

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE MATRIZ CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

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

**PROYECTO TÉCNICO**

**“INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE  
COMO SELLANTE DE HOLGURAS EN LAS VÁLVULAS  
DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA  
ALTERNATIVO HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L  
MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y EMISIONES  
CONTAMINANTES”**

**AUTORES**

**PABLO VICENTE MAXI VENAVIDEZ**

**LUIS EDUARDO MENDOZA SIGUENCIA**

**TUTOR**

**ING. MILTON OSWALDO GARCÍA TOBAR M. SC.**

Cuenca, diciembre 2016

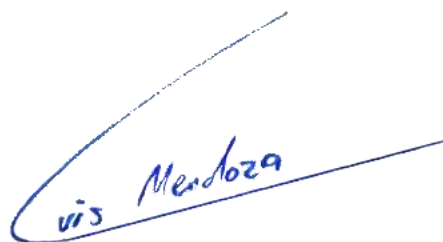
## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Pablo Vicente Maxi Venavidez, con documento de identificación N° 0105512008, y Luis Eduardo Mendoza Siguenca, con documento de identificación N° 0105396139, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación: “INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE COMO SELLANTE DE HOLGURAS EN LAS VÁLVULAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y EMISIONES CONTAMINANTES”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniería Mecánica Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Maxi Venavidez Pablo Vicente  
0105512008

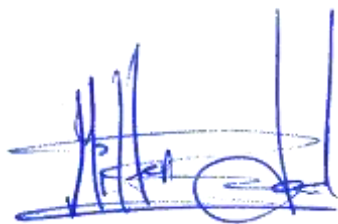


Mendoza Siguenca Luis Eduardo  
0105396139

## CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación: “INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE COMO SELLANTE DE HOLGURAS EN LAS VÁLVULAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y EMISIONES CONTAMINANTES”, realizado por los autores, Pablo Vicente Maxi Venavidez y Luis Eduardo Mendoza Sigüencia, obteniendo el Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of several vertical strokes and a circular element at the bottom right.

Ing. Milton Oswaldo García Tobar M.Sc.

0104282181

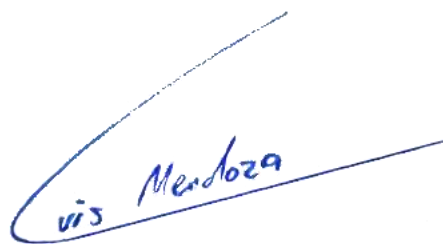
## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Pablo Vicente Maxi Venavidez, con documento de identificación N° 0105512008, y Luis Eduardo Mendoza Siguencia, con documento de identificación N° 0105396139, autores del Trabajo de Titulación “INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD DEL LUBRICANTE COMO SELLANTE DE HOLGURAS EN LAS VÁLVULAS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y EMISIONES CONTAMINANTES” certificamos que el total contenido del Proyecto Técnico, son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, diciembre del 2016



Maxi Venavidez Pablo Vicente  
0105512008



Mendoza Siguencia Luis Eduardo  
0105396139

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios quien me concedió la fortaleza para alcanzar mis metas durante toda esta etapa.

A mis queridos padres Vicente e Irma, quienes me otorgaron su amor, apoyo, consejos, además, de compartir cada momento de mi vida.

A mis hermanos Ximena, Mayra, Andrea y Jonnathan, quienes me brindaron apoyo en todo momento.

A los docentes y colaboradores de la Universidad Politécnica Salesiana quienes fueron parte de mi formación académica.

A nuestro director del proyecto de titulación, Ing. Milton García, por proporcionar su conocimiento en el transcurso de esta investigación.

Al Ingeniero Adrián Sigüenza, por brindarme su amistad y apoyo.

Al Ingeniero Néstor Rivera, por la disponibilidad de los equipos de medición utilizados en esta investigación.

A mi compañero Luis, por otorgarme la confianza y apoyo durante todo momento en este proyecto de titulación.

PABLO

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Luis y María, por brindarme su apoyo tanto moral como económico durante toda la carrera universitaria.

A mis hermanas, Alexandra, Adriana, María y mi sobrina Carolina, quienes estuvieron en todo momento junto a mi apoyándome al igual que mis padres.

A todos los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana de la carrera de Mecánica Automotriz, quienes brindaron sus conocimientos para poder culminar una meta más en mi vida.

Al Ing. Milton García, por brindarme su apoyo y guiarme durante el proyecto de titulación.

A mi compañero de tesis Pablo, por brindarme su apoyo y confianza para culminar el proyecto de titulación.

LUIS

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, hermanos, en especial a Juan que desde el cielo me cuida, a mis cuñados y amigos que estuvieron a mi lado compartiendo alegrías y tristezas, brindándome su apoyo y permitiéndome culminar mi carrera universitaria.

PABLO

## **DEDICATORIA**

A mis padres Luis y María, quienes son un pilar fundamental en mi vida para poder cumplir mis proyectos.

A mis hermanas, Alexandra, Adriana, María y mi sobrina Carolina, ya que con su apoyo durante toda mi vida no sería posible haber cumplido una meta más.

A todos mis familiares, quienes supieron apoyarme con sus consejos en el transcurso de mi vida.

A mis amigos, quienes me brindaron su apoyo y amistad desinteresada para poder cumplir mis objetivos y proyectos en mi vida.

**LUIS**



## RESUMEN

La presente investigación analiza la influencia que tiene la viscosidad del lubricante como sellante de holguras en las válvulas de un motor de combustión interna alternativo mediante el análisis de vibraciones y emisiones contaminantes.

Se realizó un diseño experimental de superficie de respuesta, para determinar la cronología de muestreo, obteniendo un total de quince corridas con tres repeticiones, basado en diferentes estados que varían de acuerdo a la configuración de las variables de entrada (holgura, viscosidad del lubricante, y cantidad de aditivo) y las variables de salida (vibración y emisiones contaminantes)

Para el proceso de muestreo, se controlaron los diferentes parámetros de funcionamiento del motor (Temperatura de Ingreso del Aire (IAT), Temperatura del Refrigerante del Motor (ECT), velocidad de giro, ON/OFF del ventilador) mediante un escáner automotriz "MULTISCAN". Las señales temporales correspondientes a la vibración del sistema fueron adquiridas por un acelerómetro piezoeléctrico uniaxial y el acondicionamiento de señal se lo hizo a través de un equipo ADASH. Para la obtención de los gases contaminantes se utilizó un analizador de gases QROTECH QGA-6000 el mismo que cuenta con el análisis de 4 gases contaminantes: HC, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO, y en paralelo, con los valores de Lambda y AFR.

El procesamiento de señales vibratorias fue realizado mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) con la ayuda del software Matlab® para su interpretación en el dominio de la frecuencia y posteriormente analizadas mediante superficie de respuesta (corroborar los datos obtenidos en la corrida experimental) y un análisis de gráficas factoriales (verifica si existen efectos e interacciones entre las variables de entrada).

Los resultados obtenidos indican que los HC descienden conforme aumenta la viscosidad, mientras el CO disminuye. En cuanto al factor holgura, los HC y CO aumentan conforme la holgura se incrementa. Con el factor aditivo, los HC aumentan, hasta un 50% del mismo. Al aplicar más aditivo hasta el 100% disminuyen los HC, el CO aumenta conforme aumenta la cantidad del mismo.

En base a lo anterior, se concluye que el argumento planteado: “el incremento en la viscosidad del aceite actúa como sellante de holguras, y por ende, disminución en las emisiones contaminantes”, no se cumple según lo esperado, debido que los resultados obtenidos indican que si la viscosidad no es adecuada, aumentan los fenómenos de vibraciones porque se dificulta la formación de la película de aceite entre ciertas holguras. Además, las emisiones contaminantes se ven alteradas debido que mientras más viscoso sea el aceite mayor energía de impulsión se necesita, la cual es obtenida directamente del poder calorífico del combustible.

## **ABSTRACT**

This research analyzes the influence of the oil viscosity as a gap sealant on the valves of an internal combustion engine through the analysis of vibrations and pollutant emissions.

An experimental design of response surface were performed, in order to determine the sampling chronology, obtaining a total of fifteen runs with three repetitions, based on different conditions that vary according to the configuration of the input variables (slack, lubricant viscosity, and amount of additive) and output variables (vibration and pollutant emissions).

For the sampling process, the different engine operating parameters were controlled (Intake Air Temperature (IAT), Engine Coolant Temperature (ECT), rpm, fan position ON / OFF) using a "MULTISCAN" automotive scanner. The temporary signals corresponding to the system vibration were acquired by a uniaxial piezoelectric accelerometer and the signal conditioning was done through an ADASH equipment. To obtain the pollutant gases, a QROTECH QGA-6000 gas analyzer was used, which has the analysis of four pollutant gases: HC, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and CO, and in parallel, with Lambda and AFR values (Air Fuel Ratio).

The vibration signal processing was performed using the Fast Fourier Transform (FFT) in Matlab® software for its interpretation in the frequency domain and subsequently analyzed by response surface (corroborates the data obtained in the experimental run) and an analysis of factorial graphs (checks for effects and interactions between input variables).

The obtained results indicate that the HCs decrease as the viscosity increases, while the CO decreases. As for the slack factor, the HC and CO increase as the slack increases. With the additive factor, HCs increase, up to 50% of it. When applying more additive up to 100%, the HC decreases, but the CO increases as the amount increases.

Based on the above, it's concluded that the argument raised: "the increase in the viscosity of the oil acts as a gap sealant, and therefore, decrease in pollutant emissions ", is not fulfilled as expected, because the results obtained indicate that if

the viscosity is not adequate, vibration phenomena increase because the formation of the oil film between certain gaps is difficult. In addition, pollutant emissions are altered because the more viscous the oil more drive power is needed, which is obtained directly from the calorific value of the fuel.

## **INDICE GENERAL**

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
DEDICATORIA .....	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	XI
INDICE GENERAL.....	XIII
INDICE DE FIGURAS.....	XVIII
INDICE DE TABLAS .....	XXI
1 INTRODUCCIÓN .....	1
2 PROBLEMA .....	2
3 OBJETIVOS .....	2
3.1 Objetivo General .....	2
3.2 Objetivos Específicos .....	2
4 ESTADO DEL ARTE.....	3
4.1 Sistema de lubricación de un M.C.I.A .....	3
4.1.1 Sistema de lubricación por barboteo .....	3
4.1.2 Lubricación a presión .....	4
4.1.3 Lubricación mixta.....	4
4.2 Válvulas de un M.C.I.A.....	5
4.2.1 Válvula de admisión .....	5
4.2.1.1 Funcionamiento .....	5
4.2.1.2 Características .....	5

4.2.2 Válvula de escape .....	6
4.2.2.1 Funcionamiento .....	6
4.2.2.2 Características .....	7
4.3 Tipología de las fallas en las válvulas de un MCIA .....	7
4.3.1 Condiciones normales de trabajo.....	7
4.3.2 Desgaste Normal en las Válvulas .....	7
4.3.2.1 Desgaste por adhesión .....	8
4.3.2.2 Desgaste por abrasión.....	8
4.3.3 Fallas prematuras.....	8
4.3.3.1 Gripaje del vástago levanta válvulas .....	8
4.3.3.2 Desgaste del asiento de válvulas .....	8
4.3.3.3 Fracturas y roturas de las válvulas .....	9
4.3.3.4 Arrastre en la región del asiento de válvulas.....	10
4.3.3.5 Fractura en la región de la cabeza de la válvula.....	10
4.3.3.6 Desgaste generalizado en la cabeza de la válvula .....	10
4.3.3.7 Asiento de válvulas quemado con desgaste localizado .....	11
4.3.3.8 Irregularidades.....	11
4.4 Vibraciones.....	12
4.4.1 ¿Qué es vibración? .....	13
4.4.1.1 Movimiento Armónico Sencillo .....	13
4.4.1.2 Vibración Compleja .....	14
4.4.2 Sistemas Lineales y no Lineales.....	14
4.4.2.1 Sistemas Lineales .....	14
4.4.2.2 No linealidades en Sistemas .....	15
4.4.3 Análisis de Frecuencia.....	15
4.4.3.1 Transductor de Medición – Acelerómetro.....	16
4.4.4 Formas de la Transformada de Fourier .....	17

4.4.4.1 La serie de Fourier .....	17
4.4.4.2 Los Coeficientes de Fourier .....	17
4.4.4.3 La Transformada Integral de Fourier .....	18
4.4.4.4 La Transformada Discrecional de Fourier.....	19
4.4.4.5 La Transformada Rápida de Fourier.....	20
4.4.5 Análisis de vibraciones en MCIA .....	21
4.5 Emisión de Gases de Escape .....	22
4.5.1 Componentes de los Gases de Escape .....	22
4.5.2 Fuentes de Emisión en MCIA .....	23
4.5.3 Normativa Ecuatoriana de Gases de Escape .....	23
4.5.4 Análisis de Gases de Escape .....	24
5. MARCO METODOLOGICO .....	25
5.1 Implementación del diseño experimental.....	25
5.1.1 Unidad experimental .....	25
5.1.2 Modelo experimental para la adquisición de datos de señales vibratorias y emisión de gases de escape.....	26
5.1.2.1 Factores de estudio .....	27
5.1.2.2 Factores controlables .....	29
5.1.2.3 Factores no controlables .....	30
5.1.2.4 Niveles y Tratamientos.....	30
5.1.2.5 Variables de respuesta .....	30
5.2 Adquisición de señales vibratorias y gases contaminantes .....	30
5.2.1 Scanner Automotriz.....	30
5.2.2 Adquisición de señales vibratorias .....	31
5.2.2.1 Aspectos Prácticos en la Medición de Vibración.....	34
5.2.2.1.1 Condiciones de Prueba .....	35
5.2.2.1.2 Condiciones de operación.....	35

