



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE
ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE UN MOTOR
TURBO CARGADO EN EL TALLER DE
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”**

DARWIN SEBASTIÁN RUIZ MENA

TRABAJO DE TITULACIÓN

TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

RIOBAMBA – ECUADOR
2019

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE
TITULACIÓN**

2017-08-23

Yo recomiendo que el trabajo de titulación preparado por:

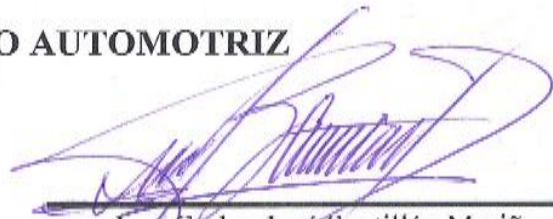
DARWIN SEBASTIÁN RUIZ MENA

Titulado:

**“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE UN
MOTOR DE TURBO CARGADO EN EL TALLER DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ”**

Sea aceptado como total complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ



Ing. Carlos José Santillán Mariño
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:



Ing. Luis Fernando Buenaño Moyano
DIRECTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



Ing. Celín Abad Padilla Padilla
MIEMBRO TRABAJO DE TITULACIÓN

ESPOCH

Facultad de Mecánica


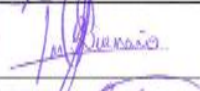

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: DARWIN SEBASTIÁN RUIZ MENA

TRABAJO DE TITULACIÓN: “CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE UN MOTOR DE TURBO CARGADO EN EL TALLER DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”

Fecha de Examinación: 2019-07-31

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos PRESIDENTE TRIB. DEFENSA	✓		
Ing. Luis Fernando Buenaño Moyano DIRECTOR	✓		
Ing. Celin Abad Padilla Padilla MIEMBRO	✓		

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.



Ing. José Francisco Pérez Fiallos
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de titulación denominado **“CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN DE UN MOTOR DE TURBO CARGADO EN EL TALLER DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ”** que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación técnica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



Darwin Sebastián Ruiz Mena
Cédula de Identidad: 150091946-7

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Darwin Sebastián Ruiz Mena, declaro que el presente trabajo presentado es de mi autoría y los resultados alcanzados en los diferentes análisis son auténticos y únicos en cuanto al estudio realizado en el presente trabajo. En la parte investigativa se utilizaron textos y figuras de varios autores los cuales han sido referenciados y citados correctamente. Soy consciente del hecho de no respetar derechos de autoría y hacer plagio, por lo tanto, asumo con gran responsabilidad de cualquier irregularidad presentada por el incumplimiento de lo declarado.



Darwin Sebastián Ruiz Mena
Cédula de Identidad: 150091946-7

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a la memoria de mi madre Alba Ruiz, quien fue el pilar fundamental en mi educación fue la primera persona que confío en que podría lograr este objetivo, pese a su pronta partida sé que en algún lugar podrá observar su anhelo más deseado concluido.

A mi hermano que estado siempre hay con una palabra de aliento apoyándome en esta etapa de mi vida.

A mi tío que sido como un padre, que ha sabido ser un ejemplo de trabajo y perseverancia para lograr todos los objetivos propuestos.

A mi hija que ha sido mi inspiración, mi empuje a seguir adelante y no decaer en las adversidades de la vida.

Darwin Sebastián Ruiz Mena

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a Dios que ha guiado mi vida por el camino del bien sin dejarme decaer en las cosas vanas de este mundo, por ser la fuente de mi fe para creer en mí y saber que todo se puede alcanzar con trabajo y dedicación.

Mi eterno agradecimiento a mi madre Alba Ruiz que pese a su pronta partida, supo dar el mejor regalo de una madre a su hijo la educación, Dios te tenga en su santa gloria por haber sido un extraordinario ser humano, por enseñarme con el ejemplo que el amor de una madre va por encima de sí misma, porque tu trabajaste sabiendo de tu enfermedad y sacrificaste tu vida por darme lo mejor, no me alcanzará la vida para agradecer todo lo hecho por mi madre mía.

Agradezco a mi hermano José Bonilla que sin poseer mucho y ser menor a mí me apoyado con lo que ha tenido demostrando lo afortunado que soy y la importancia que tengo para él.

Mi agradecimiento a mi tío Ramiro Ruiz que sin tener ninguna obligación siempre ha estado como un padre pendiente en lo que necesitará para poder desarrollar este objetivo.

Agradezco a mi esposa Angela Guamán por ser mi apoyo incondicional y darme un regalo extraordinario que es mi hija que, a llegado la fuente de mi inspiración para lograr muchos objetivos en mi vida, en especial este trabajo de titulación.

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por acogerme en su campus y brindarme una extraordinaria educación, ya que cuenta con una elite de docentes calificados y reconocidos quienes supieron transmitir todos sus conocimientos durante mi ciclo de estudiante en especial mi agradecimiento va dirigido a los docentes Ing. Luis Buenaño, Ing. Celin Padilla quienes me acogieron bajo su tutela para realizar mi trabajo de titulación.

Darwin Sebastián Ruiz Mena

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPITULO I

1	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	3
1.1	Motor de combustión interna turbo cargados.....	3
1.1.1	<i>Introducción</i>	3
1.2	Función del sistema sobrealimentado o turbo cargado	3
1.2.1.1	<i>Compresor volumétrico.....</i>	4
1.2.1.2	<i>Turbocompresor.....</i>	4
1.2.1.3	<i>Turbocompresor de geometría fija.....</i>	5
1.2.1.4	<i>Turbocompresor de geometría variable (VTG)</i>	6
1.2.1.5	<i>Compres.....</i>	6
1.2.2	<i>Ventajas y desventajas del turbocompresor.....</i>	7
1.2.3	<i>Intercooler.....</i>	8
1.2.4	<i>Sobrealimentación en motores diésel.....</i>	8
1.2.5	<i>Sobrealimentación en el motor ciclo Otto (motores a gasolina)</i>	9
1.3	Inyección electrónica en motores a gasolina.....	9
1.3.1	<i>Función del sistema de inyección electrónica.....</i>	10
1.3.2	<i>Ventajas.....</i>	10
1.3.3	<i>Elementos del sistema de inyección electrónica</i>	10
1.3.3.1	<i>ECU.....</i>	11
1.3.3.2	<i>Sensores</i>	11
1.3.3.3	<i>Actuadores</i>	12
1.4	Unidad de control programable.....	12
1.4.1	<i>MegaSquirt.....</i>	12
1.5	Vibraciones	13
1.5.1	<i>Características de las vibraciones</i>	13
1.5.1.1	<i>Magnitud de la vibración</i>	14
1.5.1.2	<i>Frecuencia de la vibración</i>	14
1.5.1.3	<i>Periodo de la vibración.....</i>	14
1.5.2	<i>Movimiento periódico</i>	14
1.5.2.1	<i>Vibración libre</i>	15

1.5.2.2	<i>Movimiento armónico</i>	15
1.5.2.3	<i>Vibración torsional</i>	16
1.5.2.4	<i>Péndulo simple</i>	16
1.5.2.5	<i>Amortiguación</i>	16
1.5.2.6	<i>Movimiento periódico forzado</i>	17
1.5.2.7	<i>Vibraciones armónicas forzada no amortiguada</i>	17
1.5.2.8	<i>Vibración forzada causada por fuerza de rotación</i>	17
1.5.2.9	<i>Fuerzas transmitidas</i>	17
1.5.2.10	<i>Fatiga de los materiales</i>	18
1.6	Fuentes de vibración.....	18
1.6.1	<i>Maquinas, herramientas o vehículos que las originan vibraciones</i>	18
1.6.2	<i>Causas de vibración</i>	18
1.6.2.1	<i>Vibración debido a desbalance</i>	19
1.6.2.2	<i>Vibración debido a la falta de alineamiento</i>	19
1.6.2.3	<i>Vibración debido a la excentricidad</i>	19
1.6.2.4	<i>Vibración debido a rodamientos defectuosos</i>	20
1.6.2.5	<i>Vibración debido a la inadecuada lubricación</i>	20
1.6.2.6	<i>Vibración debido al aflojamiento mecánico</i>	20
1.6.2.7	<i>Vibración debido al problema de engranaje</i>	21
1.7	Medición de vibración.....	21
1.7.1	<i>Medición y análisis de vibraciones</i>	21
1.7.2	<i>Vibrómetro</i>	21
1.7.2.1	<i>Transductor</i>	22
1.7.2.2	<i>Preamplificador</i>	22
1.7.2.3	<i>Analizador de frecuencia</i>	22
1.7.2.4	<i>Medidor</i>	22
1.7.3	<i>Vibracheck</i>	23

CAPITULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	25
2.1	Metodología para el análisis de los espectros de vibración en M.C.I.....	25
2.1.1	<i>Enfoque</i>	25
2.1.2	<i>Modalidad de la investigación</i>	25
2.1.2.1	<i>Investigación del campo</i>	25
2.1.2.2	<i>Investigación bibliográfica</i>	25
2.1.2.3	<i>Investigación experimental</i>	26
2.1.3	<i>Tipo de investigación</i>	26

2.1.3.1	<i>Investigación exploratoria</i>	26
2.1.3.2	<i>Investigación descriptiva</i>	26
2.1.3.3	<i>Investigación explicativa</i>	26
2.1.4	<i>Población y muestra</i>	26
2.1.4.1	<i>Población</i>	26
2.1.4.2	<i>Muestra</i>	27
2.2	<i>Evaluación del estado actual del motor turbo cargado y rehabilitación de la misma</i> 27	
2.2.1	<i>Análisis del estado del Motor turbo cargado</i>	27
2.2.2	<i>Estado de sistema de sobrealimentación</i>	28
2.2.3	<i>Estado de sistema de alimentación</i>	28
2.2.4	<i>Estado del sistema de refrigeración</i>	29
2.2.5	<i>Estado del sistema de lubricación</i>	29
2.2.6	<i>Estado del sistema de distribución o puesta a punto</i>	30
2.2.7	<i>Estado del sistema eléctrico y electrónico</i>	30
2.2.8	<i>Estado del tablero de control</i>	31
2.3	<i>Implementación de elementos faltantes en motor turbo cargado</i>	31
2.3.1	<i>Sensor CKP</i>	31
2.3.2	<i>Sensor MAP</i>	32
2.3.3	<i>Filtro y conducto de entrada de aire</i>	32
2.3.4	<i>Batería</i>	33
2.3.5	<i>Alternador</i>	33
2.3.6	<i>ECU</i>	34
2.3.7	<i>Horómetro</i>	35

CAPÍTULO III

3	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	36
3.1	<i>Estudio y análisis de los espectros característicos del M.C.I. turbo carado</i>	36
3.1.1	<i>Características del M.C.I. turbo cargado</i>	36
3.1.2	<i>Norma ISO 10816 vibración mecánica (evaluación de la vibración de equipos en base a su medición en partes no rotatorias)</i>	37
3.1.3	<i>Ubicación de los acelerómetros</i>	38
3.1.4	<i>Lados de la medición</i>	38
3.1.4.1	<i>Niveles de medición</i>	38
3.1.4.2	<i>Puntos de medición relacionados con la longitud de la máquina</i>	39
3.2	<i>Análisis de vibración en M.C.I. turbo-cargado</i>	39
3.2.1	<i>Direcciones y puntos para la ubicación del sensor de Vibracheck</i>	39
3.2.2	<i>Ubicación de puntos de referencia</i>	39

3.2.3	<i>Configuración de datos para MAINtraq</i>	40
3.2.4	<i>Denominación de códigos para el análisis de vibración en motor turbo – cargado</i>	41
3.2.5	<i>Espectros característicos del funcionamiento indemne del motor turbo cargado</i>	44
3.2.5.1	<i>Análisis de emisiones de gases de escape del M.C.I</i>	44
3.2.5.2	<i>Consideración de frecuencia fundamental para el análisis de vibración del M.C.I.</i>	45
3.2.5.3	<i>Espectro característico a ralentí. (1000 rpm)</i>	47
3.2.5.4	<i>Espectro característico a 1500 RPM</i>	47
3.2.5.5	<i>Espectro característico a 3000 RPM</i>	48
3.2.6	<i>Espectros característicos del funcionamiento del motor turbo cargado simulando ciertas averías electrónicas</i>	48
3.2.6.1	<i>Falla de combustión en un cilindro</i>	49
3.2.6.2	<i>Falla de avance al encendido modificado desde la MegaSquirt III</i>	50
3.2.6.3	<i>Falla de relación estequiometría modificado desde la MS3</i>	52
3.2.6.4	<i>Espectro característico con falla de relación estequiométrica a 1500 rpm</i>	53
3.3	<i>Análisis de resultados de las pruebas de vibración en M.C.I. turbo-cargado</i>	53
3.3.1	<i>Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a ralentí</i>	54
3.3.2	<i>Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a 1500 rpm</i>	55
3.3.3	<i>Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a 2000 rpm</i>	57
3.4	<i>Estudio de espectros de vibración como mantenimiento predictivo</i>	59
3.4.1	<i>Ventajas de análisis de vibración como mantenimiento predictivo</i>	59
3.4.2	<i>Consideraciones para el análisis de vibración como mantenimiento predictivo</i>	59
3.4.3	<i>Análisis de vibraciones utilizado como mantenimiento predictivo</i>	60
3.4.4	<i>Factibilidad de análisis de vibración como mantenimiento predictivo</i>	60
3.5	<i>Costos de la implementación</i>	61
3.5.1	<i>Detalle de costos directos</i>	61
3.5.2	<i>Detalle de costos indirectos</i>	62
3.5.3	<i>Costos totales</i>	62
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	64
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Características de la batería seleccionada.....	33
Tabla 1-3:	Características del M.C.I. turbo cargado	37
Tabla 2-3:	Denominación de código para el análisis de vibración	41
Tabla 3-3:	Códigos para el análisis de vibración	42
Tabla 4-3:	Emisiones permito por Corpaire.....	44
Tabla 5-3:	Frecuencias fundamentales.....	46
Tabla 6-3:	Costos del sistema mecánico	61
Tabla 7-3:	Costos del sistema eléctrico.....	62
Tabla 8-3:	Total de costos directos	62
Tabla 9-3:	Total de costos indirectos	62
Tabla 10-3:	Costos totales.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Compresor volumétrico.....	4
Figura 2-1:	Turbocompresor	5
Figura 3-1:	Turbocompresor de geometría fija	6
Figura 4-1:	Turbocompresor de geometría variable.....	6
Figura 5-1:	Turbocompresor comprex	7
Figura 6-1:	Intercooler	8
Figura 7-1:	Elementos de funcionamiento de la inyección electrónica.....	11
Figura 8-1:	ECU programable MegaSquirt.....	13
Figura 9-1:	Movimiento periódico	14
Figura 10-1:	Vibración libre	15
Figura 11-1:	Movimiento armónico simple	15
Figura 12-1:	Péndulo simple	16
Figura 13-1:	Transductor	22
Figura 14-1:	Analizador de vibraciones Vobracheck.....	23
Figura 1-2:	Metodología para el análisis de los espectros de vibración.....	27
Figura 2-2:	Banco de Pruebas de motor turbo cargado.....	28
Figura 3-2:	Elementos faltantes 1	28
Figura 4-2:	Elementos faltantes 2	29
Figura 5-2:	Radiador del motor.....	29
Figura 6-2:	Sistema de lubricación	29
Figura 7-2:	Polea de distribución	30
Figura 8-2:	Tablero electrónico de control.....	31
Figura 9-2:	Tablero de control	31
Figura 10-2:	Sensor inductivo CKP	32
Figura 11-2:	Sensor MAP	32
Figura 12-2:	Filtro de aire	33
Figura 13-2:	Batería seleccionada.....	33
Figura 14-2:	Alternador	34
Figura 15-2:	ECU MegaSquirt III.....	34
Figura 16-2:	Placa MegaSquirt III	34
Figura 17-2:	Horómetro	35
Figura 1-3:	Mediciones con el analizador de vibraciones.....	36
Figura 2-3:	Maquina montada en descanso hidrodinámico o cojinetes	38

Figura 3-3:	Direcciones y puntos para la ubicación de acelerómetros en motor en línea.....	38
Figura 4-3:	Puntos para la ubicación de acelerómetro	39
Figura 5-3:	Inicio de programa MAINtraq	40
Figura 6-3:	Datos característicos del motor en MAINtraq	40
Figura 7-3:	Configuración de variables	41
Figura 8-3:	Carga de configuración a Vibracheck.....	41
Figura 9-3:	Ubicación del acelerómetro en Z	42
Figura 10-3:	Ubicación del acelerómetro en X.....	43
Figura 11-3:	Ubicación del acelerómetro en Y	43
Figura 12-3:	Puntos de análisis de espectros	43
Figura 13-3:	Analizador de emisiones	44
Figura 14-3:	Instalación de sonda	45
Figura 15-3:	Valores de misiones emitidos por un motor turbo cargado.....	45
Figura 16-3:	Espectro característico a 3000 rpm	48
Figura 17-3:	Modificación de mapeo de inyección	52

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Frecuencias fundamentales para el análisis de vibración	46
Gráfico 2-3:	Espectro característico a ralentí	47
Gráfico 3-3:	Espectro característico a 1500 rpm.....	47
Gráfico 4-3:	Espectro característico a 3000 rpm.....	48
Gráfico 5-3:	Espectro con falla de combustión a ralentí	49
Gráfico 6-3:	Espectro con falla de combustión a 1500 rpm.....	49
Gráfico 7-3:	Espectro con falla de combustión a 2000 rpm.....	50
Gráfico 8-3:	Ángulo de avance	50
Gráfico 9-3:	Espectro con falla de avance al encendido a ralentí	51
Gráfico 10-3:	Espectro con falla de avance al encendido a 1500 rpm	51
Gráfico 11-3:	Espectro con falla de avance al encendido a 2000 rpm	51
Gráfico 12-3:	Espectro con falla de relación estequiométrica a ralentí.....	52
Gráfico 13-3:	Espectro con falla de relación estequiométrica a 1500 rpm	53
Gráfico 14-3:	Espectro con falla de relación estequiométrica 2000 rpm	53
Gráfico 15-3:	Análisis del patrón con espectro de falla de combustión a ralentí.....	54
Gráfico 16-3:	Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a ralentí	54
Gráfico 17-3:	Análisis del patrón con espectro de falla de relación estequiométrica a ralentí	55
Gráfico 18-3:	Análisis del patrón con espectro de falla de combustión a 1500 rpm.....	55
Gráfico 19-3:	Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a 1500 rpm	56
Gráfico 20-3:	Análisis del patrón con espectro de falla con relación $\lambda=1$ a 1500 rpm.....	56
Gráfico 21-3:	Análisis del patrón con espectro a falla de combustión a 2000 rpm.....	57
Gráfico 22-3:	Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a 2000 rpm	58
Gráfico 23-3:	Análisis del patrón con espectro de falla a relación $\lambda=1$ a 2000 rpm	58
Gráfico 24-3:	Diferencia del espectro base con el espectro de falla de combustión a ralentí	61

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PMP	Plan de mantenimiento predictivo
MCI	Motor de combustion interna
ECU	Unidad de control electronica
RMS	Valor cuadrático medio
MAF	Sensor de Masa de Flujo de Aire
MAP	Sensor de Presión Absoluta en el Múltiple de Admisión
IAT	Sensor de Temperatura de Admisión
CHT	Sensor de Temperatura de la Cabeza de Cilindros
ECT	Sensor de Temperatura de Refrigerante
KS	Sensor de Detonación
CKP	Sensor de Posición y Velocidad del Cigüeñal
CMP	Sensor de Posición y Velocidad del Árbol de Levas
TPS	Sensor de Posición del Acelerador
IAC	Válvula de Control de aire en Ralentí
EVAP	Sistema de emisiones
EGR	Válvula de Recirculación de gases de escape
HZ	Ciclos por segundo
PMS	Punto muerto superior
LAD	Lado axial derecho
LAZ	Lado axial izquierdo
LVD	Lado vertical derecho
LVZ	Lado vertical izquierdo
LHD	Lado horizontal derecho
LHZ	Lado horizontal izquierdo

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Gráfica de la severidad de la velocidad y el desplazamiento

Anexo B: Gráfica de la severidad de la velocidad de aceleración

Anexo C: Diagrama MS3

Anexo D: Características de la MS3

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación tipo proyecto de investigación tuvo como objetivo el análisis de espectros de vibración en un motor turbo cargado, las mismas que se generan en un motor de combustión interna a gasolina debido a las averías que se presentan, las cuales son un método para diagnosticar las fallas en los componentes de cualquier tipo de máquinas rotativas, y que forma parte del mantenimiento predictivo. Para lo cual se inició con la revisión del estado del arte, luego se implementó un Megasquirt III con el de fin de optimizar el motor turbo cargado, después se hizo un análisis de gases para verificar la programación de la Megasquirt y que el motor este trabajando dentro del rango de emisiones de gases permitidos por las normativas ambientales. Luego se colocó los puntos referenciales en el motor para tomar las muestras de datos en óptimas condiciones. A continuación, se simuló las averías mediante la Megasquirt y se registró los datos de los espectros de vibración a 1500 rpm y 2000 rpm del motor turbo cargado, además se definen y describen los espectros de averías simulados en el motor, debido a que cada componente del mismo produce vibraciones con determinada frecuencia. Por último, se analizó los datos obtenidos y se comparó para hacer un diagnóstico del motor turbo cargado y determinar el componente o sistema defectuoso analizando la magnitud de la vibración. En base a esto se concluyó que los espectros característicos de los diferentes componentes se puede diagnosticar fallas eléctricas y mecánicas de un motor. Por tanto, se recomienda implementar este método en el mantenimiento predictivo de un automóvil.

