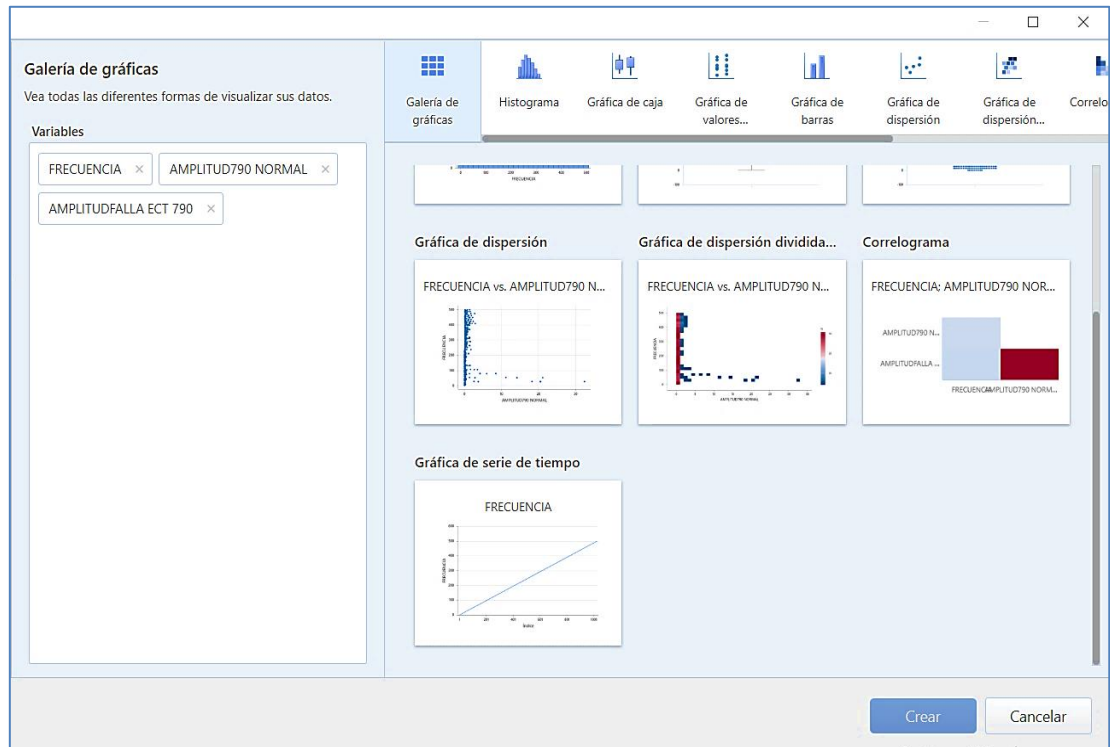
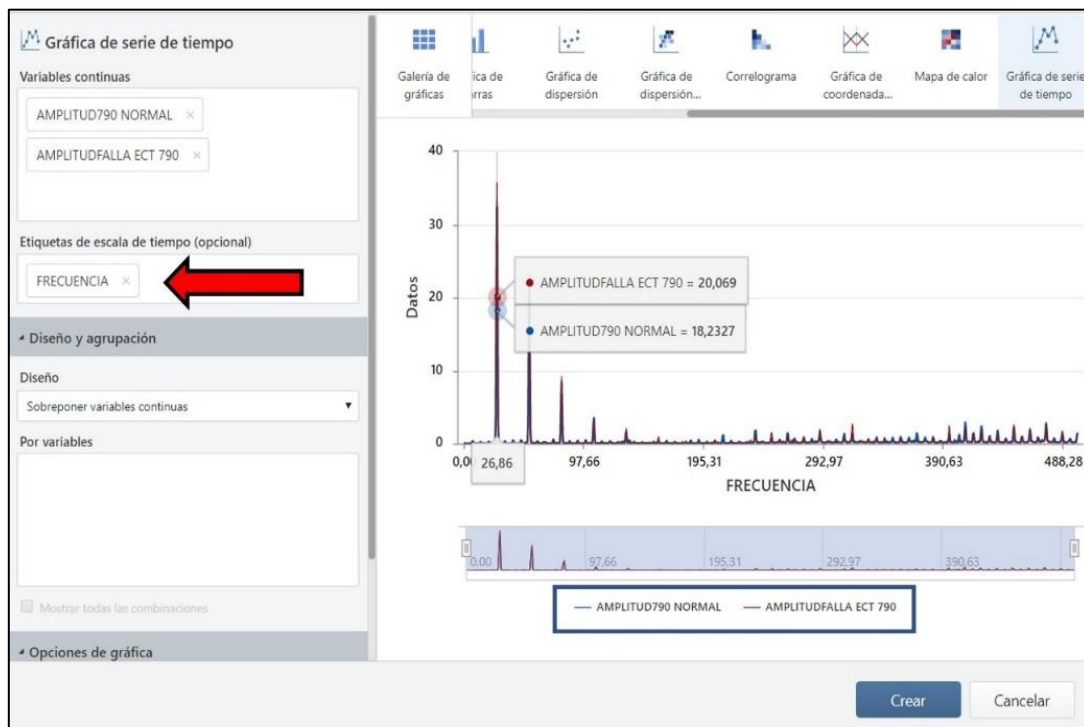


Figura 40

Caracterización del espectro de vibración



Minitab muestra los espectros sobrepuestos de los ensayos en estado normal y estado de falla, como se aprecia en la Figura 40. Como se mencionó anteriormente, debido a la falta de diferencias relevantes en las medianas, se decidió calcular una mediana compuesta por bloque contador y luego combinar estas medianas compuestas a través de una mediana adicional con el fin de caracterizar de manera integral el espectro de vibración del sensor."

3.8 CRONOGRAMA

En la tabla 8 se detalla el cronograma de las actividades realizadas durante el tiempo establecido para su realización siendo su totalidad 400 horas.

Tabla 10

Cronograma de actividades a desarrollarse

Actividades	Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Investigación, planificación del diseño experimental y descripción del registro de datos	12 H															
Investigación y definición de las fallas a realizar al motor		25 H														
Planteamiento del problema.		25H														
Obtención y análisis de literaturas.		25H														
Toma de datos y desarrollo del diseño experimental			22 H	22 H	22 H											
Análisis y procesamiento de los datos obtenidos			20 H	20 H	20 H											
Elaboración de trabajo de titulación					20 H	20 H										
Defensa pública de avance de tesis									8 H							
Resultados y discusión									20H							
Resumen										20 H						
Corrección de trabajo de titulación											20 H	20 H	20 H			
Informe de trabajo final														20 H	20 H	
Total de horas	400															

3.9 PRESUPUESTO

A continuación, en la Tabla 11 se detallan el presupuesto para la elaboración de este proyecto. En el presupuesto se detallan entre los gastos como el transporte, la documentación, impresiones y los diferentes recursos a utilizar en nuestro trabajo de titulación.

Tabla 11*Presupuesto referencial para el proyecto*

PRESUPUESTO ESTIMADO	
DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL
Transporte//Movilización	\$400
Impresiones	\$30
Horas de laboratorios (motores y computacional) y equipos automotrices	\$570
Total	\$1000

4. CAPITULO IV

4.1 ANALISIS DE LOS ESPECTROS CARACTERISTICOS

En este capítulo, se lleva a cabo el análisis del comportamiento de las variables obtenidas a través de la toma de datos y su posterior aplicación a la estadística. Para ello, se utilizó el software Minitab. Los datos correspondientes a las variables frecuencia y amplitud se obtuvieron a través del software analizador de vibraciones Dewesoft y el sensor piezoeléctrico, el cual fue encargado de medir y registrar las vibraciones del motor en los estados normales y con fallas, así como en los tres regímenes de carga (790, 1800 y 2500) RPM. En el presente estudio, primero se llevó a cabo la configuración del equipo analizador de vibraciones Dewesoft para la selección del espectro de frecuencia característico de vibración. La configuración de la frecuencia de muestreo, se determinó el rango de tiempo de adquisición de datos en un periodo controlado de 10 segundos y con una frecuencia de 1000Hz con el fin de cumplir con la norma ISO 10816-6. Con esta configuración previa, se logró una adquisición precisa y rigurosa de los datos para la posterior evaluación del espectro de vibración. Cabe recalcar que para la toma de datos se tomó en cuenta el estado del clima correspondiente a cada experimento como se aprecia en la tabla 12

Tabla 12

Bitácora previa a la toma de datos

Dia-hora	Característica	Unidad
11 de enero / 2023 09:00am / 15:00pm	Temperatura ambiente	28-30°C
	Humedad %	73%
	Presión atmosférica	1009.9 mb
	Punto de condensación	26.3°C

Al momento de evaluar los datos, se determinó que estos no cumplen con la prueba de normalidad, se intentó normalizarlos mediante la transformada de Johnson, una técnica utilizada para convertir los datos en una distribución normal y se llegó a la conclusión que, en este estudio, los datos son no paramétricos y la prueba de Wilcoxon sería una herramienta fundamental para su análisis.

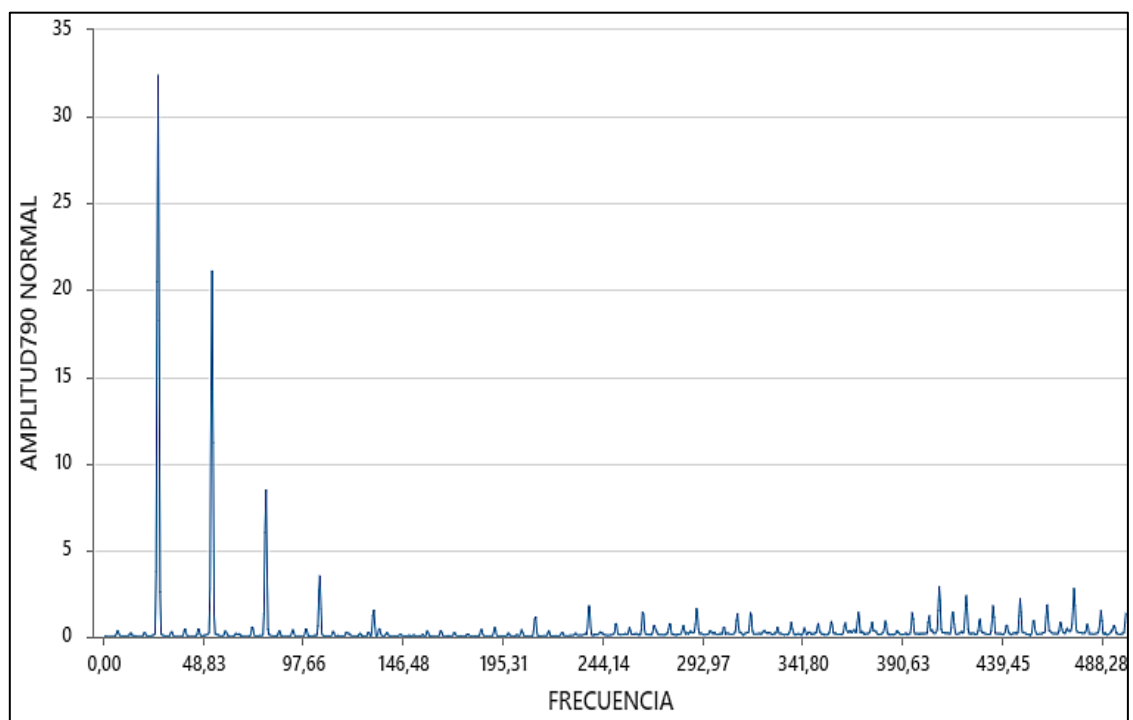
4.1.1 ESPECTROS CARACTERISTICOS EN CONDICION NORMAL A 790, 1800 Y 2500 RPM

En la Figura 41 se muestra la amplitud de vibración y la frecuencia medida del motor Diésel en su estado normal a una velocidad de 790 RPM en estado normal. Para poder caracterizar el espectro característico, se tomaron las 8 amplitudes de los ensayos por cada tratamiento.

Después de seleccionarlal, se calculó una "mediana compuesta" para resumir la información del conjunto de datos y poder caracterizar el espectro característico. Este mismo procedimiento se realizó para los regímenes de carga de 1800 y 2500 RPM en estado normal y en estado con falla.

Figura 41

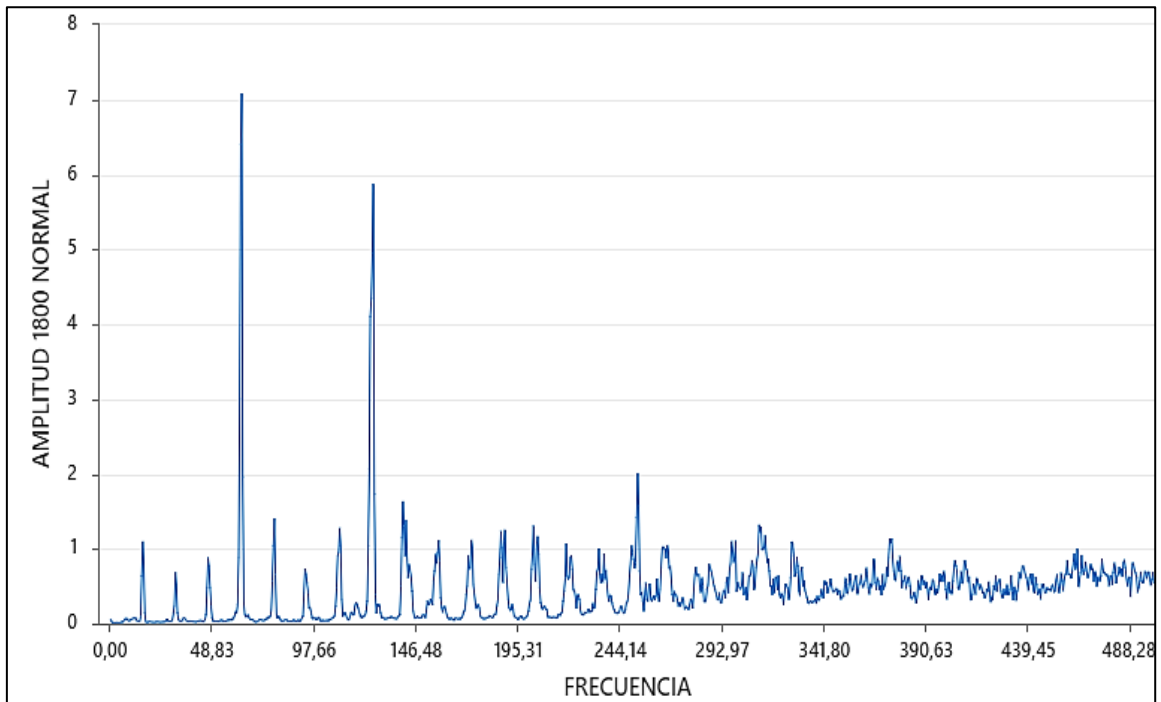
Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 790 RPM



La Figura 42 ilustra la relación entre la amplitud de vibración y la frecuencia medida del motor Diésel a una velocidad de 1800 RPM en estado normal.

Figura 42

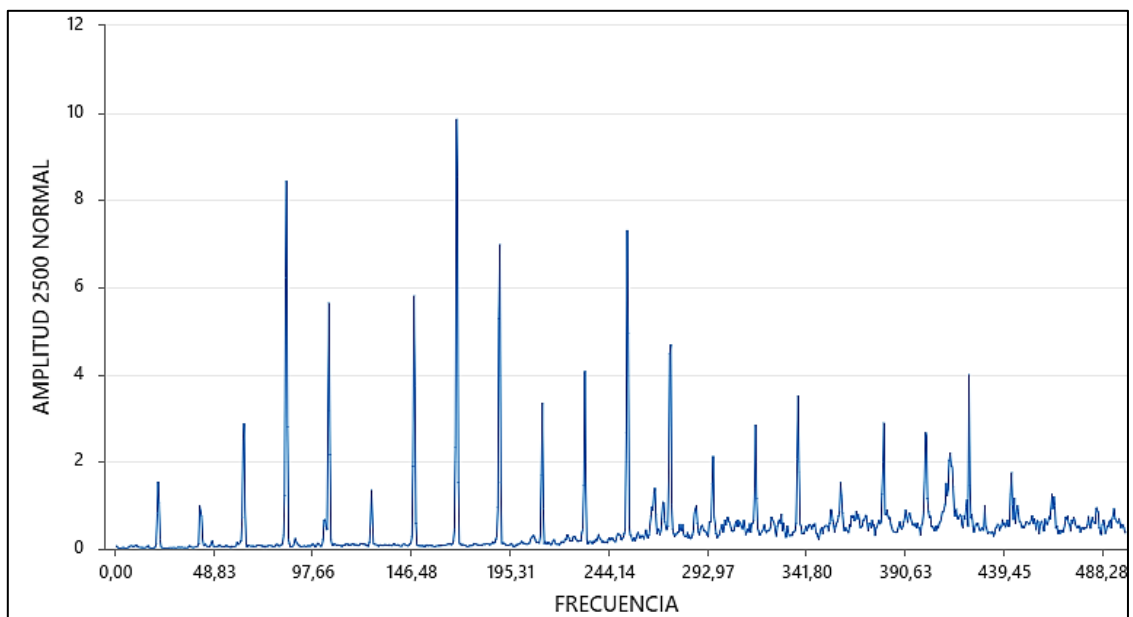
Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 1800 RPM



Por último, la Figura 43 ilustra la relación entre la amplitud de vibración y la frecuencia medida del motor Diésel a una velocidad de 2500 RPM en estado normal.

Figura 43

Caracterización del espectro de vibración en estado normal a 2500 RPM



4.1.2 ESPECTRO CARACTERISTICOS EN CONDICION DE FALLA DEL SENSOR ECT A 790, 1800 Y 2500 RPM

La Figura 44 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida por el sensor ECT a una velocidad de 790 RPM en modo de falla.