5.2.2.1.3 Calentamiento.....	35
5.2.2.1.4 Inspección Visual .....	35
5.2.2.2 Protocolo para la toma de muestras de señales vibratorias .....	35
5.2.3 Adquisición de gases contaminantes.....	36
5.2.3.1 Protocolo para la toma de muestra de gases contaminantes.....	37
5.2.4 Nomenclatura utilizada para la adquisición de los datos de vibración y gases contaminantes.....	38
5.3 Procesamiento de señales adquiridas.....	38
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	39
6.1 Análisis de superficie de respuesta.....	40
6.1.1 Análisis de superficie de respuesta para vibraciones .....	40
6.1.1.1 Análisis de residuos para vibraciones .....	40
6.1.1.2 Análisis de efectos principales para vibraciones .....	41
6.1.1.3 Análisis de interacciones para vibraciones.....	42
6.1.2 Análisis de residuos de Emisión de Gases .....	43
6.1.2.1 Análisis de residuos para hidrocarburos no combustionados (HC) .....	43
6.1.2.2 Análisis de efectos principales para hidrocarburos no combustionados (HC) .....	43
6.1.2.3 Análisis de interacciones para hidrocarburos no combustionados (HC)....	44
6.1.2.4 Análisis de residuos para monóxido de carbono (CO).....	45
6.1.2.5 Análisis de efectos principales para monóxido de carbono (CO) .....	45
6.1.2.6 Análisis de interacciones para monóxido de carbono (CO).....	46
6.2 Análisis de espectros patrones.....	47
6.2.1 Análisis de espectro patrón con desgaste nulo de la válvula.....	48
6.2.2 Análisis de espectro patrón con desgaste al 10% de la válvula.....	48
6.2.3 Análisis de espectro patrón con desgaste al 20% de la válvula.....	49
6.3 Comparación de espectros con el espectro patrón.....	49
6.3.1 Análisis de espectros con desgaste al 0% de la válvula .....	49



6.3.2	Análisis de espectros con desgaste al 10% de la válvula .....	51
6.3.3	Análisis de espectros con desgaste al 20% de la válvula .....	54
6.4	Comparación de características temporales .....	56
6.4.1	Comparación de características temporales de espectros con desgaste nulo	56
6.4.2	Comparación de características temporales de espectros con desgaste al 10% .....	56
6.4.3	Comparación de características temporales de espectros con desgaste al 20% .....	57
6.5	Análisis de emisiones contaminantes .....	58
6.5.1	Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 0% .....	58
6.5.2	Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 10% .....	59
6.5.3	Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 20% .....	59
7.	CONCLUSIONES .....	60
8.	RECOMENDACIONES .....	63
9.	BIBLIOGRAFIA .....	64
10.	ANEXO 1: TABLA DE CARACTERISTICAS TEMPORALES Y EMISIONES DE ESCAPE .....	66
11.	ANEXO 2: FIGURAS DE ANALISIS DE RESIDUOS .....	69
12.	ANEXO 3: FIGURAS DE EFECTOS PRINCIPALES .....	75
13.	ANEXO 4: FIGURAS DE INTERACCIONES .....	81

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de lubricación del M.C.I.A. ....	3
Figura 2: Sistema de lubricación por barboteo. ....	4
Figura 3: Sistema de lubricación a presión. ....	4
Figura 4: Válvulas de un M.C.I.A. ....	5
Figura 5: Posicionamiento de la válvula. ....	6
Figura 6: Dimensiones de las Válvulas. ....	7
Figura 7: Gripaje en la región inferior de la válvula. ....	8
Figura 8: Desgaste en la región del asiento. ....	9
Figura 9: Válvula deformada y quebrada en la región del radio y vástago. ....	9
Figura 10: Rotura en la región del canal de traba. ....	9
Figura 11: Fisura en el asiento de válvula. ....	10
Figura 12: Rotura parte de la cabeza. ....	10
Figura 13: Desgaste en la región de la cabeza de la válvula. ....	11
Figura 14: Desintegración localizada en la región del asiento de la válvula. ....	11
Figura 15: Faja irregular de asentamiento. ....	12
Figura 16: Válvula de admisión contaminada con aceite lubricante debido a holgura excesiva entre vástago y guía. ....	12
Figura 17: Marcas que indican que la válvula no giro. ....	12
Figura 18: Movimiento armónico simple. ....	13
Figura 19: Vibración compleja. ....	14
Figura 20: (a) Dominio de tiempo vs (b) Dominio de frecuencia. ....	16
Figura 21: Acelerómetro piezo eléctrico. ....	16
Figura 22: Triangulo de fuego. ....	22
Figura 23: Motor Hyundai Accent. ....	25
Figura 24: Diagrama de bloques de variables de un proceso. ....	26
Figura 25: Válvulas de un cilindro. ....	27
Figura 26: Aditivo y aceite. ....	28
Figura 27: Pantalla de escáner automotriz. ....	30
Figura 28: Escáner automotriz. ....	31
Figura 29: Adash® A3716. ....	33
Figura 30: Posición del Acelerómetro uniaxial. ....	34
Figura 31: Componentes de un sistema de sonido y vibración. ....	34
Figura 32: Analizador de gases QGA-6000. ....	37

Figura 33: Procesamiento de señales. ....	39
Figura 34: Gráfica de residuos para Curtosis.....	41
Figura 35: Gráfica de efectos principales para Curtosis.....	42
Figura 36: Gráfica de interacción para Curtosis. ....	42
Figura 37: Gráfica de residuos para HC. ....	43
Figura 38: Gráfica de efectos principales para HC.....	44
Figura 39: Gráfica de interacciones para HC.....	44
Figura 40: Gráfica de residuos para CO. ....	45
Figura 41: Gráfica de efectos principales para CO.....	46
Figura 42: Gráfica de interacciones para CO.....	46
Figura 43: Gráfica de espectro patrón con 0% de desgaste. ....	48
Figura 44: Gráfica de espectro patrón con 10% de desgaste. ....	48
Figura 45: Gráfica de espectro patrón con 20% de desgaste. ....	49
Figura 46: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-51,69-50 con espectro patrón con 0% de desgaste.....	50
Figura 47: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-15,6-50 con espectro patrón con 0% de desgaste.....	50
Figura 48: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-33,645-100 con espectro patrón con 0% de desgaste.....	51
Figura 49: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-15,6-100 con espectro patrón con 10% de desgaste.....	52
Figura 50: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317--10-15,6-0 con espectro patrón con 10% de desgaste.....	52
Figura 51: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-51,69-100 con espectro patrón con 10% de desgaste.....	53
Figura 52: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-33,645-50 con espectro patrón con 10% de desgaste.....	53
Figura 53: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-15,6-50 con espectro patrón con 20% de desgaste.....	54
Figura 54: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-33,645-0 con espectro patrón con 20% de desgaste.....	55
Figura 55: Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-51,69-50 con espectro patrón con 20% de desgaste.....	55
Figura 56: Gráfica de residuos para Varianza.....	70

Figura 57: Gráfica de residuos para Desviación Estándar. ....	70
Figura 58: Gráfica de residuos para la Media. ....	71
Figura 59: Gráfica de residuos para RMS. ....	71
Figura 60: Gráfica de residuos para Asimetría. ....	72
Figura 61: Gráfica de residuos para Potencia. ....	72
Figura 62: Gráfica de residuos para Energía. ....	73
Figura 63: Gráfica de residuos para CO <sub>2</sub> . ....	73
Figura 64: Gráfica de residuos para O <sub>2</sub> . ....	74
Figura 65: Gráfica de efectos principales para Varianza. ....	76
Figura 66: Gráfica de efectos principales para Desviación Estándar. ....	76
Figura 67: Gráfica de efectos principales para la Media. ....	77
Figura 68: Gráfica de efectos principales para RMS. ....	77
Figura 69: Gráfica de efectos principales para Asimetría. ....	78
Figura 70: Gráfica de efectos principales para Potencia. ....	78
Figura 71: Gráfica de efectos principales para Energía. ....	79
Figura 72: Gráfica de efectos principales para CO <sub>2</sub> . ....	79
Figura 73: Gráfica de efectos principales para O <sub>2</sub> . ....	80
Figura 74: Gráfica de interacción para Varianza. ....	82
Figura 75: Gráfica de interacción para Desviación Estándar. ....	82
Figura 76: Gráfica de interacción para la Media. ....	83
Figura 77: Gráfica de interacción para RMS. ....	83
Figura 78: Gráfica de interacción para Asimetría. ....	84
Figura 79: Gráfica de interacción para Potencia. ....	84
Figura 80: Gráfica de interacción para Energía. ....	85
Figura 81: Gráfica de interacción para CO <sub>2</sub> . ....	85
Figura 82: Gráfica de interacción para O <sub>2</sub> . ....	86

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites permisibles de emisiones. ....	24
Tabla 2: Datos del motor Hyundai Accent. ....	26
Tabla 3: Variables de entrada. ....	28
Tabla 4: Corridas experimentales. ....	29
Tabla 5: Factores controlables. ....	29
Tabla 6: Características de los elementos de medición para la obtención de datos vibratorios. ....	31
Tabla 7: Características de los elementos de medición para la obtención de datos vibratorios. ....	32
Tabla 8: Nomenclatura utilizada para la obtención de datos de señales de vibración y gases contaminantes. ....	38
Tabla 9: Nomenclatura para las distintas configuraciones del diseño experimental. ....	47
Tabla 10: Comparación de las características temporales con 0% de desgaste. ....	56
Tabla 11: Comparación de las características temporales con 10% de desgaste. ....	57
Tabla 12: Comparación de las características temporales con 20% de desgaste. ....	58
Tabla 13: Comparación de emisiones contaminantes con 0% de desgaste. ....	59
Tabla 14: Comparación de emisiones contaminantes con 10% de desgaste. ....	59
Tabla 15: Comparación de emisiones contaminantes con 20% de desgaste. ....	60
Tabla 16: Tabla de características temporales y emisiones de escape. ....	67
Tabla 17: Tabla de características temporales y emisiones de escape (Continuación).. ....	68

## 1 INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) a través de la transformación de energía térmica a mecánica generan trabajo mediante la combustión de la mezcla aire-combustible, dicha variación es utilizada para la impulsión de automóviles, camiones, barcos, ferrocarriles, etc.

Todo este proceso rotativo conlleva un desgaste natural de los elementos mecánicos del motor, así como de sus sistemas alternativos, generando contaminación del medio ambiente. Dicho desgaste como ya se menciona puede ser natural o prematuro, donde este último nace por la falta de lubricación en las superficies de contacto provocando una reducción en la vida útil de aquel elemento, según [1] (White, 2010, pág. 70) “Lo que más absorbe energía es la fricción” provocando mayor contaminación al medio ambiente.

El presente proyecto de titulación se ha centrado en el desgaste prematuro de las válvulas del primer cilindro con la alteración de viscosidad en lubricantes a las prescritas por el fabricante y la introducción de un aditivo. Esta investigación se ha fundamentado en la hipótesis planteada por varios mecánicos automotrices “al incrementar la viscosidad del lubricante sellamos holguras y disminuimos las emisiones contaminantes”. Para corroborar esta hipótesis, se indujo desgaste en las válvulas del primer cilindro hasta un máximo permisible expuesto por el fabricante y se modificaron las viscosidades con la ayuda de un aditivo para producir un sellado en el desgaste producido.

Existen varias técnicas para aplicar un mantenimiento predictivo con el fin de monitorizar elementos como son termografía, análisis de aceites, vibraciones, entre otros. El presente estudio se centra en aplicar el análisis de vibraciones como técnica no invasiva para la detección de fallos y anomalías en una maquinaria en constante funcionamiento como lo expone [1] (White, 2010, pág. 70) “El análisis de vibraciones, cuando está aplicado correctamente, permite al técnico detectar pequeños defectos mecánicos incipientes mucho antes que representen una amenaza en contra de la integridad de la máquina. La medición de vibración y su análisis son las bases del Mantenimiento Predictivo, que forma un fuerte contraste con la práctica de mantenimiento del tipo histórico, funcionar hasta fallar.”, así como también el uso

paralelo del análisis de gases contaminantes para analizar el comportamiento y variación de los mismos durante las diferentes fases de la investigación.

## **2 PROBLEMA**

Una de las fallas más frecuentes en los MCIAs es el desgaste de las válvulas en sus superficies de contacto. [2] (MORESA, 2014)

Al tratarse de un fallo por degradación mecánica, no basta solamente una aplicación de mantenimiento correctivo que representará un mayor costo y tiempo de reparación, frente a uno planificado (mantenimiento preventivo); debido a la forma intempestiva en la que se presentaría un fallo en un elemento cualquiera, pudiendo o no, repercutir en la consecuencia de un fallo mayor.

El problema nace en la posibilidad de que un MCIAs pueda ocultar fallos producidos por holguras propias del contacto mecánico, producto de variaciones de viscosidad, lo que provocará un sellamiento transitorio de dichas holguras, disminuyendo: el paso de aceite a la cámara de combustión, el paso de gases frescos y de escape a la parte superior del motor; pudiendo o no afectar directamente a variaciones en la emisión de gases contaminantes.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo General**

Determinar la influencia de la viscosidad del lubricante como sellante de holguras en las válvulas de un motor de combustión interna alternativo Hyundai Accent DOHC 1.5L mediante análisis de vibraciones y emisiones contaminantes.

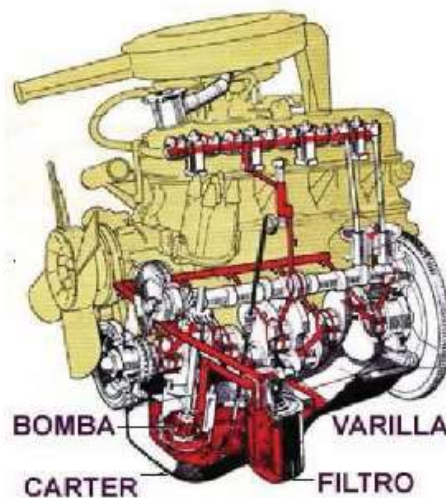
### **3.2 Objetivos Específicos**

- Definir la tipología de las fallas ocasionadas en las válvulas.
- Definir variables de entrada y salida involucradas en el estudio a realizar.
- Plantear e implementar el diseño experimental.
- Establecer un protocolo para la toma de muestras.
- Analizar los resultados obtenidos.

## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 Sistema de lubricación de un M.C.I.A

El sistema de lubricación de un M.C.I.A tiene como misión distribuir el aceite lubricante por todos los elementos de motor ya sean estáticos o móviles, teniendo mayor relevancia los elementos móviles ya que los mismos se encuentran en continuo funcionamiento entre si provocando fricción, rozamiento, desgastes excesivos y prematuros, disminuyendo la vida útil del motor.