Palabras clave: <VIBRACIÓN MECÁNICA>, <MOTOR TURBO-CARGADO>, <ESTEQUIOMETRIA>, <EFECTO DE LA COMBUSTIÓN>, <MOVIMIENTO ARMÓNICO>, <SIMULACIÓN DE FALLAS>, <MANTENIMIENTO PREDICTIVO>.



ABSTRACT

The objective of this research project was to analyze vibration spectra in a turbocharged engine, which are generated in a gasoline internal combustion engine due to breakdowns, which are a method to diagnose the failures in the components of any rotary machines, and that is part of the predictive maintenance. For which it began with the review of state of the art, then a Megasquirt III was implemented to optimize the turbocharged engine. The gas analysis was done to verify the programming of the Megasquirt and that the motor is working inside of the gas emissions range allowed by environmental regulations. Then the reference points placed in the engine to take the data samples in optimal conditions. Then, the faults were simulated using the Megasquirt, and the data of the vibration spectra at 1500 rpm and 2000 rpm of the turbocharged engine were recorded. Also, the simulated fault spectra in the engine are defined and described because each component produces vibrations with a specific frequency. Finally, the data obtained were analyzed and compared to make a diagnosis of the turbocharged engine and determine the defective part or system analyzing the magnitude of the vibration. Based on this, it was concluded that the characteristic spectra of the different components could diagnose electrical and mechanical failures of an engine. Therefore, it is recommended to implement this method in the predictive maintenance of car.

Keywords: <MECHANICAL VIBRATION>, <TURBO-LOADED ENGINE>, <STOICHIOMETRY>, <EFFECT OF COMBUSTION>, <HARMONIC MOVEMENT>, <FAULTY SIMULATION>, <PREDICTIVE MAINTENANCE>.



INTRODUCCIÓN

La Carrera de Ingeniería Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ha mostrado más alto crecimiento en los últimos años, goza de un gran prestigio dentro del país, debido a que es la encargada de formar profesionales competitivos, de alta calidad y conscientes de las necesidades actuales del campo automotriz de nuestro país. Por esta razón los profesionales formados en esta institución están en capacidad de satisfacer los requerimientos competentes al área en la que se desempeñan, siempre con un enfoque en el desarrollo de nuevos estudios y tecnologías en la búsqueda de nuevas vías para el cuidado del medio ambiente.

El argumento de esta tesis tiene como propósito ser un instrumento de aporte científico e investigativo para la nueva generación de estudiantes, ya que brindará conocimientos relevantes y un alto grado de nivel académico.

Diariamente la aparición del fenómeno de vibración en máquinas rotativas, es uno de los problemas más frecuentes que suele ser de difícil solución, las máquinas en las que se presentan vibraciones torsionales son: motores de combustión interna, compresores de émbolo y bombas de expulsión, los mismos que presentan vibraciones durante su funcionamiento ya sea del tipo transversal o torsional causadas por la combinación de la aceleración y por la presión de los gases de la combustión y las partes móviles como son pistones, bielas y cigüeñales.

El presente proyecto se desarrolla con la finalidad de reducir las vibraciones y evitar daños catastróficos en motores de combustión interna turbo-cargado a gasolina, mediante el estudio de caracterización y análisis de espectros de vibración como mantenimiento predictivo.

Mediante este proyecto los futuros profesionales de la Escuela de Ingeniería Automotriz, podrán aplicar esta modalidad de estudio y enfocarla hacia fines: medioambientales, eficientes e investigativos, entre otros.

Justificación

En la actualidad el vehículo es el principal medio de transporte utilizado por las personas para movilidad y comercio, siendo esta una razón fundamental para que el vehículo se encuentre en óptimas condiciones de trabajo. El mantenimiento predictivo es un método por el cual un técnico puede proveer y diagnosticar un fallo que puede llegar a darse con el tiempo.

La vibración es un fenómeno natural que produce un motor en funcionamiento, este fenómeno bien estudiado puede facilitar la predicción de fallos a través del análisis de vibraciones.

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar y analizar los espectros de vibración de un motor de turbo cargado en el taller de ingeniería automotriz.

Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual del motor turbo cargado y rehabilitación de la misma para luego ser utilizada para los estudios de espectros de vibraciones.
- Obtener espectros bases para luego ser comparadas con espectros diferentes que marquen el comportamiento de los elementos del motor.
- Establecer una tabla del estudio de vibraciones mediante la recopilación de datos y simulación de fallas electrónicas para determinar la sintomatología que presenta el motor.
- Realizar el estudio de espectros de vibraciones mecánicas generadas en el motor por el efecto de combustión.
- Analizar si es factible el estudio de espectros de vibración para ser utilizado como un método de mantenimiento predictivo para los motores de combustión interna.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Motor de combustión interna turbo cargados

1.1.1 *Introducción*

La implementación de turbo en motores de combustión interna viene suministrada por la necesidad de incrementar la potencia sin modificar su cilindrada. Los motores turbo cargados o sobrealimentados, utilizan medios mecánicos y a su vez aprovecha la dinámica de los gases, ya sea de escape o admisión para introducir mayor cantidad de aire en los cilindros. De esta manera los motores son más eficientes y por tanto poseen mayor potencia. (Alonso, 2003)

Aumentar la potencia en un motor depende de la cantidad de combustible quemado en cada ciclo de trabajo y del número de revoluciones. Pero tanto en motores Diésel como en los de gasolina, por mucho que aumentemos el combustible que hacemos llegar al interior de la cámara de combustión, no conseguimos aumentar su potencia si este combustible no encuentra aire pasadero para quemarse. (Alonso, 2003)

Por lo cual es necesario compensarlo el volumen de aire (motores diésel) o mezcla de aire combustible (motores gasolina) que entra a los cilindros en la fase de admisión, solo conseguiremos aumentar la potencia, sin variar la cilindrada ni el régimen del motor añadiendo un turbocompresor. (Alonso, 2003)

1.2 Función del sistema sobrealimentado o turbo cargado

Su función es beneficiar la energía desperdiciada por los gases de escape (energía cinética) y tomar aire del medio ambiente, para impulsar mediante un turbo compresor a través del conducto de admisión hacia el interior de los cilindros (Bohner, 1985).

Otra de las funciones primordiales es forzar el aire que ingresa al motor, con mayor cantidad de aire en el interior del cilindro, el motor trabaja más eficiente, aumentando la potencia y reduciendo las emisiones contaminantes. (Bohner, 1985)

Una manera de sobrealimentar el motor de combustión interna es mediante un turbocompresor. De esta manera, la sobrealimentación es empleada para introducir aire a presión hacia el cilindro

del motor, superior a la aspiración estándar. Se puede encontrar varios tipos de compresores de aire usados en sistema de sobrealimentación para motores de combustión interna: (Bohner, 1985)

- Compresor Volumétrico.
- Turbocompresor.
- Compresor.

1.2.1.1 *Compresor volumétrico*

Los compresores volumétricos son compresores mecánicos, aquellos que utilizan un sistema de tracción mecánica que va conectado al cigüeñal y gira al mismo tiempo que esta. Normalmente es arrastrada mediante una correa, engranajes o una cadena. (Bohner, 1985)

La característica esencial de estos tipos de compresores está en hacer circular el aire a mayor velocidad, por lo que acumulan aire a presión en todo el conducto de admisión y crean una sobrepresión en todo el sistema de sobrealimentación. (Bohner, 1985)

Una de las ventajas de este tipo de compresor respecto a otros tipos de compresores, es que trabaja desde bajas revoluciones del motor. La transferencia de aire del lado de la succión al lado de descarga se hace de manera continua y no por impulsos. Al girar el compresor volumétrico, aporta una gran cantidad del volumen de aire a presión, incrementando la presión en las cámaras de combustión de cada cilindro del motor. Este tipo de turbocompresor es el más utilizado porque no consume potencia del motor y puede girar a más de 100000 rpm, de tal modo que la sobrealimentación es de mayor eficiencia a cualquier revolución del motor. (Bohner, 1985)

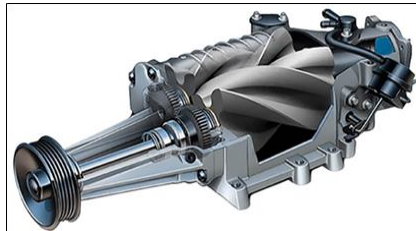


Figura 1-1: Compresor volumétrico
Fuente: (Peréz, 2017)

1.2.1.2 *Turbocompresor*

Es uno de los sistemas más utilizados hoy en día sobre todo en los motores a diésel, este sistema aprovecha la energía térmica de los gases de escape para mover una turbina en cuyo eje esta acoplado un compresor de hélice. La energía cinética producida por los gases de escape, transitan por una turbina ejerciendo una fuerza sobre sus álabes. Esta energía mecánica de giro adquirida por la turbina de escape es transmitida al compresor, esta aspira aire por medio del depurador y lo empuja a presión aprovechando la fuerza centrífuga del turbocompresor hacia el colector de

admisión. De este modo se obtiene una presión de alimentación superior a la atmosférica en cada cámara de cilindro. (Gil, 1999)

Este sistema es el más esgrimido debido a que ocupa muy poco espacio, además tiene como ventaja principal que anula en su totalidad el consumo de potencia efectiva del motor de combustión interna, y está concedido con la capacidad de girar a altas revoluciones, ya que puede llegar a girar hasta 200000 RPM, Según el tamaño del mismo. De este modo el aire se comprime y aumenta su valor de sobrepresión al ingresar hacia el interior del cilindro. (Gil, 1999)

Para que la sobrepresión no se exceda y evitar los daños catastróficos en la parte interna del motor, se incorpora una válvula de seguridad llamada válvula de alivio o descarga de presión (Wastegate), que va instalada en la turbina de escape, y es accionada mediante vacío generada por el motor. (Gil, 1999)

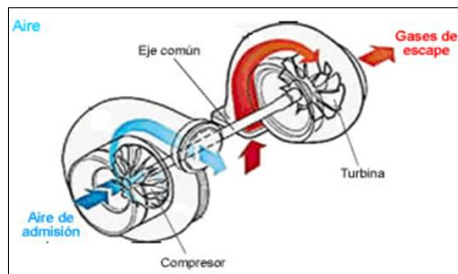


Figura 2-1: Turbocompresor
Fuente: (ECURED, 2019)

Los turbocompresores pueden clasificarse en dos:

- Turbocompresor de Geometría Fija.
- Turbocompresor de Geometría Variable.

1.2.1.3 Turbocompresor de geometría fija

Los turbos de geometría fija (TGF) formado principalmente por una turbina y un compresor, introducidos en sus respectivas carcasas de forma opuesta y unida por un eje común. Tanto la turbina como el compresor contienen alabes para aumentar la presión de alimentación de gases aspirados. Su estructura es sencilla ya que apenas juntan elementos mecánicos que envían el aire al interior de la cámara con la carcasa de escape. El problema que tienen es que su lag es excesivo. (Gil, 1999)

Recordamos que el lag es un término que hace referencia al tiempo de respuesta del turbo, con respecto a las revoluciones del motor. Es decir, el tiempo en que tarda en enviar potencia al motor, desde que presionamos el pedal del acelerador desde el punto muerto. (Gil, 1999)

Su aspecto positivo es que son económicos y fiables, pues al carecer de piezas internas, su costo de producción es menor y hay menos elementos mecánicos que se puedan averiar. (Gil, 1999)

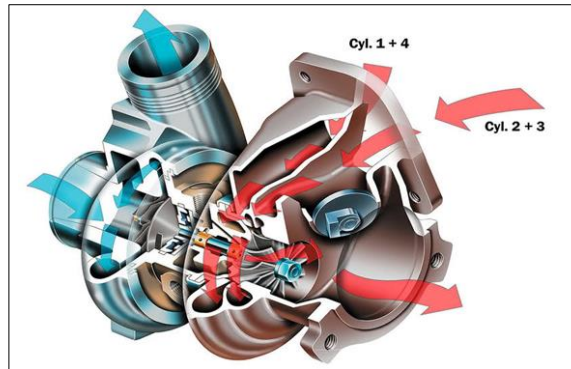


Figura 3-1: Turbocompresor de geometría fija
Fuente: (Fatboy Racing Malaysia - Turbosix, 2019)

1.2.1.4 Turbocompresor de geometría variable (VTG)

Es utilizado en motores de alto rendimiento, el objetivo de turbocompresor de geometría variable, es incrementar y controlar la presión de sobrealimentación, dentro de una extensa gama operativa del motor de combustión interna. (Orovio, 2010, pp. 271-273)

El VTG es un turbocompresor utilizado para disminuir el retraso de respuesta. Por medio de unos álabes móviles alojados en disco o corona, que son desplazados todos a la vez unos ciertos ángulos de acuerdo a la carga del motor, por medio de un mecanismo de varilla-palanca accionada por una válvula neumática, en algunos vehículos son controlados por un pequeño motor eléctrico. Regenteado por la ECU o unidad de control electrónico. Con el Turbo de Geometría Variable, se busca los valores importantes de par motor a régimen bajos e intermedios, y una potencia a alto régimen. (Orovio, 2010, pp. 271-273)

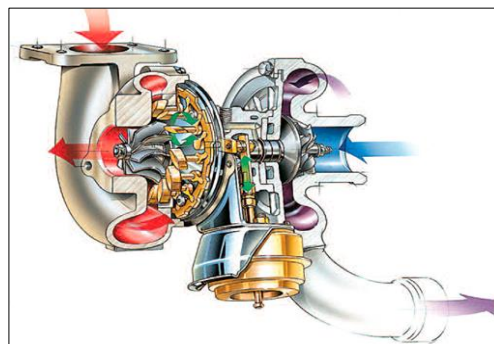


Figura 4-1: Turbocompresor de geometría variable
Fuente: (Taller actual, 2019)

1.2.1.5 Compres

Este tipo de compresores recibe el nombre de compres por la forma de realizar la técnica de funcionamiento cambiador de la onda de presión. Se empezaron a implantar en los vehículos para

perfeccionar las características del turbocompresor sobre todo en bajas revoluciones del motor. (Autoavance, 2012)

El principio de funcionamiento de estos prototipos de compresores se basa en transmitir por contacto directo al aire del colector de admisión los residuos de energía de presión contenidos en los gases de escape por medio de las finas paredes radiales de un tambor que recibe movimiento del cigüeñal del motor. (Autoavance, 2012)

El régimen de funcionamiento máximo está entre las 15 000 a 20 000 RPM, produciéndose a partir de aquí un descenso notable de su rendimiento. (Automoviles El Mangas SL, s.f)

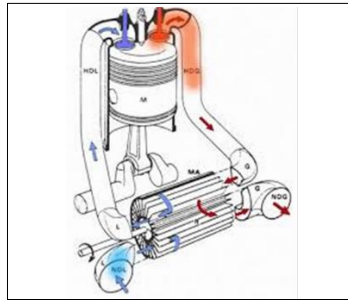


Figura 5-1: Turbocompresor complejo

Fuente: (Autoavance, 2012)

1.2.2 *Ventajas y desventajas del turbocompresor*

Dentro de las ventajas, se tiene:

- Mejor rendimiento. Un turbocompresor puede aumentar la potencia efectiva de un motor estándar en un 35% por cilindrada total.
- Reducción del ruido del motor. La caracola de escape actúa como un silenciador del ruido de los gases de escape. Similarmente la caracola de admisión absorbe el ruido producido en el múltiple de admisión.
- Reducción del consumo de combustible, en relación a los motores naturalmente aspirados.
- Puede ajustarse a cualquier altitud, debido a que depende de la diferencia de presión entre los gases de escape y la presión atmosférica. (Ecomotoe.es, 2012)

Dentro de las desventajas, se tiene:

- Retrasa en su respuesta, potencia y par reducido a bajas revoluciones, debido al turbo-lago.
- Montaje del turbocompresor en la zona de los gases de escape, lo que conlleva a utilizar materiales refractarios.
- Dificultosa lubricación y refrigeración de acuerdo a su diseño tecnológico. (Ecomotoe.es, 2012)

1.2.3 *Intercooler*

Es un intercambiador térmico de aire/aire que se encarga de enfriar el aire comprimido por el turbocompresor. El aire al ser comprimido se calienta. En el caso del turbocompresor los gases salen a una temperatura elevada de unos 90-120 °C. Este calentamiento es indeseado, porque el aire al calentarse pierden densidad, con lo que la masa de oxígeno por unidad de volumen disminuye. Esto provoca que la eficiencia volumétrica del motor disminuya. (Autocout24, 2018)

El intercooler rebaja la temperatura del aire de admisión a unos 60 °C, evita que disminuya la eficiencia volumétrica del M.C.I. y reduce el desgaste interno del motor, con lo que la ganancia de potencia está en torno al 10-15 %. (Autocout24, 2018)

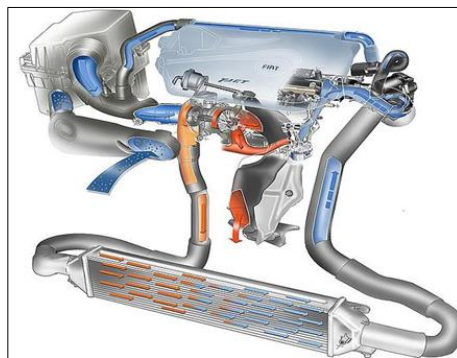


Figura 6-1: Intercooler

Fuente: (Autocout24, 2018)

1.2.4 *Sobrealimentación en motores diésel*

En motores diésel la sobrealimentación está más difundida, El hecho de utilizar solamente aire en el proceso de compresión y no introducir el combustible hasta el momento final de la carrera compresión, no puede crear problemas de "picado" o autoencendido en el motor. Un motor diésel trabaja con exceso de aire al no tener cuerpo de aceleración, esto significa que a igual cilindrada unitaria e igual régimen motor (rpm) ingresa mayor cantidad aire en un cilindro de un motor diésel que a un motor de encendido por chispa. (Hermógenes Gil, 2002)

En motores diésel solamente entra aire al abrirse la válvula de admisión, debido además a una mayor robustez estructural, ya, que está facultado a mantener altas presiones en el interior de la cámara de combustión, debido también a las condiciones de su combustible, resulta especialmente dotado para admitir una sobrealimentación similar a la que puede proporcionar un turbo compresor. (Hermógenes Gil, 2002)

Las presiones obtenidas al final de la compresión y sobre todo durante la carrera de trabajo exceden el rango de (40 a 80 bares), que en el motor de ciclo Otto (motor de gasolina) (15-25 bares). Esta alta presión, es necesaria para conseguir la alta temperatura pretendida para la auto-

inflamación o auto-ignición del gasóleo, es el origen de que la fuerza de los gases de escape, a igual régimen, cilindrada unitaria y carga requerida al motor sea mucho mayor en el diésel que en la gasolina. (Hermógenes Gil, 2002)