Figura 44

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 790 RPM

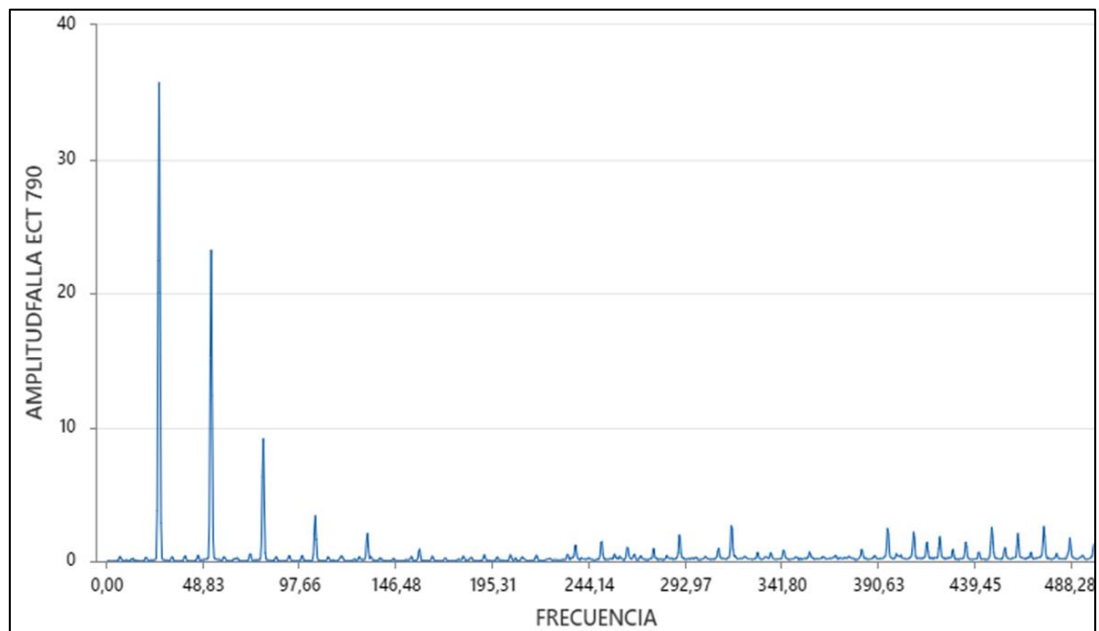
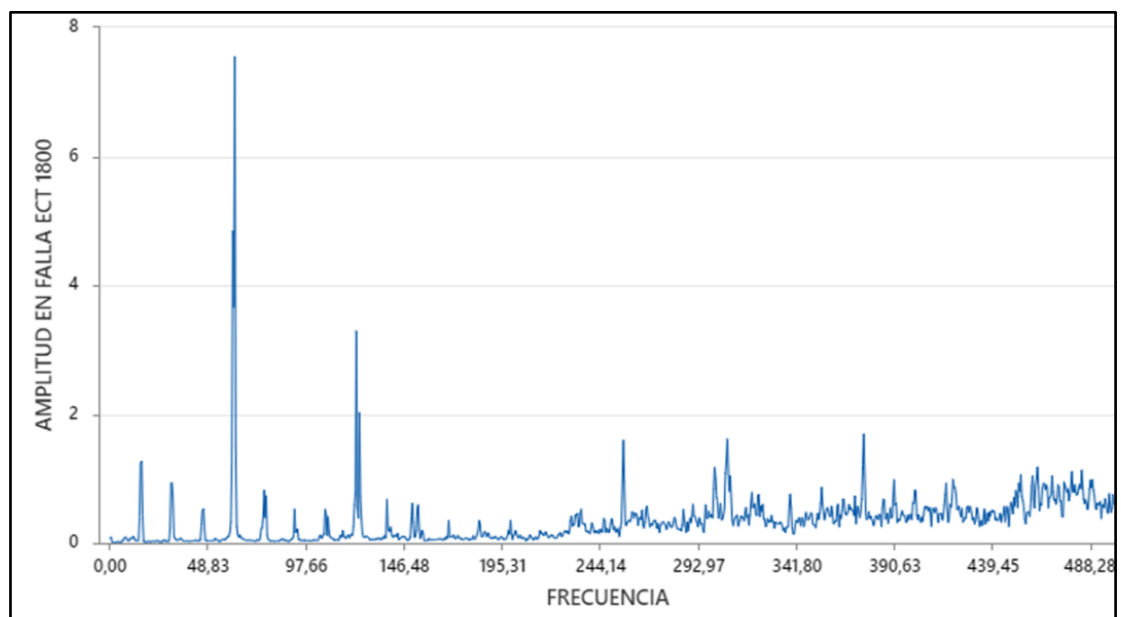


Figura 45

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 1800 RPM

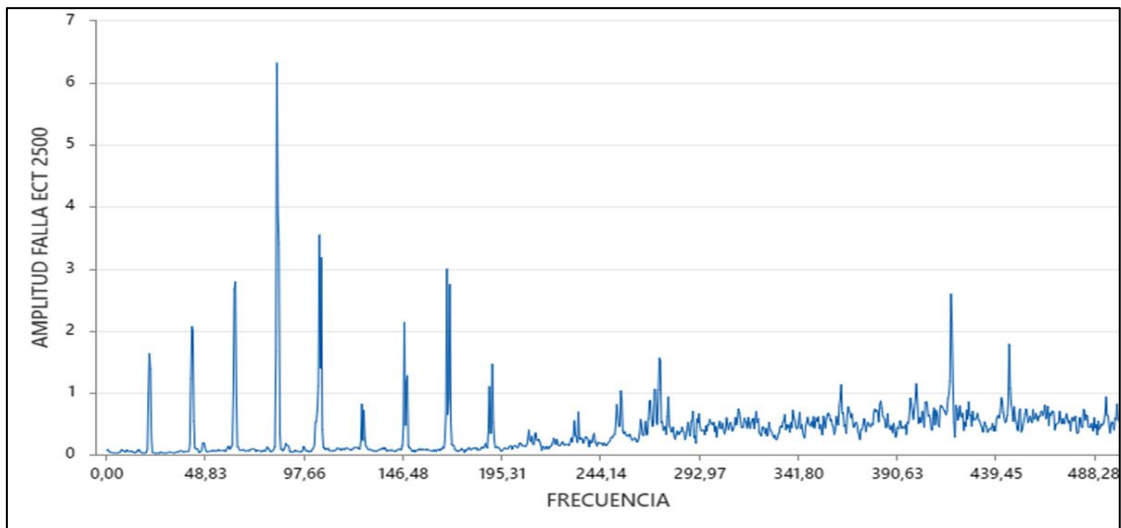


La Figura 45 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida del motor diésel a una velocidad de 1800 RPM en falla.

Por último, la Figura 46 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida del motor diésel a una velocidad de 2500 RPM en falla.

Figura 46

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor ECT en 2500 RPM

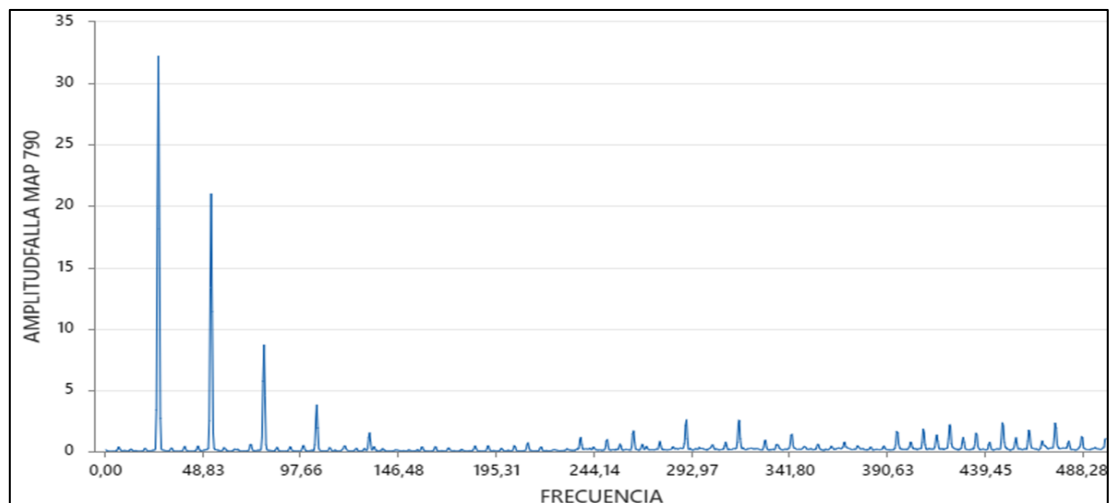


4.1.3 ESPECTRO CARACTERISTICOS EN CONDICION DE FALLA DEL SENSOR MAP A 790, 1800 Y 2500 RPM

La Figura 43 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida por el sensor MAP a una velocidad de 790 RPM en falla.

Figura 47

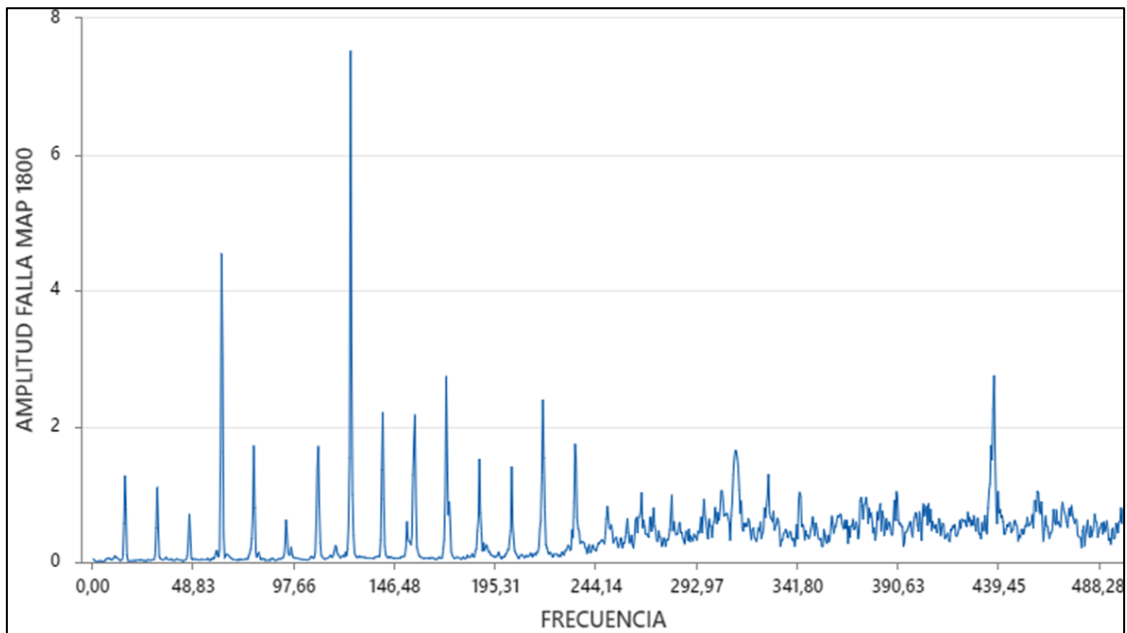
Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor MAP en 790 RPM



La Figura 48 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida del motor diésel a una velocidad de 1800 RPM en falla.

Figura 48

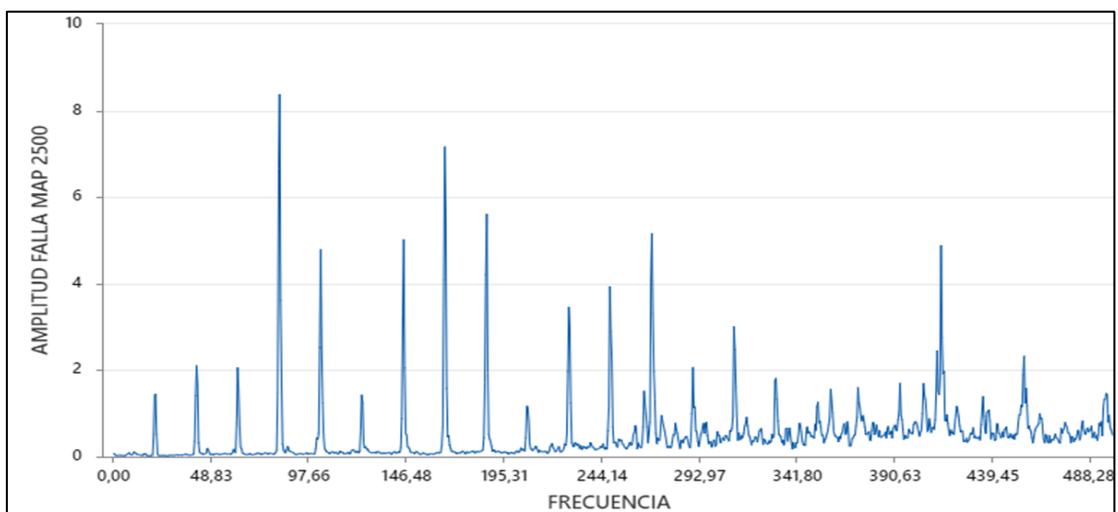
Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor MAP en 1800 RPM



Por último, la Figura 45 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida del motor diésel a una velocidad de 2500 RPM en falla.

Figura 49

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor MAP en 2500 RPM

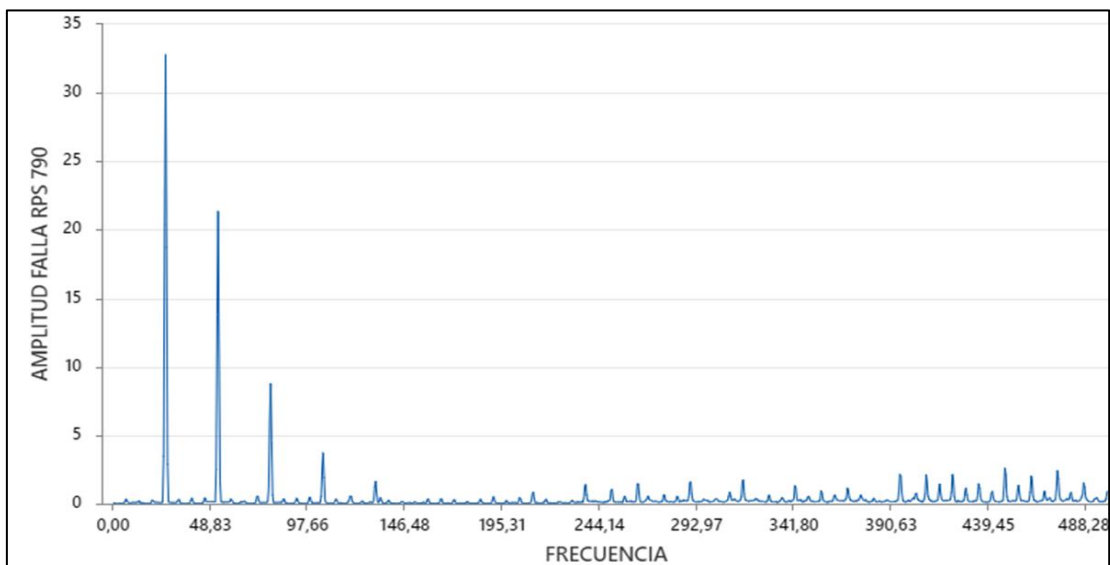


4.1.4 ESPECTRO CARACTERISTICOS EN CONDICION DE FALLA DEL SENSOR RPS A 790, 1800 Y 2500 RPM

La Figura 50 ilustra la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida por el sensor MAP a una velocidad de 790 RPM en falla.

Figura 50

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 790 RPM



Las Figuras 51 y 52 ilustran la relación entre la amplitud de la vibración y la frecuencia medida del motor diésel a una velocidad de 1800 y 2500 RPM con falla.