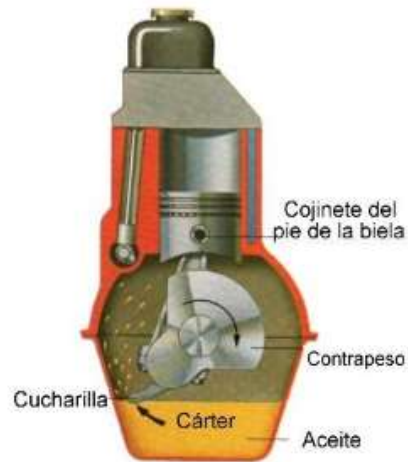
**Figura 1:** Sistema de lubricación del M.C.I.A. **Fuente:** [3] (Bueno, 2010, pág. 52)

Existen diversas formas de distribución del aceite lubricante en el motor de los cuales tenemos:

#### 4.1.1 Sistema de lubricación por barboteo

Este sistema, las piezas que giran rápidamente salpican el aceite hacia los demás componentes. Esto hace que en el espacio libre del cárter se encuentre una espesa niebla de pequeñas gotas de aceite que paulatinamente se introducen en los juegos entre las superficies rozantes. Este tipo de lubricación se utilizó en algunos motores antiguos; actualmente está en desuso debido a sus inconvenientes tales como: gran consumo de aceite, rápida oxidación del mismo y falta de seguridad en las zonas de fuerte fricción.

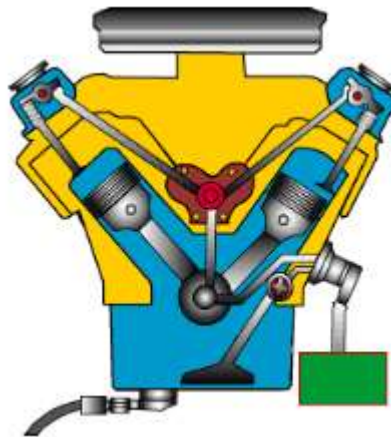




**Figura 2:** Sistema de lubricación por barboteo. **Fuente:** [4] (Villegas, 2007)

#### 4.1.2 Lubricación a presión

En este sistema el aceite del cárter se suministra por medio de una bomba y de los conductos correspondientes a las superficies de rozamiento, de donde vuelve a escurrir al cárter. Con este sistema a las superficies rozantes llega la cantidad necesaria de aceite y se asegura su circulación intensa.



**Figura 3:** Sistema de lubricación a presión. **Fuente:** [4] (Villegas, 2007)

#### 4.1.3 Lubricación mixta

Este tipo de lubricación está basada en la conjugación de los tipos anteriores, es decir, es una combinación entre el sistema a presión y barboteo. [5] (Tormos, 2005, pág. 15)

## 4.2 Válvulas de un M.C.I.A

Situadas en el interior de la cámara de combustión, son las encargadas de abrir y cerrar los orificios de entrada y salida de gases. Constituidas por una cabeza de válvula la cual hace el cierre hermético con el orificio de la culata. Suelen estar mecanizadas con un ángulo de inclinación para evitar fugas y permitir un mejor cierre. Esta parte de la válvula apoya en la culata sobre un elemento llamado asiento de válvula. Unida a la cabeza se encuentra el vástago o cuerpo de válvula cuya misión es la de servir de guía a la válvula en su desplazamiento. Al final del vástago posee unas hendiduras las cuales sirven para fijar el resto de elementos que van acoplados a la válvula. [6] (Montoya, 2008, pág. 34)



**Figura 4:** Válvulas de un M.C.I.A. **Fuente:** Los Autores.

### 4.2.1 Válvula de admisión

#### 4.2.1.1 Funcionamiento

Tiene como función que se abra para el ingreso de mezcla aire-combustible procedente del sistema de inyección, el mismo que ingresa en la cámara de combustión del motor para que se efectuara el ciclo de admisión.

#### 4.2.1.2 Características

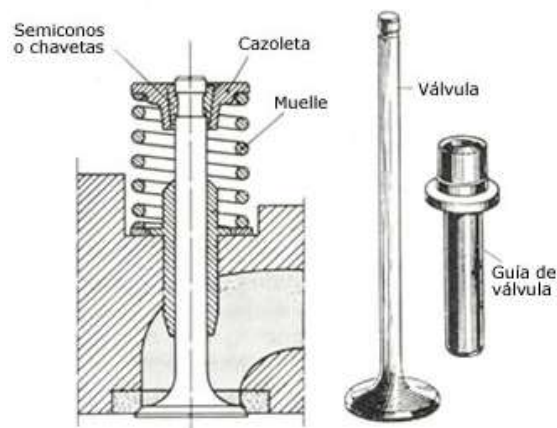
Está constituida por una cabeza mecanizada en toda su periferia con una inclinación o conicidad en la superficie del asiento, generalmente de 45° haciendo de cierre

hermético sobre el orificio de la culata, con un desgaste máximo admisible entre vástago y guía de 0.1mm (0.004’’). [7] (Hyundai Group, 1994)

Las válvulas de admisión están fabricadas de acero austenítico al níquel o titanio. [3] (Bueno, 2010, pág. 44)

Poseen características térmicas para soportar temperaturas elevadas y químicas para evitar la corrosión, deben resistir la llamada corrosión fría producida por los gases que no escapan adecuadamente y van acumulándose en la cabeza de la válvula y del vástago creando una especie de ácido al condensarse. [8] (Payri & Desantes, 2011)

Las válvulas de admisión tienen un diámetro de 20 y 30% mayor a la válvula de escape para tener mayor cantidad de masa gaseosa al cilindro, en la Figura 5 se indica el posicionamiento de las válvulas.



**Figura 5:** Posicionamiento de la válvula. **Fuente:** Los Autores.

## 4.2.2 Válvula de escape

### 4.2.2.1 Funcionamiento

Tiene como objetivo poner a los cilindros en contacto con el exterior gracias a los orificios de escape destinados a la expulsión de los gases residuales, siendo su función de permitir la salida hacia el exterior de los gases generados por la combustión.

#### 4.2.2.2 Características

Se fabrica en acero austenítico al níquel más cromo o cromo al sílice, algunas rellenas de sodio en polvo, que pasa a estado líquido por temperatura y refrigera la válvula de esta manera. [3] (Bueno, 2010, pág. 45)

La válvula de escape está sometida al paso de los gases producto de la combustión, por lo que puede alcanzar temperaturas de hasta 800 °C, al contrario que las válvulas de admisión, suelen hacerse con menor diámetro de cabeza para darle mayor consistencia, ya que estarán sometidas a las elevadas temperaturas de la salida de los gases [9] (Kalpakjian & Schmid, 2008), el desgaste máximo admisible entre vástago y guía de 0.15mm (0.006”). [7] (Hyundai Group, 1994)

### 4.3 Tipología de las fallas en las válvulas de un MCIA

#### 4.3.1 Condiciones normales de trabajo

La vida útil de las válvulas es proporcional a los demás componentes del motor. Los sistemas de inyección de combustible, lubricación, enfriamiento y filtración de aire, funcionando en condiciones normales contribuyen para que las válvulas tengan desgaste normal. [10] (MAHLE, 2012, pág. 61)

#### 4.3.2 Desgaste Normal en las Válvulas

Una de las principales misiones del lubricante es la de reducir el rozamiento entre superficies en movimiento y con ello el desgaste que sufren sean los mínimos posibles. En la Figura 6 podemos observar el desgaste que se produce en las válvulas en funcionamiento normal.



**Figura 6:** Dimensiones de las Válvulas. **Fuente:** Los Autores.

Los tipos de desgaste que pueden presentarse en las válvulas son los siguientes:

#### **4.3.2.1 Desgaste por adhesión**

El desgaste por adhesión es también conocido como “scuffing” en terminología anglosajona, siendo quizás el desgaste más importante y por ello el menos deseado, se presenta cuando dos cuerpos en rozamiento no tienen una película de lubricante entre sí. Este desgaste se debe a que las superficies, aún las mejores acabadas, contienen a escala micrométrica, numerosas asperezas superficiales. [5] (Tormos, 2005, págs. 42-43)

#### **4.3.2.2 Desgaste por abrasión**

El desgaste por abrasión tiene lugar cuando hay desprendimiento de materia de una superficie, y se da cuando partículas o superficies rugosas se desplazan sobre una superficie más suave. Este tipo de desgaste no siempre es perjudicial, e incluso puede ser deseable en algunos casos. [5] (Tormos, 2005, pág. 44)

### **4.3.3 Fallas prematuras**

#### **4.3.3.1 Gripaje del vástago levanta válvulas**

El gripaje es la adherencia de elementos que se deslizan entre sí, en algunos casos, provoca arrastre de material. En la Figura 7 se observa el vástago levanta válvulas con marcas de gripaje con la guía.



**Figura 7:** Gripaje en la región inferior de la válvula. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 62)

#### **4.3.3.2 Desgaste del asiento de válvulas**

Este desgaste provoca la reducción del material en cualquier elemento, en la Figura 8 se percibe el desgaste excesivo en forma de canal en el asiento de válvulas.



**Figura 8:** Desgaste en la región del asiento. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 62)

#### 4.3.3.3 Fracturas y roturas de las válvulas

Las fracturas y roturas se provocan al existir golpes violentos, en la Figura 9 se nota que la válvula presenta fractura y rotura total de la cabeza en la región del radio y vástago. Este tipo de falla está relacionada a causas mecánicas. [10] (MAHLE, 2012, pág. 63)



**Figura 9:** Válvula deformada y quebrada en la región del radio y vástago. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 63)

En la figura 10 se observa que las válvulas presentan rotura/fractura o desgaste en la región de los canales de traba.



**Figura 10:** Rotura en la región del canal de traba. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 64)

#### 4.3.3.4 Arrastre en la región del asiento de válvulas

El arrastre de material aumenta mientras mayor sea el roce, este tipo de falla está vinculada a causas térmicas, en la Figura 11 la válvula presenta un arrastre en la parte del asiento de la cabeza.



**Figura 11:** Fisura en el asiento de válvula. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 64)

#### 4.3.3.5 Fractura en la región de la cabeza de la válvula

Este tipo de falla está relacionada a causas térmicas. Caso la fractura aumente, parte de la cabeza se desprenderá [10] (MAHLE, 2012, pág. 64), en la Figura 12 se percibe la rotura en la cabeza de la válvula.



**Figura 12:** Rotura parte de la cabeza. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 65)

#### 4.3.3.6 Desgaste generalizado en la cabeza de la válvula

En la Figura 13 se nota la presencia de desgaste en la región de la cabeza y en el asiento de válvulas. Este tipo de falla está relacionada a causas térmicas. [10] (MAHLE, 2012, pág. 65)



**Figura 13:** Desgaste en la región de la cabeza de la válvula. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 65)

#### **4.3.3.7 Asiento de válvulas quemado con desgaste localizado**

En la Figura 14 se observa el desgaste en la región del asiento, extendiéndose hacia la región del radio, este tipo de falla está relacionada a causas térmicas. [10] (MAHLE, 2012, pág. 65)



**Figura 14:** Desintegración localizada en la región del asiento de la válvula. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 66)

#### **4.3.3.8 Irregularidades**

Las irregularidades en las válvulas se ocasionan por la variación de holguras entre sus elementos, provocando: válvulas con contaminación del asiento de válvulas, marcación de asentamiento desplazado, exceso de carbón en la base de la válvula, marcación irregular de la cabeza de la válvula [10] (MAHLE, 2012, pág. 66). En las Figuras 15, 16 y 17 se observan estos fenómenos.





**Figura 15:** Faja irregular de asentamiento. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 66)



**Figura 16:** Válvula de admisión contaminada con aceite lubricante debido a holgura excesiva entre vástago y guía. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 66)



**Figura 17:** Marcas que indican que la válvula no giro. **Fuente:** [10] (MAHLE, 2012, pág. 66)

#### 4.4 Vibraciones

Con el pasar del tiempo de la investigación y desarrollo, la vibración en una maquina se estudia debido a que se puede, a través de esta, detectar fallos que nos permiten alargar la vida útil de la misma. La técnica anteriormente descrita es una de las técnicas del mantenimiento predictivo que se emplean en la actualidad en diferentes ramas de la investigación.

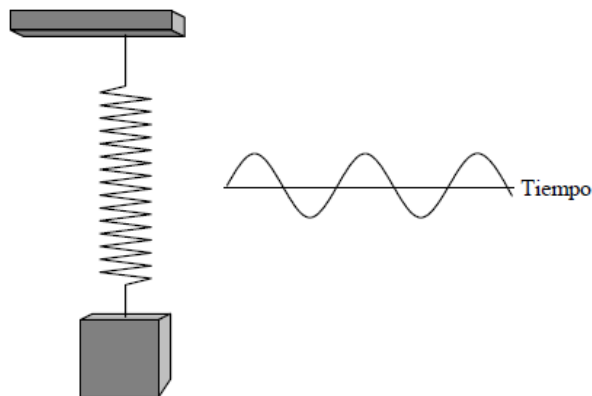
#### 4.4.1 ¿Qué es vibración?

Para un concepto formal de vibración se parte desde la definición de oscilación, que es el momento de vaivén de un parámetro físico con respecto a una posición de referencia o equilibrio, cuya posición es cuando la fuerza que actúa sobre si es cero, por lo tanto, se conoce como vibración mecánica a la oscilación de un cuerpo y/o sistema.

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen dentro del mismo. Esa es la razón porque un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación actuando en una máquina. Esas fuerzas dependen del estado de la máquina, y el conocimiento de sus características e interacciones permite de diagnosticar un problema de la máquina. [1] (White, 2010, pág. 16)

##### 4.4.1.1 Movimiento Armónico Sencillo

El movimiento armónico sencillo es cuando el movimiento se da en una dirección. Este sistema mecánico se llama sistema resorte-masa, con un grado único de libertad.

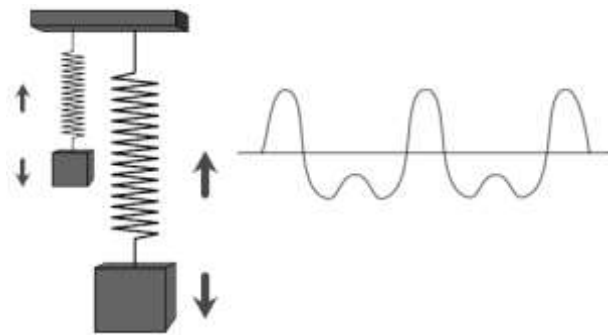


**Figura 18:** Movimiento armónico simple. **Fuente:** [1] (White, 2010, pág. 17)

Las definiciones siguientes son aplicables al movimiento armónico sencillo, el periodo ( $T$  [s]) es el tiempo necesario para un ciclo. La frecuencia ( $F$  [Hz]) es el número de ciclos que ocurren en un segundo.