1.2.5 Sobrealimentación en el motor ciclo Otto (motores a gasolina)

En motores a gasolina o de chispa, presentan muchas dificultades para su sobrealimentación que los motores diésel, Uno de las inconvenientes es la combustión de los motores a gasolina, el problema que acarrea sobrepasar una cierta presión de compresión puede ocasionar problemas de picado, bien por autoencendido o por detonación. (Hermógenes Gil, 2002)

Este problema es debido al aumento de temperatura que sufre la mezcla de aire-combustible dentro del cilindro en la carrera de compresión, la solución para este problema consiste en reducir la relación de compresión con el fin de que no aumente demasiado la presión y con ello la temperatura de la mezcla que puede provocar el autoencendido o la detonación, sin embargo, cuando se logra un diseño de sobrealimentación equilibrado, provistos de la cantidad de válvulas suficientes para contrarrestar los efectos secundarios que la sobrealimentación presenta, obtienen aumento de potencia espectaculares, sobre todo en motores de pequeña cilindrada. (Hermógenes Gil, 2002)

Los motores turbo de 1400 CC proporcionan potencia que están encima que un motor atmosférico de 2000 CC, con notables ventajas en un menor consumo de combustible, menor peso y unas características de aceleración y velocidad máxima muy superior. (Hermógenes Gil, 2002)

1.3 Inyección electrónica en motores a gasolina

La inyección electrónica de combustible es un sistema que reemplaza al carburador. Su ejecución se debió al incremento de los requerimientos de los organismos de control del medio ambiente para restringir los gases contaminantes hacia el medio ambiente y a la vez perfeccionar el consumo excesivo de combustible. (Hernández, 2010)

Sistemas de inyección electrónica se puede subdividir en diversos tipos (mono punto, multipunto, secuencial y simultánea) pero fundamentalmente todas se establecen en un mismo principio, con la asistencia de la electrónica para graduar la inyección del combustible. (Hernández, 2010)

Su importancia radica en su mejor desempeño respecto al carburador en la dosificación de la mezcla aire / combustible, es decir que el factor lambda quede muy próxima a la relación estequiometría (14,7:1). (Hernández, 2010)

1.3.1 *Función del sistema de inyección electrónica*

Su función principal es controlar la pulverización necesaria de combustibles, la misma que logra dosificar de acorde al aire aspirado del medio ambiente y conforme al régimen de funcionamiento del motor de combustión interna. (Hernández, 2010)

El ajuste y la dosificación de combustible se lleva a cabo por medio de una tarjeta electrónica, denominado como ECU (Unidad de Control Electrónico), el mismo que es encargado de acoger la información en todo momento del funcionamiento del motor de combustión interna, por medio de sensores, estos cambian en señales electrónicas las magnitudes físicas medidas durante el funcionamiento del motor tales como: temperatura de refrigerante y aire, carga, régimen, presión en múltiple de admisión, etc. (Hernández, 2010)

1.3.2 *Ventajas*

Entre las ventajas más significativas se tiene:

- Los nuevos sistemas tienen implementado un sistema de autodiagnóstico, que anuncia cuando hay presencia de averías en el sistema de inyección electrónica.
- Respuesta inmediata de aceleración y desaceleración.
- Los motores de inyección logran incrementar antes la temperatura del motor gracias al correcto suministro de combustible.
- La mezcla se envía uniformemente a cada cilindro.
- Mayor control de la mezcla de aire combustible y por ende un bajo nivel de emisiones contaminantes al medio ambiente.

1.3.3 *Elementos del sistema de inyección electrónica*

Los elementos del sistema de inyección son los siguientes:

- ECU.
- Sensores.
- Actuadores.

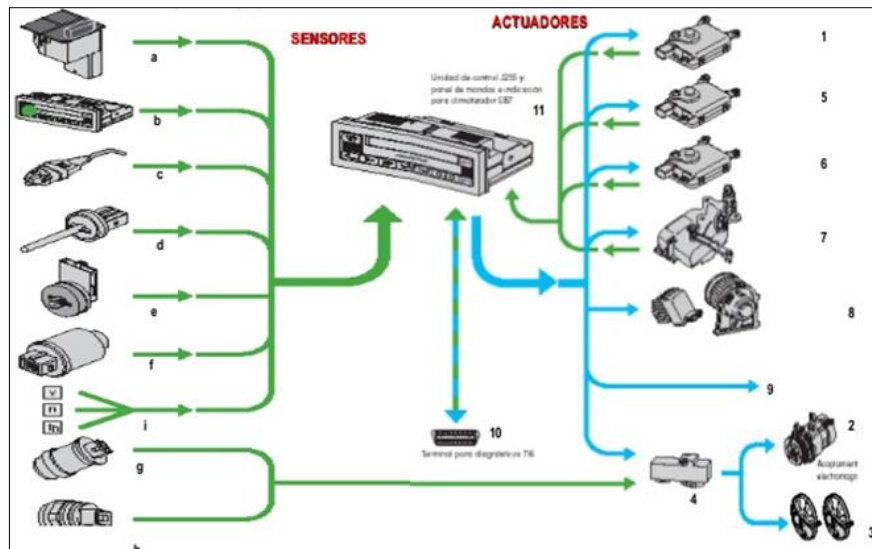


Figura 7-1: Elementos de funcionamiento de la inyección electrónica
Fuente: (Sena, 2010)

1.3.3.1 ECU

Es la centralita electrónica considerado como cerebro del motor, que administra varios aspectos de la operación de combustión interna del motor por medio de sensores instalados en diferentes partes del motor. Programas de computador controlan los inyectores de combustible de manera muy precisa y eficiente, de modo que bajo diferentes condiciones de operación del motor se puede obtener una mezcla combustible/aire óptimo. (Hernández, 2010)

1.3.3.2 Sensores

Son elementos electrónicos captadores de magnitudes físicas o químicas denominadas variables de instrumentación y convertirlas por medio de un transductor en variables o señales eléctricas, que a su vez son comunicadas a la centralita electrónica (ECU). (Hernández, 2010)

En un motor de combustión interna equipado con Inyección Electrónica, se puede localizar varios sensores, tales como:

- TPS (Sensor de Posición del Acelerador).
- IAT (Sensor de Temperatura de Aire).
- ECT (Sensor de Temperatura de Refrigerante).
- MAF (Sensor de Masa de Flujo de Aire)
- MAP (Sensor de Presión Absoluta).
- KS (Sensor de Detonación).
- CKP (Sensor de Posición del Cigüeñal).
- CMP (Sensor de Posición del Árbol de Levas).

1.3.3.3 Actuadores

Son dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado. Este recibe la orden de ECU y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control, En un motor de combustión interna se puede encontrar diversos actuadores: (Hernández, 2010)

- IAC (Válvula de Control de aire en Ralentí).
- EGR (Válvula de Recirculación de gases de escape).
- Inyectores.
- Bobina de Encendido.
- Bomba de Combustible.
- Electro ventilador.
- EVAP (Sistema de emisiones).
- Regulador de Presión de Combustible.

1.4 Unidad de control programable

ECU programable, que puede ajustarse y modificarse a una serie de parámetros en el M.C.I. para garantizar su óptimo desempeño. En un motor con inyección electrónica, la unidad de control del motor es la que determina la cantidad de combustible a inyectarse y a la vez puede ajustar el tiempo adecuado para el salto de chispa en una bujía, con base a un número de parámetros. (Roshfrans, 2015)

ECU S programables, permite la modificación de diversos parámetros por el usuario. Este tipo de ECU S se utilizan cuando se ha realizado modificaciones significativas en un M.C.I. Como por ejemplo al implementar un turbocompresor en un motor estándar. Tal programación puede ser mapeada por medio software adecuado mientras el motor está en funcionamiento (Roshfrans, 2015)

1.4.1 MegaSquirt

Es un controlador electrónico reprogramable, diseñado, específicamente para controlar la pulverización del combustible por medio de los inyectores y mejorar el rendimiento del M.C.I, de modo que éste pueda entregar más potencia. (Megamanual, 2015)

El controlador MegaSquirt es capaz de proporcionar cálculos en tiempo real de inyección de combustible, hasta 16 000 RPM, es completamente programable y compactible para

intercomunicarse con una computadora (laptop) por medio de una conexión serial. (Megamanual, 2015)

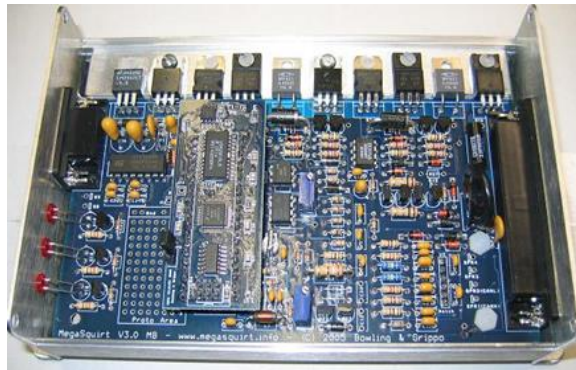


Figura 8-1: ECU programable MegaSquirt
Fuente: Ruiz D, 2019

MegaSquirt es una ECU reprogramable idóneo para controlar la dosificación de combustible en todo tipo de motores a combustión interna, desde uno hasta doce cilindros. Los actuadores a controlar pueden ser de alta o baja impedancia, para cualquier número de cilindros, aún sea el caso de motores de tres o de cinco cilindros, incluso motores con sistema de encendido DIS (odd-fire). MegaSquirt soporta un variado número de sistemas de encendido. (Megamanual, 2015)

Con MegaSquirt es posible controlar desde una bobina hasta un máximo de seis bobinas de encendido de cualquier tipo, mediante algunas modificaciones al sistema. Si se desea controlar únicamente el combustible, se puede conseguir la secuencia considerada de disparo (trigger), directamente del negativo de la bobina o de la señal existente del indicador de RPMS del motor. (TARINGA, 2008)

1.5 Vibraciones

La vibración son oscilaciones y las oscilaciones son movimiento que hace una partícula alrededor de un punto fijo, de pequeña amplitud, todos los cuerpos presentan una señal de vibración de diferentes características. Por tanto, una señal de vibración capturada de un equipo móvil es la suma de vibración de cada una de sus componentes. (Reliabilityweb.com, 2018)

1.5.1 Características de las vibraciones

Los efectos que producen las vibraciones mecánicas, dependen fundamentalmente de las siguientes características: (Reliabilityweb.com, 2018)

- Magnitud.
- Frecuencia.
- Periodo.

1.5.1.1 Magnitud de la vibración

La magnitud de una vibración puede medirse en función del desplazamiento producido por dicha vibración. Al tratarse de un movimiento, es posible determinarla en términos de velocidad o aceleración. (Reliabilityweb.com, 2018)

Teniendo en cuenta la facilidad de medición, generalmente se determina en términos de aceleración, siendo las unidades utilizadas los m/s^2 . La aceleración es máxima cuando pasa por el punto de equilibrio hasta llegar a cero en el extremo. (Reliabilityweb.com, 2018)

1.5.1.2 Frecuencia de la vibración

La frecuencia indica el número de veces que el objeto o equipo vibra por segundo. y se mide en Hz (Ciclos por segundo). Las vibraciones producidas por las máquinas generalmente no tienen una frecuencia determinada, sino que son una mezcla de vibraciones de diversas frecuencias. (Reliabilityweb.com, 2018)

1.5.1.3 Periodo de la vibración

Es el tiempo que tarda una masa o partícula en realizar un ciclo completo (medido generalmente en seg o mseg). (Reliabilityweb.com, 2018)

1.5.2 Movimiento periódico

Es el movimiento de un cuerpo o partícula que a intervalos iguales de tiempo se repite con las mismas características, y puede ser debido a una vibración libre o una vibración forzada. Un movimiento periódico es el tipo de evolución temporal que presenta un sistema cuyo estado se repite exactamente a intervalos regulares de tiempo. (CIENCIA CREATIVA, 2016)

La expresión periódico se aplica a esta clase de movimiento, sirve para significar fenómenos o hechos que se repiten igualmente después de un cierto tiempo. (CIENCIA CREATIVA, 2016)

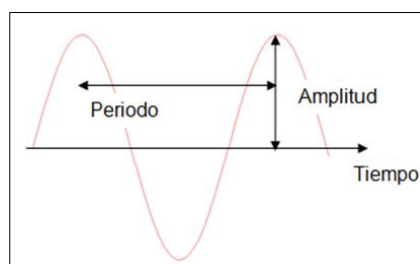


Figura 9-1: Movimiento periódico
Fuente: (CIENCIA CREATIVA, 2016)

1.5.2.1 Vibración libre

Es la oscilación continua de una masa, después que se para la fuerza de excitación. La vibración se hará a la frecuencia natural del sistema, y se extinguirá gradualmente, debido a la amortiguación del sistema. (Femap & Nx Nastran, 2016)

Todos los sistemas que poseen masa y elasticidad son capaces de vibrar libremente, por otra parte, la vibración puede darse en la ausencia de fuerzas externas. (Femap & Nx Nastran, 2016)

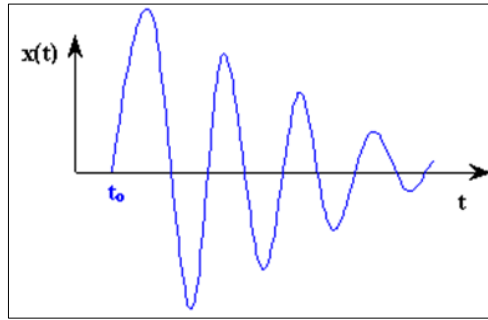


Figura 10-1: Vibración libre
Fuente: (De Mecánica, 2002)

1.5.2.2 Movimiento armónico

Es la forma más simple de vibración, también denominado movimiento vibratorio armónico simple. es un movimiento periódico de vaivén, y vibratorio en ausencia de fricción, en el que un cuerpo o masa, oscila de un lado al otro de su posición de equilibrio, en una dirección determinada, y en intervalos iguales de tiempo. (Fiscalab, 2019)

En el movimiento armónico simple la fuerza que actúa sobre el cuerpo móvil es directamente proporcional al desplazamiento. (Fiscalab, 2019)

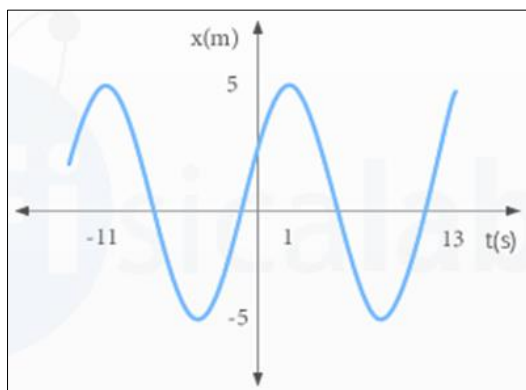


Figura 11-1: Movimiento armónico simple
Fuente: (Fiscalab, 2019)

1.5.2.3 Vibración torsional

Son oscilaciones de un cuerpo o masa entorno a un eje central. Y es causado por fuerzas de torque, el desplazamiento se mide en coordenadas angulares. La vibración torsional es un tipo de vibración vigente en todo tipo de máquinas alternativas y rotativas, tiene su comienzo en pequeñas oscilaciones de velocidad angular. El movimiento torsional surge sobrepuesto al movimiento rotativo permanente de los elementos mecánicos que giran y son las oscilaciones periódicas entorno a la velocidad de giro. (Dasoluciones, 2014)

La vibración torsional suele aparecer en trenes de engranajes, cigüeñales o sistemas de embragues.

1.5.2.4 Péndulo simple

El péndulo simple o también llamado péndulo matemático, es un sistema constituido por una masa suspendida verticalmente por un hilo de masa despreciable, Cuando se desplaza la masa de la vertical, esta oscila alrededor de la articulación con movimiento periódico regular. (Blogger, 2011)

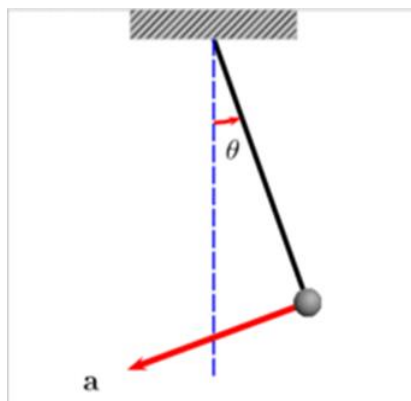


Figura 12-1: Péndulo simple

Fuente: (Lagos, 2011)

Un péndulo simple también es un sistema mecánico, Cuando se separa hacia un lado de su posición de equilibrio y se le suelta, el péndulo oscila en un plano vertical bajo la influencia de la gravedad. El movimiento es periódico y oscilatorio. Si un pequeño cuerpo de masa m se encuentra sujeto al extremo de un hilo de peso despreciable, cuya longitud es L y que oscila en un plano vertical. Este dispositivo constituye un Péndulo Simple en oscilación. (Blogger, 2011)

1.5.2.5 Amortiguación

La amortiguación es el proceso en el cual la amplitud de la vibración disminuye continuamente. En la amortiguación la energía se disipa en forma de fricción, calor o en forma de sonido. La

amortiguación viscosa es la más utilizada, ya que la fuerza de amortiguación es proporcional a la velocidad. (Blogger, 2011)

1.5.2.6 Movimiento periódico forzado

Cuando el movimiento de oscilación es debido a una fuerza externa del sistema, se dice que es una vibración forzada, y si existe una disipación de energía debido a la fricción, es una vibración forzada amortiguada. Un movimiento forzado es cuando se lleva en marcha un sistema amortiguado y se le va introduciendo energía al sistema. (fuerza impulsora) que varía armónicamente con el tiempo. (Universidad de Sevilla, 2016)

1.5.2.7 Vibraciones armónicas forzada no amortiguada

Son aquellas vibraciones en las cuales no existe amortiguamiento de ningún tipo, pero son producidas por fuerzas externas. Las fuerzas excitadoras pueden ser de diversas naturalezas influyendo esta característica en el comportamiento del sistema sobre el cual actúa. (Universidad de Sevilla, 2016)

Por ejemplo, las máquinas rotativas como las turbinas, bombas hidráulicas, etc. están sometidas a una frecuencia de rotación de acuerdo a su diseño. Si existe cierto desplazamiento del centro de masa respecto al centro de giro, sobre el rotor surgirá una fuerza excitadora que será proporcional a la frecuencia de rotación. (Universidad de Sevilla, 2016)

1.5.2.8 Vibración forzada causada por fuerza de rotación

Fuente de vibración forzada, es debido al desequilibrio de partes en rotación. Si el centro de gravedad de una masa m no equilibrada tiene una excentricidad radial, la fuerza centrífuga generada por la rotación producirá que esta vibre, este es el caso cuando el eje de un motor no está balanceado. (Universidad de Sevilla, 2016)

1.5.2.9 Fuerzas transmitidas

La resonancia mecánica es un fenómeno producida cuando un sistema mecánico vibra en respuesta a una fuerza periódica, aplicada con la frecuencia natural del sistema. cuyo periodo de vibración se acerca al periodo de vibración característico de dicho cuerpo, en el cual, una fuerza relativamente pequeña aplicada de forma repetida hace que la amplitud del sistema oscilante aumente hasta alcanzar amplitudes peligrosas que puedan destruir el sistema. (Universidad de Sevilla, 2016)

1.5.2.10 Fatiga de los materiales

En ocasiones los segmentos de metal son sometidos a tensiones mecánicas y es un prodigio por el cual la cisura de los materiales a bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Estas fallas en los materiales se denominan fractura por fatiga. Es muy común la fractura por fatiga en los elementos móviles como en los ejes de transmisión. (Universidad de Sevilla, 2016)

Una fractura por fatiga se origina en lugares donde se concentra la tensión mecánica, como en una grieta. Una vez iniciada la fractura, ésta se extiende a través del segmento debido a las tensiones mecánicas cíclicas, hasta que la sección que queda se vuelve tan pequeña que no puede soportar la carga y ocurre la fractura del material. (Universidad de Sevilla, 2016)

1.6 Fuentes de vibración

- Se origina en la oscilación de equipos destinados a transporte, perforación, abrasión, sedimentación.
- Los movimientos rotatorios o alternativos, motores de combustión interna, superficies de rodadura de vehículos.
- Vibración de estructuras.