Figura 51

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 1800 RPM

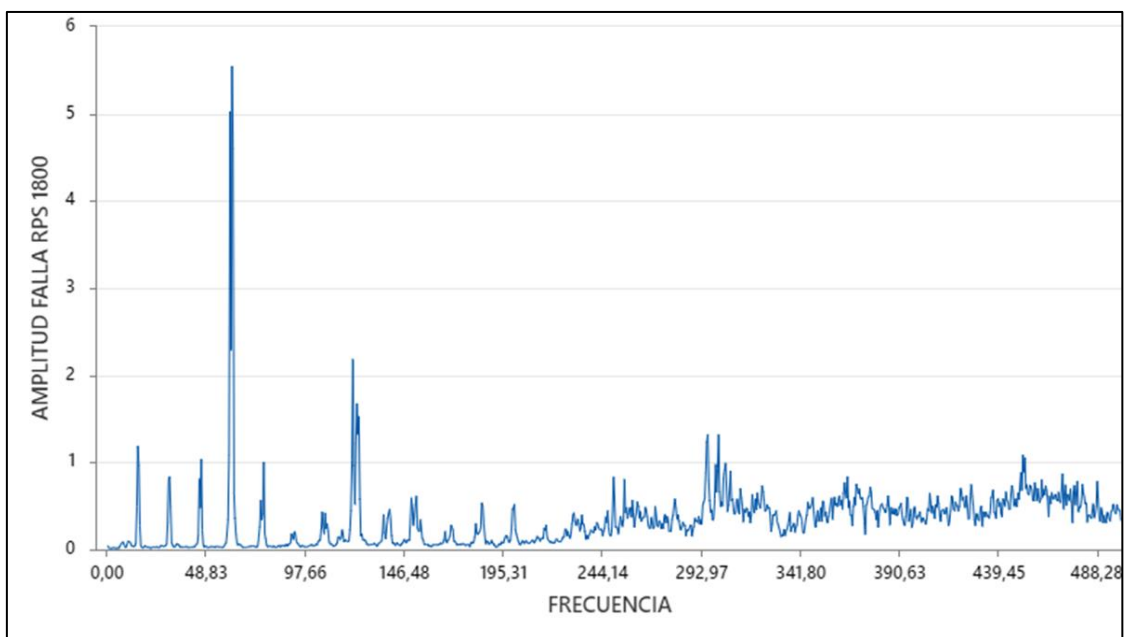
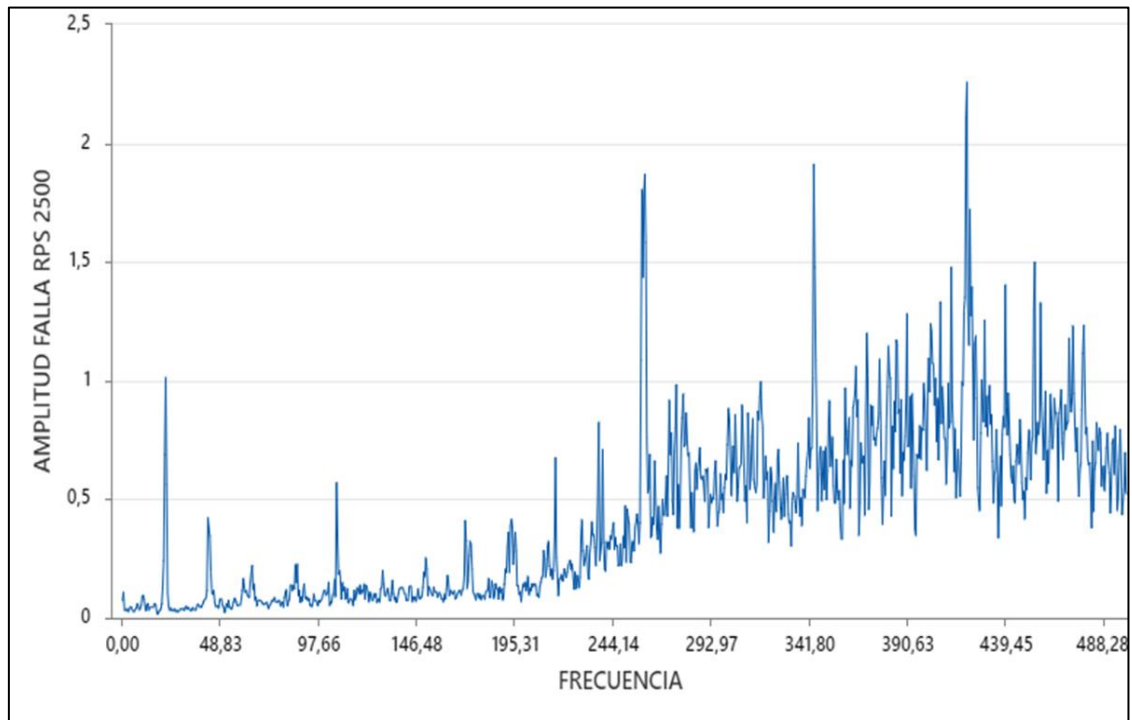


Figura 52

Caracterización del espectro de vibración en falla del sensor RPS en 2500 RPM



4.2 COMPARATIVA DE LOS ESPECTROS DE VIBRACION EN CONDICION NORMAL VS FALLA

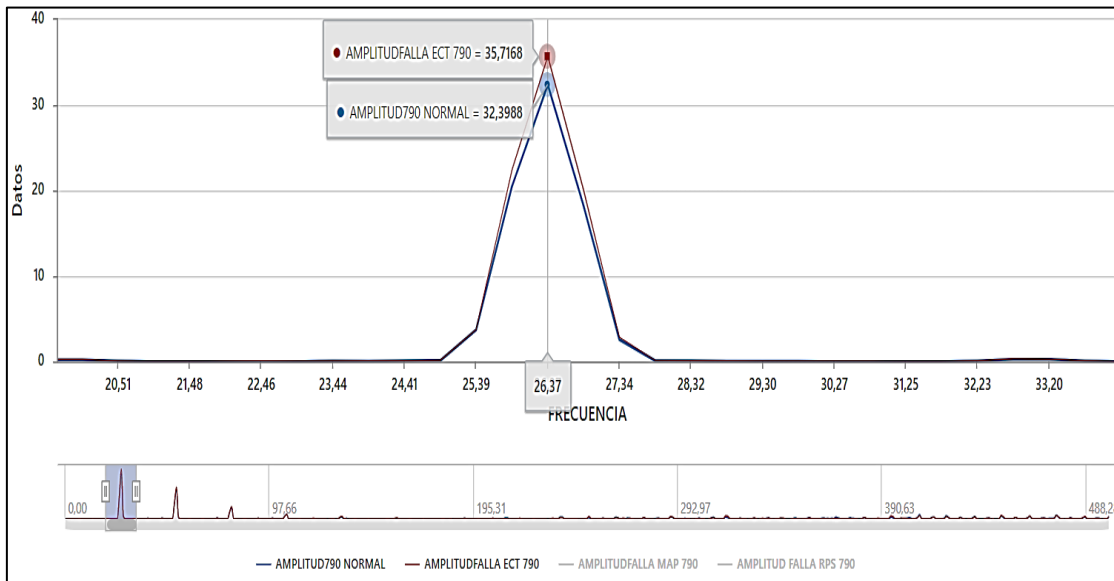
4.2.1 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR ECT 790 RPM

Se presenta el análisis del espectro de vibración a 790 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 53 muestra 2 espectros, el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor (color azul), sin presentar ninguna falla y el segundo exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor ECT (color rojo).

Se observa que en la frecuencia de 26,37 Hz se presenta un pico más alto que el normal, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 35,71 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 32,39 m/s².

Figura 53

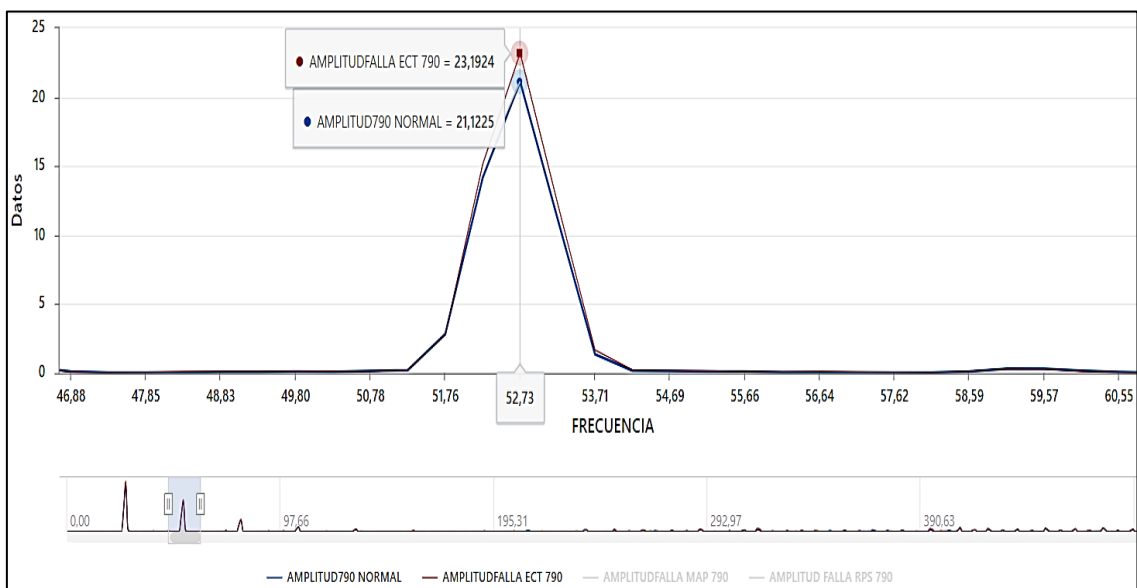
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor ECT en falla vs normal a 790 RPM



En la Figura 54, con una frecuencia de 52,73, Hz se presenta un pico más alto que el normal, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 23,19 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 21,12 m/s².

Figura 54

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor ECT en falla vs normal a 790 RPM

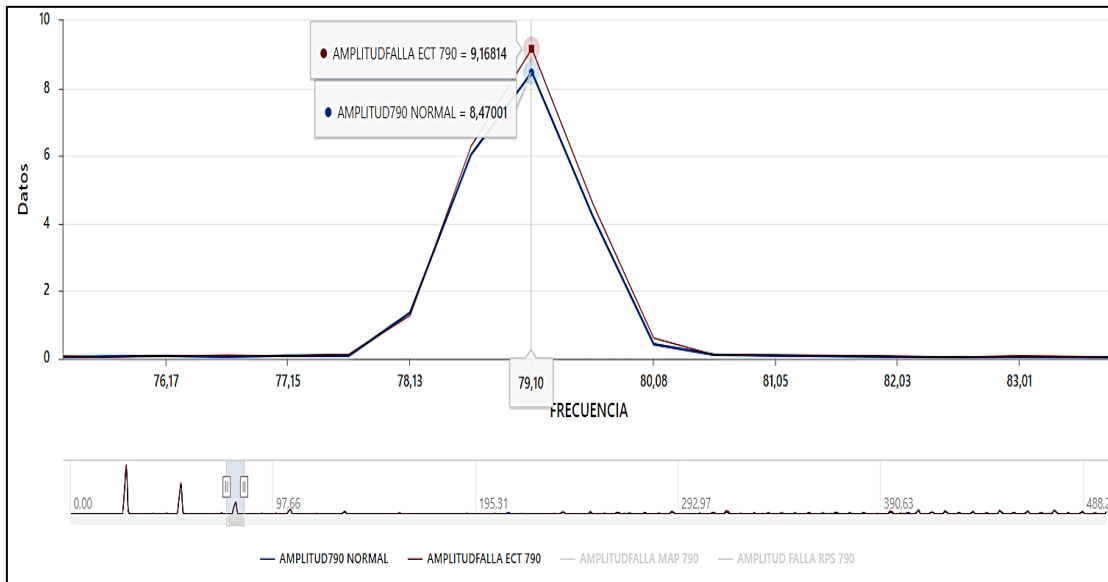


En la Figura 55, con una frecuencia de 79,10 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 9,16 m/s²,

mientras que el espectro en condición normal con el valor de 8,47 m/s².

Figura 55

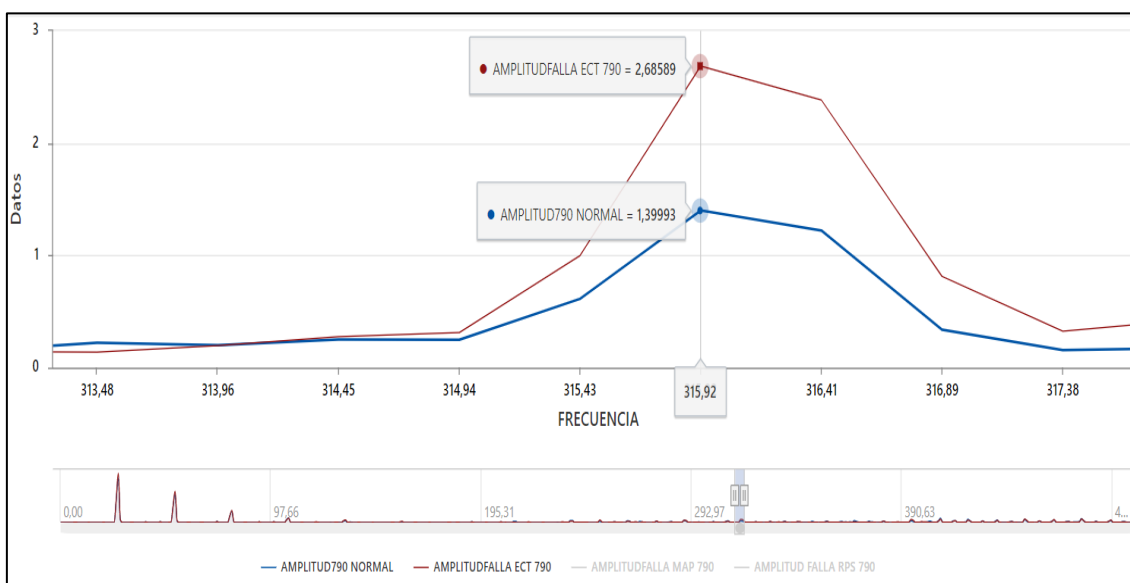
Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM



En la Figura 56, con una frecuencia de 315,43 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 2,68 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,39 m/s²

Figura 56

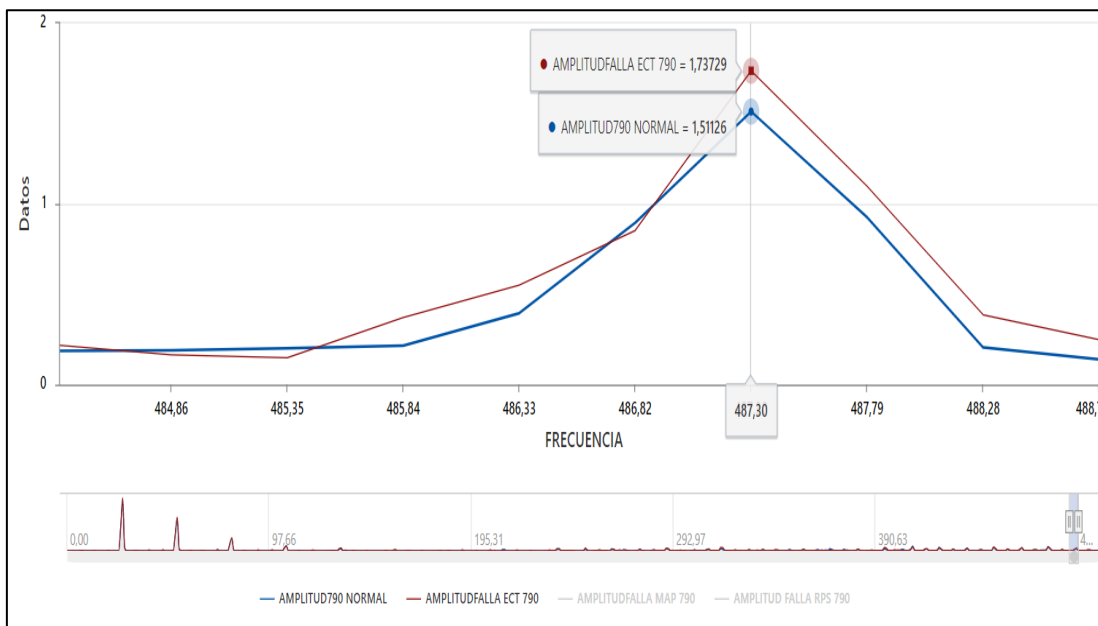
Análisis comparativo 4 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM



En la Figura 57, con una frecuencia de 487,30 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 1,73 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,51 m/s².

Figura 57

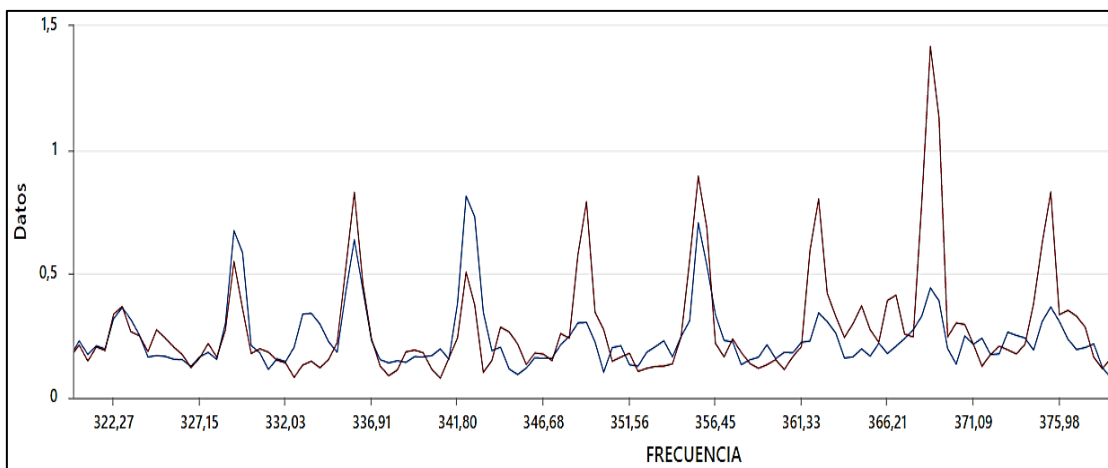
Análisis comparativo 5 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM



Es importante destacar que, a una velocidad de 790 rpm, y a partir de la frecuencia de 322,27 Hz en adelante, como se muestra en la Figura 58, se presentó un desfase de la señal con un notorio aumento en las inestabilidades detectadas, impidiendo identificar con precisión los picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro.

Figura 58

Desfase de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 790 RPM



4.2.1.1 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR ECT 1800 RPM

A continuación, se presenta el análisis del espectro de vibración a 1800 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 59 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla.

Por otro lado, el segundo espectro muestra los resultados de las fallas inducidas a los sensores ECT. Se observa que en la frecuencia de 15,63 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 1,27 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,09 m/s².