#### 4.4.1.2 Vibración Compleja

La vibración compleja es el movimiento que resulta de una fuerza oscilatoria y de un sistema mecánico lineal. La frecuencia de la vibración será la misma que la frecuencia forzada. Si hay varias frecuencias forzadas, que ocurren al mismo tiempo, entonces la vibración resultante será una suma de las vibraciones a cada frecuencia. Bajo esas condiciones la forma de la onda resultante no será senoidal y puede ser muy compleja. [1] (White, 2010, pág. 26)



**Figura 19:** Vibración compleja. **Fuente:** [1] (White, 2010, pág. 26)

#### 4.4.2 Sistemas Lineales y no Lineales

Cuando se habla de linealidad de un sistema se refiere a las características de un sistema que puede tener señales de entrada y de salida. Un sistema es cualquier aparato o estructura que puede aceptar una señal de entrada y producir una señal de salida.

##### 4.4.2.1 Sistemas Lineales

Se dice que un sistema es lineal, cuando cumple con los dos criterios siguientes:

1. Si una entrada  $X$  al sistema produce una salida  $X$ , entonces una entrada  $2X$  producirá una salida  $2X$ . En otras palabras, la magnitud de la salida del sistema es proporcional a la magnitud de la entrada del sistema.
2. Si una entrada  $X$  produce una salida  $X$ , y una entrada  $Y$  produce una salida  $Y$ , entonces una entrada  $X+Y$  producirá  $X+Y$ . En otras palabras, el sistema maneja dos

entradas simultáneas de manera independiente y esas no interactúan en el sistema. [1] (White, 2010, pág. 30)

#### **4.4.2.2 No linealidades en Sistemas**

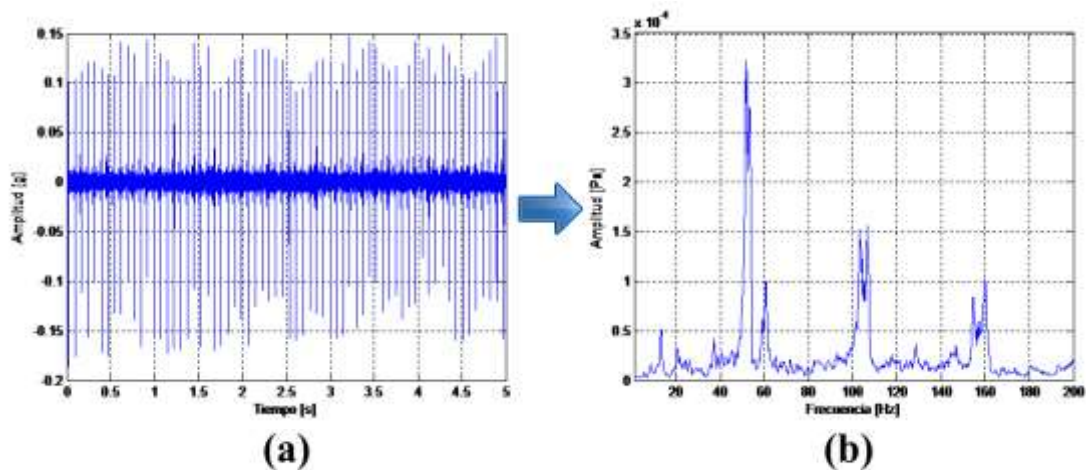
La linealidad con absoluta perfección no existe en ningún sistema real. Hay muchos tipos diferentes de no linealidad y existen en varios grados en todos los sistemas mecánicos, aunque muchos sistemas actuales se acercan a un comportamiento lineal, especialmente con niveles de entrada pequeños. Si un sistema no es lineal, producirá frecuencias en su salida, que no existen en su entrada. [1] (White, 2010, pág. 31)

“Los sistemas con un solo grado de libertad son aquellos cuya configuración puede definirse mediante una única coordenada. Estos sistemas pueden utilizarse como una primera aproximación a sistemas complejos ayudando a comprender de mejor manera su comportamiento.” [11] (Albarracín Méndez & Huiñisaca Quizhpe, 2015)

En un MCIA según [12] (Matienzo, 1996) “La fuerza de los gases tiene un contenido de frecuencias concentrado en la zona de bajas frecuencias, desde 0 a 2-3 kHz, capaz de excitar frecuencias naturales de la estructura del bloque. Las cargas de impacto surgen en el mecanismo de distribución, por la holgura térmica en el accionamiento de las válvulas”, lo que indica que en los MCIA, una pequeña excitación en el sistema, aumentan las frecuencias provocando diferencia en las señales de entrada, convirtiéndose en un sistema no lineal.

#### **4.4.3 Análisis de Frecuencia**

Para reducir las limitaciones del análisis de la forma de onda, lo óptimo es llevar a cabo un análisis de frecuencias, también llamado análisis de espectro de la señal de vibración. La gráfica en el dominio del tiempo se conoce como forma de onda, y la gráfica en el dominio de la frecuencia se llama espectro frecuencial.



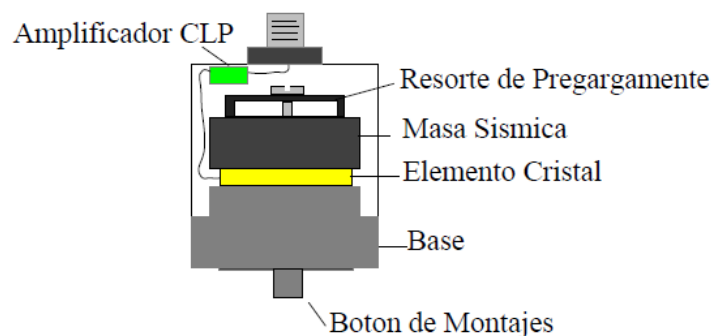
**Figura 20:** (a) Dominio de tiempo vs (b) Dominio de frecuencia. **Fuente:** Los Autores.

En la Figura 20(a) se ven algunos eventos confusos en el dominio de tiempo y contiene una gran cantidad de información que no es aparente, dicha información se puede observar en la Figura 20(b) en el dominio de la frecuencia.

#### 4.4.3.1 Transductor de Medición – Acelerómetro

Se conoce como transductor a un elemento capaz de convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica, con el fin de proporcionar una salida utilizable de una magnitud física que se desea medir. [13] (PICKUPS, 2016)

Se puede considerar al acelerómetro piezo eléctrico como el transductor estándar para la medición de vibración en máquinas. Se produce en varias configuraciones, pero para describir el principio de operación de este elemento se basa en un sensor de tipo a compresión que se observa en la Figura 21.



**Figura 21:** Acelerómetro piezo eléctrico. **Fuente:** [1] (White, 2010, pág. 55)

La masa sísmica está sujeta a la base con un perno axial, que se apoya en un resorte circular. El elemento piezo eléctrico está ajustado entre la base y la masa. Cuando una materia (cuarzo) está sujeta a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies. Si se incrementa la temperatura de un material piezo eléctrico, se va llegar al llamado "punto curie" o "temperatura curie" y se pierde la propiedad piezo eléctrica. [1] (White, 2010, pág. 55)

#### **4.4.4 Formas de la Transformada de Fourier**

A continuación mencionamos las cuatro formas de la transformada de Fourier:

##### **4.4.4.1 La serie de Fourier**

La operación de la Serie de Fourier está basada en una señal de tiempo que es periódica. Dicha forma se repite en una cantidad infinita de veces. Fourier demostró que una señal de este tipo es equivalente a una colección de funciones senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos del recíproco del periodo de la señal de tiempo. El resultado un poco inesperado es que cualquier forma de onda, siempre y cuando no sea infinita en longitud se puede representar como la suma de una serie de componentes armónicos, y la frecuencia fundamental de la serie de armónicos es 1 entre la longitud de la forma de onda. Las amplitudes de los varios armónicos se llaman los coeficientes Fourier, y sus valores se pueden calcular fácilmente si se conoce la ecuación para la forma de onda. También se puede calcular gráficamente la forma de onda. [1] (White, 2010, pág. 59)

La serie de Fourier de una función periódica  $f(x)$  de periodo  $T$ , también conocida como señal, definida en un intervalo de longitud  $T$  está dada por la Ecuación (1).

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [\cos(n\omega_0 x) + b_n \text{sen}(n\omega_0 x)] \quad (1)$$

##### **4.4.4.2 Los Coeficientes de Fourier**

El cálculo de los coeficientes de Fourier se define como una transformada matemática del dominio de tiempo hacia el dominio de frecuencia. Un hecho importante que se puede ver de la Serie de Fourier es que la forma de onda original se puede reconstruir a partir de los coeficientes de frecuencia. En otras palabras, es

posible transformar del dominio de frecuencia y regresar hacia el dominio de tiempo sin que se pierda la información. La Serie de Fourier está perfectamente adaptada para realizar el análisis de frecuencia en formas de ondas periódicas, eso es en señales deterministas. [1] (White, 2010, pág. 59)

Donde, la Ecuación (2) indica la frecuencia fundamental, mientras las Ecuaciones (3), (4) y (5) permiten el cálculo de los coeficientes.

$$\omega_o = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

$$a_o = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) dx \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(n\omega_o x) dx \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \sen(n\omega_o x) dx \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (5)$$

#### 4.4.4.3 La Transformada Integral de Fourier

La extensión natural de la Serie de Fourier para abarcar señales de tiempo de una longitud infinita, estas son señales no repetitivas continuas, es la Transformada Integral de Fourier, o más sencillo la Transformada de Fourier. Esta integración transformará cualquiera señal continua de tiempo de forma arbitraria en un espectro continuo con una extensión de frecuencias infinita. Una característica interesante de la Transformada de Fourier es el hecho que un evento que abarca un periodo de tiempo corto se extenderá sobre un largo rango de frecuencias o viceversa. [1] (White, 2010, pág. 59)

La transformada integral de Fourier está representada en las Ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10), siendo la ultima la denotación final.

$$f(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-T}^T f(t) [\cos(n\omega_o t) * \cos(n\omega_o x) + \sen(n\omega_o t) * \sen(n\omega_o x)] dt \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-T}^T f(t) \cos(n\omega_o t - n\omega_o x) dt \quad (7)$$

$$f(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt + \frac{1}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-T}^T f(t) \cos(n\omega_0(t-x)) dt \quad (8)$$

$$f(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos(n\omega_0(t-x)) dt \quad (9)$$

$$f(x) = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t) dt + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi}{T} F_T(n\omega_0) dt \quad (10)$$

Dónde:

$$F_T(y) = \int_{-T}^T f(t) \cos(y(t-x)) dt \quad (11)$$

#### 4.4.4.4 La Transformada Discrecional de Fourier

Ni la Serie de Fourier, ni la Transformada de Fourier se prestan fácilmente para cálculos en computadoras digitales. Para vencer este impedimento, la llamada Transformada Discrecional de Fourier fue desarrollada. (TDF). Probablemente la primera persona que concibió la TDF fue Wilhelm Friedrich Gauss, el famoso matemático alemán, del siglo XIX, aunque por cierto él no tenía una computadora digital en la que podría implementarla. La TDF opera con una señal de muestras-o discreta- en el dominio del tiempo. A partir de esta se genera un espectro de muestras -o discreto- en el dominio de la frecuencia. El espectro que resulta es una aproximación de la Serie de Fourier, una aproximación en el sentido que se perdió la información entre las muestras de la forma de onda. La clave hacia la TDF es la existencia de una forma de onda de la que se tomaron muestras, esto es la posibilidad de representar la forma de onda en una serie de números. [1] (White, 2010, pág. 60)

En la Ecuación (12) se tiene la notación de Euler.

$$e^{j\frac{2\pi}{N}n} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

En la Ecuación (13) se indica la nulidad de recorrido frente a la suma de los recorridos.



$$\sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}n} = 0 \quad \forall N \geq 2 \quad (13)$$

En la Ecuación (17) se presenta la periodicidad frecuencial.

$$e^{j(k+\beta N)\frac{2\pi}{N}n} = e^{jk\frac{2\pi}{N}n + jk\frac{2\pi}{N}n\beta N} \quad (14)$$

$$= e^{jk\frac{2\pi}{N}n + jk2\pi\beta} \quad (15)$$

$$= e^{jk\frac{2\pi}{N}n} e^{jk2\pi\beta} \quad (16)$$

$$= e^{jk\frac{2\pi}{N}n} \quad (17)$$

Y por último en la Ecuación (20) se muestra la componente espectral.

$$X = |X|e^{j\theta} \quad (18)$$

$$Xe^{jk\frac{2\pi}{N}n} \quad (19)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn}; n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (20)$$

#### 4.4.4.5 La Transformada Rápida de Fourier

Para adaptar la TDF para uso con computadoras digitales, la llamada Transformada Rápida de Fourier fue desarrollada. La FFT es un algoritmo para calcular la TDF de manera ágil y segura. [1] (White, 2010, pág. 60)

En la ecuaciones (21) y (22) se presenta la FFT.

$$\hat{f}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (21)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(w) e^{-i\omega x} dw \quad (22)$$

Las ecuaciones fueron obtenidas de: [14] (Kreysig, 2003)

#### **4.4.5 Análisis de vibraciones en MCIA**

Actualmente existen investigaciones realizadas en MCIA en base a la aplicación de la técnica del mantenimiento preventivo de análisis de vibraciones, un estudio reciente que titula “Diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna a gasolina Hyundai Accent DOHC 1.5L mediante análisis de vibraciones” que presenta el diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna Hyundai Accent 1.5L mediante análisis de vibraciones, en el cual mediante el uso de un diseño experimental se adquirió las señales vibro acústicas, las que fueron procesadas mediante la Transformada de Fourier; para el posterior análisis de resultados por Comparación Espectral y Análisis de Componentes Principales (ACP), en la cual concluye que al realizar el análisis de vibraciones mediante ACP se obtiene un 75% de información, el comportamiento de las variables de salida, en los regímenes de giro del motor a 700 rpm, 1600rpm y 2500 rpm. Indistintamente de el régimen de giro los valores de Varianza, Potencia, Energía, RMS, Factor de cresta y Curtosis tienen más variación; estos valores pueden ser altos o bajos al implementar una bomba con o sin desgaste, y utilizando cualquier tipo de aceite, además al realizar un ACP se proporciona datos que en el análisis espectral no se pueden observar siendo este último un método visual.