1.6.1 Maquinas, herramientas o vehículos que las originan vibraciones

Entre las más comunes se tiene:

- Alta frecuencia. Herramientas manuales rotativas o alternativas, eléctricas y neumáticas. (20 a 1000 Hz).
- Baja frecuencia. Vehículos de carga pesada, transporte de pasajeros, vehículos industriales, trenes y maquinaria pasada (1 a 20 Hz).
- Muy baja frecuencia. Transporte marítimo y vehículos livianos (menos de 1 Hz).

1.6.2 Causas de vibración

Entre las más comunes se tiene:

1.6.2.1 Vibración debido a desbalance

Es una de las causas más comunes de la vibración. En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican: La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x los rpm de la pieza desbalanceada. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las maquinas con ejes horizontales). El análisis de fase indica lecturas de fase estables. La fase se desplazará 90° si se desplaza el captador 90°. Nota: el desbalance de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial. (SidleShare, 2017)

1.6.2.2 Vibración debido a la falta de alineamiento

En la mayoría de los casos los datos derivados de una condición de falta de alineamiento indican lo siguiente: La frecuencia de vibración es de 1x rpm; también 2x y 3x rpm en los casos de una grave falta de alineamiento. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido axial, además de radial. El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables. La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales. Nota: uno de los indicios más importantes de problemas debidos a falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial. En general, cada vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor que la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar la existencia de un problema de alineamiento o eje torcido. Los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento son: angular, en paralelo y una combinación de ambos. Una falta de alineamiento angular sujeta principalmente los ejes de las maquinas accionadora y accionada a vibración axial igual a la velocidad de rotación (rpm) del eje. La falta de alineamiento en paralelo produce principalmente vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de rotación del eje. (SidleShare, 2017)

1.6.2.3 Vibración debido a la excentricidad

La excentricidad es otra de las causas más comunes de vibración en la maquinaria rotativa. Excentricidad en este caso no significa "ovalización", sino que la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor, el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica. La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances, y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro. (SidleShare, 2017)

1.6.2.4 Vibración debido a rodamientos defectuosos

Excesivos niveles de vibración, producidos por rodamientos de chumacera defectuosos, son habitualmente la derivación de un desgaste excesiva (causada por desgaste debido a una acción de barrido o por erosión química), aflojamientos mecánicos (metal blanco suelto en el alojamiento), o problemas de lubricación. (SidleShare, 2017)

1.6.2.5 Vibración debido a la inadecuada lubricación

Una incorrecta lubricación, incluyendo la falta de engrase y el uso de lubricantes erróneos, puede producir problemas de vibración en un rodamiento de chumacera. En semejantes casos la lubricación incorrecta causa excesiva roce entre el rodamiento estacionario y el eje rotante, y dicha fricción provoca vibración en el rodamiento y en las demás piezas mecánicas relacionadas. Este tipo de vibración se llama "dry whip", o sea látigo seco, y es muy parecido al pasar de un dedo mojado sobre un cristal seco. La frecuencia de la vibración debida al látigo seco generalmente es muy alta y promueve el sonido chillón característico de los rodamientos que están desempeñando en seco. No es muy probable que dicha frecuencia sea algún múltiplo integral del rpm del eje, de manera que no es de esperarse ningún patrón significativo bajo la luz estroboscópica. En este respecto, la vibración ocasionada por el látigo seco es similar a la vibración creada por un rodamiento antifricción en mal estado. (SidleShare, 2017)

1.6.2.6 Vibración debido al aflojamiento mecánico

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeo (machacado) resultante producen vibración a una frecuencia que a menudo es $2x$, y también múltiplos más elevados, del rpm. La vibración puede ser resultado de pernos de montaje sueltos, de holgura excesiva en los rodamientos, o de fisuras en la estructura o en el pedestal de soporte. La vibración característica de un aflojamiento mecánico es generada por alguna otra fuerza de excitación, como un desbalance o una falta de alineamiento. Sin embargo, el aflojamiento mecánico empeora la situación, transformando cantidades relativamente pequeñas de desbalance o falta de alineamiento en amplitudes de vibración excesivamente altas. Corresponde por lo tanto decir que el aflojamiento mecánico permite que se den mayores vibraciones de las que ocurrirían de por sí, derivadas de otros problemas. (SidleShare, 2017)

1.6.2.7 Vibración debido al problema de engranaje

La vibración que resulta de problemas de engranaje es de fácil identificación porque normalmente ocurre a una frecuencia igual a la frecuencia de engrane de los engranajes - es decir, la cantidad de dientes del engranaje multiplicada por los rpm del engranaje que falla. Inconvenientes habituales de los engranajes, que tienen como resultado vibración a la frecuencia de engrane, comprenden el desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes de los engranajes, fallas de lubricación y materias extrañas atrapadas entre los dientes. (SidleShare, 2017)

1.7 Medición de vibración

1.7.1 Medición y análisis de vibraciones

Se aplica, en todo tipo de industrias con el objetivo de facilitar la técnica de diagnóstico de fallas y para el monitoreo continuo de condición de las máquinas y equipos. Esto nos permite estar al tanto en profundidad al comportamiento de las máquinas y componentes mecánicos mientras están en marcha y nos ayuda a descubrir dificultades mecánicas en cualquier tipo de máquina. (Vibrator, 2015)

Mediante la medición y análisis de vibraciones en máquinas y equipos industriales, se descubren fallas bien confinadas, En la mayoría de los casos la ventaja que presenta en equipos rotatorios, es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una industria. (Vibrator, 2015)

1.7.2 Vibrómetro

Es un instrumento de medida señalado para determinar las magnitudes que caracterizan el suceso de las vibraciones y oscilaciones mecánicas. La medición proporciona los siguientes parámetros: aceleración de la vibración, velocidad de vibración y variación de vibración. De este modo se caracterizan las vibraciones con precisión.

El vibrómetro consta de un transductor, el acelerómetro, que en contacto con la superficie del elemento vibrante convierte las señales mecánicas en señales eléctricas caracterizando el hecho físico en unidades de aceleración, utilizado fundamentalmente para el mantenimiento preventivo y predictivo de todo tipo de máquinas.

Generalmente los vibrómetros están compuestos por:

- Transductor.
- Preamplificador.
- Analizador de frecuencia.
- Medidor.

1.7.2.1 Transductor

Empleado para medir la velocidad lineal, la proximidad, desplazamiento y también la aceleración de elementos y componentes sometidos a vibración, los transductores son encargados de convertir la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración. (PCE Ibérica S.L., 2014)



Figura 13-1: Transductor
Fuente: (PCE Ibérica S.L., 2014)

1.7.2.2 Preamplificador

Incrementa la señal recibida convenientemente.

1.7.2.3 Analizador de frecuencia

En bandas de octava o de un tercio de octava.

1.7.2.4 Medidor

Calibrado en unidades vibratorias. El vibrómetro es un instrumento secundario acoplado con su sensor capaz de señalar:

- Nivel efectivo de RMS (raíz cuadrada media).
- El valor pico de la vibración.
- El valor pico – pico de la vibración.

Nivel efectivo de RMS. La raíz cuadrada media de vibración, (valor eficaz) es el promedio de los valores de la raíz cuadrada de las amplitudes de la onda. En el caso de una onda senoidal pura es 0,707 por el valor pico, El valor RMS es conforme al área bajo la curva. (SidleShare, 2015)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

El valor RMS representa un estimado del contenido energético en la vibración de un elemento, equipo, máquina o estructura. Este valor es pródigamente utilizado para cuantificar la severidad de la vibración en máquinas y equipos. (SidleShare, 2015)

El valor pico de la vibración. Es el trayecto máximo de la onda del punto cero o del eje de coordenadas.

El valor pico – pico de la vibración. Es puntualmente dos veces el valor pico, ya que la forma de la onda es simétrica.

1.7.3 *Vibracheck*

Es un instrumento portátil de vibraciones mecánicas de dos canales, utilizada para controlar la confiabilidad y diagnosticar problemas en máquinas rotativas, por medio de conexiones de acelerómetros o sensores de proximidad que mide espectros en aceleración, velocidad, desplazamiento y envolvente. (Dokumen, 2015)

Vibracheck analiza máquinas, estructuras y trabaja en conjunto con el software MAINTraQ Analyzer ofreciendo los siguientes gráficos: Espectros, formas de ondas, espectros cruzados, diagrama polar, diagrama de bode, análisis de fase cascada de espectros en función de rpm mantenimiento predictivo, Vibracheck analiza las vibraciones de máquinas en un plan de mantenimiento predictivo. Es muy fácil de usar por lo que puede ser operado por técnicos o inspectores de mantenimiento. Las rutas pueden incluir mediciones de espectros, formas de onda o niveles de vibraciones con un mínimo de trabajo para el operador. Vibracheck mide espectros de hasta 6400 líneas de resolución, lo que permite una excelente discriminación de componentes de frecuencias para la mayoría de los casos prácticos. medición de formas de onda. (Dokumen, 2015)



Figura 14-1: Analizador de vibraciones Vobracheck

Fuente: Ruiz D, 2019

Vibracheck mide formas de onda con frecuencia de muestreo y tiempo de medición configurables. análisis de fase Vibracheck ABG analiza la diferencia de fase de un canal respecto del otro. Esto permite conocer la forma en que se mueve un rotor sin detener la máquina. medición de orbitas Vibracheck modelo ABG mide orbitas sin filtrar o filtradas y el desplazamiento pico a pico de cada sensor en conjunto con el software MAINTraQ Analyzer sensores Vibracheck puede trabajar con los siguientes sensores: Acelerómetros de 100 mV/g o 500 mV/g. (Dokumen, 2015)

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Metodología para el análisis de los espectros de vibración en M.C.I.

En el presente capítulo se realiza el levantamiento de información de las señales de vibración en funcionamiento indemne y simulando averías electrónicas del motor, para lo cual se utilizó motor de combustión interna turbo cargado repotenciada electrónicamente con MEGASQUIRT III, perteneciente a la Carrera de Ingeniería Automotriz.

2.1.1 *Enfoque*

El enfoque que se va a presentar en este trabajo de titulación será de tipo cuantitativo, ya que se interpretará la metodología para la adquisición de datos de vibraciones del M.C.I., comportamiento de los diferentes componentes y sistemas durante las pruebas y monitoreo de datos de señales de vibraciones, especificaciones y parámetros se buscará la mejor alternativa para la selección del correcto funcionamiento del sistema para adquisición de señales de vibraciones mecánicas. Y su utilización en los procesos de aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Automotriz.

2.1.2 *Modalidad de la investigación*

2.1.2.1 *Investigación del campo*

Se recolectará toda la información posible que permita realizar un estudio sistemático sobre la adquisición de los espectros relacionados a las vibraciones mecánicas, producidas por diferentes averías que van presentando en funcionamiento del motor y por desgaste interno del mismo.

2.1.2.2 *Investigación bibliográfica*

Por medio de la utilización de diferentes libros de Ingeniería en vibraciones, páginas web, folletos y artículos científicos podremos ampliar la teoría de vibraciones, criterios para poder obtener una

idea clara y así aplicarlo en el análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas causadas por averías y desgastes presentes durante el funcionamiento del motor.

2.1.2.3 *Investigación experimental*

Durante el desarrollo de la presente investigación experimentalmente se podrán determinar los espectros patrones y sistema de adquisición de datos, permitiendo obtener los mejores espectros característicos para el diagnóstico de las señales de vibraciones producidas por el funcionamiento del motor.

2.1.3 *Tipo de investigación*

2.1.3.1 *Investigación exploratoria*

Se basará en el estudio de espectros patrones de bancos de pruebas, el mismo que permitirá realizar la comparación con los espectros sustraídas con averías.

2.1.3.2 *Investigación descriptiva*

Hace referencia de ir detallando paso a paso todo lo que se va realizando en el análisis de vibración, es decir, se puede mencionar el adelanto de estudio de espectros de vibraciones.

2.1.3.3 *Investigación explicativa*

Se expondrá todos los aspectos que influyen en el estudio de análisis de vibraciones mecánicas del banco de pruebas, para poder llegar de una mejor manera y lograr ser comprendidos por parte de cada uno de los interesados en conocer acerca de este tema.

2.1.4 *Población y muestra*

2.1.4.1 *Población*

La aplicación del proyecto se realizará por medio de una guía de observación, en el cual se tomará nota los datos que arrojen las señales de vibraciones, características de las mismas, puntos inferiores y superiores del espectro y tiempos en los cuales se presente los picos críticos de armónicos.

2.1.4.2 Muestra

Mediante la guía de observación se tomará nota del tiempo total aproximado en los cuales se presenta las distorsiones de la señal como son puntos máximos y mínimos del espectro producido por la avería generada en motor de combustión interna.

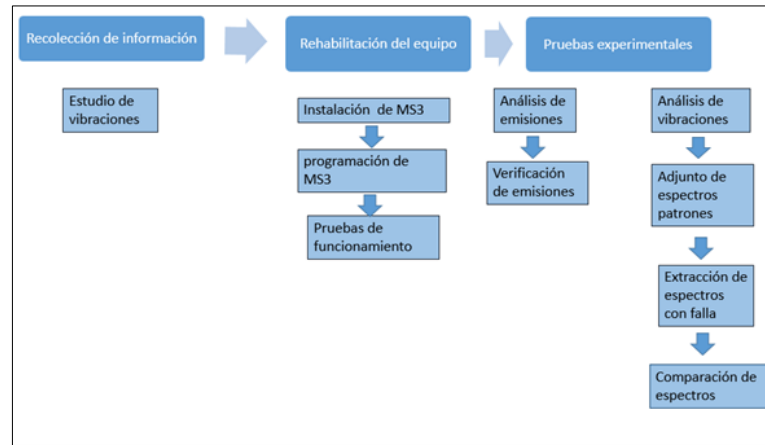


Figura 1-2: Metodología para el análisis de los espectros de vibración

Fuente: Ruiz D, 2019

2.2 Evaluación del estado actual del motor turbo cargado y rehabilitación de la misma

2.2.1 Análisis del estado del Motor turbo cargado

El motor de combustión interna turbo cargado a gasolina, perteneciente a la Escuela de Ingeniería Automotriz se utilizó para la caracterización y análisis de espectros de vibración, el mismo que servirá como material didáctico para el estudio de vibraciones en un M.C.I. la cual será incorporado en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Automotriz, se planteó la necesidad de estudiar y analizar los espectros de vibración en banco de pruebas motor turbo cargado, como trabajo de investigación y análisis, antepuesto al trabajo de titulación, el cual es objeto de desarrollo, investigación, estudio e análisis de vibraciones.



Figura 2-2: Banco de Pruebas de motor turbo cargado

Fuente: Ruiz D, 2019

Luego de haber realizado la adquisición del motor turbo cargado, cumpliendo con todos los trámites correspondientes de gestión en la Escuela de Ingeniería Automotriz, seguidamente se realizó una inspección visual de todos los sistemas del banco de pruebas, concluyendo, que la mayoría de sistemas se encuentra en mal estado, y algunos elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos faltantes, a continuación, se detallan los elementos averiados y faltantes en los diferentes sistemas.

2.2.2 *Estado de sistema de sobrealimentación*

Al realizar la inspección previa de este sistema se encontró en las siguientes condiciones:

- Ausencia de depurador y conductos de admisión de aire.
- Falta de bases del sistema de sobrealimentación.
- Mal estado de turbocompresor.



Figura 3-2: Elementos faltantes 1

Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.3 *Estado de sistema de alimentación*

Al verificar el estado actual del sistema de alimentación se encontró en las siguientes condiciones:

- Irregular sujeción del riel de combustible.
- Filtro de combustible por remplazar.
- Pre-filtro de la bomba de combustible por remplazar.



Figura 4-2: Elementos faltantes 2
Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.4 *Estado del sistema de refrigeración*

En el presente sistema encontramos que está en uso agua pura, para el correcto enfriamiento del motor, y a su vez reducir el deterioro de elementos mecánicos en este sistema, se remplazara el agua por líquido refrigerante.



Figura 5-2: Radiador del motor
Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.5 *Estado del sistema de lubricación*

En este sistema se presenta únicamente por realizar el cambio respectivo de aceite y filtro correspondiente.



Figura 6-2: Sistema de lubricación
Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.6 *Estado del sistema de distribución o puesta a punto*

En el sistema de calado del motor, se verifico la sincronización del motor (puesta a punto), el mismo que se encuentra en estado de indemne.



Figura 7-2: Polea de distribución

Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.7 *Estado del sistema eléctrico y electrónico*

Al verificar este sistema se encontró la ausencia de muchos elementos eléctricos y electrónicos, y algunas de ellas averiadas:

- Ausencia de la ECU.
- Sensor CKP faltante.
- Sensor MAP faltante.
- Falta de socket del actuador IAC.
- Horómetro ausente.
- Arnés y conectores desperfecto.
- Cables de bujías en mal estado.
- Ausencia del acumulador (batería).
- Motor de arranque en mal estado.
- Alternador faltante.
- Cableado de diferentes sistemas en mal estado.



Figura 8-2: Tablero electrónico de control

Fuente: Ruiz D, 2019

2.2.8 *Estado del tablero de control*

El tablero de control se encuentra en pésimas condiciones, ya que está rota en su totalidad.



Figura 9-2: Tablero de control

Fuente: Ruiz D, 2019

2.3 **Implementación de elementos faltantes en motor turbo cargado**

El motor de combustión interna turbo cargado es necesario rehabilitar, debido a que se encuentra no operativo, al adquirir el banco de pruebas, se ha tenido en cuenta que es necesario añadir ciertos componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos, manera que se alcance a una etapa funcional del M.C.I.

2.3.1 *Sensor CKP*

Es un captador magnético encargado de enviar señales a la centralita electrónica informándole la posición del cigüeñal con relación al punto muerto superior (PMS) del primer cilindro, de este modo controlar el encendido y el punto de inyección, para el presente proyecto se utiliza un sensor inductivo debido a que el banco de pruebas cuenta con sistema de inyección de Corsa Wind.



Figura 10-2: Sensor inductivo CKP

Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.2 *Sensor MAP*

Controla la entrega de combustible hacia el interior de los cilindros del motor, tomando en cuenta el estado de carga y la posición del acelerador. Es un sensor que mide la variación de presión o vacío en el múltiple de admisión, actuando de acuerdo al valor de vacío puede entregar mayor o menor voltaje a la ECU, el mismo que calcula y suministra la cantidad de combustible necesaria a través de los inyectores.

Para el banco de pruebas es necesario implementar un sensor MAP de altas prestaciones debido a que cuenta con turbo alimentado, para ello se utilizó un sensor adecuado para motores sobrealimentados el mismo que ya viene incorporado en la MEGA SQUIRT III.

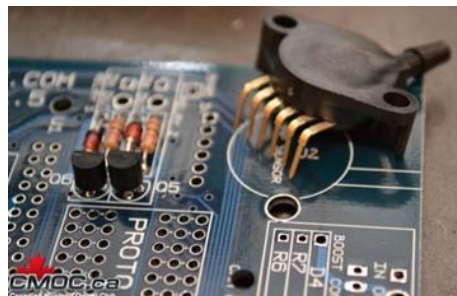


Figura 11-2: Sensor MAP

Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.3 *Filtro y conducto de entrada de aire*

Filtro de aire es un elemento que se encomendará de absorber las impurezas presentes en el medio ambiente al ser aspirado por el motor. Consta de capas tejidas unidas entre sí.

Se implementó un filtro de aire cónico deportivo, debido a sus mejores prestaciones, ya que admite el paso de un flujo de aire semejante en todo su contorno.



Figura 12-2: Filtro de aire
Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.4 *Batería*

Es un aparato electromagnético capaz de acumular energía eléctrica y suministrar la corriente eléctrica. Recoge constante carga del alternador.

Tabla 1-2: Características de la batería seleccionada

Marca	BOSCH
Modelo	S3 NS 60 GPF
Voltaje (V)	12
Amperaje (Ah)	60
Capacidad de Arranque (A) (27 °C)	570
Capacidad de Arranque (A) (0 °C)	420
Potencia de Arranque en Frio (A) (-18 °C)	450
Capacidad de Reserva (min.)	80
Medidas (mm)	232x185x290

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019



Figura 13-2: Batería seleccionada
Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.5 *Alternador*

Es un dispositivo eléctrico, que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, el mismo que genera corriente eléctrica mediante campos magnéticos.