Figura 59

Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 1800 RPM

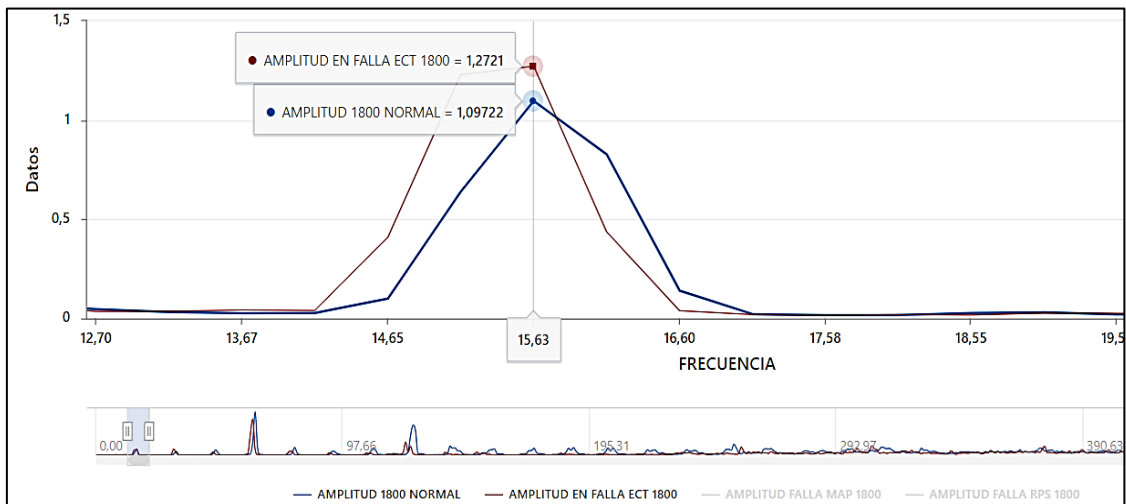
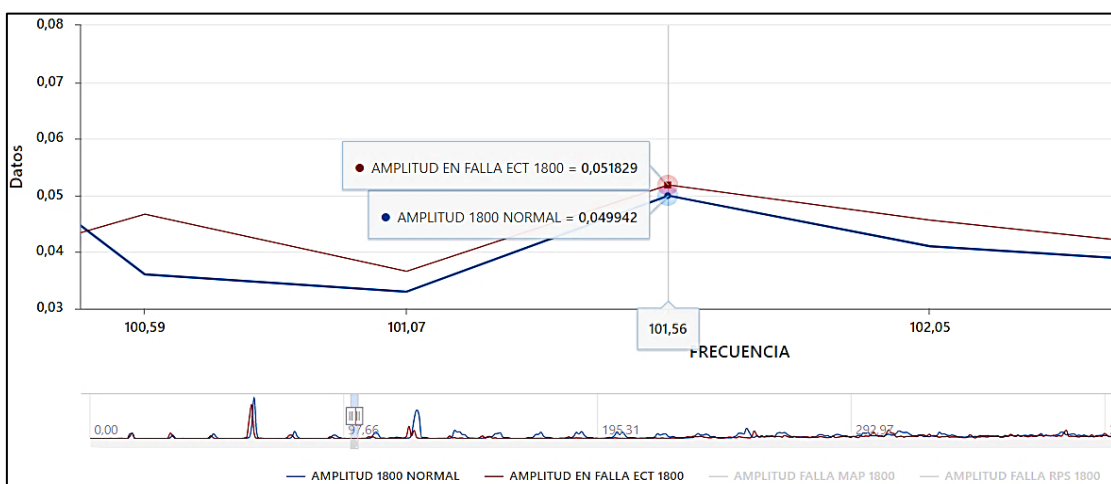


Figura 60

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 1800 RPM



En la Figura 60, con una frecuencia de 101,56 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 0,05 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,04 m/s².

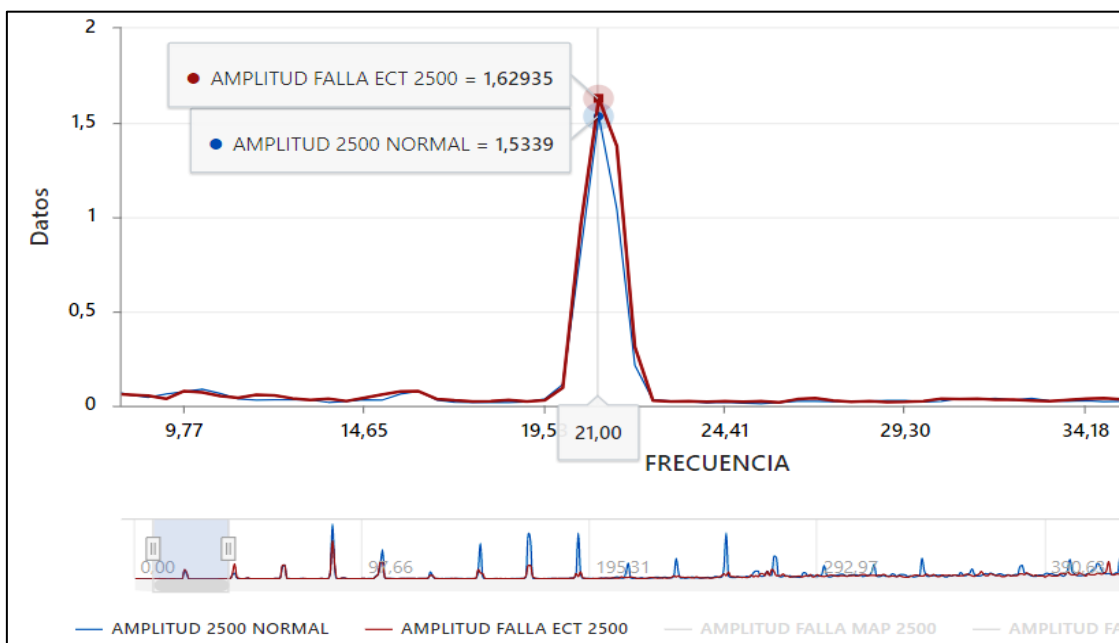
Es importante destacar que, a una velocidad de 1800 rpm, no se logró identificar con precisión los picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, lo que posiblemente generó inestabilidades detectadas por el sensor piezoeléctrico debido a la gravedad de la falla y a la alta velocidad a la que se sometió el motor.

4.2.1.2 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR ECT 2500 RPM

Finalmente, se presenta el análisis del espectro de vibración a 2500 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 61 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor ECT.

Figura 61

Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 2500 RPM



Es importante resaltar que, a una velocidad de 2500 rpm, no fue posible identificar con precisión picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, que posiblemente generó inestabilidades

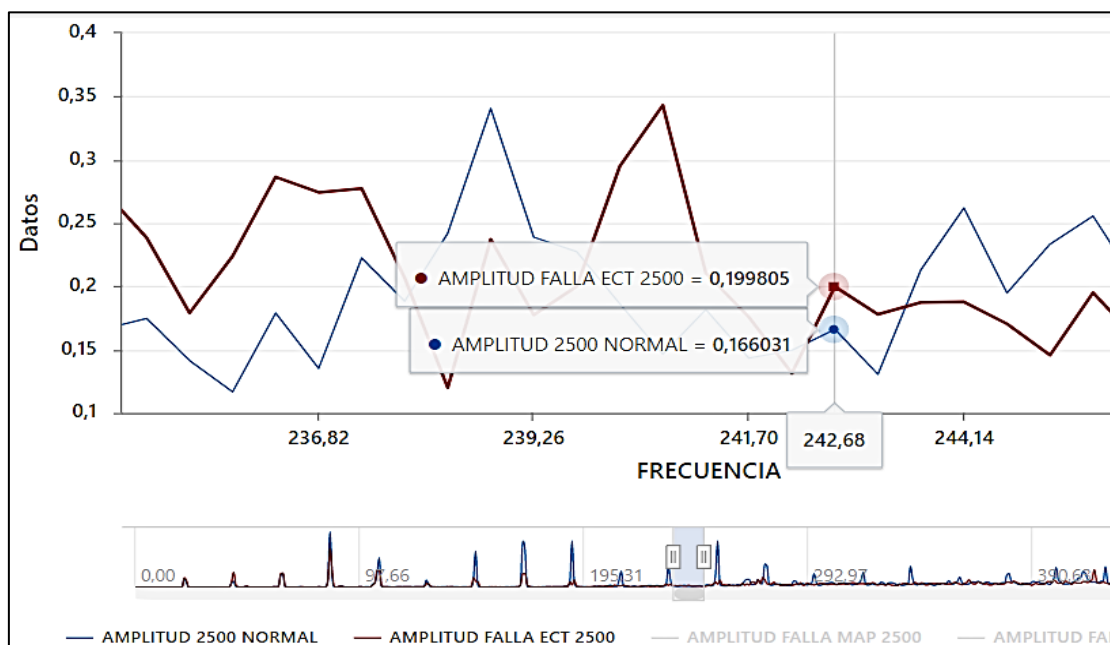
que fueron detectadas por el sensor piezoeléctrico debido a la gravedad de la falla y la alta velocidad a la que se sometió el motor.

Se observa que en la frecuencia de 21,00 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor ECT, obteniendo un valor de 1,62 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,53 m/s².

Así mismo, en la Figura 62, con una la frecuencia de 242,68 Hz se produce el pico más alto que es la amplitud en falla del sensor ECT siendo el valor de 0,19 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,16 m/s².

Figura 62

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla ECT vs normal a 2500 RPM



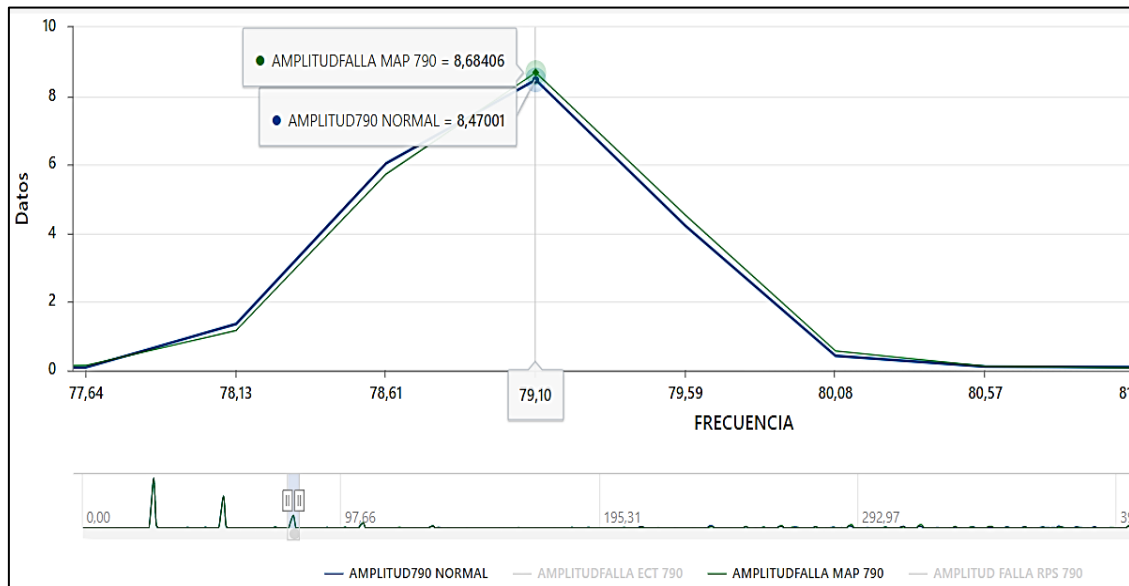
4.2.2 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR MAP 790 RPM

Se presenta el análisis del espectro de vibración a 790 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 63 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor MAP.

Se observa que en la frecuencia de 79,10 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 8,68 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 8,47 m/s².

Figura 63

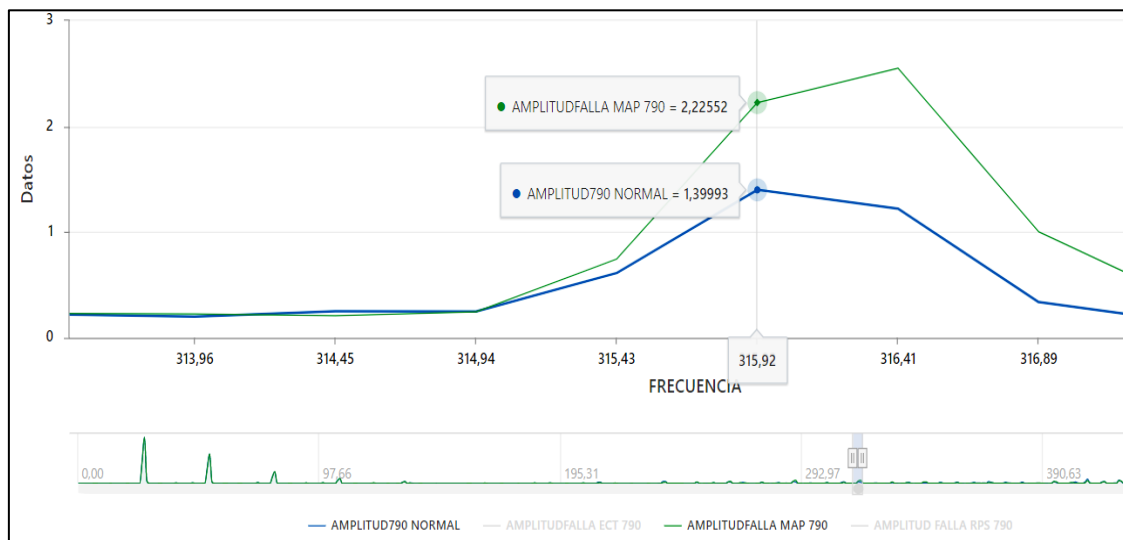
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500 RPM



En la Figura 64, con una frecuencia de 315,92 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 2,22 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,39 m/s².

Figura 64

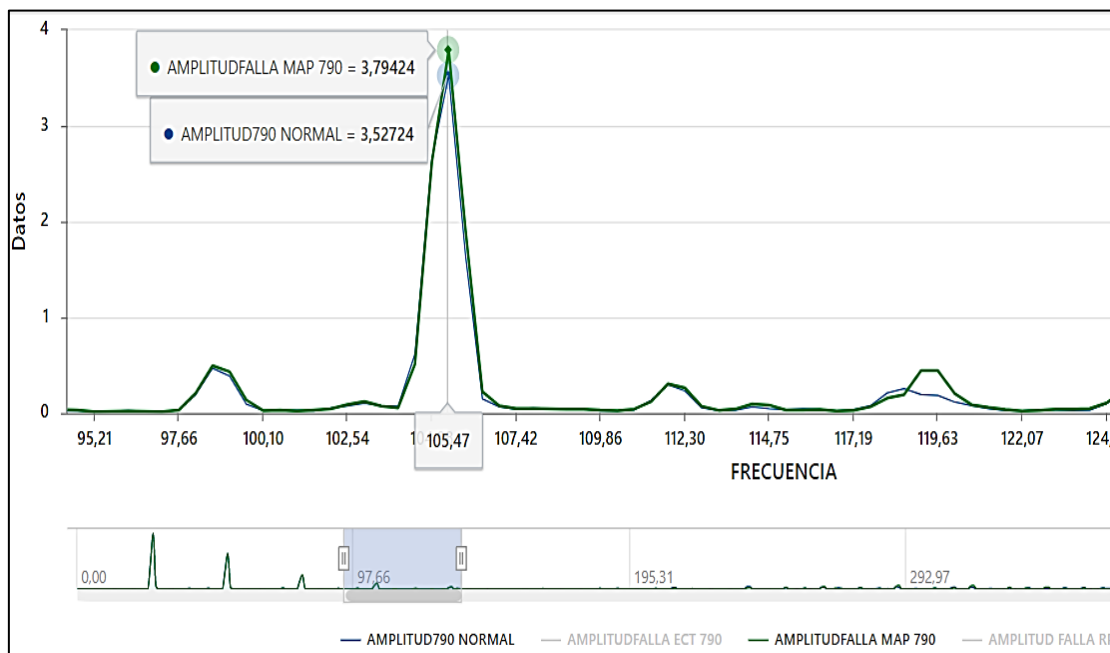
Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500 RPM



En la Figura 65, con una frecuencia de 105,47 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 3,79 m/s², mientras que el espectro en condición normal con el valor de 3,52 m/s².

Figura 65

Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 790 RPM



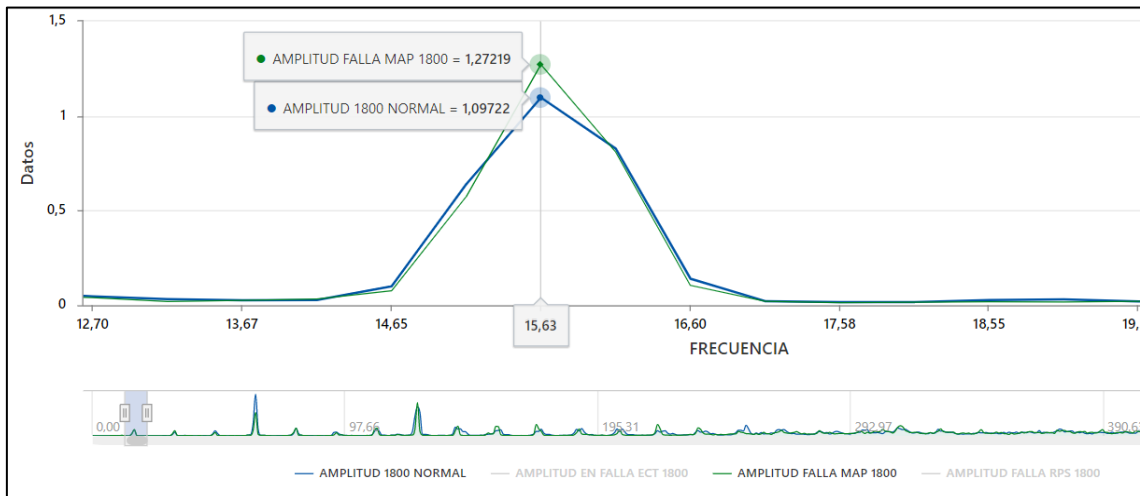
4.2.2.1 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR MAP 1800 RPM

A continuación, se presenta el análisis del espectro de vibración a 1800 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 66 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe los resultados de las fallas inducidas a los sensores MAP.

Se observa que en la frecuencia de 15,63 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 1,27 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,09 m/s².