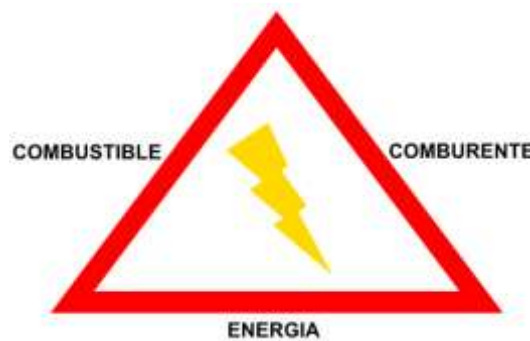
En otra investigación que titula “Detección de fallas a través de análisis de vibraciones mediante la transformada de Wavelets de un motor de combustión interna Sonata 2.0 a gasolina” presenta el análisis de vibraciones de un motor de combustión interna alternativo, mediante análisis de frecuencias y la transformada de Wavelet, en donde se realiza un estudio de la forma de la señal temporal y de la energía de dicha señal, para extraer así algunos de los valores característicos, esta metodología se presenta como beneficio para la optimización del mantenimiento de MCIA, en la cual concluye que al realizar un análisis mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) y la transformada continua de Wavelet (CWT), donde al realizar el análisis con FFT no permite diferenciar considerablemente una señal de otra por lo que no es un método adecuado para la detección y caracterización de fallas minúsculas o insipientes que se reflejan en las señales de vibración, mientras tanto, con la CWT permite obtener un plano escala-tiempo que magnifica la forma de una señal y determinar la escala con mayor contenido energético y por tanto con mayor

información de la señal, además que, la CWT permite simplificar una señal a su expresión más compacta conservando la mayoría de sus características originales, sin embargo, no se puede detectar si la información perdida es o no relevante.

#### 4.5 Emisión de Gases de Escape

Los gases emitidos por el escape son todos los gases que se dan en la combustión, por ello es que se tiene claro los elementos que conforman la misma. Para que la combustión sea posible se tiene estos elementos que se indican a continuación:

- **Energía de activación**, mínima cantidad de energía necesaria para que se produzca la reacción en cadena.
- **Combustible**, sustancia que reacciona con otra sustancia que aporta toda la energía en la combustión.
- **Comburente**, sustancia necesaria para que reaccione el combustible.



**Figura 22:** Triángulo de fuego. **Fuente:** Los Autores.

##### 4.5.1 Componentes de los Gases de Escape

En una combustión real nos podemos encontrar varios compuestos:

- **Inofensivas:** Nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, hidrógeno y vapor de agua.
- **Nocivas:** Monóxido de carbono, Hidrocarburos no combustionados, óxidos de nitrógeno, plomo y sus compuestos, dióxidos de azufre, hollín, etc.

#### 4.5.2 Fuentes de Emisión en MCI

- **Emisiones por el bloque,** Debido a las holguras de ajuste que existen entre los aros de los pistones, parte de los gases de combustión pasan a la parte baja del motor, es decir, al cárter; dichos gases deben ser evacuado porque de no ser así afectarían a la vida útil de retenes y juntas. La manera de eliminar estos gases es enviarlos por medio de una desairación del cárter a la admisión para quemarlos.
- **Emisiones por evaporación,** Se deben a la volatilidad del combustible sobre todo la gasolina.
  - **El carburador:** En nuestro medio aún se tiene vehículos de este tipo de alimentación de combustible por lo que es importante destacar; en los vehículos actuales este problema no existe ya que en el sistema de inyección es totalmente hermético.
  - **El depósito:** Estos vapores se forman con el motor en reposo, cuando el motor está en marcha el consumo de gasolina impide que la presión interna del depósito aumente evitando gran parte de estos gases volátiles.
  - **Válvula de respiración de dos direcciones:** Tiene dos funciones la primera dejar entrar aire al depósito a medida que se va consumiendo el combustible, la segunda, cuando los vapores del combustible hacen que la presión dentro del depósito alcance un determinado valor, esta válvula los evacua a un deposito llamado canister.
- **Emisiones por el escape,** son las que se producen por la combustión, es decir la liberación de energía del fluido.

#### 4.5.3 Normativa Ecuatoriana de Gases de Escape

La normativa que rige en nuestro país es la NTE INEN 2204, que establece los límites permitidos de emisiones contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres, vehículos automotores de gasolina. A continuación en la Tabla 1 se indica los valores máximos permisibles en ralentí.

**Tabla 1:** Límites permisibles de emisiones. **Fuente:** [15] NTE INEN 2204

<b>Año modelo</b>	<b>% CO*</b>		<b>ppm HC*</b>	
	<b>0 – 1500 **</b>	<b>1500 – 3000 **</b>	<b>0 – 1500 **</b>	<b>1500 – 3000 **</b>
<b>2000 y posteriores</b>	1,0	1,0	200	200
<b>1990 a 1999</b>	3,5	4,5	650	750
<b>1989 y anteriores</b>	5,5	6,5	1000	1200

\*Volumen  
 \*\*Altitud = metros sobre el nivel del mar (msnm).

#### 4.5.4 Análisis de Gases de Escape

Para el análisis de los gases de escape se realiza mediante un proceso de análisis residual, un residual es la diferencia entre el valor observado y el valor estimado por la línea de regresión. El residual puede ser considerado como el error aleatorio observado. También se acostumbra usar el Residual estandarizado, el cual se obtiene al dividir el residual entre la desviación estándar del residual (al realizar un análisis residual debemos utilizar Residual estandarizado). El análisis residual se puede llevar a cabo gráficamente o en forma analítica.

El análisis residual permite cotejar si las suposiciones del modelo de regresión se cumplen.

Mediante el proceso de análisis residual se puede detectar:

- Si efectivamente la relación entre las variables X y Y es lineal.
- Si hay normalidad de los errores.
- Si hay valores anormales en la distribución de errores (Si se usa Residual estandarizado, cualquier observación con un residual mayor de 2 o menor de 2 es considerado “outlier”).
- Si hay varianza constante (propiedad de Homocedasticidad).
- Si hay independencia de los errores.

Posterior a esto se puede optimizar la respuesta configurando los factores de entrada de acuerdo a las necesidades, es decir, que nos muestra una estructuración adecuada para obtener la respuesta deseada, todo esto se realiza con la ayuda de MINITAB.

## 5. MARCO METODOLOGICO

El análisis se basa en la implementación del diseño experimental, el cual consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación. [16] (Gutierrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008, pág. 5)

### 5.1 Implementación del diseño experimental

Para la adquisición de datos de señales vibratorias y emisión de gases de escape se creó un diseño experimental, basado en diferentes estados que varían de acuerdo a la configuración de los factores de entrada como son: la holgura entre vástago y guía de válvula, grado de viscosidad del lubricante y aditivo para la variación de la viscosidad del lubricante, establecidos para el estudio.

#### 5.1.1 Unidad experimental

La presente investigación fue desarrollada sobre un motor Hyundai Accent que se muestra en la Figura 23 cuyas características y especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.



**Figura 23:** Motor Hyundai Accent. **Fuente:** Los Autores.

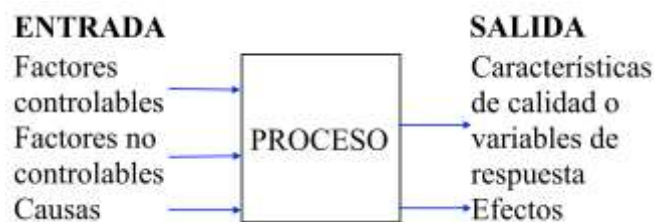
**Tabla 2:** Datos del motor Hyundai Accent. **Fuente:** Acondicionada por los Autores de [7] (Hyundai Group, 1994)

Hyundai Accent	
<b>Motor</b>	Alpha II
<b>Modelo</b>	G4FK
<b>Cilindrada</b>	1.5 L
<b>Potencia Máxima</b>	74 KW @ 6000 RPM
<b>Par Máximo</b>	134 Nm @ 4000 RPM
<b>Relación de Compresión</b>	9.5:1
<b>Distribución</b>	DOHC

### 5.1.2 Modelo experimental para la adquisición de datos de señales vibratorias y emisión de gases de escape.

Para la obtención de las señales se emplea el método de superficie de respuesta (modelo Box – Behnken), este método nos permite aplicar una estrategia experimental y de análisis que permite resolver la hipótesis de encontrar las condiciones de operación óptimas del proceso.

En la Figura 24 se aprecia un diagrama de bloques de las variables del proceso a realizar.



**Figura 24:** Diagrama de bloques de variables de un proceso. **Fuente:** Los Autores.

Para este experimento se utilizan tres variables que influyen directamente sobre la respuesta de las señales a obtener.

### 5.1.2.1 Factores de estudio

Son variables que se investigan en el proceso para saber cómo influye en las variables de respuesta.

En este experimento se utiliza como variables de entrada, el juego entre guías y válvulas de un cilindro producto del desgaste, grado de viscosidad del aceite y aditivo para modificar la viscosidad del aceite.

El desgaste que presenta la válvula entre guía y vástago provoca que el aceite pase desde la parte superior del motor hacia la cámara de combustión afectando directamente la emisión de gases contaminantes, por otro lado, la holgura al incrementarse crea un golpeteo que será percibida mediante las señales de vibración. El desgaste se provocó en las válvulas de admisión y escape de un cilindro en la misma proporción para poder percibir de una forma global, como se puede apreciar en la Figura 25.



**Figura 25:** Válvulas de un cilindro. **Fuente:** Los Autores.

La viscosidad del aceite es un factor importante porque actúa directamente sobre el motor como sellante, para este experimento se utiliza lubricantes con el grado de viscosidad que el fabricante indica, además de usar mezclas con un aditivo para modificar la viscosidad de los diferentes tipos de aceites. (Figura 26)





**Figura 26:** Aditivo y aceite. **Fuente:** Los Autores.

En la Tabla 3 se indican los valores que se tienen como variables de entrada para este experimento.

**Tabla 3:** Variables de entrada. **Fuente:** Los Autores.

Factor	Nivel Bajo	Nivel Medio	Nivel Alto
Holgura de Válvula (guía-vástago)	0,00	0,10	0,20
Grado de Viscosidad	15,6	33,645	51,69
Aditivo	0,00	0,50	1

Con las variables de entrada descritas con anterioridad, el método de superficie de respuesta nos brinda una metodología adecuada para la obtención de señales de vibración y emisión de gases contaminantes, este diseño consta de 15 corridas base con tres repeticiones, teniendo un total de 45 corridas, tal y como se detalla en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Corridas experimentales. **Fuente:** Los Autores.

Orden	Viscosidad	Holgura	Aditivo	Orden	Viscosidad	Holgura	Aditivo	Orden	Viscosidad	Holgura	Aditivo
<b>1</b>	15,6	0	50	<b>16</b>	15,6	0	50	<b>31</b>	15,6	0	50
<b>2</b>	51,69	0	50	<b>17</b>	51,69	0	50	<b>32</b>	51,69	0	50
<b>3</b>	15,6	20	50	<b>18</b>	15,6	20	50	<b>33</b>	15,6	20	50
<b>4</b>	51,69	20	50	<b>19</b>	51,69	20	50	<b>34</b>	51,69	20	50
<b>5</b>	15,6	10	0	<b>20</b>	15,6	10	0	<b>35</b>	15,6	10	0
<b>6</b>	51,69	10	0	<b>21</b>	51,69	10	0	<b>36</b>	51,69	10	0
<b>7</b>	15,6	10	100	<b>22</b>	15,6	10	100	<b>37</b>	15,6	10	100
<b>8</b>	51,69	10	100	<b>23</b>	51,69	10	100	<b>38</b>	51,69	10	100
<b>9</b>	33,645	0	0	<b>24</b>	33,645	0	0	<b>39</b>	33,645	0	0
<b>10</b>	33,645	20	0	<b>25</b>	33,645	20	0	<b>40</b>	33,645	20	0
<b>11</b>	33,645	0	100	<b>26</b>	33,645	0	100	<b>41</b>	33,645	0	100
<b>12</b>	33,645	20	100	<b>27</b>	33,645	20	100	<b>42</b>	33,645	20	100
<b>13</b>	33,645	10	50	<b>28</b>	33,645	10	50	<b>43</b>	33,645	10	50
<b>14</b>	33,645	10	50	<b>29</b>	33,645	10	50	<b>44</b>	33,645	10	50
<b>15</b>	33,645	10	50	<b>30</b>	33,645	10	50	<b>45</b>	33,645	10	50

### 5.1.2.2 Factores controlables

Son variables de proceso que se pueden fijar en un punto o un nivel de operación. Para este experimento se establecieron factores que pueden afectar la respuesta pero se los puede manejar entre un rango a los parámetros, como se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Factores Controlables. **Fuente:** Los Autores.

<b>Factor Controlable</b>	<b>Rango</b>
<b>RPM</b>	1560
<b>Temperatura del Refrigerante</b>	83,2 – 84,8 °C
<b>Temperatura de Ingreso del Aire</b>	41,3 – 45 °C

Para el control de estos factores se hace uso del escáner automatizado, los parámetros se observa en la Figura 27.

CURRENT DATA		28/ 31
*MAP SENSOR.....	19.8	kPa
*INTAKE AIR TEMP.SENSOR.	41.3	°C
*COOLANT TEMP.SENSOR....	84.8	°C
*THROTTLE POSITION SNSR.	663	mV
*ENGINE SPEED.....	1523	rpm
IGNITION TIMING.....	31	°
INJECTOR DURATION-BANK1	2.4	mS
INJECTOR DURATION-BANK2	8.7	mS
INJECTOR DURATION-BANK3	2.4	mS
INJECTOR DURATION-BANK4	2.4	mS
EMP. BURGE VALVE.....	5.9	x
FUEL PUMP RELAY.....	ON	
I: Graph		ENTER: Fix

**Figura 27:** Pantalla de escáner automotriz. **Fuente:** Los Autores.

### 5.1.2.3 Factores no controlables

Son variables que no se pueden controlar durante la operación normal del proceso. En este experimento se consideró que la humedad relativa, la temperatura ambiente y la carga del motor, presentan condiciones similares al momento de realizar las corridas experimentales, la última debido a que se utilizó un banco didáctico eliminando la carga.

### 5.1.2.4 Niveles y Tratamientos

Se conoce como niveles cada parámetro de un factor, y tratamiento es la combinación entre factores de los distintos niveles.

### 5.1.2.5 Variables de respuesta

Las variables de respuesta dan a conocer el resultado de cada prueba experimental. Para este experimento se establece como variables de respuesta la señal de vibración y emisión de gases contaminantes que serán extraídas de cada prueba experimental.

## 5.2 Adquisición de señales vibratorias y gases contaminantes

### 5.2.1 Scanner Automotriz

El escáner presentado en la Figura 28 es de vital importancia para la adquisición de datos tanto de señales vibratorias como de gases contaminantes, debido que con este instrumento se controla que los parámetros establecidos en la Tabla 6 sean los adecuados.