Figura 14-2: Alternador
Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.6 ECU

Es una unidad de control electrónico del motor que es responsable de supervisar y administrar todos los aspectos del funcionamiento del motor mediante la constante comunicación con los varios sensores y actuadores.

Para el mejor desempeño de motor se implementó un Mega Squirt III, debido a que es de muy altas prestaciones, programable y adecuados para motores sobrealimentados, el mismo que permite ajustar los parámetros del MCI.



Figura 15-2: ECU MegaSquirt III
Fuente: Ruiz D, 2019

Para el correcto funcionamiento del motor turbo-cargado a gasolina se realizó una nueva instalación de todos los sistemas eléctricos y electrónicos, posteriormente se realizó ajustes de parámetros adecuados en la MegaSquirt III.



Figura 16-2: Placa MegaSquirt III
Fuente: Ruiz D, 2019

2.3.7 *Horómetro*

Es un dispositivo generalmente eléctrico que registra el número de horas de trabajo o funcionamiento en que un motor o un equipo, ha funcionado desde la última vez que se ha inicializado el dispositivo. Estos dispositivos son utilizados para controlar las intervenciones de mantenimiento preventivo de los equipos.

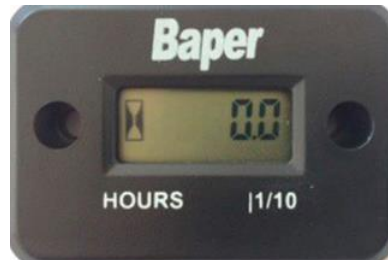


Figura 17-2: Horómetro
Fuente: Ruiz D, 2019

CAPÍTULO III

3 MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Estudio y análisis de los espectros característicos del M.C.I. turbo carado

Los espectros patrones y espectros característicos de fallas en M.C.I. fue obtenido por medio de analizador de vibraciones (VIBROCHECK), se desarrolló en el taller mecánico de Ingeniería Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.




Figura 1-3: Mediciones con el analizador de vibraciones

Fuente: Ruiz D, 2019

3.1.1 Características del M.C.I. turbo cargado

Las características más predominantes de la unidad experimental utilizada para generar espectros representativos del resultado de experimento o pruebas de muestreo, se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 1-3: Características del M.C.I. turbo cargado

Marca	Chevrolet	Figura
Modelo	Swift	
Orden de encendido	1-3-4-2	
Tipo de combustible	Gasolina	
Posición de cilindros	4 cilindros en línea.	
Distribución	OHC de 16 válvulas.	
Carrera	90,00 mm	
Diámetro	75,00 mm	
Cilindrada	1 590 cm ³	
Relación de compresión.	9,5:1	
Potencia hp/rpm máx. Estándar	92/6 000	
Potencia hp/rpm máx. con LE3-Jetronic	106/6 000	
Potencia hp/rpm máx. con Megaquirt III V3.0	110/6 000	
Torque Nm/rpm máx. Estándar	133/3 750	
Torque Nm/rpm máx. con LE3-Jetronic	148/4 000	
Torque Nm/rpm máx. con MegaSquirt III V3.0	180/3 500	

Fuente: (Tolerance Data, 2009)

Realizado por: Ruiz D, 2019

El banco de estudio con características mencionadas, originalmente un motor con sistema de alimentación de combustible a carburación, posterior fue modificada con sistema de inyección electrónica (LE3-Jetronic), el incremento de los sensores y actuadores en la gestión electrónica nos ayuda a simular averías con facilidad, y obtener datos característicos de vibraciones idóneos. Finalmente, el M.C.I. fue modificada mecánicamente con la implementación de turbo compresor, para compensar la relación estequiométrica, se incorporó una nueva centralita electrónica MegaSquirt III, debido a que es muy versátil, dinámico y programable, lo que admite concordar los parámetros del motor; como su perfeccionado en diferentes sistemas, tales como pulso de inyección y sistema de encendido.

3.1.2 Norma ISO 10816 vibración mecánica (evaluación de la vibración de equipos en base a su medición en partes no rotatorias)

La norma indicada establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las

máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. (Rodesprex, 1996).

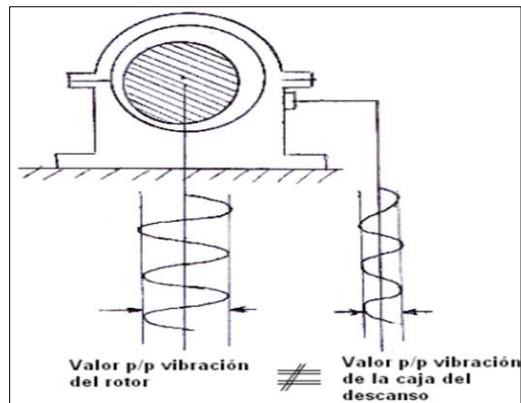


Figura 2-3: Máquina montada en descanso hidrodinámico o cojinetes

Fuente: (Udec.cl, 2017)

3.1.3 Ubicación de los acelerómetros

En la norma 10816-6 se especifica la ubicación de los acelerómetros para la medición a la cual es aplicable la norma. (Rodesprex, 1996).

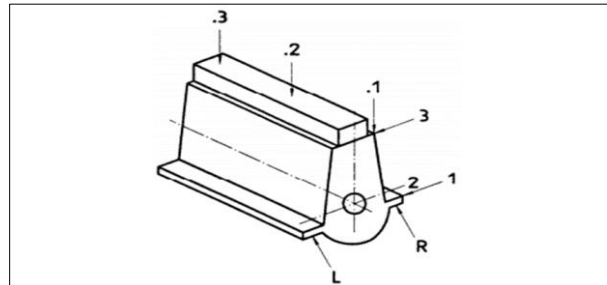


Figura 3-3: Direcciones y puntos para la ubicación de acelerómetros en motor en línea

Fuente: (Rodesprex, 1996)

3.1.4 Lados de la medición

- **L** lado izquierdo cuando se enfrentan al borde de acoplamiento.
- **R** lado derecho cuando se enfrentan al borde de acoplamiento.

3.1.4.1 Niveles de medición

1. Montaje al final de la máquina.
2. Nivel del cigüeñal.

3. Borde superior del marco.

3.1.4.2 *Puntos de medición relacionados con la longitud de la máquina*

1. Extremo de acoplamiento.
2. Mitad de la máquina.
3. Extremo libre de la máquina.

3.2 **Análisis de vibración en M.C.I. turbo-cargado**

Para la adquisición de la señal de vibración y posterior análisis de los espectros, se debe considerar que todos los motores emiten una cierta vibración de manera natural, estas vibraciones varían conforme a desgaste o averías que van presentado en los diferentes sistemas que está compuesto un M.C.I.

3.2.1 *Direcciones y puntos para la ubicación del sensor de Vibracheck*

En motor de combustión interna estudiada, fue indispensable buscar los puntos más adecuados para la instalación del sensor (acelerómetro), bajo norma ISO 10816 mencionado en el apartado 3.1.

3.2.2 *Ubicación de puntos de referencia*

Los puntos de referencias son pequeños cubos de aproximadamente 2cm x 2cm x 3cm, que van pegadas con la ayuda de epoxi, en algunos puntos a analizar, de culata y block, debido a que el sensor acelerómetro se acopla con facilidad en elementos metálicos que en aluminio.



Figura 4-3: Puntos para la ubicación de acelerómetro

Fuente: Ruiz D, 2019

Se ubicó dos puntos de referencia a la altura de eje de levas y dos puntos a la altura del cigüeñal.

3.2.3 Configuración de datos para MAINtraq

Para realizar la adquisición de datos por medio de software MAINtraq se debe de tener instala en la computadora y posterior a ello realizar la configuración de los puntos a analizar los espectros de vibraciones, a continúan se detallan los pasos de configuración del software.

- Paso inicial es abrir el programa, y crear carpeta matriz como se indica en la figura 5-3.

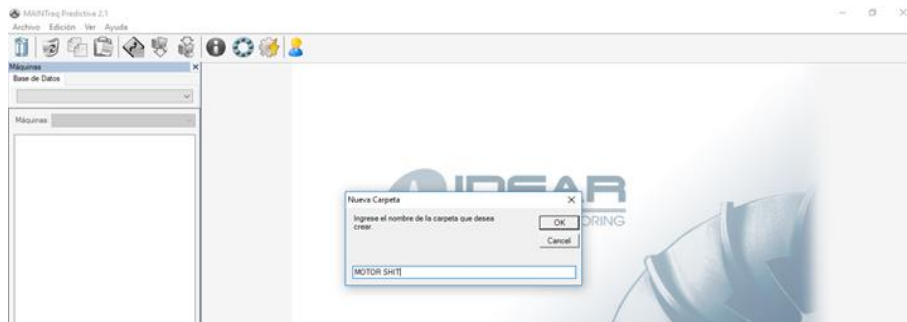


Figura 5-3: Inicio de programa MAINtraq

Fuente: Ruiz D, 2019

- Posterior a ello se ingresa los datos característicos del motor de combustión interna a ser analizados los espectros de vibración.

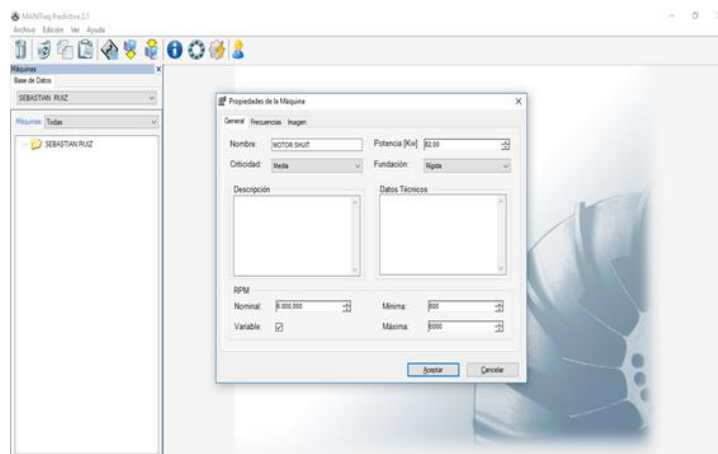


Figura 6-3: Datos característicos del motor en MAINtraq

Fuente: Ruiz D, 2019

- Seguidamente se asigna los puntos de análisis, los mismos que se encuentran instaladas en diferentes partes del motor.
- Luego de asignación de los puntos a analizar se procede con la configuración de variables como: frecuencia máxima, línea espectral y promedios.

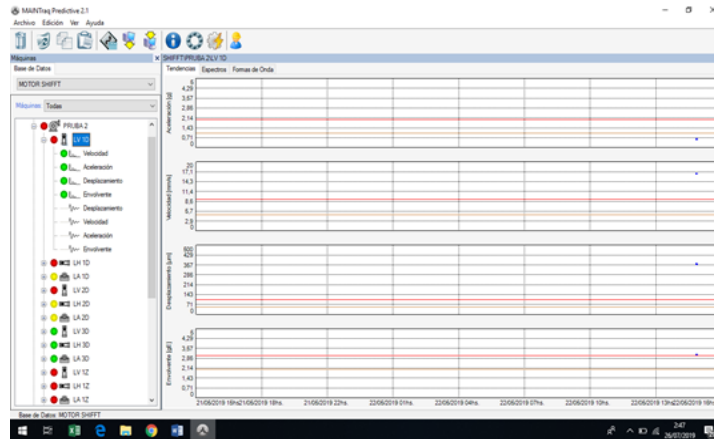


Figura 7-3: Configuración de variables

Fuente: Ruiz D, 2019

- Finalmente, las configuraciones realizadas en el software MAINtraq, se trasfiere hacia el equipo Vibracheck por medio de cable serial.



Figura 8-3: Carga de configuración a Vibracheck

Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.4 Denominación de códigos para el análisis de vibración en motor turbo – cargado

La codificación garantiza los tratamientos que se va a realizar en cada punto de referencia seleccionada, para las pruebas a realizar se denomina una codificación alfa numérica que brinda una base para la recolección de datos confiables.

Tabla 2-3: Denominación de código para el análisis de vibración

Ejemplo de códigos: LV1D	
LH2Z L = A, V/H/A = B, 1 = C, D/Z = D	
LA1D	
Componente	Denominación
A	Lado
B	Vertical, Horizontal, Axial
C	Punto de referencia 1 o 2
D	Derecho/izquierdo

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

Los espectros serán analizados en cada uno de los puntos de referencian que se detallan a continuación.

Tabla 3-3: Códigos para el análisis de vibración

Código de los tratamientos	
Código	Denominación
LV1D	Lado vertical derecho del punto 1
LH1D	Lado horizontal derecho del punto 1
LA1D	Lado axial derecho del punto 1
LV2D	Lado vertical derecho del punto 2
LH2D	Lado horizontal derecho del punto 2
LA2D	Lado axial derecho del punto 2
LV1Z	Lado vertical izquierdo del punto 1
LH1Z	Lado horizontal izquierdo del punto 1
LA1Z	Lado axial izquierdo del punto 1
LV2Z	Lado vertical izquierdo del punto 2
LH2Z	Lado horizontal izquierdo del punto 2
LA2Z	Lado axial izquierdo del punto 2

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

Para la adquisición de datos de vibración en cada punto de referencian se instaló el sensor acelerómetro para cada una de las coordenadas X(horizontal), Y(vertical) y Z(axial) cómo se indica en la figura.



Figura 9-3: Ubicación del acelerómetro en Z

Fuente: Ruiz D, 2019



Figura 10-3: Ubicación del acelerómetro en X

Fuente: Ruiz D, 2019



Figura 11-3: Ubicación del acelerómetro en Y

Fuente: Ruiz D, 2019

Para el análisis de espectros, se optó realizar estudios de los espectros sustraídas correspondiente a la prueba LA1D.

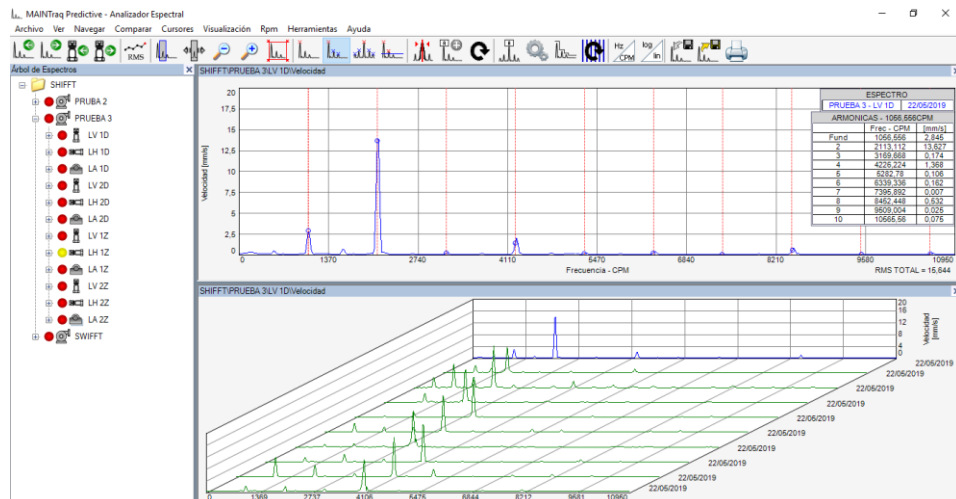


Figura 12-3: Puntos de análisis de espectros

Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.5 Espectros característicos del funcionamiento indemne del motor turbo cargado

Para obtener el espectro patrón ideal, y a la vez garantizar la asignación de parámetros adecuados a la MS3, se realizó la parametrización y programación de la MegaSquirt III, considerando las emisiones de gases de escape entre el rango permitido por Corpaire.

Tabla 4-3: Emisiones permito por Corpaire

	CARBURACIÓN	INYECCIÓN SIN catalizar	INYECCIÓN antes del catalizador	INYECCIÓN después del catalizador
CO	Entre 1% y 2%	1 +/- 0.5%	Entre 0.4% y 0.8%	Menor de 0.2%
CO2	Mayor que 11%	Mayor que 12%	Mayor que 13%	Mayor que 13.5%
HC	Menor de 400 ppm	Menor que 300 ppm	Menor de 250 ppm	Menor de 100 ppm
O2	Menor de 3.5%	Menor de 2.5%	Menor de 1.5%	Menor de 0.2%
λ			Entre 0.99 y 1.02	Entre 0.99 y 1.01
RPM			Ralentí	2000 RPM

Fuente: (XUNTA DE GALICIA, 2019)

Realizado por: Ruiz D, 2019

Los espectros característicos obtenido a diferentes rpm, en funcionamiento indemne de todos los elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos. Nos sirve como datos comparativos, con respecto a espectros simulado ciertas averías en diferentes sistemas que está compuesto un M.C.I.

3.2.5.1 Análisis de emisiones de gases de escape del M.C.I

El análisis de emisiones de gases de escape se realizó en el laboratorio de escuela de ingeniería automotriz de la escuela superior politécnica de Chimborazo.



Figura 13-3: Analizador de emisiones

Fuente: Ruiz D, 2019



Figura 14-3: Instalación de sonda
Fuente: Ruiz D, 2019

Los resultados obtenidos de las pruebas de análisis de gases se detallan a continuación.



Figura 15-3: Valores de misiones emitidos por un motor turbo cargado
Fuente: Ruiz D, 2019

En la figura 15-3. Se puede observar que el motor turbo-cargado cumple con la norma establecida por el medio ambiente, y a la vez garantiza que el banco de pruebas repotenciado está en óptimas condiciones de funcionamiento. La variación mínima de valores de emisiones es debido a que el motor es modificado con sistema de sobrealimentación a un motor atmosférico de carburación.

3.2.5.2 Consideración de frecuencia fundamental para el análisis de vibración del M.C.I

Para establecer el intervalo de frecuencia adecuados para el análisis de vibración, se consideró que las frecuencias excitadas por M.C.I. recíprocamente son encontradas en un rango de 2 a 300 Hz, para el análisis de los espectros patrones se considera la frecuencia fundamental del espectro (X), la cual representa una vuelta del cigüeñal y está relacionado con el régimen del giro del motor, también se considera a los submúltiplos y múltiplos de la frecuencia fundamental, los mismos que se encuentran relacionados con la combustión del motor.

- La frecuencia fundamental (X) está asociada con el giro del cigüeñal, provocado por la combustión del motor.
- La frecuencia (X/2) es correspondiente al eje levas, debido a que por cada dos vueltas del cigüeñal el árbol de levas gira una vuelta.
- Al girar una vuelta el cigüeñal dos pistones se encuentran en el PMS por lo que la frecuencia asociada sería 2X.
- Durante las cuatro etapas de funcionamiento del ciclo Otto, cuatro levas accionan a las válvulas, la frecuencia asociada sería 4X.
- Cuando él un pistón está en combustión las otras tres no lo están y generan vibración, cada pistón recorre dos carreras la frecuencia asociada sería 6X.
- Al cumplirse un ciclo de funcionamiento se mueven ocho válvulas correspondientes a los pistones que no se encuentran en combustión, la frecuencia asociada sería 8X.
- En la tabla siguiente se detallan diferentes frecuencias con los elementos relacionados del M.C.I.