Figura 66

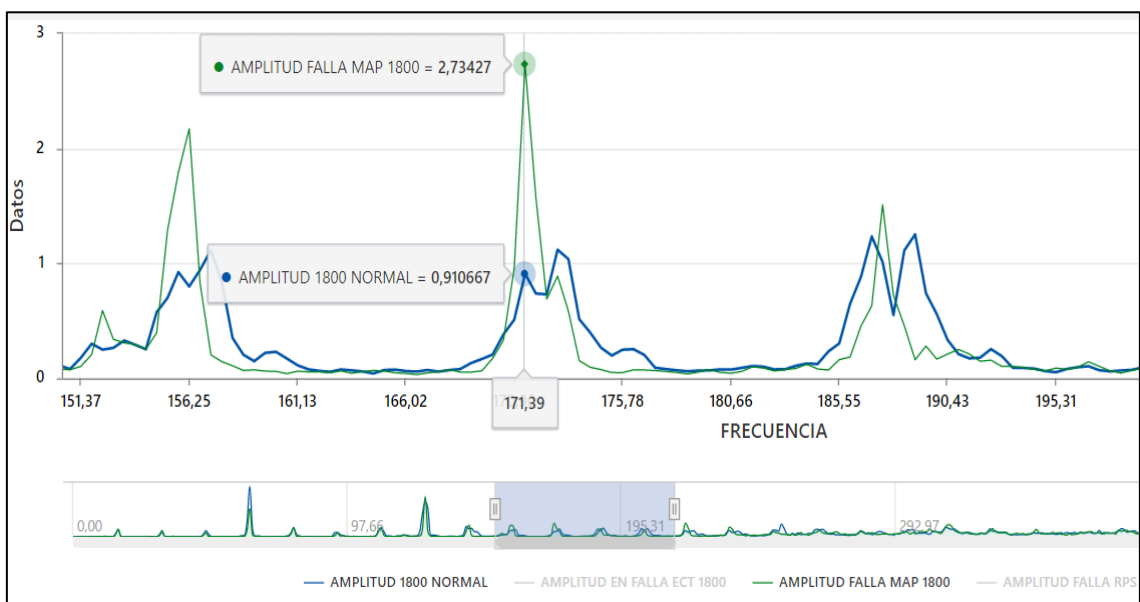
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 1800 RPM



En la Figura 67, con una frecuencia de 171,39 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 2,73 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,91 m/s².

Figura 67

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 1800 RPM

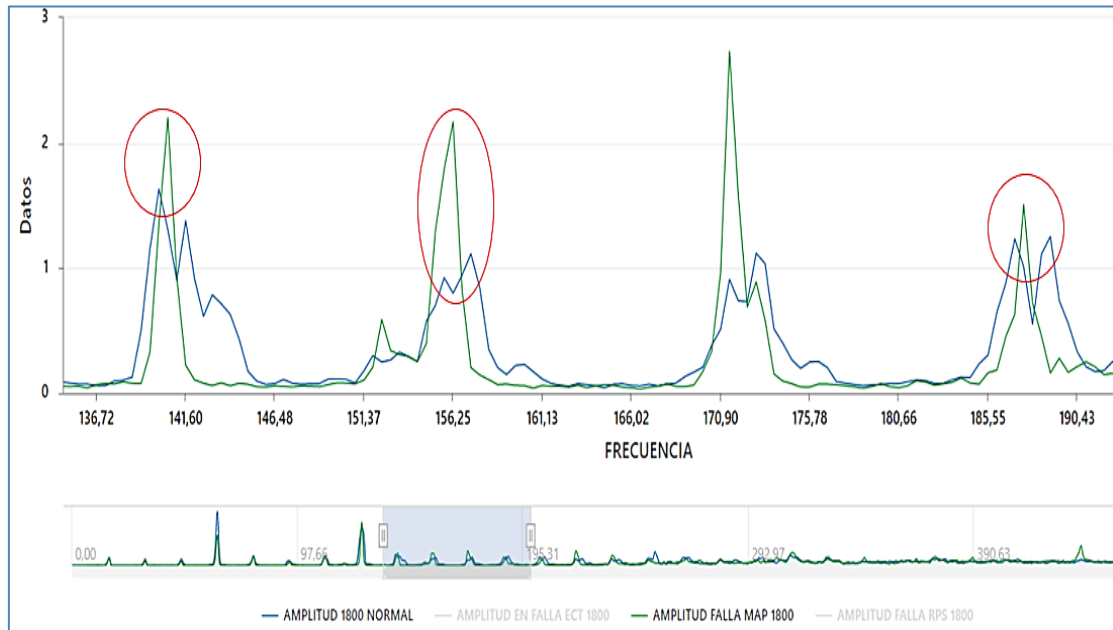


Como se aprecia en la figura 68, es importante resaltar que, a una velocidad de 1800 rpm, no fue posible identificar con precisión picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, que posiblemente generó inestabilidades que fueron detectadas por el sensor piezoeléctrico

debido a la gravedad de la falla y la alta velocidad a la que se sometió el motor.

Figura 68

Desfase de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 1800 RPM



4.2.2.3 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR MAP 2500 RPM

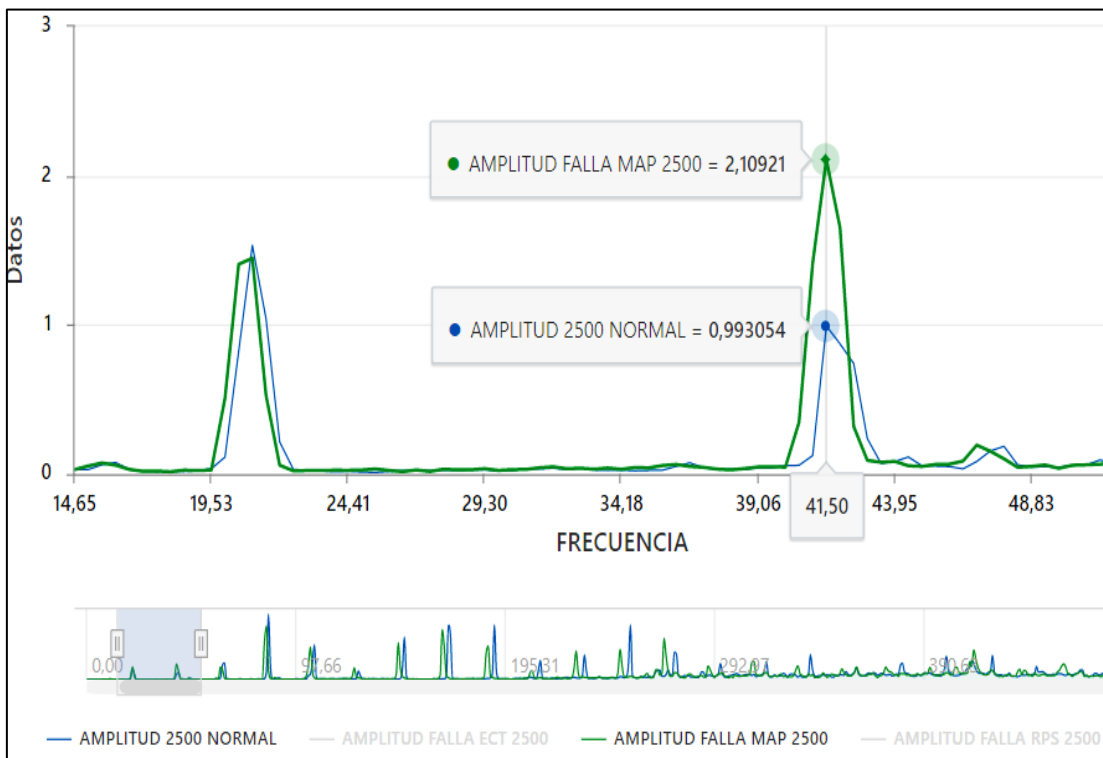
Finalmente, se presenta el análisis del espectro de vibración a 2500 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 69 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla.

Por otro lado, el segundo espectro exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor MAP. Es importante resaltar que, a una velocidad de 1800 rpm, no fue posible identificar con precisión picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, que posiblemente generó inestabilidades que fueron detectadas por el sensor piezoeléctrico debido a la gravedad de la falla y la alta velocidad a la que se sometió el motor.

Se observa que en la frecuencia de 41,50 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor MAP, obteniendo un valor de 2,10 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,99 m/s².

Figura 69

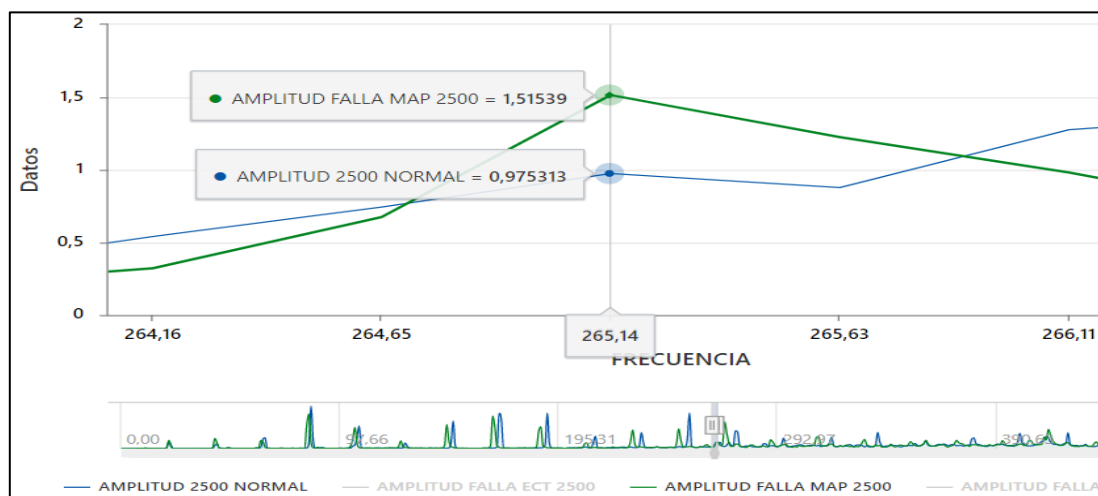
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500 RPM



Así mismo, en la Figura 70, con una la frecuencia de 265,14 Hz se produce el pico más alto que es la amplitud en falla del sensor MAP siendo el valor de 1,51 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,97 m/s².

Figura 70

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla MAP vs normal a 2500 RPM

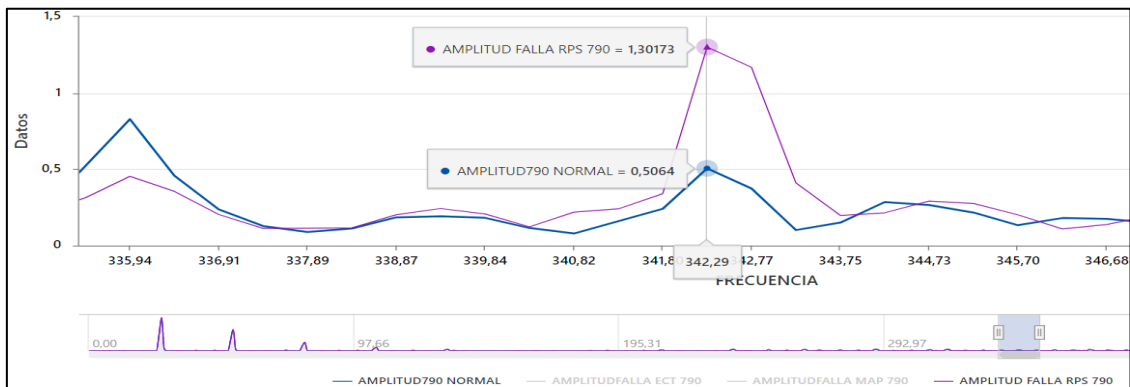


4.2.3 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR RPS 790 RPM

Se presenta el análisis del espectro de vibración a 790 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 71 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor RPS. Se observa que en la frecuencia de 342,29 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 1,30 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,50 m/s².

Figura 71

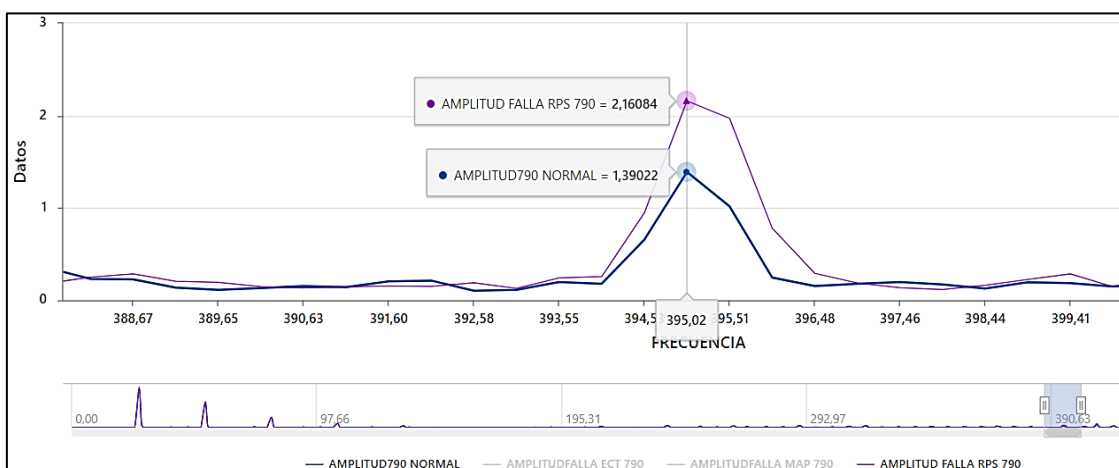
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor RPS en falla vs normal a 790 RPM



En la Figura 72, con una frecuencia de 395,02 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 2,16 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 1,39 m/s².

Figura 72

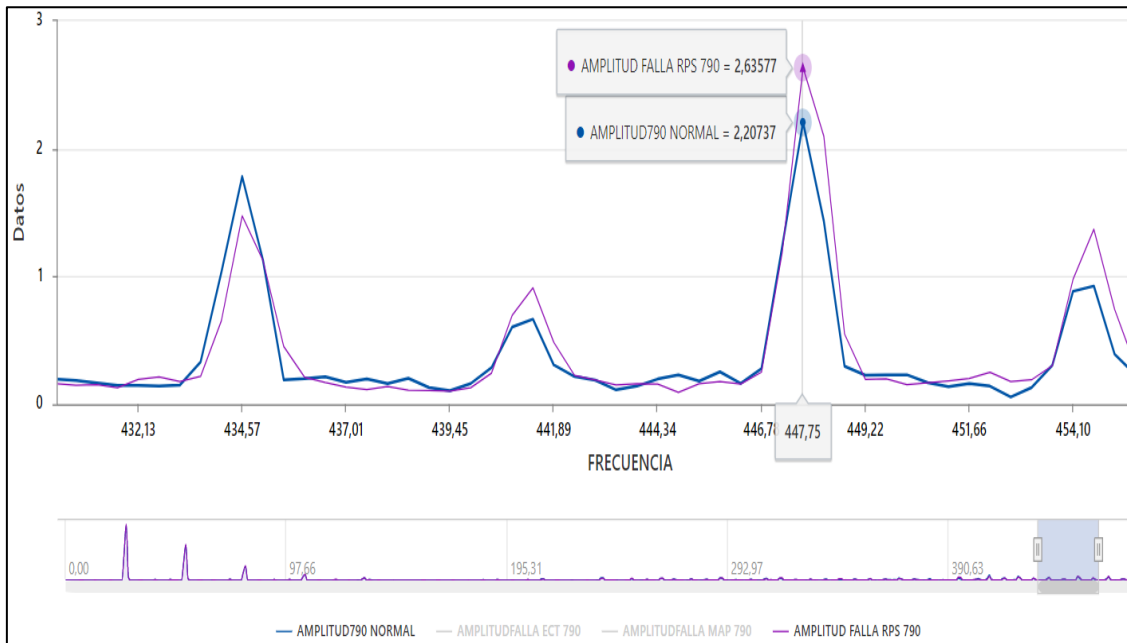
Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor RPS en falla vs normal a 790 RPM



En la Figura 73, con una frecuencia de 447,75 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 2,63 m/s², mientras que el espectro en condición normal con el valor de 2,20 m/s².

Figura 73

Análisis comparativo 3 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 790 RPM

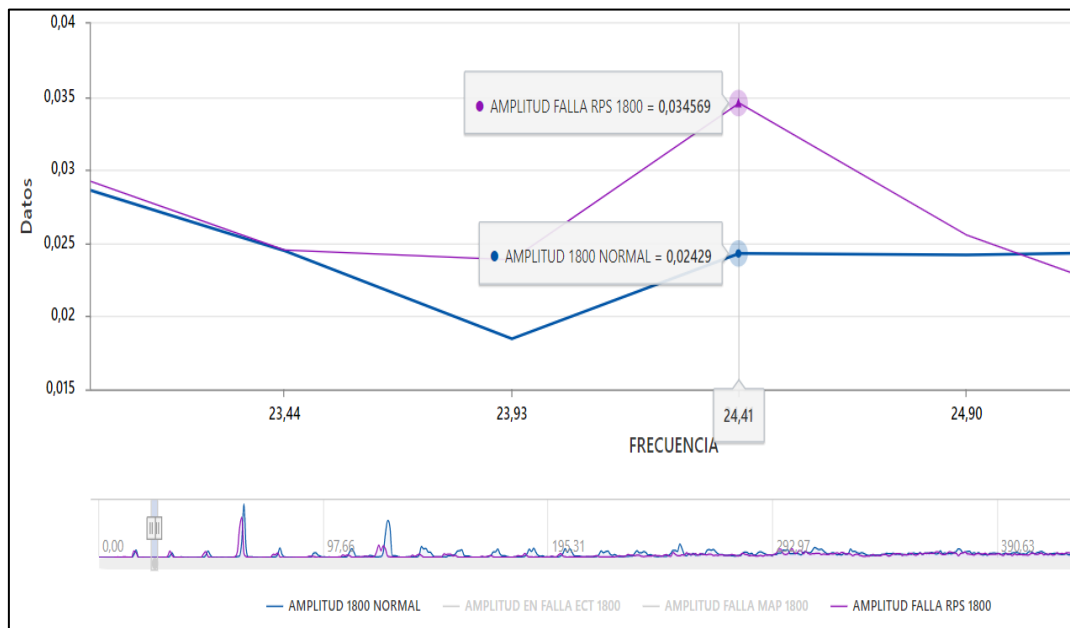


4.2.3.1 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR RPS 1800 RPM

A continuación, se presenta el análisis del espectro de vibración a 1800 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 74 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe los resultados de las fallas inducidas a los sensores RPS. Se observa que en la frecuencia de 24,41 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 0,03 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,02 m/s².