**Figura 28:** Escáner automotriz. **Fuente:** Los Autores.

**Tabla 6:** Características de los elementos de medición para la obtención de datos vibratorios. **Fuente:** Los Autores.

Descripción	Rango
Temperatura de ingreso del aire	41,3 – 45 °C
Velocidad del motor	1560 rpm
Sensor de temperatura del refrigerante	83,2 – 84,8 °C
Ventilador	OFF

### 5.2.2 Adquisición de señales vibratorias

Para la adquisición de datos vibratorios para el presente proyecto se utilizaron los siguientes elementos de medición:

- Analizador de señales acústicas ADASH. (Figura 29)
- Acelerómetro uniaxial.
- Escáner Automotriz.

**Tabla 7:** Características de los elementos de medición para la obtención de datos vibratorios. **Fuente:** [17] Erbesd Instruments

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS
1	<p>Analizador de señales acústicas ADASH</p> <p>Modelo: A3716 2 U</p> <p>N° Serie: 624971</p>	<p><b>16 canales AC:</b> Permite la entrada analógica de sensores como micrófono.</p> <p><b>4 canales de taco:</b> permite la conexión de un taco o algún sensor con la finalidad de sincronización de señales.</p> <p><b>16 canales DC:</b> Permite la entrada digital de señales producidas por sensores digitales.</p> <p><b>Software de adquisición y configuración:</b> Permite la configuración de cada uno de los sensores conectados sobre el equipo Adash® A3716</p> <p><b>Software de visualización en línea:</b> Permite la visualización de las señales obtenidas tanto en tiempo como en frecuencia para su correspondiente análisis</p>
2	<p>Acelerómetro uniaxial.</p> <p>Marca ACS</p> <p>Modelo ACS: 3411LN</p> <p>Sensibilidad: 102mV/g</p> <p>Grado de protección: IP67</p>	<p>Fabricación a prueba de agua.</p> <p>Acelerómetro unidireccional con regulador de voltaje, amplificador y un filtro que limpia la señal analógica digital de 5000 Hz.</p> <p>Ensamble fabricado de acero inoxidable.</p>



**Figura 29:** Adash® A3716. **Fuente:** Los Autores.

“La norma ISO 10816-6:1995 Vibraciones mecánicas: evaluación de vibraciones en máquinas mediante la medición en piezas no rotativas”, indica la posición adecuada del acelerómetro sobre el objeto de medición de las señales vibratorias en la cual sugiere que el acelerómetro debe ir ubicado lo más cerca posible perpendicular al objeto u elemento a estudiar [18] (válvulas del primer cilindro del block motor).

Existen diferentes formas de acoplamiento de un acelerómetro para la adquisición de tales como:

- **Pulso**, esta forma de acoplamiento es la menos adoptada ya que consiste que el operador mantenga situado el acelerómetro sobre el punto de medición, lo que implica una baja exactitud en la tomas de señales vibratorias.
- **Imán**, el acelerómetro lleva implantado en su parte frontal un imán lo que permite el acoplamiento del mismo hacia el elemento a ser estudiado, es una de los acoplamientos más utilizados en la industria.
- **Roscado**, el acelerómetro lleva mecanizado en su parte frontal un rosca lo que permite al mismo ser roscado hacia la superficie del elemento a ser estudiado, este tipo de acoplamiento es el más apto para tomar señales vibratorias más exactas ya que al ser roscado en la superficie del elemento a ser estudiado evita vibraciones no deseadas ya sea por elementos externos, no se los utiliza regularmente ya que para ser acoplado se debería de realizar una rosca en la superficie del elemento a ser estudiado.

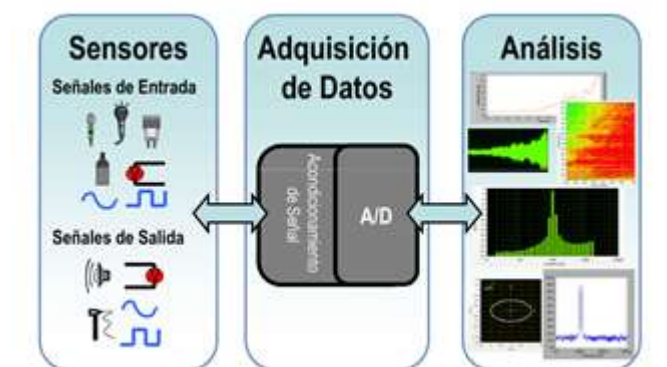
El acelerómetro siempre debe ir conectado en el mismo lugar para la toma de todas muestras, ya que si existe variación las señales vibratorias adquiridas variaran de las muestras patrón, por lo tanto el análisis de las mismas serán erróneos.

Para el proyecto a realizar el acelerómetro se ha ubicado en una platina de hierro cerca al primer cilindro en el cabezote como se puede apreciar en la Figura 30.



**Figura 30:** Posición del Acelerómetro uniaxial. **Fuente:** Los Autores.

En la Figura 31 se observa el proceso de adquisición de datos, partiendo de las señales obtenidas mediante los sensores para su posterior análisis.



**Figura 31:** Componentes de un sistema de sonido y vibración. **Fuente:** [19]  
(Mercado, 2010)

### 5.2.2.1 Aspectos Prácticos en la Medición de Vibración

Para la adquisición de señales vibratorias se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

#### **5.2.2.1.1 Condiciones de Prueba**

La firma de vibración de una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación y de su estado físico.

#### **5.2.2.1.2 Condiciones de operación**

Es imperativo, que cuando se recopilan datos, las RPM de la prueba estén muy cerca de las RPM que se usaron en pruebas anteriores, la velocidad debe ser constante sin variaciones

#### **5.2.2.1.3 Calentamiento**

Todas las máquinas deben ser probadas totalmente calentadas.

Una máquina fría tendrá una firma de vibración diferente de una máquina caliente y esas pueden a veces ser totalmente diferentes.

#### **5.2.2.1.4 Inspección Visual**

Es importante la inspección visual de una máquina en operación mientras que se está probando la vibración, ya que se pueden descubrir indicaciones evaluables acerca del estado de la máquina. Se debe notar las RPM y la presión de descarga. Los puntos siguientes deben ser verificados:

- ¿Hay algunos ruidos inusitados?
- ¿Se puede sentir un nivel de vibración excesivo?
- ¿Hay algo inusitado en la operación de la máquina?
- ¿Hay algunas fugas de vapor o de fluidos aparentes?
- ¿Los valores que indican los parecen normales?

[1] (White, 2010, pág. 76)

#### **5.2.2.2 Protocolo para la toma de muestras de señales vibratorias**

- 1) Preparar y/o disponer de las herramientas a usar.
- 2) Revisar que todos los sensores estén conectados al equipo de monitoreo.



- 3) Revisar que los elementos de medición estén colocados correctamente en el motor.
- 4) Encender el equipo de monitoreo ADASH A3716®.
- 5) Revisar niveles de líquidos del motor.
- 6) Encender el motor.
- 7) Esperar que el motor llegue a su temperatura de funcionamiento, para ello se espera que el ventilador se encienda y apague 3 veces.
- 8) Revisar que la temperatura de funcionamiento del motor este entre (83.2 y 84.8 °C).
- 9) Tomar una muestra de prueba para verificar que todos los elementos de medición estén funcionando correctamente.
- 10) Borrar la prueba de verificación.
- 11) Apagar el motor.
- 12) Preparar el número de prueba a realizar de acuerdo a la matriz del diseño experimental.
- 13) Encender el motor.
- 14) Regular a las rpm establecidas en el DOE.
- 15) Estabilizar el motor en las rpm establecida anteriormente.
- 16) Verificar que los datos del escáner coincida con los datos de la tabla 5.5.
- 17) Revisar que la temperatura del ambiente este entre 27 y 33 °C.
- 18) Realizar la adquisición de datos con el equipo de monitoreo durante 5 segundos.
- 19) Establecer las rpm del motor a ralentí.
- 20) Esperar a que se estabilice el motor.
- 21) Guardar el muestro desarrollado con la codificación.
- 22) Apagar el motor.
- 23) Cambiar el variables de entrada establecido en el diseño experimental
- 24) Repetir el proceso anteriormente descrito para la siguiente muestra.

### **5.2.3 Adquisición de gases contaminantes.**

Para la adquisición de gases contaminantes producidos por la unidad experimental se utilizó un analizador de gases modelo QGA-6000 de la marca QROTECH (Figura

32), el mismo que cuenta con el cálculo de análisis de 4 gases contaminantes como son: HC, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO, así también con los valores de Lambda y AFR.



**Figura 32:** Analizador de gases QGA-6000. **Fuente:** Los Autores.

### **5.2.3.1 Protocolo para la toma de muestra de gases contaminantes.**

- 1) Colocar a punto el motor.
- 2) Instalar el equipo necesario para verificar el número de revoluciones del motor,
- 3) Encender el motor para la adquisición de gases contaminantes.
- 4) Esperar que el motor, se encuentre en la temperatura de trabajo, para ello si el motor esta frio esperar 20 minutos, aproximadamente.
- 5) Limpiar los filtros de la máquina para medir los gases de escape.
- 6) Preparar la máquina para medir los gases de escape.
- 7) Encender y esperar que la maquina se autorregule.
- 8) Colocar la sonda de medición en el tubo de escape del motor.
- 9) Esperar que se regulen los datos en la pantalla des analizador de gases a 1560 rpm
- 10) Tomar los datos de gases contaminantes.
- 11) Apagar el motor.
- 12) Apagar el analizador de gases.
- 13) Repetir el proceso mencionado según el diseño de experimentos establecido.

La toma de datos entre vibraciones y gases de escape se hace conjuntamente por lo que se debe considerar los parámetros establecidos en la Tabla 6.

#### 5.2.4 Nomenclatura utilizada para la adquisición de los datos de vibración y gases contaminantes.

La nomenclatura utilizada para el presente proyecto indica los aspectos necesarios para entender cómo se obtuvo cada señal según las variables de entrada dispuestas por el diseño de experimentos lo cual se indica en la Tabla 8.

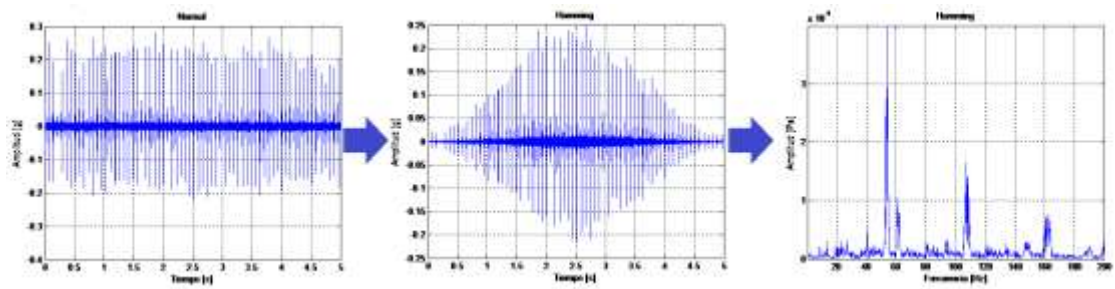
**Tabla 8:** Nomenclatura utilizada para la obtención de datos de señales de vibración y gases contaminantes. **Fuente:** Los Autores.

<b>MOTOR</b>	HYUNDAI	
<b>CILINDRAJE</b>	1,5	
<b>AÑO</b>	2002	
<b>BANCO</b>	IMA090317	
<b>VARIABLES</b>	1	Holgura
	2	Viscosidad
	3	Aditivo
<b>FECHA</b>	Toma de muestra	

La codificación final resulta de la siguiente manera: **HYUNDAI-1,5-2002-IMA090317-1-2-3-FECHA**, esto ayuda a tener ordenado nuestro banco de datos, además, de tener la facilidad de comprobar algún dato en caso de que se requiera.

#### 5.3 Procesamiento de señales adquiridas.

El equipo Adash® A3716 recibe las señales transmitidas por el acelerómetro las mismas que son guardadas en formato .WAV un formato de audio, todas las señales de espectros de vibración adquiridas se encuentran en el dominio del tiempo las mismas deberán ser transformadas al dominio de frecuencia para su respectivo análisis, tal y como se muestra en la Figura 33.



**Figura 33:** Procesamiento de señales. **Fuente:** Los Autores.

Existen diversas formas de transformar una señal acústica del dominio del tiempo a la de la frecuencia mediante las formas de la Transformada de Fourier para su posterior análisis como se citó en el capítulo 4 como son: la serie de Fourier, los Coeficientes de Fourier, la Transformada Integral de Fourier, la Transformada Discrecional de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier, la más utilizada hoy en día es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) la cual mediante un algoritmo realizado con la ayuda del software Matlab nos permite reconocer formatos .WAV, realizar la FFT, filtrar la señal y poder realizar el análisis de los aspectos característicos de un espectro de vibración los cuales se detallaran el próximo capítulo.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se utilizó el análisis de superficie de respuesta. En primer lugar se verifica que los datos obtenidos mediante las diferentes corridas experimentales estén correctos, esto se realiza aplicando ANOVA, con el cual se verifica la característica más representativa de los espectros.

Luego se efectuó un análisis de Gráficas factoriales con la finalidad de observar cómo se comporta cada variable de respuesta con respecto a cada factor y además de corroborar la correlación entre factores.

Finalmente se efectúa un estudio de los armónicos presentes en las distintas bandas frecuenciales de manera visual, que nos permitirá determinar la amplitud de vibración en las diferentes configuraciones del diseño experimental.