Tabla 5-3: Frecuencias fundamentales

FRECUENCIA	ELEMENTOS RELACIONADOS
X/2	Árbol de levas
X	Cigüeñal
2X	Combustión
4X	Levas
6X	Pistones que no están combustión
8X	Válvulas

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

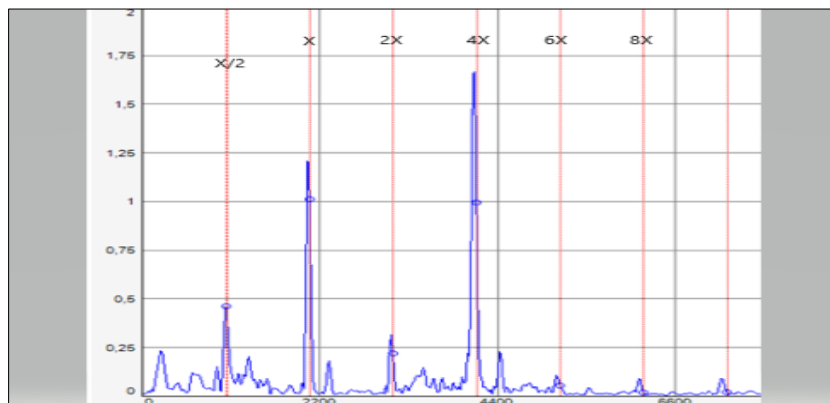


Gráfico 1-3: Frecuencias fundamentales para el análisis de vibración

Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.5.3 Espectro característico a ralentí. (1000 rpm)

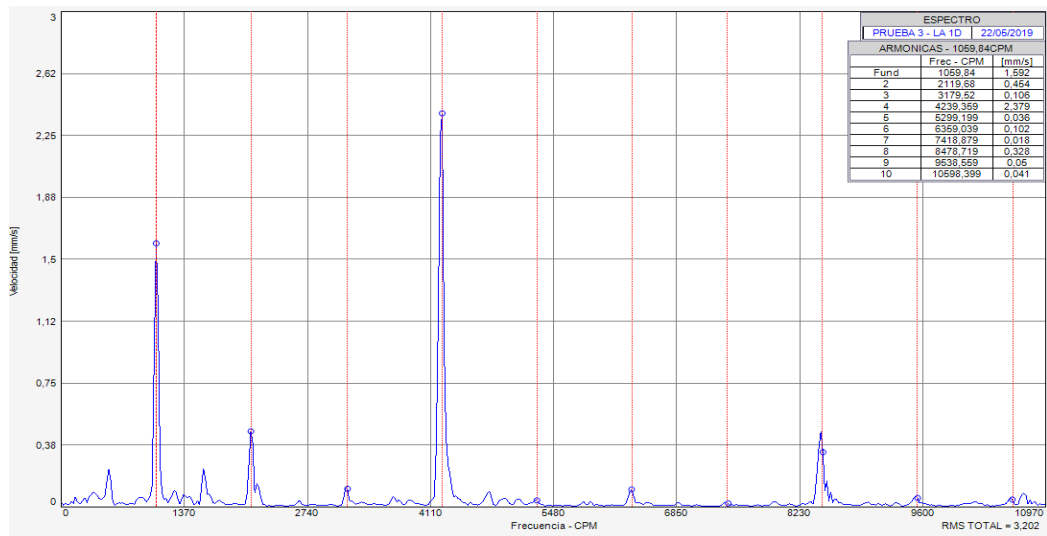


Gráfico 2-3: Espectro característico a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.5.4 Espectro característico a 1500 RPM

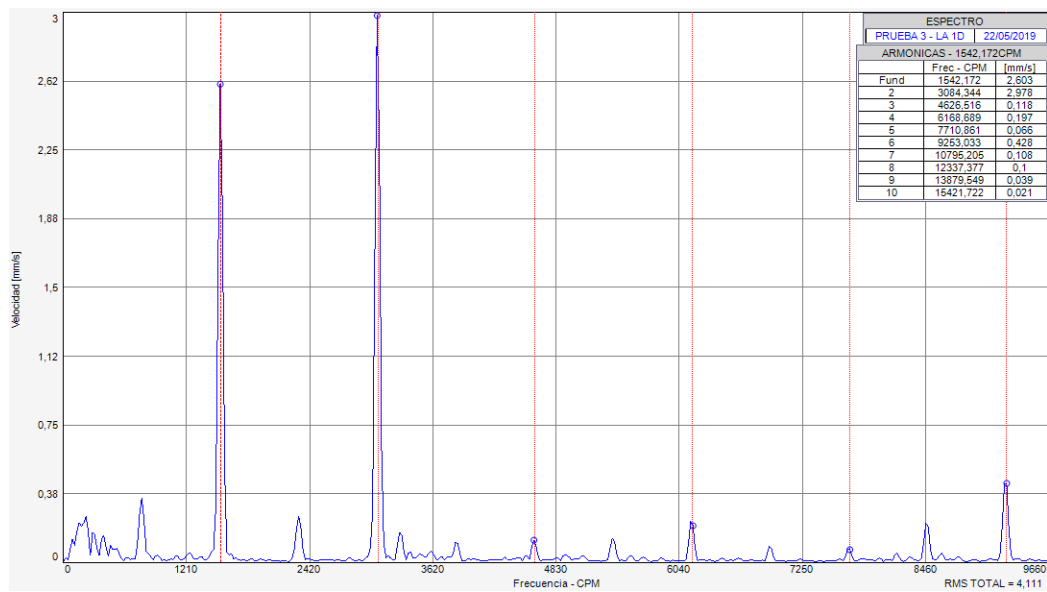


Gráfico 3-3: Espectro característico a 1500 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.5.5 Espectro característico a 3000 RPM

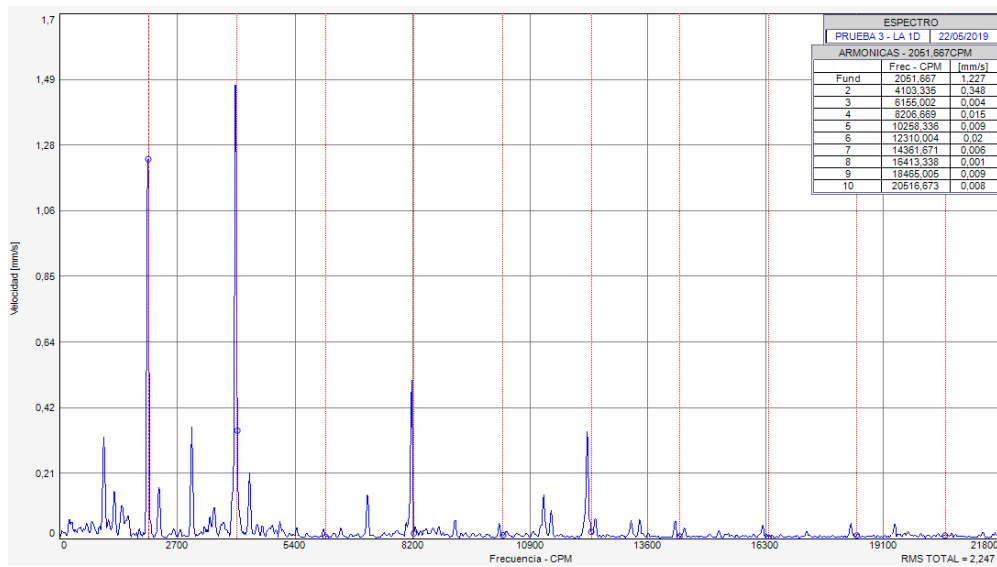


Gráfico 4-3: Espectro característico a 3000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.6 Espectros característicos del funcionamiento del motor turbo cargado simulando ciertas averías electrónicas

Para la obtención de espectros de vibración con fallas correspondiente en cada variación de factores se realizó a 1000, 1500 y 2000 RPM. Efectuando el mismo proceso desarrollado para obtener espectros patrones de vibraciones.

La implementación de gestión electrónica y computadora programable nos facilita la simulación de ciertas fallas electrónicas, las averías simuladas para la experimentación se basan en la parametrización y programación de la MegaSquirt III.



Figura 16-3: Espectro característico a 3000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

A continuación, se detallan ciertas fallas simuladas en motor turbo-cargado y se presenta los respectivos espectros obtenidos con cada una de las averías.

3.2.6.1 *Falla de combustión en un cilindro*

Es una de las fallas más comunes en todo motor de combustión interna, que puede ser ocasionadas por averías eléctricas, electrónicas y mecánicas, Uno de los mayores signos de que un cilindro está fallando es la pérdida de potencia junto con vibraciones extrañas. Dado que la combustión producida en la cámara de combustión alimenta el motor, Para simular la falla de combustión se realizó el corte de pulso al inyector. A continuación, se muestran los espectros con falla de combustión a diferentes revoluciones del motor.

- *Espectro característico con falla de combustión a ralentí.*

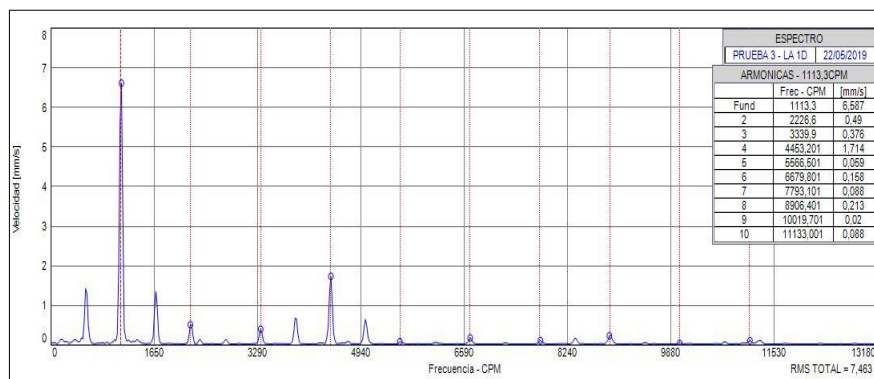


Gráfico 5-3: Espectro con falla de combustión a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla de combustión a 1500 rpm.*

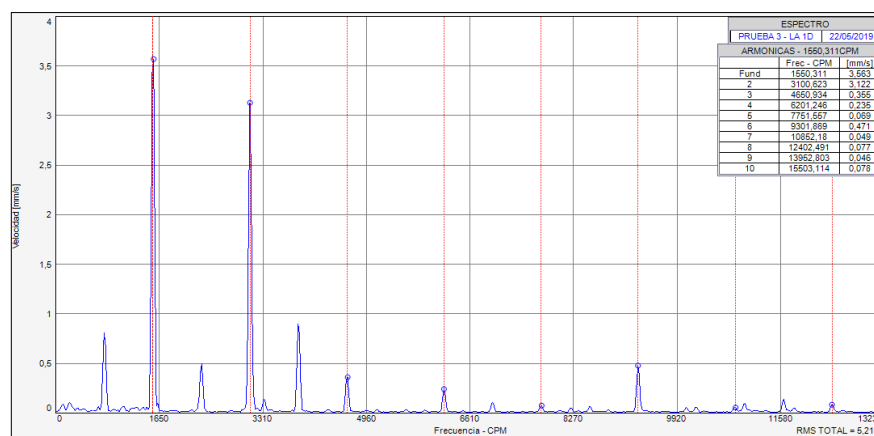


Gráfico 6-3: Espectro con falla de combustión a 1500 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla de combustión a 2000 rpm.*

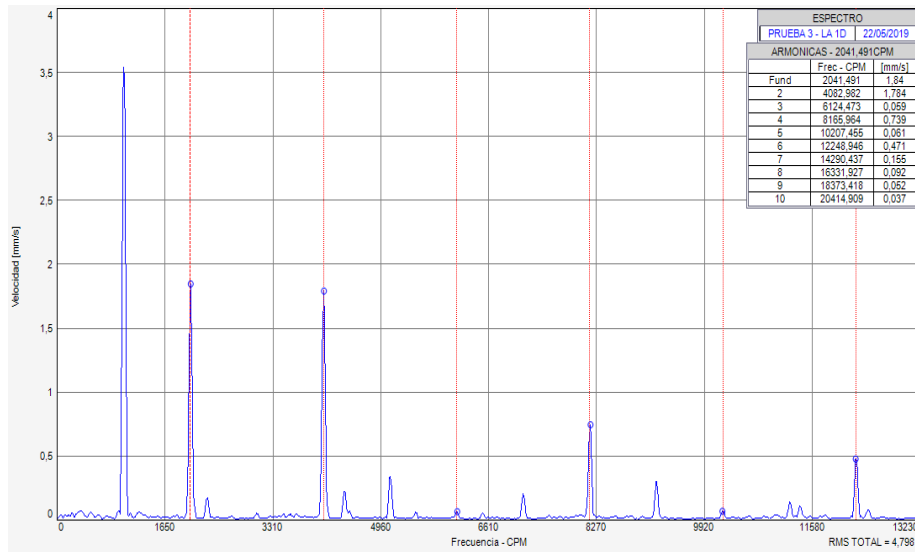


Gráfico 7-3: Espectro con falla de combustión a 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.6.2 *Falla de avance al encendido modificado desde la MegaSquirt III*

Dicha falla puede ser ocasionado por defecto de sensor de encendido, falla de ECU, mala sincronización de puesta a punto y defectos en la rueda fónica de encendido, provocando una pérdida de potencia en el motor. para obtener los espectros con falla al avance de encendido se modificó el valor de ángulo de avance desde la MegaSquirt 3.

Tipo de sistema de Rueda: Rueda fonica con mas de 1 diente faltante y señal de Fase
 Dientes de la rueda de desencadenador(dientes): 60
 Dientes perdidos(dientes): 2
 Ángulo de diente # 1(DEG BTDC): 102.0
 Velocidad de la rueda principal: Rueda manivela
 En segundo gatillo activos en: Flanco descendente
 Nivel Para la Fase 1: Bajo
 Al comprobar diente #: 1
 Y cada rotación del ..: CAM

Gráfico 8-3: Ángulo de avance
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla al avance de encendido a ralentí.*

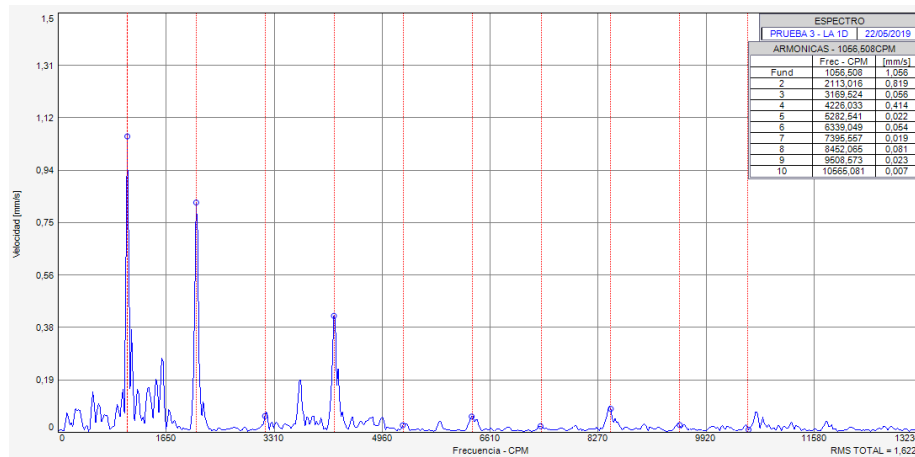


Gráfico 9-3: Espectro con falla de avance al encendido a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla al avance de encendido a 1500 rpm.*

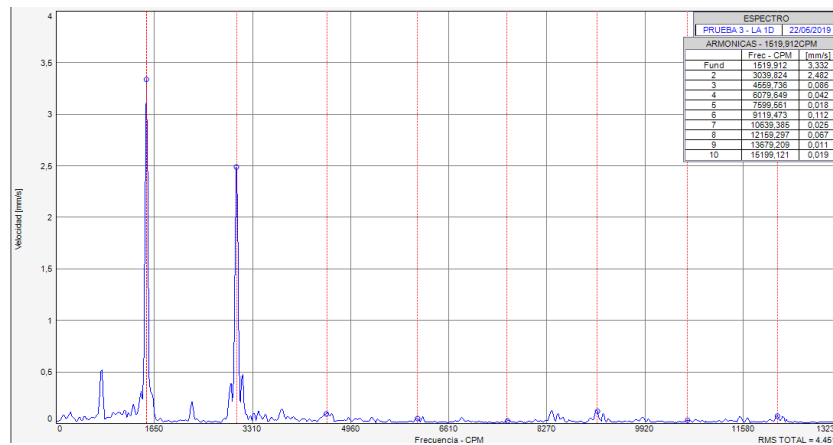


Gráfico 10-3: Espectro con falla de avance al encendido a 1500 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla al avance de encendido a 2000 rpm.*

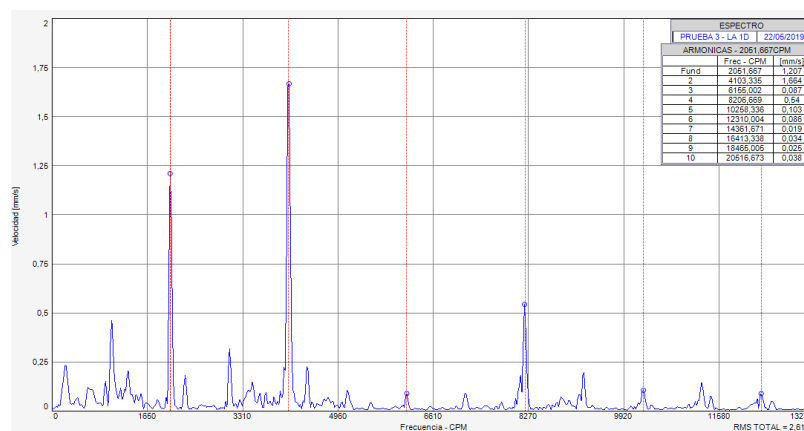


Gráfico 11-3: Espectro con falla de avance al encendido a 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.6.3 *Falla de relación estequiometría modificado desde la MS3:*

Las fallas que se generan en relaciones estequiométricas puede ser ocasionado por defecto de bujías de encendido, bomba de combustible, filtros de combustibles, etc. Al presentarse este tipo de falla se genera una pérdida de potencia en el motor. para obtener los espectros con falla de relación estequiométrica se modificó la cartografía de inyección desde la MegaSquirt 3.