Figura 74

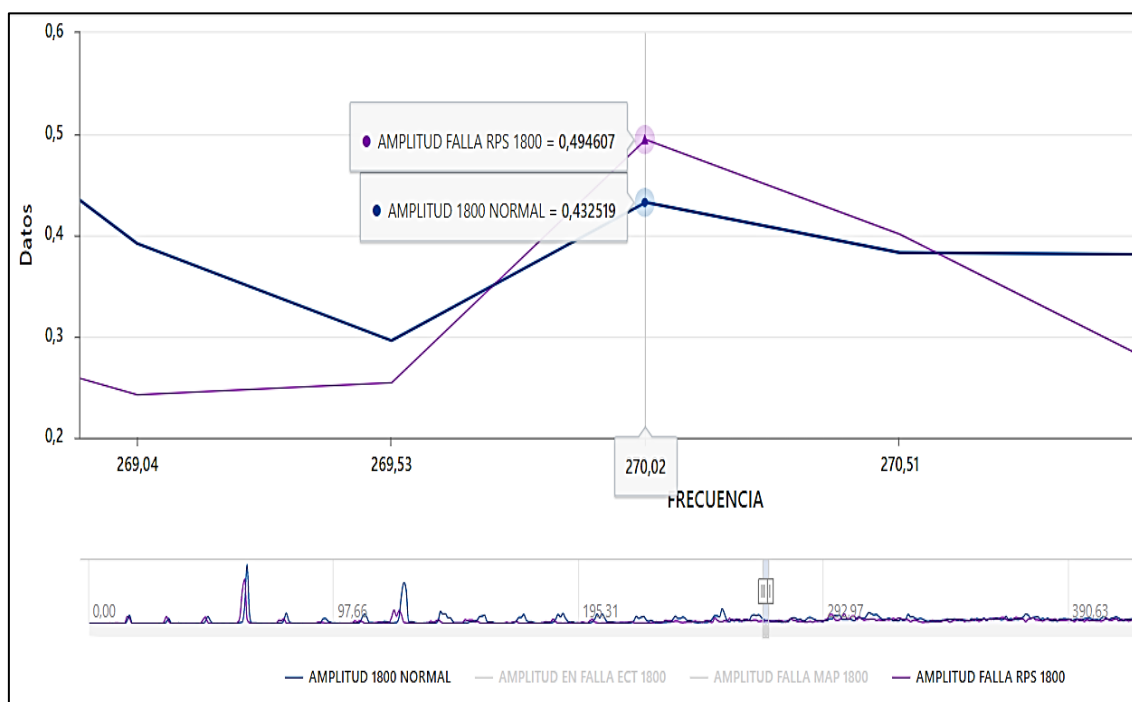
Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 1800 RPM



En la Figura 75, con una frecuencia de 270,02 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 0,49 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,43 m/s².

Figura 75

Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 1800 RPM



Es importante resaltar que, a una velocidad de 1800 rpm, no fue posible identificar con precisión picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, que posiblemente generó inestabilidades que fueron detectadas por el sensor piezoeléctrico debido a la gravedad de la falla y la alta velocidad a la que se sometió el motor.

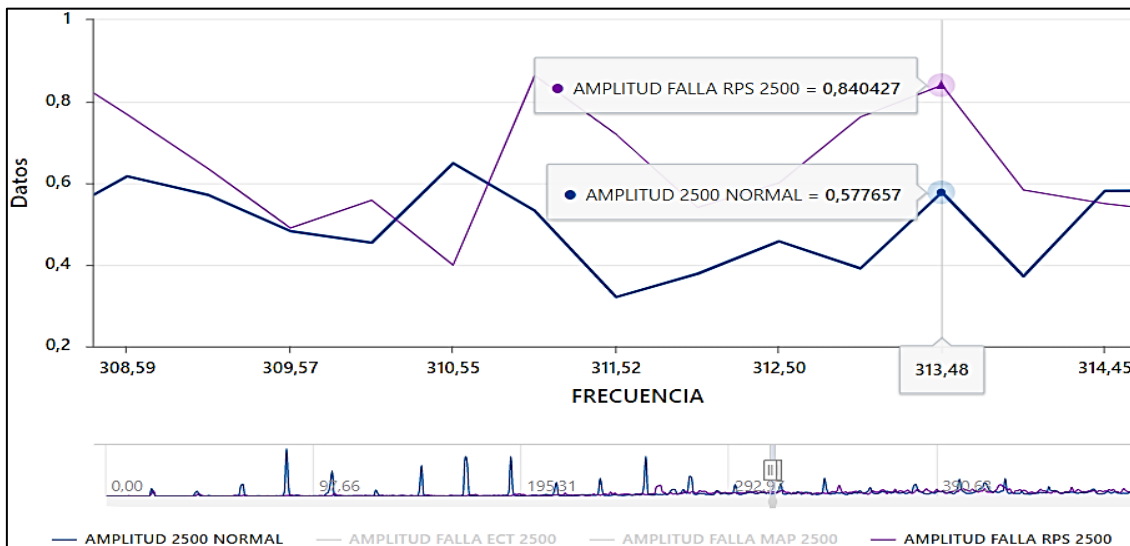
4.2.3.1.1 CONDICION NORMAL VS FALLA DEL SENSOR RPS 2500 RPM

Finalmente, se presenta el análisis del espectro de vibración a 2500 rpm mediante la implementación del método de superposición. La Figura 76 muestra 2 espectros, siendo el primero de ellos correspondiente al espectro de vibración estado normal del motor, sin presentar ninguna falla. Por otro lado, el segundo espectro exhibe el resultado de la falla inducida a el sensor RPS.

Se observa que en la frecuencia de 313,48 Hz se presenta el pico más alto, el cual corresponde a la amplitud en falla en el sensor RPS, obteniendo un valor de 0,84 m/s² mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,57 m/s².

Figura 76

Análisis comparativo 1 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM



Así mismo, en la Figura 77, con una la frecuencia de 496,09 Hz se produce el pico más alto que es la amplitud en falla del sensor RPS siendo el valor de 0,79 m/s², mientras que el espectro en condición normal se encuentra con el valor de 0,70 m/s².

Figura 77

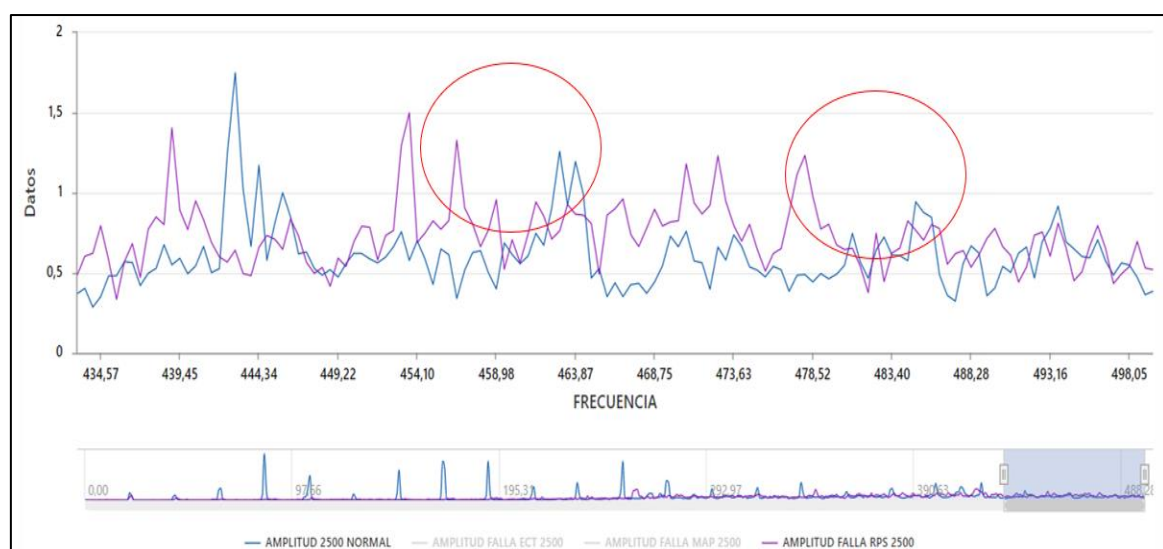
Análisis comparativo 2 de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM



Es importante resaltar que, a una velocidad de 2500 rpm, no fue posible identificar con precisión picos característicos de falla o armónicos confiables en el espectro. Esto se debió al notable desfase de la señal con falla, que posiblemente generó inestabilidades que fueron detectadas por el sensor piezoeléctrico debido a la gravedad de la falla y la alta velocidad a la que se sometió el motor,

Figura 78

Desfase de la amplitud del sensor en falla RPS vs normal a 2500 RPM



4.3 TABLA DE RESULTADOS

En la Tabla 13, se presenta los resultados de los análisis realizados a los sensores, en la cual se pueden apreciar los datos resaltados con tres diferentes colores para indicar la magnitud de la amplitud de los espectros de vibración en falla de los sensores. El color naranja representa el valor más alto, el celeste representa el segundo valor más alto y el verde representa el tercer valor más alto. Es importante señalar que todos estos valores superan la amplitud normal del motor en su estado sin falla.

Tabla 13

Comparativa de resultados de los 3 sensores a 790 RPM

COMPARATIVA DE RESULTADOS			
Frecuencia	Amplitud falla ECT 790	Amplitud falla MAP 790	Amplitud falla RPS 790
0	0,02399	0,08698	0,05511
0,49	0,03195	0,10551	0,06919
0,98	0,01040	0,01595	0,01782
1,46	0,00981	0,00624	0,00703
1,95	0,00521	0,00425	0,00421
2,44	0,00580	0,00688	0,00762
2,93	0,01081	0,01264	0,01830
3,42	0,01819	0,01513	0,03396
3,91	0,01593	0,01205	0,02162
4,39	0,01264	0,00913	0,01668
4,88	0,00995	0,00927	0,02365
5,37	0,01488	0,01505	0,03876
5,86	0,10958	0,11566	0,11458
6,35	0,32777	0,34668	0,32345
6,84	0,32967	0,33959	0,30319
492,68	0,29512951	0,234965275	0,348872275
493,16	0,29929608	0,19238345	0,344829455
493,65	0,442091645	0,26456794	0,440649625
494,14	0,407373875	0,320199405	0,383653815
494,63	0,201643195	0,21883757	0,2231452
495,12	0,148260705	0,18135255	0,133628875
495,61	0,13987979	0,20458543	0,17847705
496,09	0,13583134	0,20929037	0,16957711
496,58	0,167944445	0,14804559	0,123631675
497,07	0,177322595	0,14165052	0,18715918
497,56	0,21004009	0,23395112	0,16241267
498,05	0,25593447	0,300575165	0,187297285
498,54	0,383093935	0,313395085	0,365800945
499,02	0,91731018	0,96575874	0,810412855
499,51	1,2765257	1,0729794	0,933921855

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos, ya que contienen 1,024 datos por sensor

5. CAPÍTULO V.

5.1 CONCLUSIONES

- Al término de este proyecto se desarrolló una metodología específica para la adquisición de los espectros de vibraciones del motor, el mismo que se fundamentó en la normativa de vibración ISO-10816-6 y que coincide con estudios previos del área de vibraciones. Así mismo, se determinó que la ubicación más óptima del sensor piezoeléctrico a nivel del cigüeñal es en la posición R1.1 con un tiempo de medición de 10 segundos, esto garantiza una buena precisión al menor costo operacional.
- Se obtuvo los espectros de vibraciones del motor según la metodología desarrollada, para ello se tomaron 8 muestras para cada tratamiento por sensor bajo los regímenes de carga 790, 1800 y 2500 RPM. En cada tratamiento se obtuvieron 1024 muestras por milisegundo durante 10 segundos. Cada muestra corresponde a una amplitud de aceleración a una frecuencia específica, dando un total de 10240000 datos a procesar por tratamiento.
- Se caracterizó los espectros vibraciones del motor con falla de cada uno de los sensores a los distintos regímenes de carga. Para ello se realizó una depuración de los datos utilizando la metodología de bloques contadores, obteniendo 1024 datos por bloque contador, dando un total de 4096 datos por espectro, cabe mencionar que esta técnica depuración viene por defecto en el software Dewesoft y garantiza su efectividad. El espectro característico fue resultado de realizar la mediana compuesta de las amplitudes en función de la frecuencia de los 8 tratamientos de cada sensor.
- Para la validación de nuestros espectros característicos se aplicó el uso de la estadística de Wilcoxon puesto que los datos de este estudio no cumplen con la normalidad ni la homogeneidad necesarias para aplicar otras técnicas estadísticas. Wilcoxon ayudó a identificar si existían variaciones significativas en el comportamiento del motor mediante comparaciones de amplitudes entre el estado normal y el estado en falla. Se pudo observar que los valores de p oscilaron entre 0 y 0.49, siendo siempre menor a 0.05, lo que permite concluir que la diferencia entre las medianas es estadísticamente significativa y valida los espectros obtenidos para cada uno de los sensores.
- Entre los resultados de las amplitudes registradas por los tres sensores del estudio realizado, se ha llegado a la conclusión de que el sensor RPS fue el que más afectación produce al motor, seguido por el Sensor MAP y finalmente el sensor ECT, a ralentí - 790

RPM . Cuando el motor alcanza las 1800 RPM , se observó que el sensor ECT produce en cambio mayor afectación en el motor, seguido por el sensor MAP y, por último, el sensor RPS. Asimismo, al alcanzar las 2500 RPM, se encontró que los sensores MAP y RPS produjeron mayor afectación a la vibración del motor, mientras que el sensor ECT ocupó el segundo lugar en cuanto a la magnitud del impacto.

5.2 RECOMENDACIONES

- La presente investigación tiene como objetivo analizar el espectro de vibración en motores Diesel. Se recomienda contar con un diseño de experimento bien estructurado y un protocolo de trabajo preciso antes de iniciar los estudios. Cabe destacar que diversos factores, como la temperatura, la humedad, el punto de condensación, la presión atmosférica y el cetanaje del combustible diésel, pueden influir significativamente en la adquisición de datos.
- Antes de la adquisición de datos, es fundamental disponer de equipos especializados para este tipo de estudio, como un analizador de vibraciones, el cual debe ser debidamente calibrado. Asimismo, se requiere una configuración correcta de los canales del software del analizador de vibraciones, con las unidades de medición adecuadas en relación con el análisis a realizar, a fin de obtener resultados precisos y confiables.
- Es fundamental esperar a que el motor Diesel alcance los 90 grados Celsius antes de tomar datos. La temperatura del motor influye en su rendimiento, emisiones de gases y vibración. Esperar a que alcance su temperatura óptima permite obtener datos precisos. Los 90 grados Celsius son un estándar en pruebas de motores Diesel.
- Por último, es importante destacar la necesidad de disponer de un ordenador apropiado para este tipo de estudio, debido a que la exportación y procesamiento de datos puede generar una gran cantidad de información que podría colapsar el equipo. Este aspecto podría dificultar el análisis y, en consecuencia, no se obtendría una interpretación precisa y correcta de la información.

REFERENCIAS

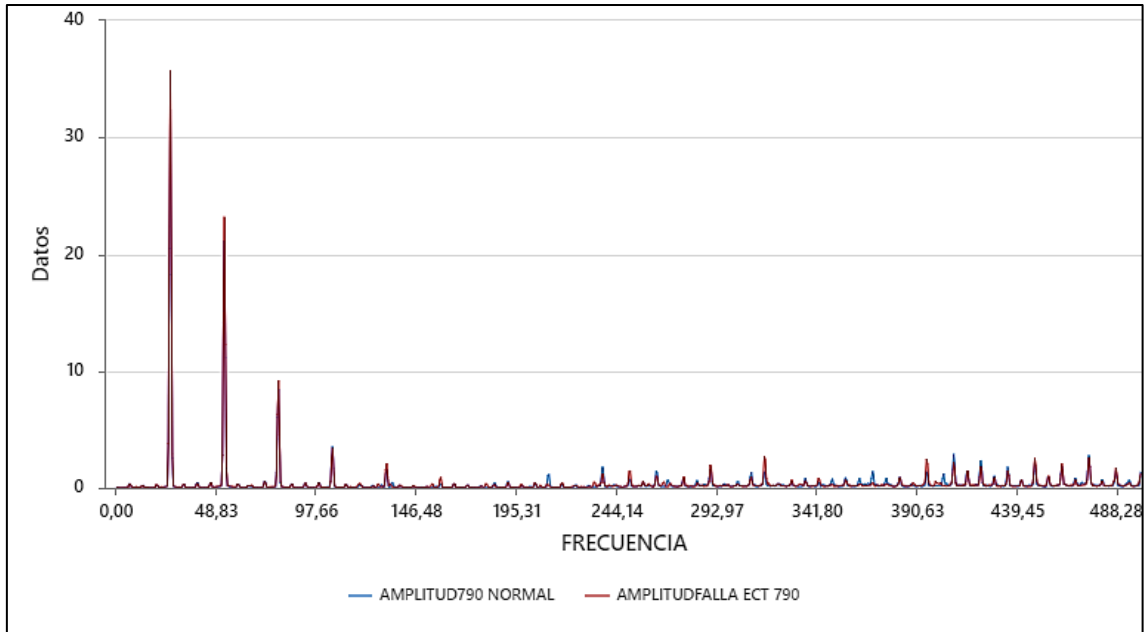
- MOLINA SANTAMARÍA, J. (2019). *Análisis de los parámetros mecánicos y electrónicos defuncionamiento del sistema de alta presión del conjunto CRDI del motor diésel Kia 2.0L tipo D4EA*. Latacunga: Espe.
- Acosta, J., y Torrado, R. (2000). *Transporte Funcionamiento del motor Diesel*. Argentina: Ministerio de trabajo y seguridad Social Sena.
- addlink. (01 de Enero de 2006). *Minitab*. Obtenido de <https://www.addlink.es/productos/minitab-statistical-software>
- Alarcón Solís, C., y Jaramillo Salgado, J. (2007). *Guía para el diagnóstico del sistema de inyección CRDi Bosch*. Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana.
- Alonso, J. (2002). *Técnicas del Automóvil, Inyección de Gasolina y Dispositivos*. España: Thompson.
- A-MAQ. (2005). *TUTORIAL DE VIBRACIONES PARA MANTENIMIENTO MECÁNICO*. Colombia: a-preditecor.
- Angamarca Panamito, J., y Soto Ocampo, C. (2015). *Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustion de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai Santa Ee 2.0, mediante el análisis de vibraciones*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Angamarca Panamito, J., y Soto Ocampo, C. (2015). *Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustion, de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai santa fe 2.0, mediante el análisis de vibraciones*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- ANT, A. (2021). *Vehiculos Motorizados Matriculados 2021*. Guayaquil: Agencia Nacional de Transito.
- Aprenda Faciles*. (7 de Agosto de 2020). Obtenido de <https://aprendafaciles.com/2020/08/07/ciguenal-partes-funcionamiento-y-fallas-que-presenta/#:~:text=Falla%20por%20fatiga%20del%20cig%C3%BCe%C3%B1al.%20Est%20falla%20puede,con%20la%20lubricaci%C3%B3n%20y%20el%20filtrado%20de%20aceite>.
- AutoAvance. (22 de Noviembre de 2019). Obtenido de Sensor Rps o Sensor de Presión Riel ¿Qué es?: <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/146-sensor-de-presion-del-riel-sistema-common-rail/>
- Automotriz, S. E. (2 de Febrero de 2019). *Fallas del sensor ECT*. Obtenido de <https://sensorautomotriz.com/fallas-del-sensor-ect/>
- Automotriz, S. M. (02 de Julio de 2020). *Sensor de presión absoluta del múltiple de admision*. Obtenido de <https://sensorautomotriz.com/sensor-map/>
- Autosoporte. (21 de Agosto de 2021). *Curso Online Solución de Fallas en Sistemas de Inyección Electrónica Diesel Common Rail*. Obtenido de <https://autosoporte.com/medicion-del-sensor-de-presion-del-common-rail/#:~:text=El%20sensor%20de%20presi%C3%B3n%20del%20riel%20RPS%2C%20va%20instalado%20al,que%20posee%20en%20su%20interior>.
- avance, A. (22 de Noviembre de 2019). *Sensor ICP o Sensor de Presión Riel ¿Qué es?* Obtenido de <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/146-sensor-de-presion-del-riel-sistema-common-rail/>
- Bao, S. F. (2020). *DISEÑO DE EXPERIMENTOS:DISEÑO FACTORIAL*. Barcelona: Universidad de Cataluña.
- Bosch. (2005). *Manual de la Técnica del Automóvil*. Barcelona: Reverté.
- BOSCH. (2005). *Sistemas de inyección diésel por acumulador Common rail*. Stuttgart: Bosh manual.
- Bosch, a. (2015). *Sistemas Modernos de Inyección a Diesel Unidades Completas y su despiece*. Mexico: Bosch Automotive Aftermarket.
- Caiza Jacome, P. (2007). *Influencia del emplazamiento del tubo de escape de los buses del distrito metropolitano de Quito en la potencia y el ambiente*. Quito: Escuela Politecnica Nacional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/358/1/CD-0775.pdf>