## **6.1 Análisis de superficie de respuesta**

Dentro del análisis de superficie de respuesta se realiza un ANOVA, este método se basa en el enfoque en el cual el procedimiento utiliza las varianzas para determinar si las medias son diferentes. El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una manera de determinar si todos los grupos son parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes. [20] (MINITAB, 2016)

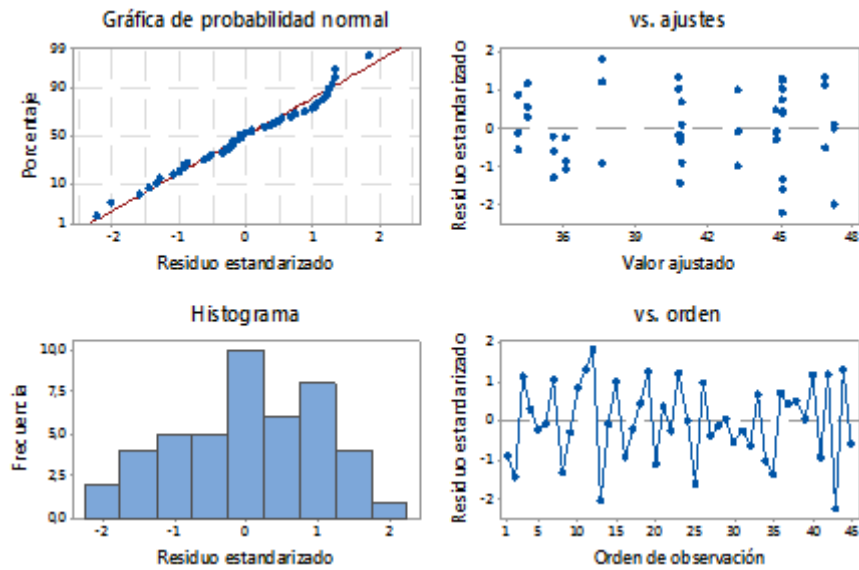
El análisis de residuos que se realiza conjuntamente con lo anterior, nos sirve para revisar la normalidad de los datos, si estos tienen varianza constante, valores atípicos, valores influyentes, simetría de los datos y la aleatorización de la corrida experimental.

En el análisis de Gráficas factoriales se encuentra el análisis de efectos principales, este es primordial porque ayuda a observar el comportamiento de las variables de respuesta según el comportamiento de los factores, además, está el análisis de interacciones que permite observar la correlación entre variables.

### **6.1.1 Análisis de superficie de respuesta para vibraciones**

#### **6.1.1.1 Análisis de residuos para vibraciones**

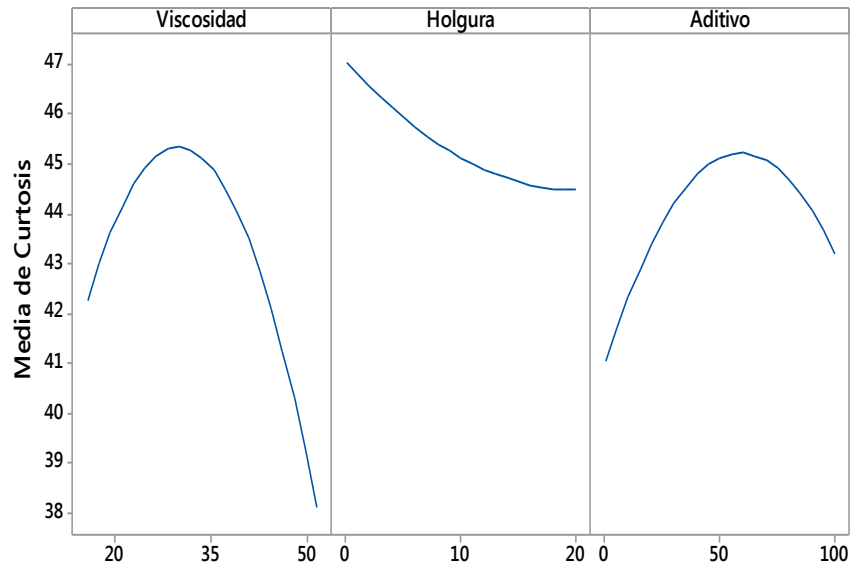
La Figura 34, la gráfica de probabilidad normal indica una distribución uniforme lineal, sin existir valores atípicos. En la gráfica de ajustes se observa que no existe un patrón, por lo tanto, la varianza es constante. El histograma muestra una asimetría con respecto a cero. En la gráfica de orden se observa la aleatorización de la corrida experimental. De lo anterior se concluye que la toma de datos se efectuó de manera correcta, respetando la aleatorización obtenida en el diseño experimental.



**Figura 34:** Gráfica de residuos para Curtosis. **Fuente:** Los Autores.

### 6.1.1.2 Análisis de efectos principales para vibraciones

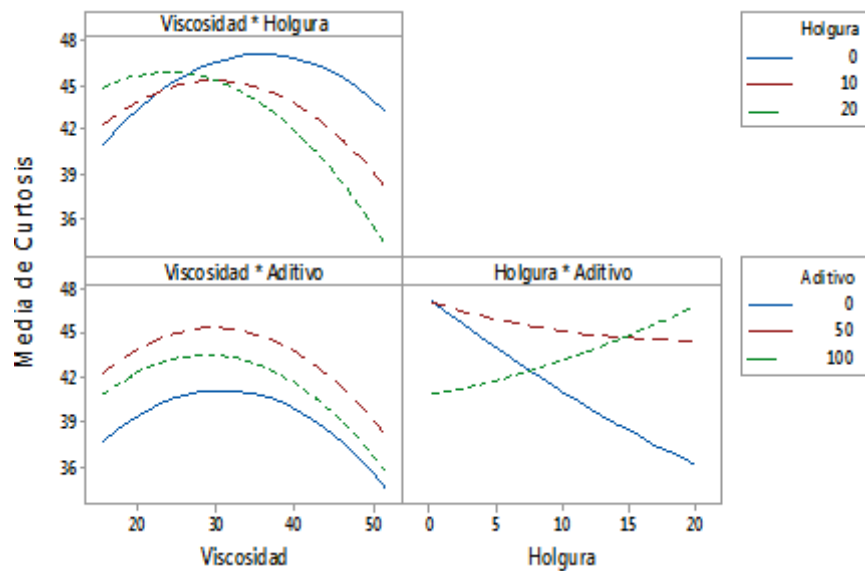
En la Figura 35, se observa cómo se comporta la media con respecto a cada factor. En primer lugar se tiene que con un valor bajo de viscosidad la media se mantiene dentro de un rango de mínimo – máximo, a medida que incrementa este factor también incrementa la media hasta cierto punto, posterior a esto decrece hasta su nivel más bajo con el aceite de mayor viscosidad. En segundo lugar se tiene que la media decrece a medida que la holgura aumenta, no de una manera proporcional. En tercer lugar se tiene un comportamiento similar que la viscosidad, debido que se ve afectada directamente, con la diferencia que la media de un aceite puro es menos que la media de un aceite con aditivo al 100%, por lo tanto, el factor que influye mayormente si se analiza cada factor individualmente es la viscosidad y se tienen efectos principales debido que el comportamiento no es lineal.



**Figura 35:** Gráfica de efectos principales para Curtosis. **Fuente:** Los Autores.

### 6.1.1.3 Análisis de interacciones para vibraciones

En la Figura 36, se observa que los factores que interaccionan son: viscosidad\*holgura y holgura\*aditivo. De esto se concluye que el aditivo utilizado con el aceite, no se relacionan entre sí debido a la calidad o propiedades del aditivo.

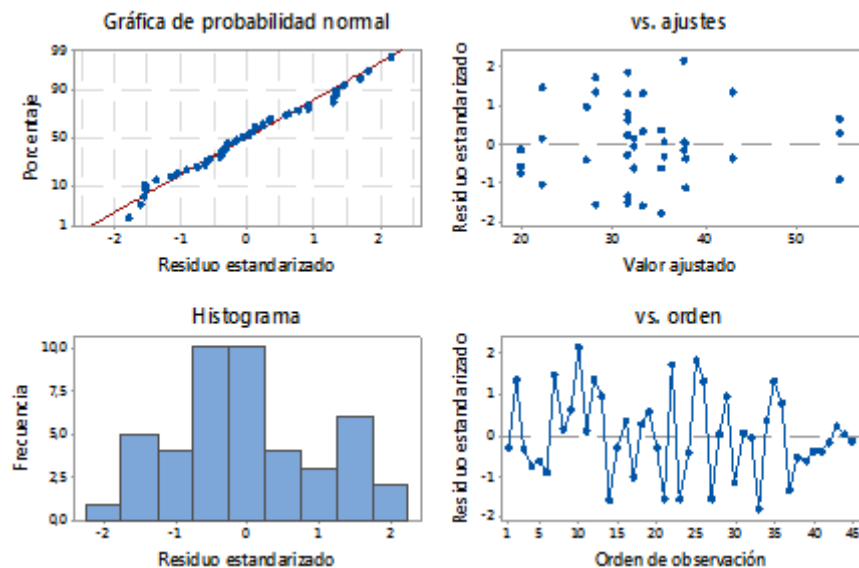


**Figura 36:** Gráfica de interacción para Curtosis. **Fuente:** Los Autores.

## 6.1.2 Análisis de residuos de Emisión de Gases

### 6.1.2.1 Análisis de residuos para hidrocarburos no combustionados (HC)

En la Figura 37, la gráfica de probabilidad normal debido a que presenta curva en las colas muestra asimetría y al tener un punto alejado también indica un valor atípico, poco común. La Gráfica de ajustes no muestra una distribución de los puntos en forma de abanico, la cual indica que tiene varianza constante, además, de valores influyentes, con el histograma se comprueba la asimetría de los datos con respecto a cero, y la gráfica de orden se observa la aleatorización de las muestras que fluctúan alrededor de la línea central, por lo tanto, la toma de muestras es correcta debido a que se respeta la aleatorización obtenida en el diseño experimental.

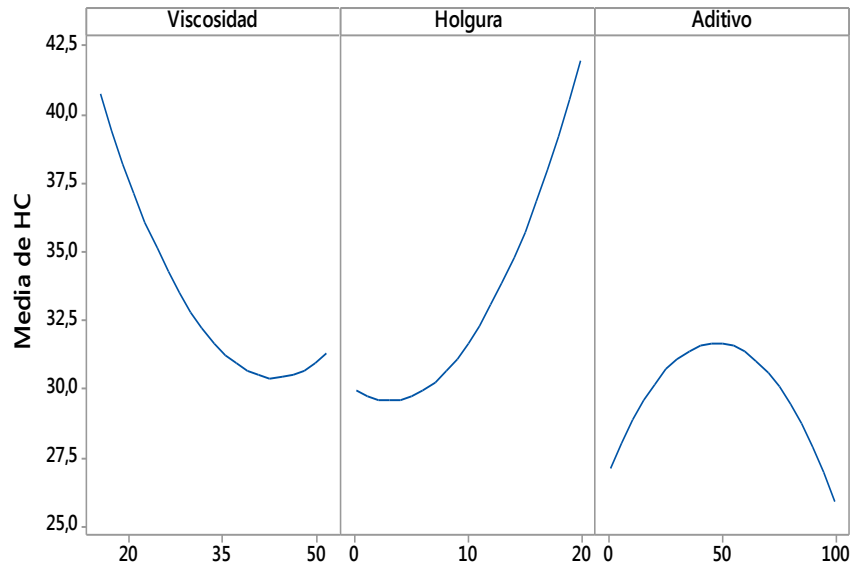


**Figura 37:** Gráfica de residuos para HC. **Fuente:** Los Autores.

### 6.1.2.2 Análisis de efectos principales para hidrocarburos no combustionados (HC)

En la Figura 38, en primer caso tenemos el comportamiento de la viscosidad de manera convexa asimétrica es decir se tiene un valor mínimo entre 35 y 50. En segundo caso con la holgura pasa algo similar que lo anterior con la diferencia que el valor mínimo se tiene entre los valores 0 y 10. En tercer caso el comportamiento del aditivo es cóncavo, es decir, tiene un valor máximo. De esto se concluye que existen efectos principales de cada factor al no tener líneas horizontales, es decir, la respuesta se ve afectada por los factores.

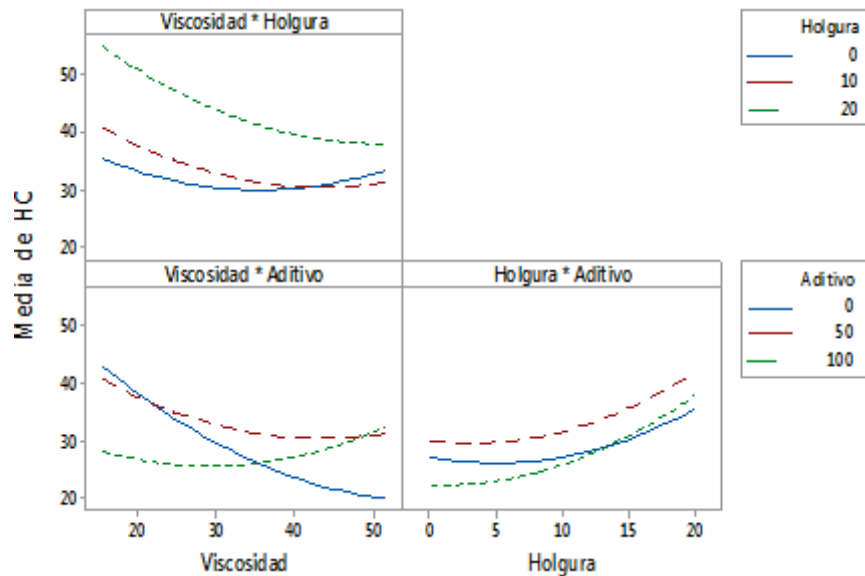




**Figura 38:** Gráfica de efectos principales para HC. **Fuente:** Los Autores.

### 6.1.2.3 Análisis de interacciones para hidrocarburos no combustionados (HC)

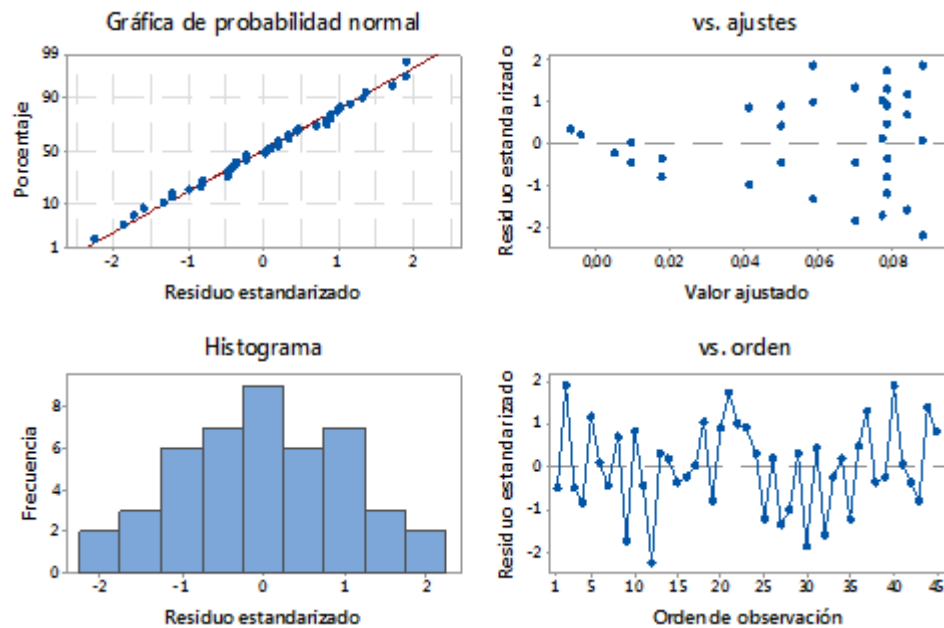
La Figura 39, indica que existe interacción entre factores: viscosidad\*holgura y viscosidad\*aditivo, esto se comprueba con el valor p, valor utilizado para saber si un factor es significativo, este valor tiene que ser menor que el valor de significancia para que exista interacción.