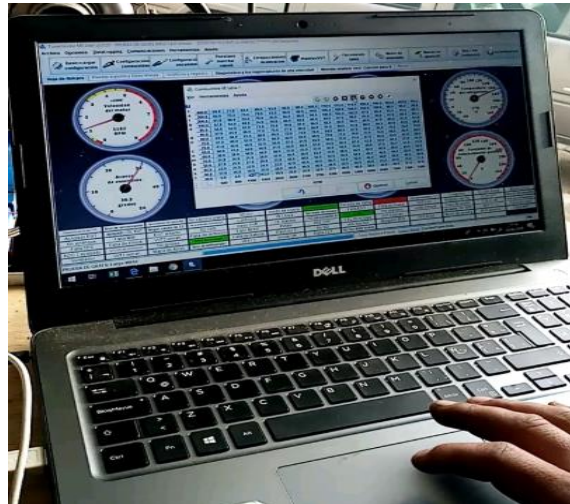


Figura 17-3: Modificación de mapeo de inyección

Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro característico con falla de relación estequiométrica a ralentí.*

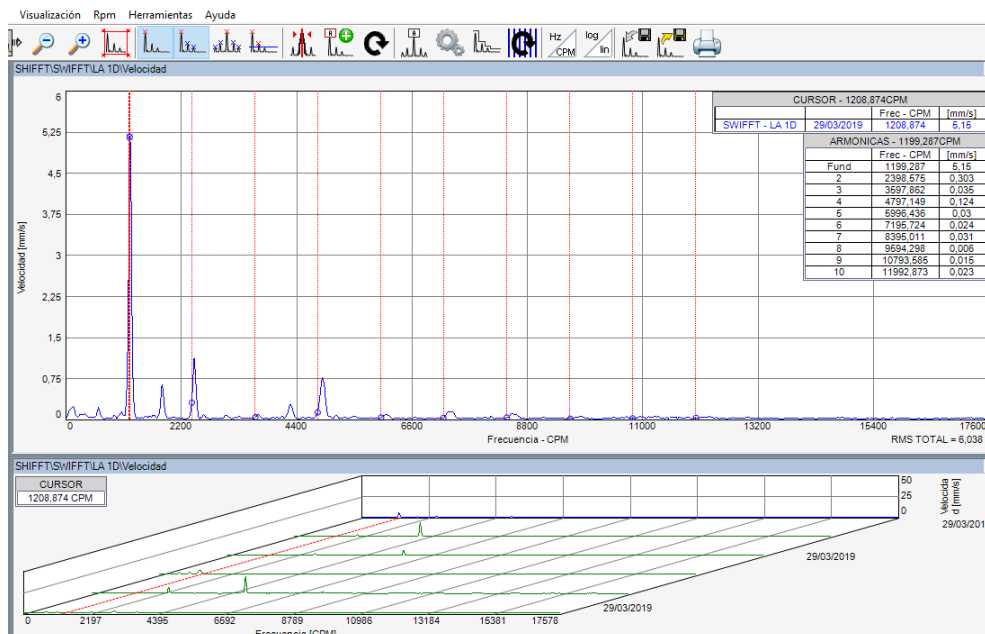


Gráfico 12-3: Espectro con falla de relación estequiométrica a ralentí

Fuente: Ruiz D, 2019

3.2.6.4 Espectro característico con falla de relación estequiométrica a 1500 rpm

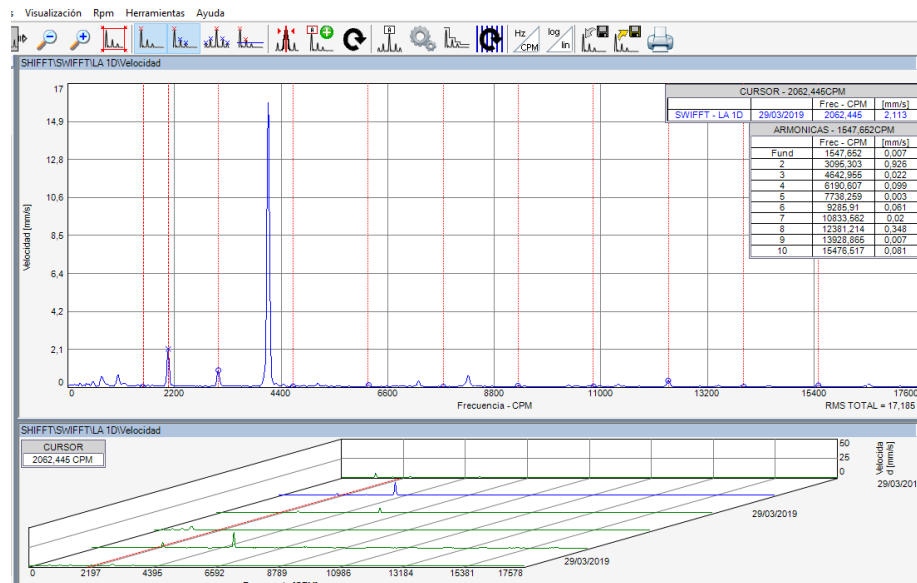


Gráfico 13-3: Espectro con falla de relación estequiométrica a 1500 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

- *Espectro con falla de relación estequiométrica a 2000 rpm.*

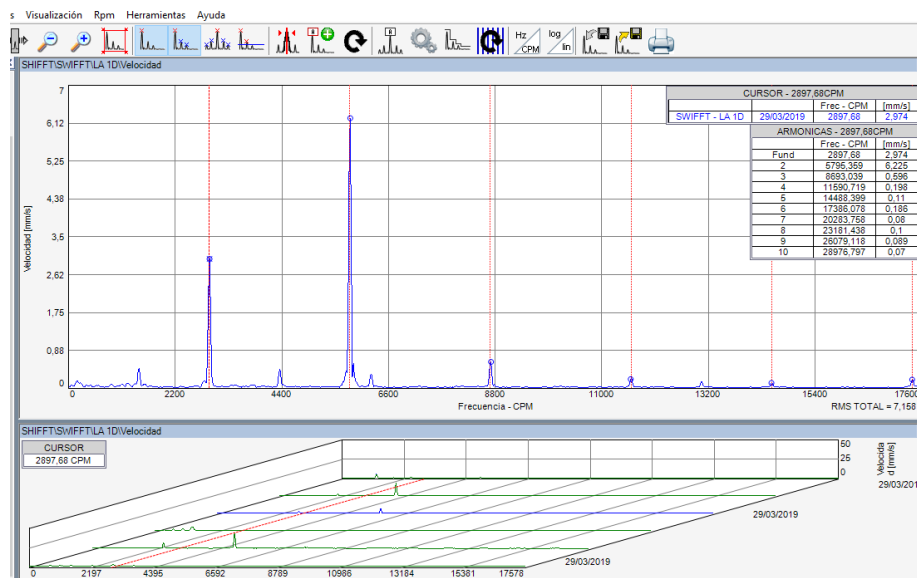


Gráfico 14-3: Espectro con falla de relación estequiométrica 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

3.3 Análisis de resultados de las pruebas de vibración en M.C.I. turbo-cargado

Las diferentes imágenes espectrales obtenidos en las pruebas anteriores fueron grabados en base de datos de MAINtracq.

3.3.1 Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a ralentí

Para obtener los resultados de los espectros, se concentró en los puntos picos de cada espectro.

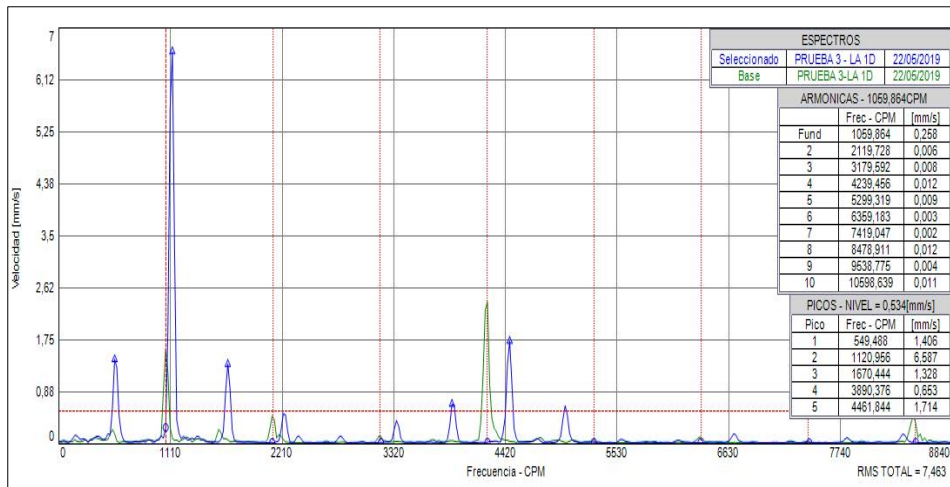


Gráfico 15-3: Análisis del patrón con espectro de falla de combustión a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

En la figura 32-3, se puede apreciar el espectro patrón a ralentí de color verde, dicho espectro indica el funcionamiento indemne del motor turbo cargado, y espectro de color azul que pertenece a falla de combustión en un cilindro.

Con la falla de combustión en un cilindro se puede observar, presencia de desfase de armónicos con respecto a los armónicos de espectro patrón, también se puede observar cambio de amplitudes de los armónicos, por ejemplo, el cambio drástico que existe es el desfase del armónico 4x es de 4239 CPM, el mismo que indica las variaciones de rpm del funcionamiento indemne y con falla de combustión en el motor, se puede visualizar también los picos de espectro con falla son de mayor amplitud.

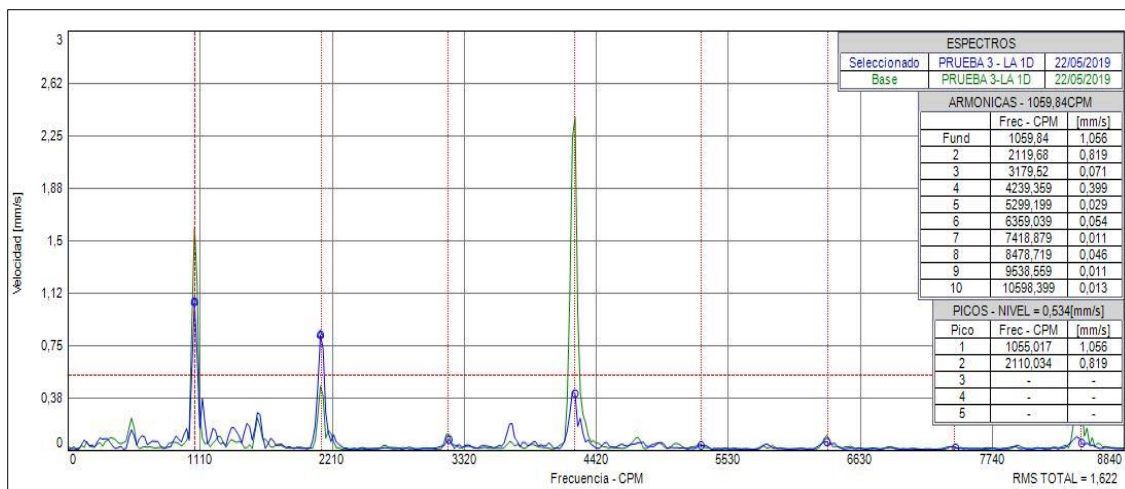


Gráfico 16-3: Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

Espectro de color verde pertenece a espectro patrón a ralentí indicando funcionamiento sin ninguna avería del motor, y espectro de color azul indica la falla al avance de encendido.

Con la presencia de desfase al ángulo de encendido, se puede observar un mínimo cambio en los armónicos del espectro con falla, el mismo que indica cambio de vibración en funcionamiento del motor, el cambio de amplitudes del armónico x es de 2119 CPM, que indica la inestabilidad de motor.

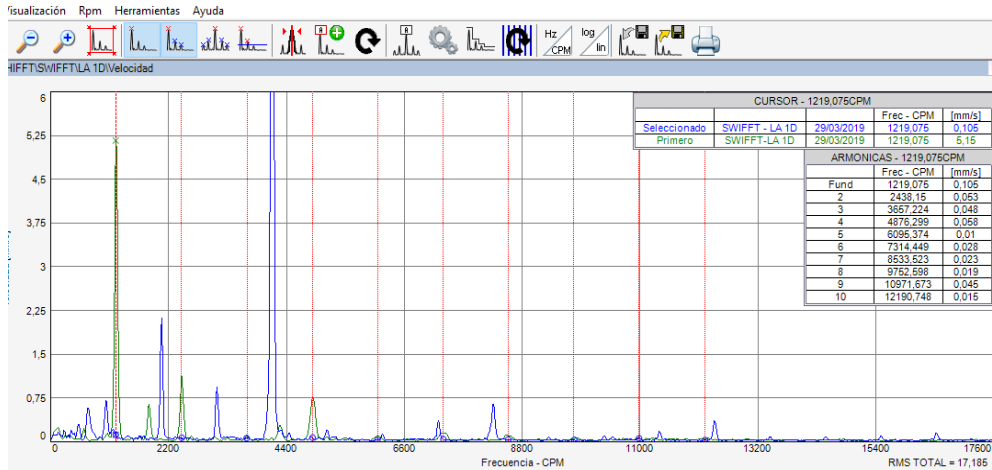


Gráfico 17-3: Análisis del patrón con espectro de falla de relación estequiométrica a ralentí

Fuente: Ruiz D, 2019

Espectro de color verde pertenece a espectro patrón a ralentí indicando funcionamiento sin ninguna avería del motor, y espectro de color azul indica la falla en relación estequiométrica.

Al modificar los parámetros de inyección, se pudo observar un cambio en los armónicos del espectro con falla, el mismo que indica cambio de vibración en funcionamiento del motor, el cambio de amplitudes del armónico 2X es de 4124 CPM, que indica la mezcla de aire/combustible inadecuada lo que conlleva a la inestabilidad de motor.

3.3.2 Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a 1500 rpm

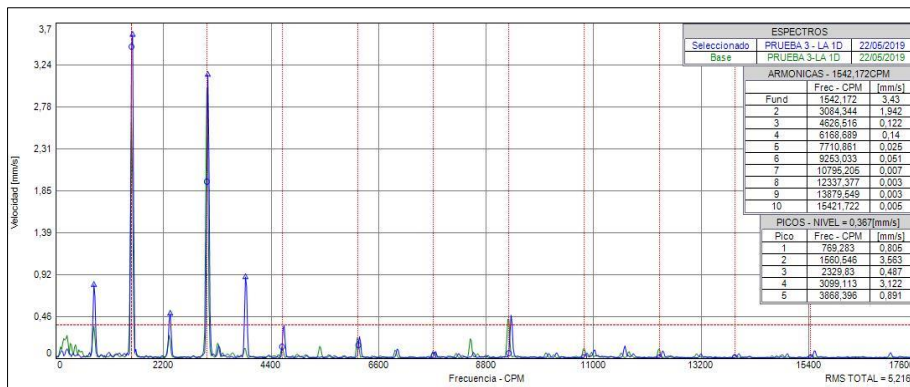


Gráfico 18-3: Análisis del patrón con espectro de falla de combustión a 1500 rpm

Fuente: Ruiz D, 2019

Espectro característico de funcionamiento indemne a 1500 rpm está representada de color verde, y espectro con falla de combustión de color azul.

En la figura 28 se puede observar los desfases de armónicos que indica cambio de rpm al dejar de trabajar un cilindro, el ascenso de amplitudes de los armónicos pertenecientes, a árbol de levas ($x/2$) y cigüeñal (x) indican el cambio de vibración natural a vibración con falla.

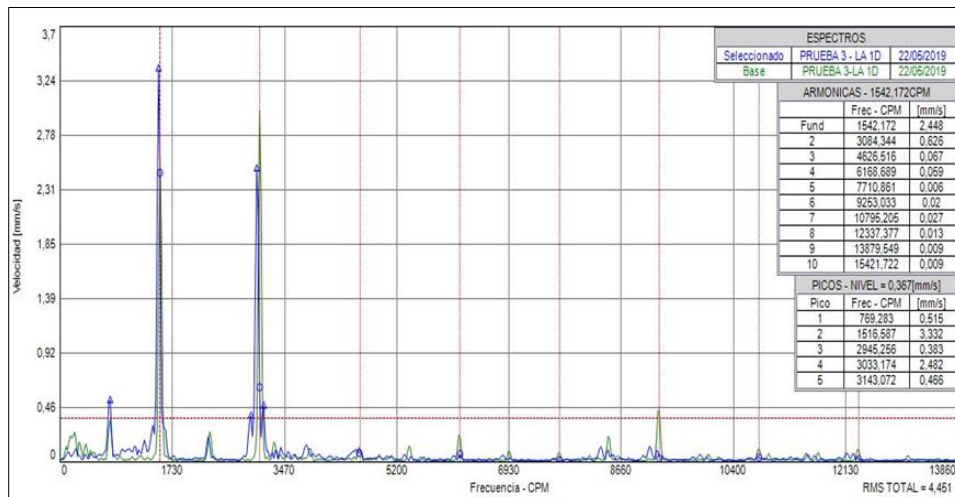


Gráfico 19-3: Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a 1500 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

Espectro de color verde pertenece a espectro patrón a 1500 rpm indicando funcionamiento sin ninguna falla del motor, y espectro de color azul indica la falla al avance de encendido.

Con la variación al ángulo de avance a 1500 rpm, se puede observar un desfase tolerable de armónicos, dicho desfase es proporcional al cambio de vibraciones del funcionamiento del motor, el cambio de amplitud del armónico $x/2$ perteneciente al árbol de levas indica que el mayor cambio de vibraciones se presenta en la culata del motor.

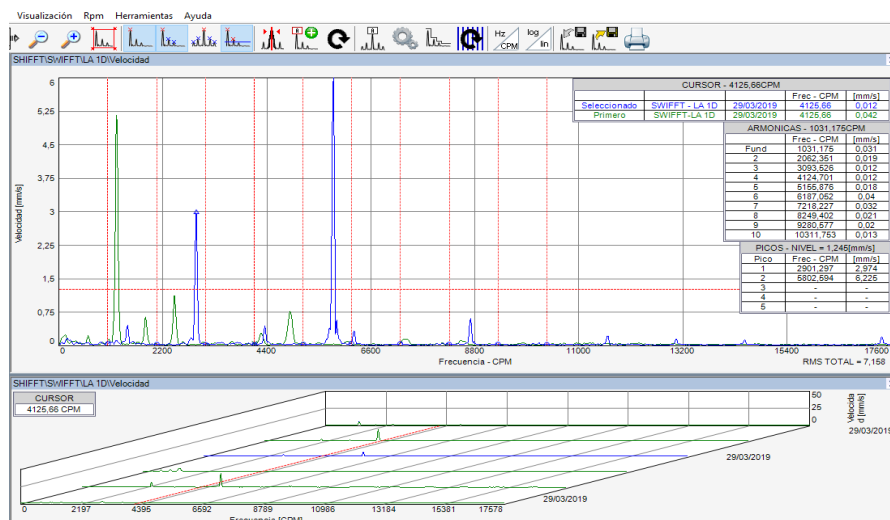


Gráfico 20-3: Análisis del patrón con espectro de falla con relación $\lambda=1$ a 1500 rpm

Fuente: Ruiz D, 2019

Espectro de color verde pertenece a espectro base a 1500 rpm indicando funcionamiento indemne del motor, y espectro de color azul indica la falla en relación estequiométrica.

Al modificar los parámetros de inyección a 1500 rpm, se puede observar presencia de desfase en los armónicos de picos altos, dicho desfase es proporcional al cambio de vibraciones del funcionamiento del motor, los cambios de amplitud del armónico inca mucha pulverización de combustible por los inyectores el cambio de vibraciones se presenta en todo el conjunto del motor.

3.3.3 Diferencia entre espectro patrón y espectros con falla a 2000 rpm

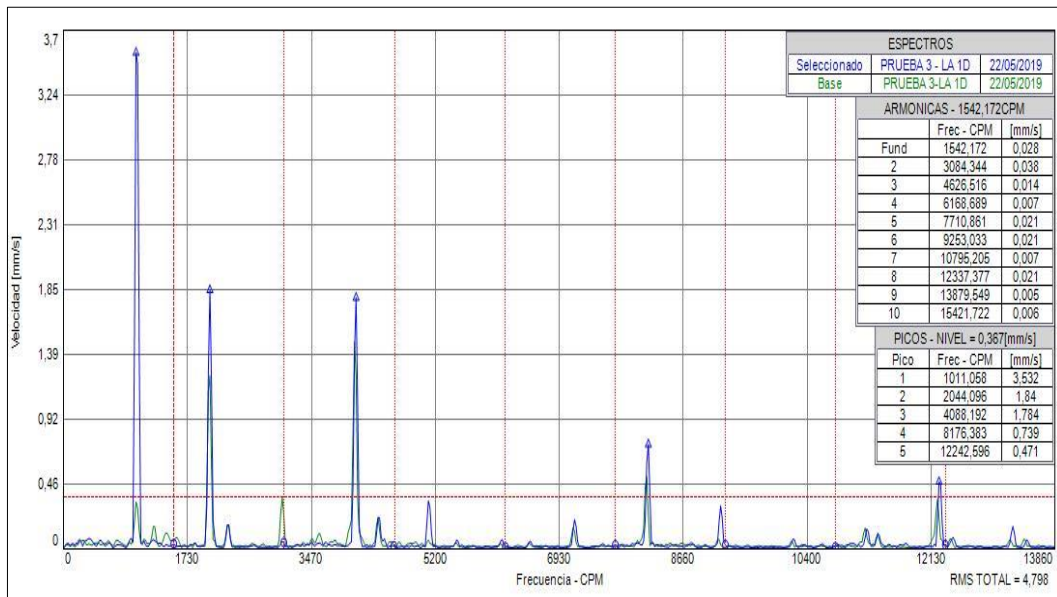


Gráfico 21-3: Análisis del patrón con espectro a falla de combustión a 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

Al igual que en los casos anteriores el espectro de color verde pertenece a espectro patrón sin ninguna anomalía en el funcionamiento del motor, y espectro de color azul indica la falla de combustión en cilindro.

El cambio brusco del pico de armónico a 1011 CPM, representa la ausencia de combustión en un cilindro, y la presencia de desfase de los armónicos nos indica la vibración generado por falta de combustión, el cambio de amplitudes de la mayoría de armónicos representa el nivel de vibración generada al provocar la falla en el motor.