- Cárdenas Robles, M. R. (2017). *Módulo de temporización electrónica para precalentadores de vehículos a combustión Diesel*. Perú: Facultad de Ingeniería de Sistemas y Electrónica.
- Castro, C. E. (2018). *Identificación de las emisiones de gases de escape en motores diésel con normativa euro 3 a diferentes alturas sobre el nivel del mar*. Ibarra: Universidad técnica del norte.
- Chauca Herembas , H., y Guerrero Arciniega , J. (2015). *Guía de diagnóstico del sistema electrónico motor Diesel Crdi Kia Sorento*. Ibarra: Universidad Tecnica del Norte.
- Crouse, W. (2001). *Equipo Eléctrico y Electrónico del Automóvil*. Colombia: Alfa-OmegaC.
- Cunalata, W. M. (2012). *“Implementación de un banco de pruebas para la unidad de control electrónico de vehículos con sistemas de inyección electrónica para la escuela de ingeniería automotriz”*. Riobamba: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO .
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. Colombia: Universidad de Antioquia.
- Duffuaa, S. (2013). *Sistemas de mantenimiento: planeación y control*. Limusa Wiley: Mexico.
- Ecopetrol. (2014). *El petróleo y su mundo*. Bogota: Ecopetrol S.A.
- Eduardo, M. D. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo de motores Diesel basado en análisis de aceite*. Quito: Escuela Politecnica Nacional.
- Encalada Muñoz, C., y Zhinin Morocho, M. (2022). *Determinación del porcentaje óptimo de biodiésel y diésel filtrado a 2850 msnm, para reducir la opacidad de un motor con sistema CRDI, y reducir el impacto ambiental*. Riobamba: Escuela Superior Politecnica Chimborazo.
- Escudero, S., González, J., Rivas, J., y Suárez, A. (2009). *Motores*. Mexico: Macmillan.
- Fichamotor. (01 de Enero de 2013). *Fichamotor Hyundai Santa Fe*. Obtenido de <https://fichasmotor.com/hyundai/hyundai-santa-fe-ii-2-2-cr-di-150-cv/>
- Gil, H. (2002). *Sistemas de Inyección del Combustible*. España: CEAC.
- Granda Gallardo , J., y Granda Gallardo , J. (2022). *ANÁLISIS DE FALLAS EN LA VÁLVULA EGR ELECTRONICA Y EN EL INTERCOOLER DE UN MOTOR DIESEL CRDI 2.2 MEDIANTE VIBRACIONES Y EMISIONES DE GASES*. Guayaquil: Universidad Politecnica Salesiana.
- Guevara Gaibor, M. (2019). *“ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA J20-A A TRAVÉS DE SIMULACIÓN DE MODOS DE FALLAS PARA CONTRIBUIR EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO”*. 2019: Universidad Politecnica de Chimborazo.
- Guillén Solano , F., y Moscoso Ramírez, M. (2011). *Diseño y construcción de un Banco Didáctico Funcional del Sistema de Inyección CRDI*. Cuenca: Universidad del Azuay Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Gutiérrez, M. (2018). *Medición de las vibraciones del motor utilizando mezclas de combustible de aceite vegetal reciclado y diesel. Un análisis matemático y computacional* . Milagro: Unemi.
- Hernandez Lopez, L. (2006). *Predicción y optimización de emisores y consumo mediante redes neuronales en motores diesel*. España: Editorial Reverté.
- IDEARA. (2014). *Vibraciones mecánicas. factores relacionados con la fuente y medidas de control*. En IDEARA. España: Confederación de Empresarios de Pontevedra (CEP).
- INEC. (6 de Febrero de 2022). *Anuario de estadísticas de transporte, 2021*. Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Estadistica%20de%20Transporte/ESTRA_2021/2021_BOLETIN_ESTRA.pdf
- ISO10816-6. (2015). *Evaluación de la vibración de la máquina mediante mediciones en piezas no giratorias*. REINO UNIDO: Bsi.
- Jaramillo Chamba, D., y Chuquimarca Jiménez, L. (2022). *Estudio comprensivo de la Transformada de Fourier Discreta para el análisis de señales digitales*. Santa Elena: Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- José, M. S. (2002). *DETECCIÓN DE ADULTERACIONES DE COMBUSTIBLES DE USO EN EL PARQUE AUTOMOTOR PERUANO”*. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS.

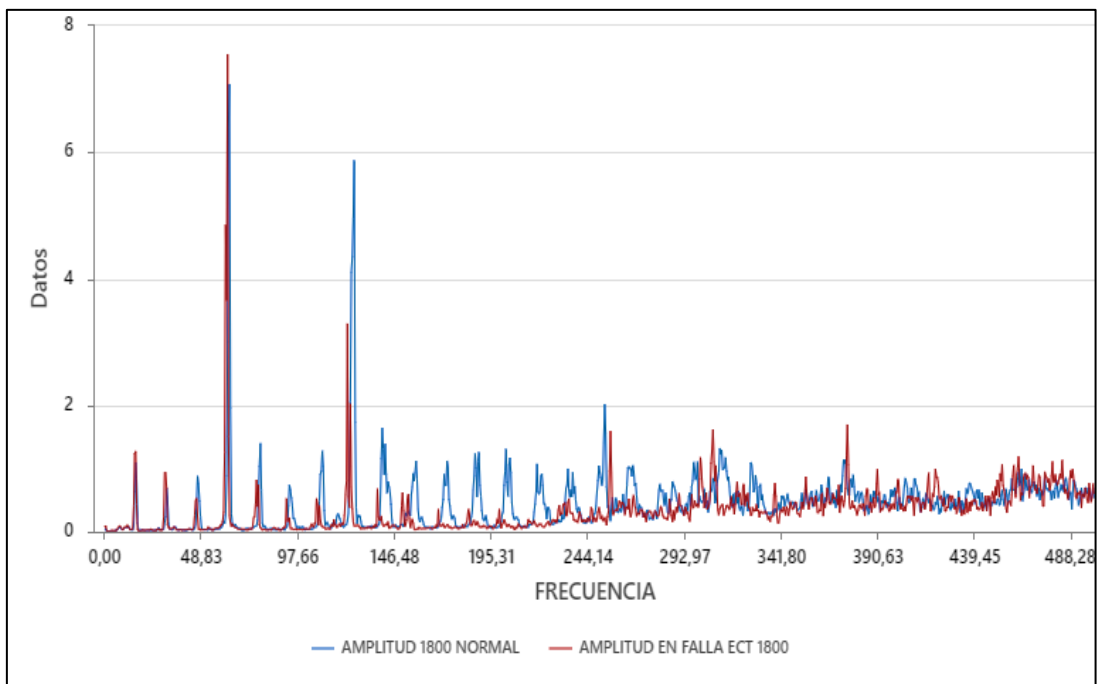
- José., R. G. (2008). *COMBUSTION Y COMBUSTIBLES*. Bogota: Torrela.
- Leonidas, P. V. (2012). *PLAN DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO PARA LA FLOTA VEHICULAR DEL GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO INTERCULTURAL DE LA CIUDAD DE CAÑAR*. 2012: Universidad Politecnica Salesiana.
- Melo, O., López, L., y Melo, S. (2018). *Diseño de experimentos, metodos y aplicaciones*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Molina Santamaría, J. (2019). *Análisis de los parámetros mecánicos y electrónicos defuncionamiento del sistema de alta presión del conjunto CRDI del motor diésel Kia 2.0L tipo D4EA*. Latacunga: Espe.
- Montgomery, D. (2007). *Diseño y analisis de experimento*. Mexico: EDITORIAL LIMUSA, SA.
- Muñoz Rodríguez, M., Moreno Gómez, F., y Morea Roy, J. (2008). *Motores alternativos de combustión*. Bogota: Universidad de Zaragoza, Universidad de Zaragoza.
- Navarrete, B., y Bolaños Ruiz. (2014). *Estudio del desempeño de acondicionadores de combustible en vehículos, a través de la inducción magnética en la re polimerización del Diésel*. Quito: UIDE.
- Pacheco, S. C. (2007). *Modulo Motor Diesel*. Albania: Alcaldia de Fonseca.
- Palomino Marín, E. (2007). *ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATORIAS*. Cuba: Centro de estudios, ingeniería en mantenimiento.
- Pernia, D. (2004). *Introduccion a la vibracion*. Venezuela: Universidad de los Andes.
- Pernia-Márquez, I. D. (2004). *INTRODUCCIÓN A LA MEDICIÓN DE VIBRACIÓN*. Venezuela: Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes.
- Prueba de ruta. (20 de Abril de 2022). *Fallas en el sensor de temperatura ECT*. Obtenido de <https://www.pruebaderuta.com/fallas-en-el-sensor-de-temperatura-ect.php#:~:text=Debido%20a%20un%20sensor%20ECT,de%20potencia%20y%20comportamientos%20extra%C3%B1os>.
- Quispe Andía, A., Calla Vasquez , K., Yangali Vicente, J., Rodríguez López, J., y Pumacayo Palomino, I. (2019). *Estadística no paramétrica aplicada a la investigación científica con software SPSS, MINITAB Y EXCEL*. Colombia: EIDEC.
- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas* . Florida: PEARSON.
- Robles, G. (2018). *Norma ISO 10816 severidad vibracion*. Mexico: Mantenimiento planificado.
- Rodesprex. (25 de Julio de 2020). *Norma ISO 10816*. Obtenido de <https://www.rodesprex.com/assets/img/services/servbenf04.pdf>
- Sarmiento Ortiz, F., y Núñez Ramo, M. (2018). *Evaluación del desempeño de un vehículo motor de combustión interna a diésel, con un sistema de inyección GLP como combustible de aporte*. Quito: 5Dez.
- Sarmiento, G. R. (2004). *Estudio de vibraciones mecánicas en máquinas reciprocantes*. Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER .
- Smith, G. M. (21 de Enero de 2021). *Dewesoftx*. Obtenido de <https://dewesoft.com/es/daq/sistemas-de-monitoreo-de-condicion-dewesoft>
- Solar, G. L. (2012). *Análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo*. Astander: Universidad de Cantabria.
- Tharanga. (2020). *Diagnóstico de fallas del motor diesel con señal de vibración*. Estados Unidos: Applied Mathematics and Physics .
- Universo, E. (1 de Febrero de 2019). *Unos 45.000 carros por año entran a rodar en Guayaquil*. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/guayaquil/2019/02/01/nota/7166981/45000-carros-ano-entran-rodar-guayaquil/#:~:text=Las%20cifras%20de%20la%20ATM,el%202015%20y%20el%202018>.
- VILLANUEVA ROJAS, J. (2020). *“DETECCIÓN DE FALLAS EN SISTEMA DE INYECCIÓN DE UN MOTOR DIÉSEL, A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES TORSIONALES EN EL EJE CIGÜEÑAL”*. Chile: PONTIFICIA UNVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO.
- White, G. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones*. USA: Azima DL.

ANEXO

CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR ECT EN 790 RPM

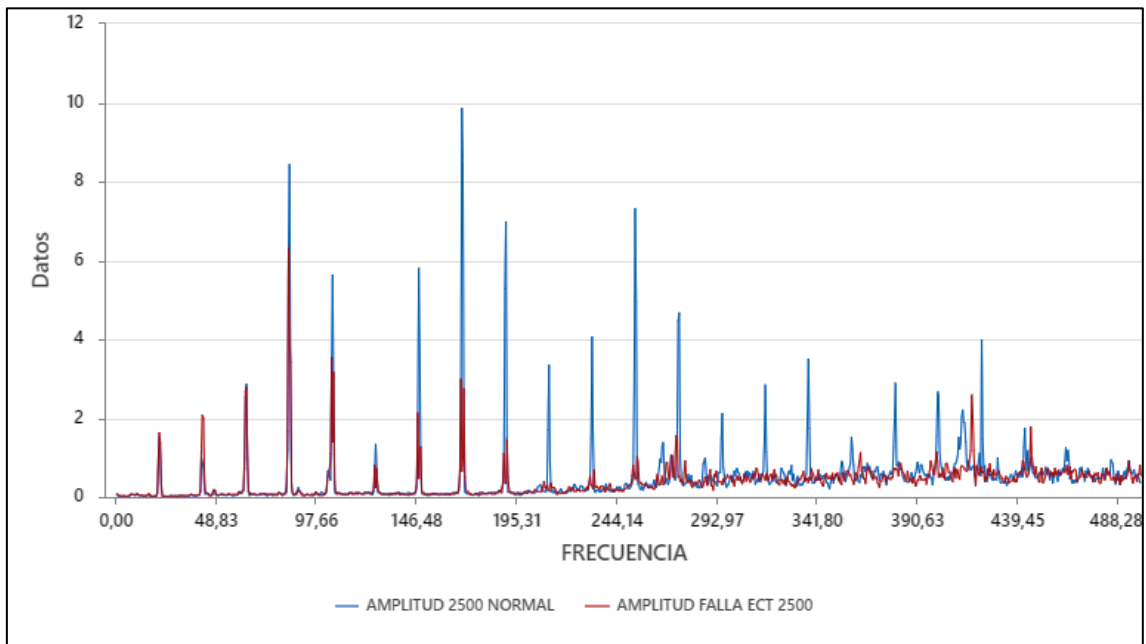


CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR ECT EN 1800 RPM



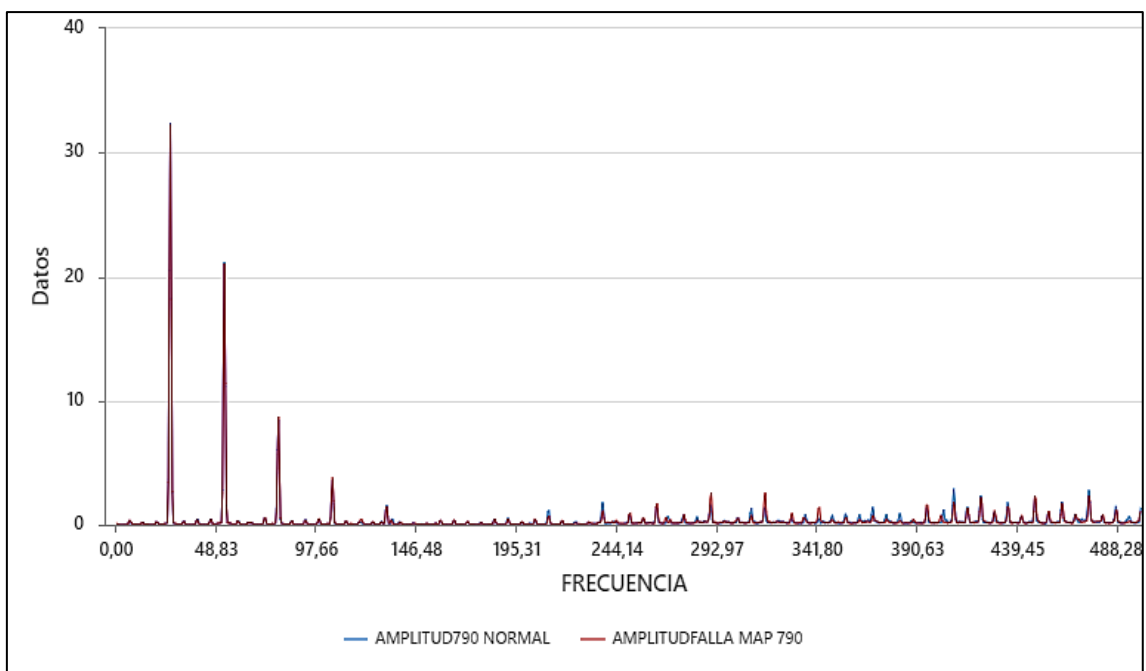
CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR ECT EN 2500 RPM