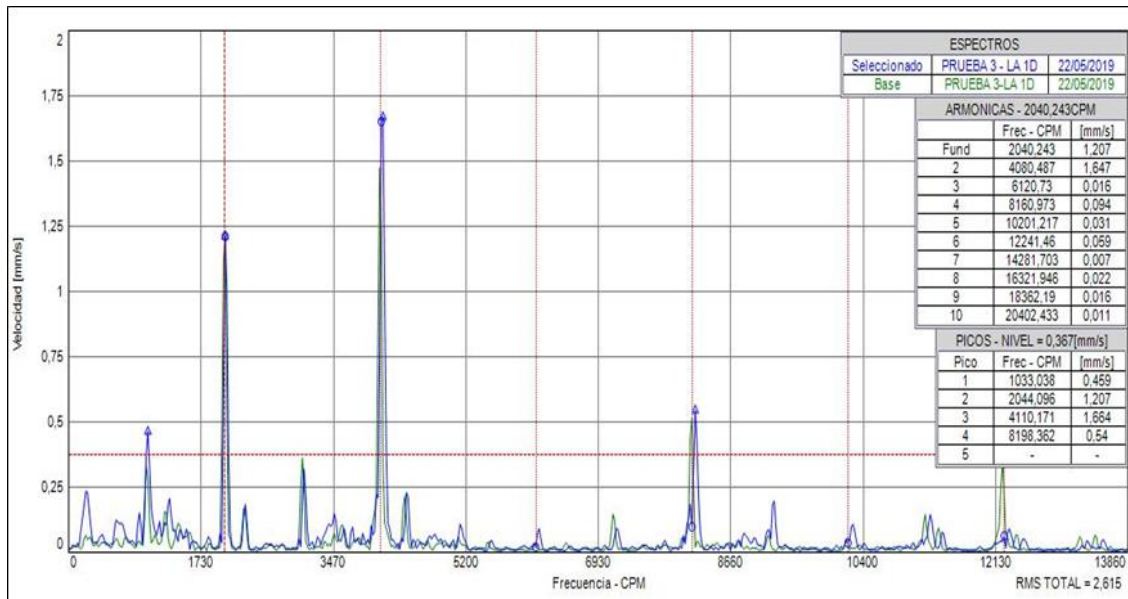


Gráfico 22-3: Análisis del patrón con espectro de falla al avance de encendido a 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

En la gráfica presente el espectro de tinta verde pertenece a espectro patrón a 2000 rpm, y el espectro de color azul indica la falla al avance de encendido.

En la figura 28 se visualiza un cambio mínimo de armónicos, a mayores revoluciones del motor el ángulo de avance se compensa al funcionamiento del mismo, por tal, que el desfase de los espectros se ven reducidas, el cambio de vibración se puede apreciar en los picos de los armónicos, por ejemplo, los picos de armónicos x/2, x, 4x incrementaron con respecto a los armónicos patrones.

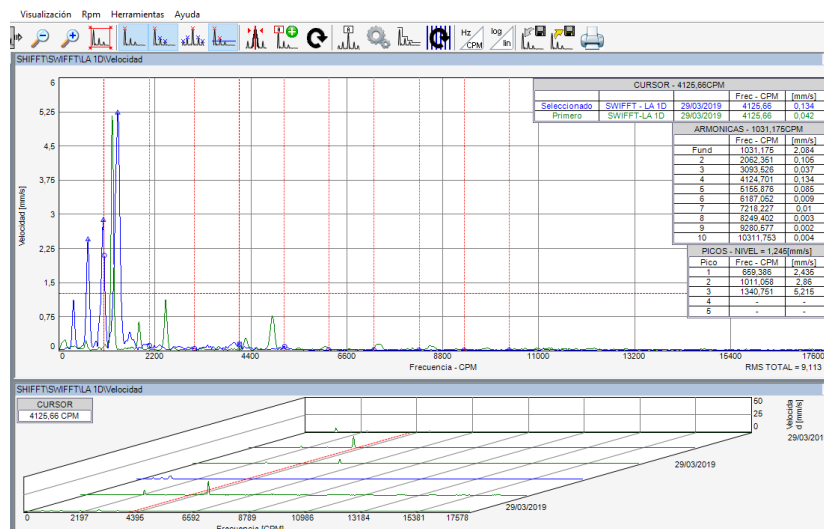


Gráfico 23-3: Análisis del patrón con espectro de falla a relación $\lambda=1$ a 2000 rpm
Fuente: Ruiz D, 2019

En la gráfica presente el espectro de color verde pertenece a espectro patrón a 2000 rpm, y el espectro de color azul indica la falla a relación estequiométrica.

Se puede visualizar un cambio brusco de armónicos, a mayores revoluciones del motor se puede apreciar el desfase de armónicos, por tal, que el desfase de los espectros indican la sobre pulverización de combustible, el cambio de vibración se puede apreciar en los picos de los armónicos, por ejemplo, los picos a frecuencia 659CPM, 1011CPM, 1340CPM se incrementaron con respecto al armónico base.

3.4 Estudio de espectros de vibración como mantenimiento predictivo

El análisis de vibración es una de las técnicas de mantenimiento predictivo, que ofrece mejores resultados al momento de diagnosticar cualquier tipo de máquinas rotativas.

Este tipo de técnica nos permite diagnosticar el estado del motor de combustión interna y sus componentes mientras este en funcionan normal, que consiste en el seguimiento periódica o continua de espectros variables, y su comparación con espectros patrones preestablecidos.

Una correcta interpretación de espectros de vibraciones generadas por fallas en M.C.I. permite minimizar las averías incontroladas y reducir los costes de las reparaciones.

3.4.1 Ventajas de análisis de vibración como mantenimiento predictivo

Un plan de mantenimiento predictivo (PMP) basada en análisis de vibración aplicada en motores de combustión interna tiene como ventajas lo siguiente:

- Se eliminan desmontajes innecesarios de diferentes componentes: debido a que el análisis de vibraciones se puede realizar con la máquina en funcionamiento.
- Se evitan daños destructivos: es posible anticipar daños catastróficos en equipos críticos que podrían provocar grandes paros de producción y daños al personal, ya que permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Reducción de tiempos de paro: mediante el análisis de vibraciones se pueden detectar desde el inicio las fallas de componentes en los motores de combustión interna, por lo que es posible corregir el problema en los períodos normales de mantenimiento del equipo sin necesidad que esta llegue a fallar.

3.4.2 Consideraciones para el análisis de vibración como mantenimiento predictivo

Para realizar el mantenimiento predictivo mediante los resultados del análisis de vibración, es muy importante e indispensable tener los espectros patrones de vibraciones a diferentes regímenes del motor a funcionamiento indemne.

Los espectros documentados del motor turbo cargado debe ser lo más completo posible y este deberá incluir la línea base de vibraciones. Se define como línea base, la tendencia máxima de un nivel de vibración sin filtro que debe tener un equipo al momento de su monitoreo. También es importante tener los registros del historial de mantenimiento, se tienen que poner las fallas y los mantenimientos realizados, así como también las labores correctivas y también el espectro de vibraciones antes y después de los mantenimientos realizados, todo esto con el fin de determinar las diferentes causas que puedan originar causas de vibraciones.

3.4.3 *Análisis de vibraciones utilizado como mantenimiento predictivo*

Hay que tener en cuenta que todos los equipos vibran, debido a las fuerzas externas y a todas aquellas que se generan por efecto de la propia rotación de sus componentes y afectada por las tolerancias inherentes a cada uno de sus elementos constructivos. La suma de todas estas condiciones estructurales y de operación, proporciona a una máquina rotativa, aunque esté recién construida una vibración característica básica con la que podemos comparar futuras vibraciones para su correcta evaluación. Máquinas similares, funcionando en buenas condiciones, tendrán similares características de vibraciones y un cambio en su vibración básica, funcionando en condiciones normales, será indicativo de que se está generando un defecto en alguno de sus elementos. Diferentes tipos de fallos dan lugar a diferentes tipos de forma de vibración ya que está compuesta por una suma de ondas senoidales dependientes de las características de cada una de las piezas que componen el conjunto.

3.4.4 *Factibilidad de análisis de vibración como mantenimiento predictivo*

El estudio de espectros de vibraciones como mantenimiento predictivo es posible solo si se tiene espectro con diferentes tipos de fallas documentados, a continuación, se puede ver un ejemplo de espectro base y un espectro con falla de combustión documentados.

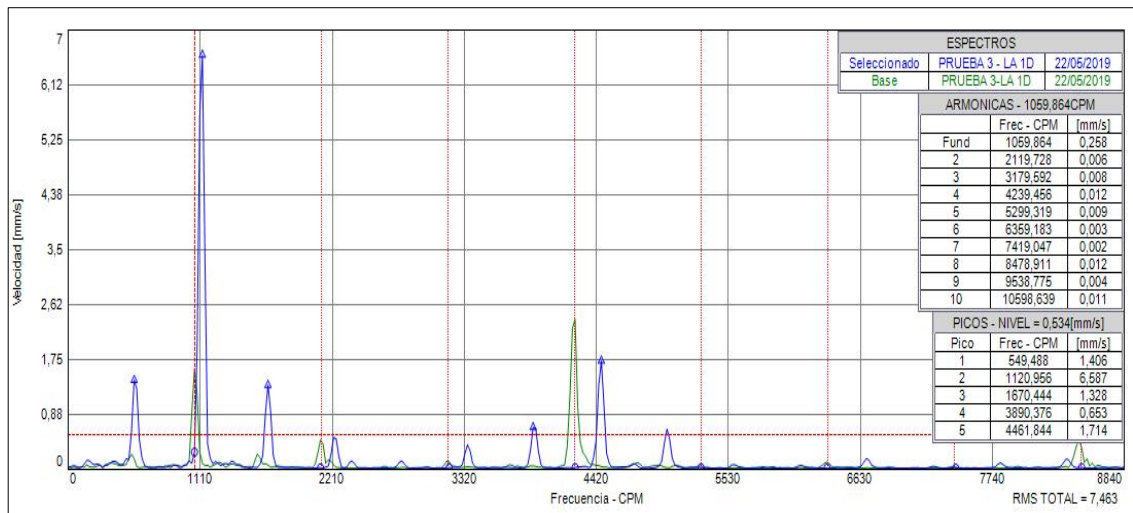


Gráfico 24-3: Diferencia del espectro base con el espectro de falla de combustión a ralentí
Fuente: Ruiz D, 2019

El espectro de color verde representa espectro base del motor turbo cargado en funcionamiento sin ninguna avería, estudiando los espectros en frecuencia se puede observar que existe cambio brusco de amplitud a la misma frecuencia 1110 (CPM) para este caso las vibraciones en dirección axial son mayores que en otras direcciones También se puede ver la presencia de desfase de armónicos la cual me indica cómo ha ido evolucionando el fallo a lo largo del tiempo.

3.5 Costos de la implementación

3.5.1 Detalle de costos directos

Tabla 6-3: Costos del sistema mecánico

SISTEMA MECÁNICO				
Cantidad	Detalle	Descripción	Valor unitario USD	Valor total USD
1	Sistema de alimentación de combustible	- Filtro de combustible - Mangueras de presión - Abrazaderas	6,00 8,00 2,00	16,00
1	Sistema de refrigeración	- Refrigerante	5,00	5,00
1	Sistema de sobrealimentación	- Base de conductos de sobrealimentación.	10,00	10,00
1	Repuestos motores	- Combustible - Aceite motor	15,00 20,00	35,00
1	Sistema de arranque y encendido	- Fusibles - Porta fusibles - Bobina de Encendido - Reparación de motor de arranque - Batería - Reparación del alternador	5,00 12,00 60,00 20,00 75,00 50,00	222,00
TOTAL			288,00 USD	

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

Tabla 7-3: Costos del sistema eléctrico

SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO				
Cantidad	Detalle	Descripción	Valor Unitario USD	Valor total USD
1	Tablero de control	- Switch de encendido.	12,00	12,00
1	Sistema Electrónico	- ECU Programable - Sensor CKP - Cable Serial a USB DB-9 RS-232	900,00 40,00 45,00	985,00
TOTAL			997,00 USD	

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

Tabla 8-3: Total de costos directos

COSTOS DIRECTOS	1285,00 USD
------------------------	--------------------

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

3.5.2 Detalle de costos indirectos**Tabla 9-3: Total de costos indirectos**

Detalle	Valor
Transporte	100,00
Varios	50,00
TOTAL	150,00 USD

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

3.5.3 Costos totales**Tabla 10-3: Costos totales**

COSTOS DIRECTOS	1285,00
COSTOS INDIRECTOS	150,00
TOTAL	1435,00 USD

Fuente: Ruiz D, 2019

Realizado por: Ruiz D, 2019

CONCLUSIONES

Con la implementación de una nueva centralita electrónica (MegaSquirt III) se consiguió ajustar los parámetros necesarios para un buen funcionamiento del motor turbo cargado y facilidad de simulación de averías electrónicas para el análisis de espectros.

Por medio de analizador de emisiones de gases se obtuvo los siguientes resultados. Valor lambda 0.925, HC 728ppm, CO 4.84%, CO₂ 11.2%, O₂ 2.05% lo que demuestra que la programación realiza a la MS3 del banco de pruebas esta parametrizada correctamente.

Se determinó tres espectros patrones de vibraciones a 1000, 1500 y 2000 RPM del motor, los cuales sirvieron para comparar con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales realizadas con distintas fallas.

Al comparar el espectro patrón para el régimen de giro a 1000 rpm con los cuatro espectros de fallas correspondientes, se puede observar que la amplitud de los armónicos sufre una variación de su magnitud de acuerdo al tipo de fallo, así pues para la prueba experimental con fallo de combustión la amplitud de los armónicos X/2 y 4X se incrementa, mientras que los restos de armónicos presentan una disminución de su amplitud, esto determina las características propias para este tipo de fallo en análisis.

Se concluye que la metodología aplicada en el análisis de vibraciones, puede ser utilizada en diferentes motores de combustión interna como mantenimiento predictivo, ya que con el análisis espectral se determina el estado de los diferentes componentes y sistemas del motor y con esto se puede planificar su respectivo mantenimiento.

RECOMENDACIONES

Se recomienda establecer un adecuado diseño experimental para poder generar resultados valederos sobre el sistema en análisis, empleado pruebas experimentales de una forma adecuada.

La adquisición de datos es el primer y principal paso a dar para hacer un análisis de vibraciones, por lo que se recomienda establecer de forma adecuada las variables controlables y no controlables a considerar.

Antes de realizar el análisis de espectros patrones de vibraciones, se debe cerciorarse que el motor este en temperatura de trabajo y en buenas condiciones de funcionamiento.

Para el desarrollo de las pruebas experimentales siempre se debe respetar el protocolo establecido y es importante elaborar una base de datos del equipo analizado para poder compararlos con mediciones futuras.

El personal técnico encargado de las mediciones y análisis de las vibraciones debe de estar altamente capacitado para poder dar un buen diagnóstico.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, J. *Técnicas del Automóvil*. Madrid: Thompson-Paraninfo, 2003, pp. 225-250.

AUTOAVANCE. *Turbo Compresor Compres.* [En línea]. 2012. [Consulta: 12 enero 2019]. Disponible en: <https://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/83-turbo-compresor-compres/>

AUTOMOVILES EL MANGAS SL. *Herramientas / Glosario*. [En línea]. 2012. [Consulta: 12 enero 2019]. Disponible en: http://www.autoselmangas.com/_Herramientas/Glosario.php#C

AUTOScout24. *Radiador intercooler*. [En línea]. 2018. [Consulta: 20 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.autoscout24.es/informacion/asesor/tecnologia-del-automovil/intercooler/>

BLOGGER. *Oscilaciones o vibraciones*. [En línea]. 2011. [Consulta: 12 enero 2019] Disponible en: <http://fisicaentusmanos.blogspot.com/2011/01/oscilaciones-o-vibraciones.html>

BOHNER, M. *Tecnología del Automóvil*. 20 ed. Barcelona: Reverté, 1985, pp. 400-440.

CIENCIA CREATIVA. *Movimientos periódicos*. [En línea]. 2016. [Consulta: 12 marzo 2019] Disponible en: <https://cienciamilagrosa.wordpress.com/2016/05/06/movimiento-armonico-simple-m-a-s/>

DASOLUCIONES. *Vibración Torsional*. [En línea]. 2014. [Consulta: 14 enero 2019] Disponible en: <http://www.dasoluciones.es/servicios/analisis-de-vibraciones/vibracion-torsional/>

DOKUMEN. *Vibracheck-200-Analizador de Vibraciones Mecánicas*. [En línea]. 2015. [Consulta: 14 enero 2019]. Disponible en: <https://dokumen.tips/documents/vibracheck-200-analizador-de-vibraciones-mecanicas.html>

ECOMOTOE.ES. *Las ventajas y los inconvenientes del turbo*. [En línea]. 2012. [Consulta: 16 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.economista.es/ecomotor/motor/noticias/4153215/07/12/Las-ventajas-y-los-inconvenientes-del-turbo.html>

FEMAP Y NX NASTRAN. *Teoría de vibraciones*. [En línea]. 2012. [Consulta: 18 enero 2019] Disponible en: <https://iberisa.wordpress.com/tag/teoria-de-vibraciones/>

FISICALAB. *Movimiento Armónico Simple (M.A.S.).* [En línea]. 2019. [Consulta: 10 febrero 2019]. Disponible en: <https://www.fiscalab.com/apartado/concepto-oscilador-armonico#contenidos>

GIL, H. *Manual del Automovil: El motor Diesel.* 3 ed. Madrid: Cultural S.A., 1999, pp. 72-94.

HERMÓGENES GIL. *Técnicas de sobrealimentacion.* España: CEAC, 2002, pp. 100-115.

HERNÁNDEZ, J. L. Diseño e implementación de una ECU para controlar el desempeño de un motor de combustión interna. [En línea]. (Trabajo de Titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador, 2010, pp. 50-80. [Consulta: 2019-02-05]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/633/1/38T00251.pdf>

MEGAMANUAL. *Introduction to the MegaSquirt® EFI Controller.* [En línea]. 2015. [Consulta: 22 enero 2019]. Disponible en: <http://www.megamanual.com/v22manual/mintro.htm>

MONOGRAFIAS.COM. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico.* [En línea]. 2018. [Consulta: 22 enero 2019]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/analisis-vibraciones/analisis-vibraciones.shtml>

OROVIO, M. *Tecnología del Automóvil.* 1 ed. Madrid: S.L. Paraninfo, 2010, pp. 150-175.

PCE. *Transductores.* [En línea]. 2014. [Consulta: 24 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/sistemas/transductores.htm>

RELIABILITYWEB.COM. *La amplitud de la vibración es la magnitud de la vibración.* [En línea]. 2018. [Consulta: 24 enero 2019]. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/sp/tips/article/la-amplitud-de-la-vibracion-es-la-magnitud-de-la-vibracion>

RODESPREX. *Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts.* [En línea]. 1996. [Consulta: 10 febrero 2019]. Disponible en: <https://www.sis.se/api/document/preview/18341/>

ROSHFRANS. *Unidad de control del motor (ECU).* [En línea]. 2015. [Consulta: 23 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.roshfrans.com/que-es-la-unidad-de-control-de-motor-ecu/>

SIDLESHARE. *Vibraciones Básicas de Máquinas.* [En línea]. 2015. [Consulta: 4 marzo 2019]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/ferrita/01-vibraciones-basicasdemaquinaslibre>

SIDLESHARE. *Balanceo de rotores y elementos rotativos.* [En línea]. 2017. [Consulta: 4 marzo 2019]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/misraimferrer/307274397-unidad4vibraciones>

SIDLESHARE. *Vibraciones mecánicas.* [En línea]. 2017. [Consulta: 4 marzo 2019]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/LuisHumbertoBolivarm/vibraciones-mecnicas>

TARINGA. *Megasquirt - Inyeccion electronica Home Made.* [En línea]. 2009. [Consulta: 6 abril 2019]. Disponible en: <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/2221920/Megasquirt---Inyeccion-electronica-Home-Made.html>

UNIVERSIDAD DE SEVILLA. *Oscilaciones amortiguadas y forzadas (CMR).* [En línea]. 2016. [Consulta: 10 abril 2019]. Disponible en: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Oscilaciones_amortiguadas_y_forzadas_\(CMR\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Oscilaciones_amortiguadas_y_forzadas_(CMR))

VIBRATOR. *Medición y análisis de vibraciones.* [En línea]. 2015. [Consulta: 14 abril 2019]. Disponible en: <http://www.vibratorsa.com/index.php/servicios/163-medicion-y-analisis-de-vibraciones>

ANEXOS