RPM



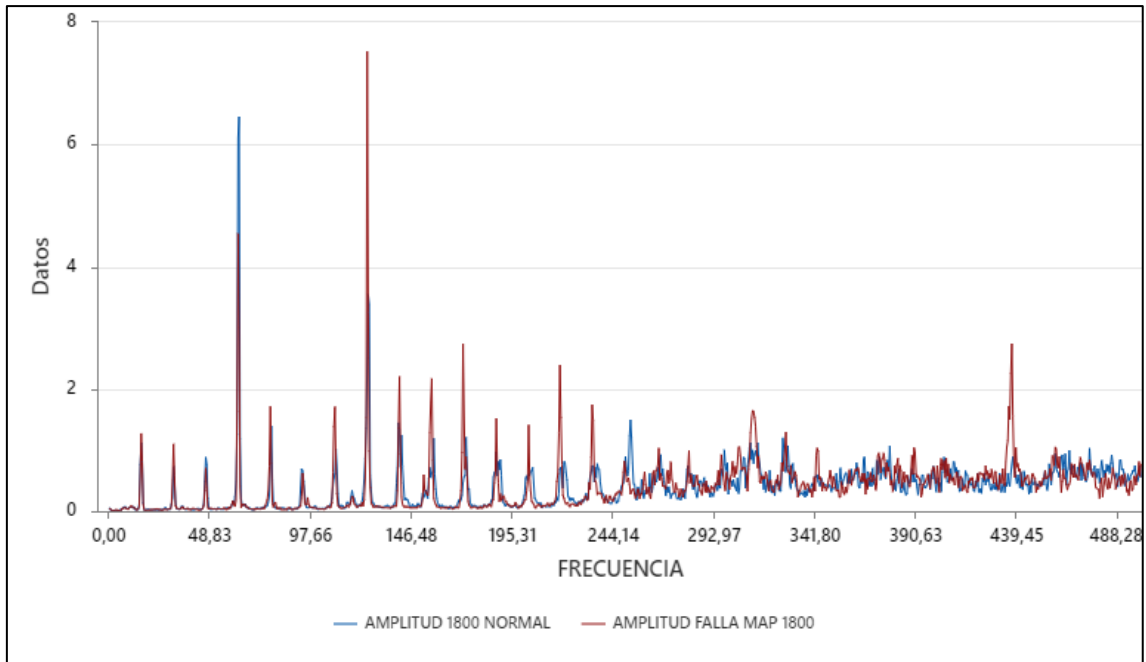
SENSOR MAP

CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR MAP EN 790 RPM

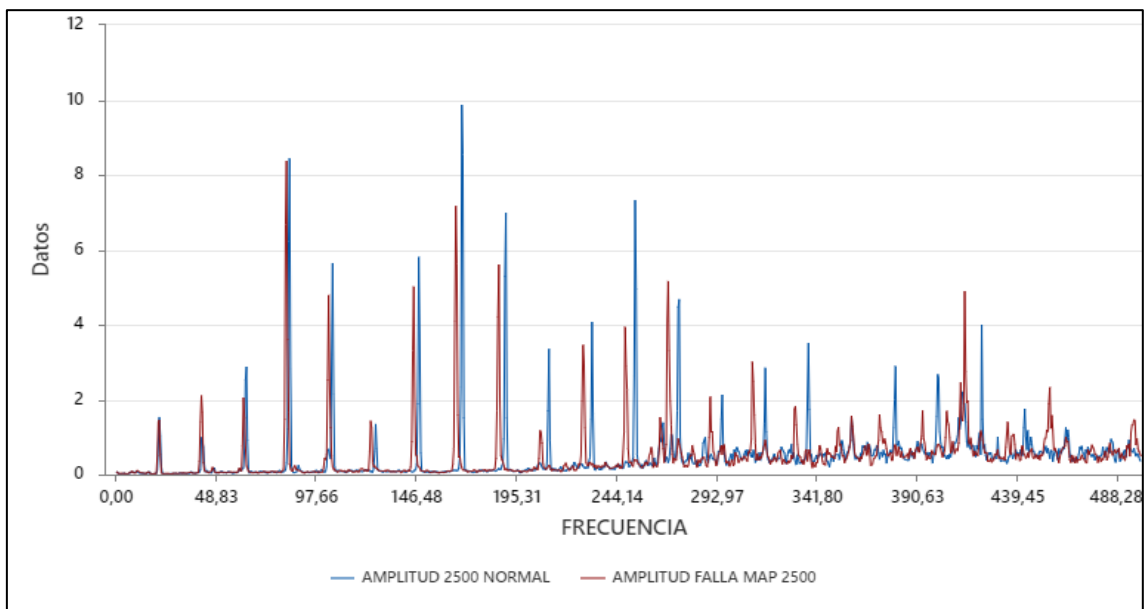


CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR MAP EN 1800

RPM



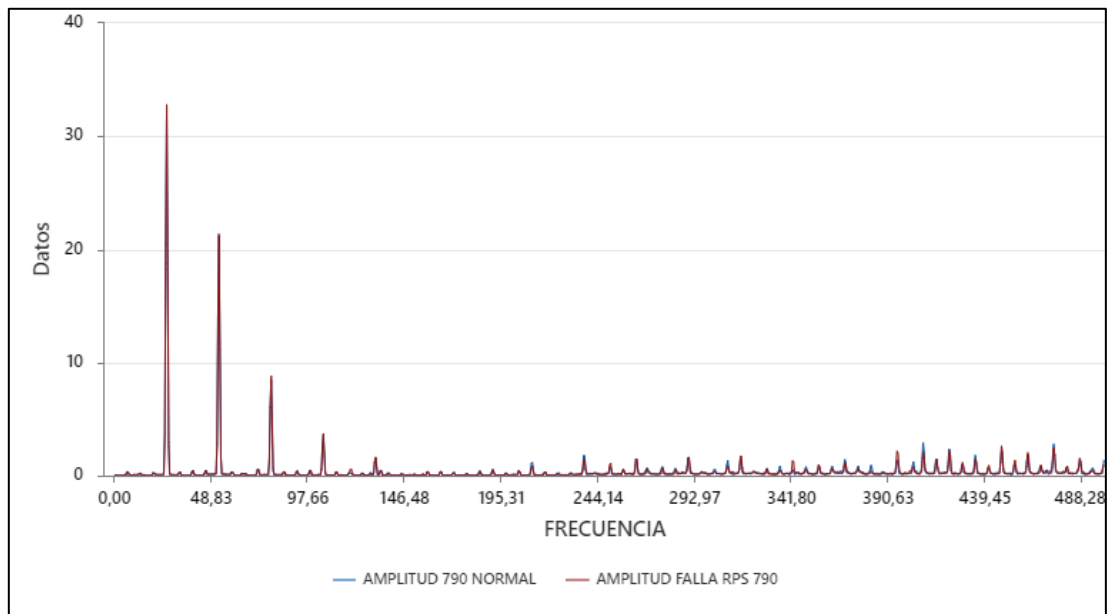
CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR MAP EN 2500 RPM



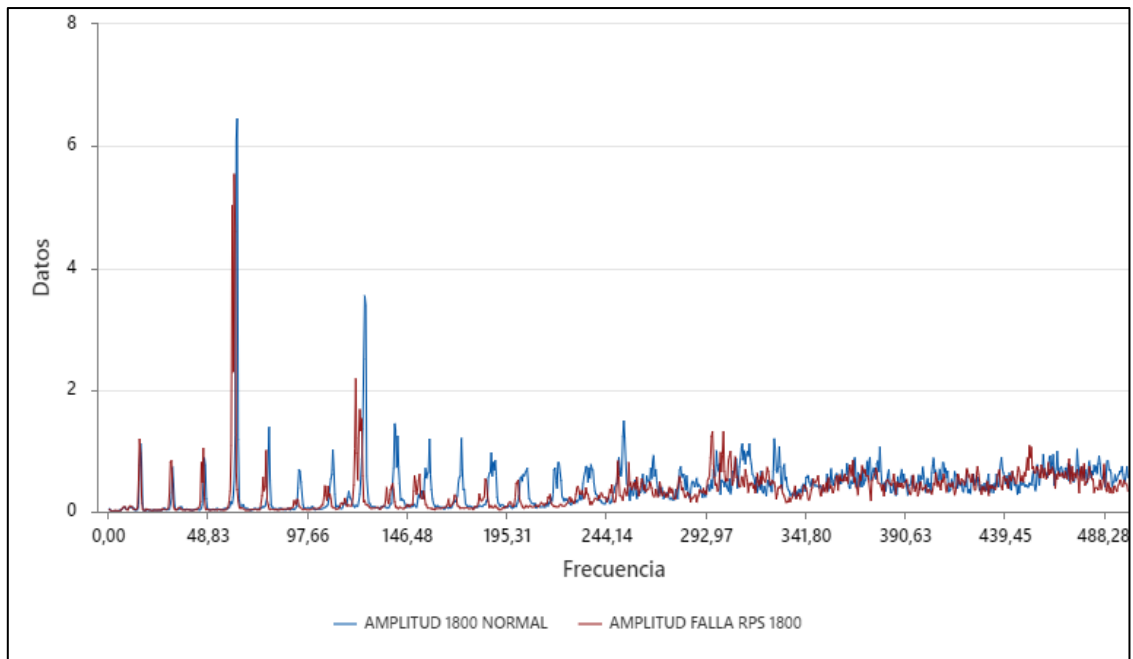
SENSOR RPS

CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE

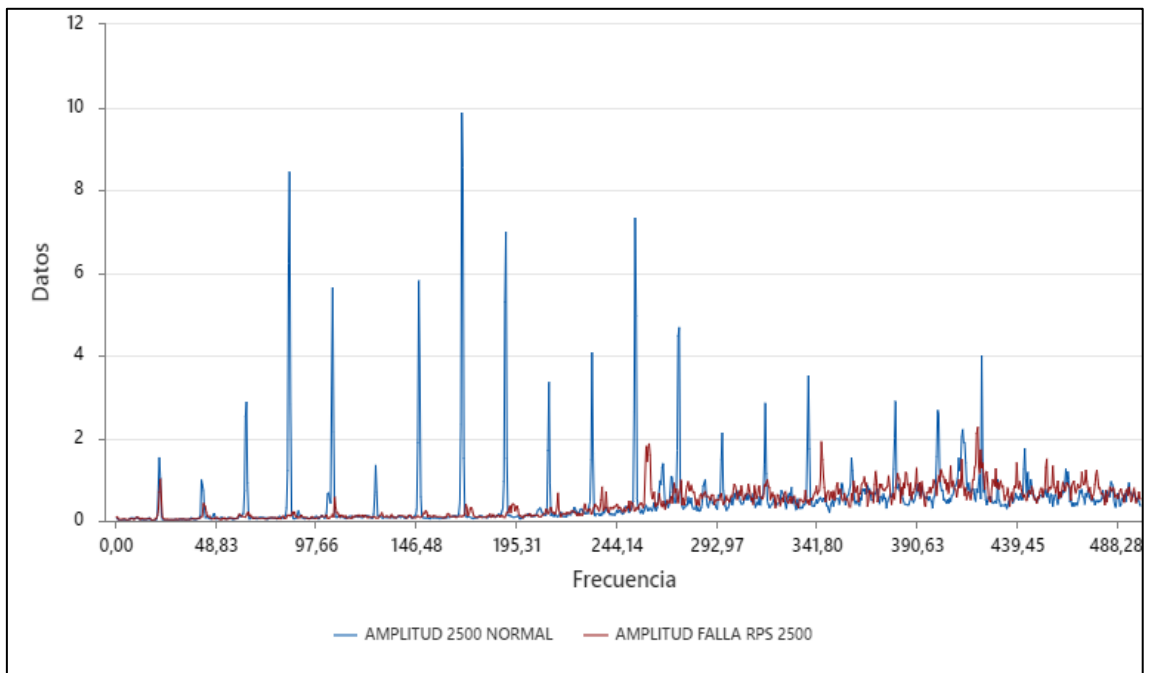
SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR RPS EN 790 RPM



CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR RPS EN 1800 RPM



CARACTERIZACIÓN DEL ESPECTRO DE VIBRACIÓN MEDIANTE SUPERPOSICIÓN EN ESTADO NORMAL VS FALLA EL SENSOR RPS EN 2500 RPM



ANEXO 2

Tabla 14

Comparativa de resultados de los 3 sensores a 790 RPM

COMPARATIVA DE RESULTADOS			
Frecuencia	Amplitud falla ECT 790	Amplitud falla MAP 790	Amplitud falla RPS 790
0	0,02399	0,08698	0,05511
0,49	0,03195	0,10551	0,06919
0,98	0,01040	0,01595	0,01782
1,46	0,00981	0,00624	0,00703
1,95	0,00521	0,00425	0,00421
2,44	0,00580	0,00688	0,00762
2,93	0,01081	0,01264	0,01830
3,42	0,01819	0,01513	0,03396
3,91	0,01593	0,01205	0,02162
4,39	0,01264	0,00913	0,01668
4,88	0,00995	0,00927	0,02365
5,37	0,01488	0,01505	0,03876
5,86	0,10958	0,11566	0,11458
6,35	0,32777	0,34668	0,32345
6,84	0,32967	0,33959	0,30319
492,68	0,29512951	0,234965275	0,348872275
493,16	0,29929608	0,19238345	0,344829455
493,65	0,442091645	0,26456794	0,440649625
494,14	0,407373875	0,320199405	0,383653815
494,63	0,201643195	0,21883757	0,2231452
495,12	0,148260705	0,18135255	0,133628875
495,61	0,13987979	0,20458543	0,17847705
496,09	0,13583134	0,20929037	0,16957711
496,58	0,167944445	0,14804559	0,123631675
497,07	0,177322595	0,14165052	0,18715918
497,56	0,21004009	0,23395112	0,16241267
498,05	0,25593447	0,300575165	0,187297285
498,54	0,383093935	0,313395085	0,365800945
499,02	0,91731018	0,96575874	0,810412855
499,51	1,2765257	1,0729794	0,933921855

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos, ya que contienen 1,024 datos por sensor

Tabla 15*Comparativa de resultados de los 3 sensores a 1800 RPM*

COMPARATIVA DE RESULTADOS			
Frecuencia	Amplitud falla ECT 1800	Amplitud falla MAP 1800	Amplitud falla RPS 2500
0	0,07252	0,03933	0,04021
0,49	0,09324	0,04242	0,03765
0,98	0,01621	0,01997	0,01329
1,46	0,00937	0,01062	0,01445
1,95	0,00988	0,01049	0,01145
2,44	0,01081	0,00869	0,01180
2,93	0,01510	0,01641	0,02293
3,42	0,01744	0,02007	0,01963
3,91	0,01950	0,01892	0,01603
4,39	0,01738	0,00889	0,00996
4,88	0,01672	0,01375	0,01599
5,37	0,00961	0,01241	0,01638
5,86	0,02911	0,01642	0,01815
6,35	0,04213	0,04299	0,03882
6,84	0,05723	0,04412	0,06210
492,68	0,649438945	0,314792425	0,425027205
493,16	0,376490785	0,35570942	0,41853322
493,65	0,599372835	0,26273316	0,35414651
494,14	0,571592005	0,471453505	0,32846689
494,63	0,544736235	0,502879575	0,435285225
495,12	0,69351977	0,340108005	0,44675474
495,61	0,60173607	0,360171065	0,521025445
496,09	0,48840663	0,57776189	0,50889619
496,58	0,46303517	0,55396491	0,420301215
497,07	0,764782695	0,43456374	0,41234538
497,56	0,59863654	0,592891575	0,51889375
498,05	0,469782115	0,59094879	0,458895295
498,54	0,54589812	0,80492863	0,454828965
499,02	0,757570355	0,565172255	0,45032157
499,51	0,594782205	0,77584642	0,331504405

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos, ya que contienen 1,024 datos por sensor

Tabla 16*Comparativa de resultados de los 3 sensores a 2500 RPM*

COMPARATIVA DE RESULTADOS			
Frecuencia	Amplitud falla ECT 2500	Amplitud falla MAP 2500	Amplitud falla RPS 2500
0	0,06267	0,05616	0,07332
0,49	0,08351	0,07273	0,10901
0,98	0,05042	0,02256	0,03277
1,46	0,03982	0,02640	0,03517
1,95	0,03389	0,02774	0,03047
2,44	0,02978	0,03126	0,03797
2,93	0,02282	0,02584	0,02637
3,42	0,02671	0,02598	0,03807
3,91	0,02823	0,03284	0,04678
4,39	0,02355	0,02045	0,04280
4,88	0,02088	0,02413	0,03280
5,37	0,02519	0,01871	0,02636
5,86	0,02909	0,02889	0,02712
6,35	0,02674	0,04328	0,03591
6,84	0,06988	0,05301	0,04032
492,68	0,533743945	0,779270855	0,755051375
493,16	0,667864115	0,704450425	0,604648265
493,65	0,926796915	0,81390023	0,810629905
494,14	0,62555942	0,484491495	0,65767452
494,63	0,62920463	1,12133784	0,451627385
495,12	0,467613425	1,32109131	0,505838975
495,61	0,34663434	1,329360795	0,66895129
496,09	0,495984435	1,46601465	0,79579017
496,58	0,53063664	1,42688575	0,65188202
497,07	0,49377188	0,79959891	0,43386838
497,56	0,388620305	0,95790578	0,493967635
498,05	0,59149957	0,698243855	0,539880245
498,54	0,56585018	0,62021622	0,69648713
499,02	0,816525635	0,546281975	0,531315725
499,51	0,53958279	0,490700115	0,520725015

Nota: A continuación, se muestra un extracto de los datos, ya que contienen 1,024 datos por sensor