**Figura 39:** Gráfica de interacciones para HC. **Fuente:** Los Autores.

#### 6.1.2.4 Análisis de residuos para monóxido de carbono (CO)

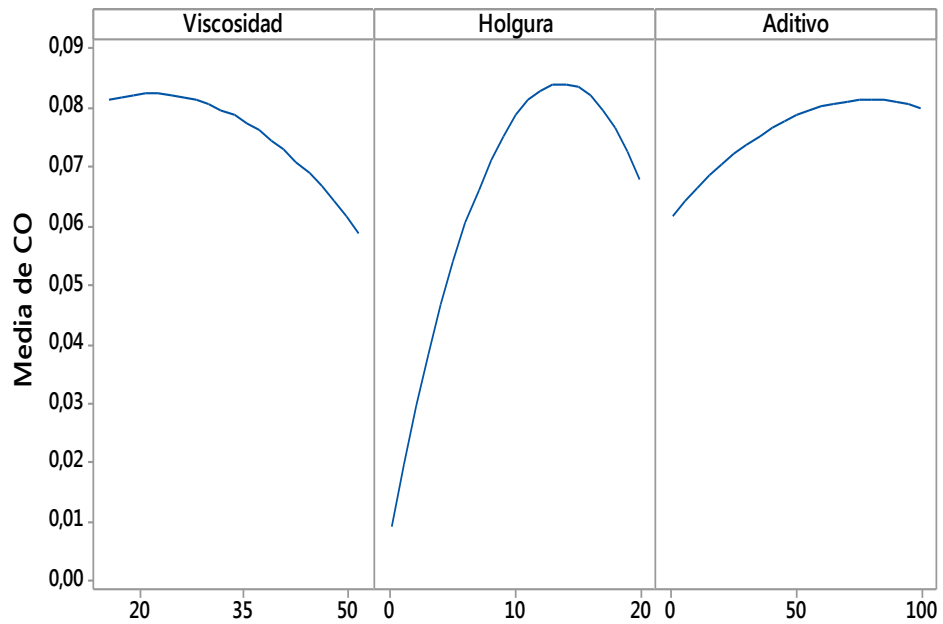
La Figura 40, la gráfica de probabilidad normal indica un valor atípico, la gráfica de ajustes indica que tiene varianza no constante, además del valor atípico, el histograma muestra la simetría de los datos con respecto a cero, y en la gráfica de orden se observa la aleatorización de las muestras que fluctúan alrededor de la línea central. Por lo que se concluye que los datos están correctamente adquiridos.



**Figura 40:** Gráfica de residuos para CO. **Fuente:** Los Autores.

#### 6.1.2.5 Análisis de efectos principales para monóxido de carbono (CO)

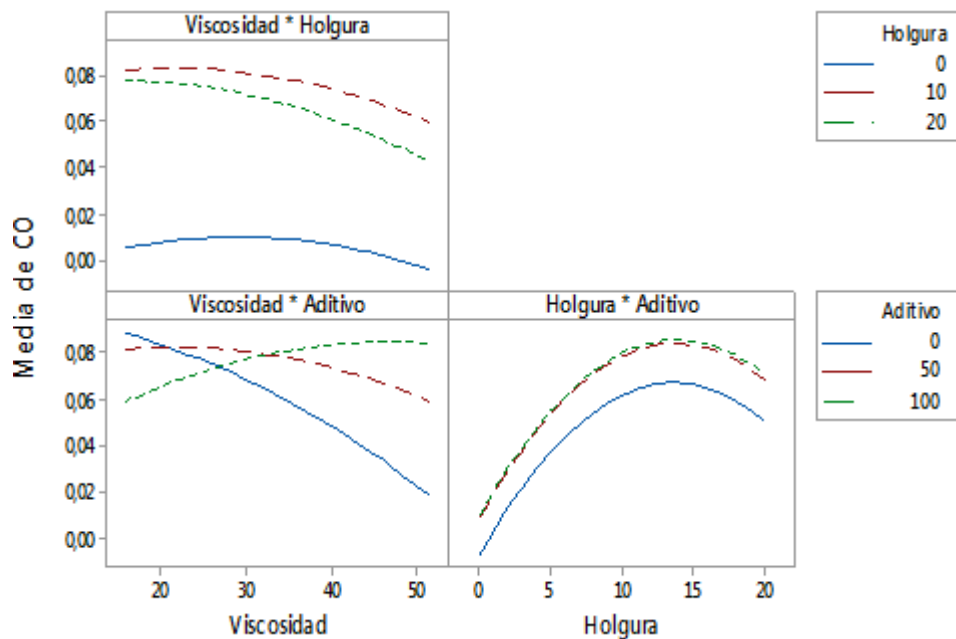
En la Figura 41 se nota el comportamiento de la media con cada factor, con los tres factores se tiene un comportamiento cóncavo, es decir que tienen una media máxima. De esto se concluye que la emisión de monóxido de carbono (CO) se ve afectada por cada factor al no existir líneas horizontales.



**Figura 41:** Gráfica de efectos principales para CO. **Fuente:** Los Autores.

#### 6.1.2.6 Análisis de interacciones para monóxido de carbono (CO)

La Figura 42, indica que existe interacción entre factores viscosidad\*aditivo, esto se comprueba con el valor p, valor utilizado para saber si un factor es significativo, este valor tiene que ser menor que el valor de significancia. De esto se concluye que para la emisión de monóxido de carbono (CO) existe relación solo entre estos factores.



**Figura 42:** Gráfica de interacciones para CO. **Fuente:** Los Autores.

## 6.2 Análisis de espectros patrones

Para el análisis de los espectros patrones se necesita establecer los mismos de cada configuración de factores del diseño experimental, para ello se estableció una nomenclatura, que se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9:** Nomenclatura para las distintas configuraciones del diseño experimental.

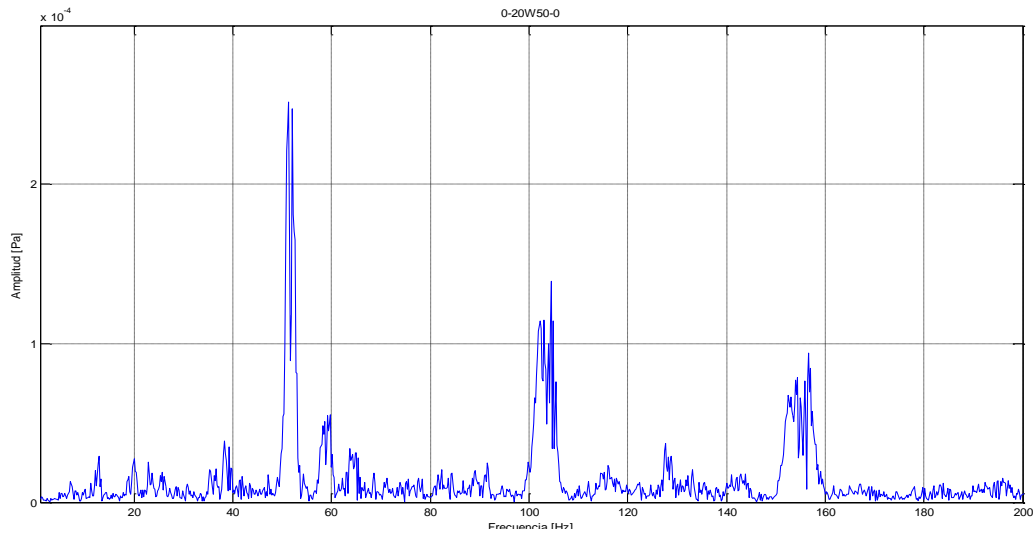
**Fuente:** Los Autores.

<b>Holgura entre vástago y guía de válvula del 0%</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Simbología</b>
Aceite Motor 10W30/Aditivo 50%	IMA090317-0-15,6-50
Aceite Motor 20W50/Aditivo 0%	IMA090317-0-33,645-0
Aceite Motor 20W50/Aditivo 100%	IMA090317-0-33,645-100
Aceite Motor 15W40/Aditivo 50%	IMA090317-0-51,69-50
<b>Holgura entre vástago y guía de válvula del 10%</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Simbología</b>
Aceite Motor 10W30/Aditivo 0%	IMA090317-10-15,6-0
Aceite Motor 10W30/Aditivo 100%	IMA090317-10-15,6-100
Aceite Motor 20W50/Aditivo 50%	IMA090317-10-33,645-50
Aceite Motor 15W40/Aditivo 0%	IMA090317-10-51,69-0
Aceite Motor 15W40/Aditivo 100%	IMA090317-10-51,69-100
<b>Holgura entre vástago y guía de válvula del 20%</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Simbología</b>
Aceite Motor 10W30/Aditivo 50%	IMA090317-20-15,6-50
Aceite Motor 20W50/Aditivo 0%	IMA090317-20-33,645-0
Aceite Motor 20W50/Aditivo 100%	IMA090317-20-33,645-100
Aceite Motor 15W40/Aditivo 50%	IMA090317-20-51,69-50

El espectro patrón se calcula obteniendo la media aritmética de las características de las señales [21] (Bustán & Jarama, 2016) pertenecientes a cada configuración de factores, como son: el porcentaje de la holgura entre válvula y guía, el grado de viscosidad del aceite, y el porcentaje de aditivo.

### 6.2.1 Análisis de espectro patrón con desgaste nulo de la válvula

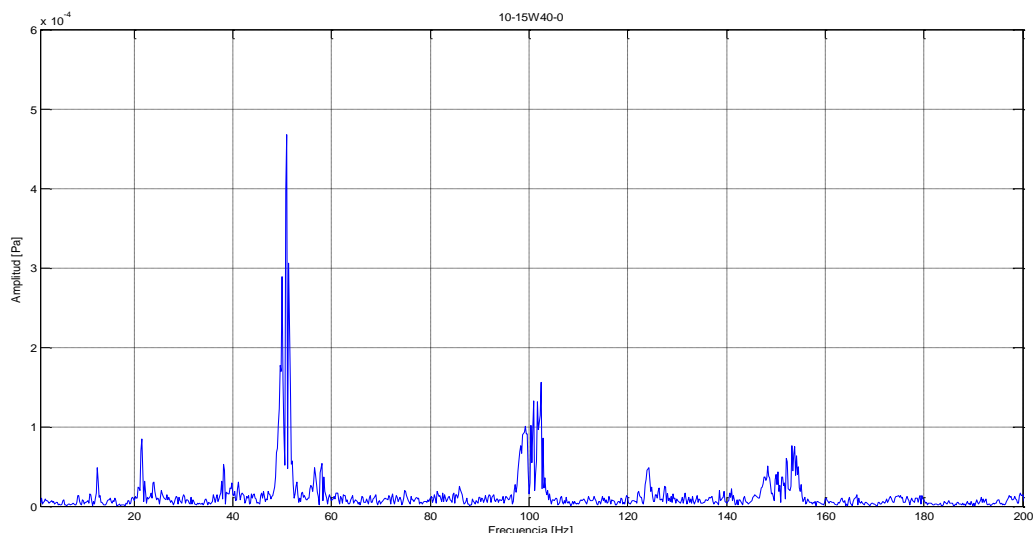
El espectro patrón determinado para un porcentaje de holgura entre guía y vástago de la válvula de 0% o nulo, es la muestra IMA090317-0-33,645-0 (20W50, 0% - aditivo). (Figura 43)



**Figura 43:** Gráfica de espectro patrón con 0% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

### 6.2.2 Análisis de espectro patrón con desgaste al 10% de la válvula

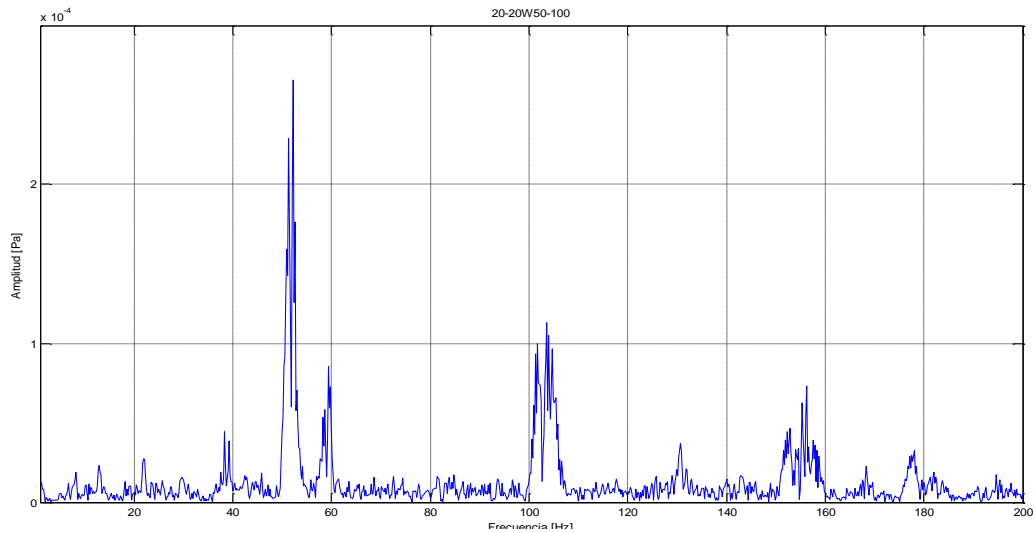
El espectro patrón elegido para cuando el porcentaje de holgura permisible entre guía y vástago de la válvula sea del 10%, es la muestra IMA090317-10-51,69-0 (15W40, 0% - aditivo). (Figura 44)



**Figura 44:** Gráfica de espectro patrón con 10% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

### 6.2.3 Análisis de espectro patrón con desgaste al 20% de la válvula

El espectro patrón elegido para cuando el porcentaje de holgura permisible entre guía y vástago de la válvula de 20%, es la muestra IMA090317-20-33,645-100 (20W50, 100% - aditivo). (Figura 45)



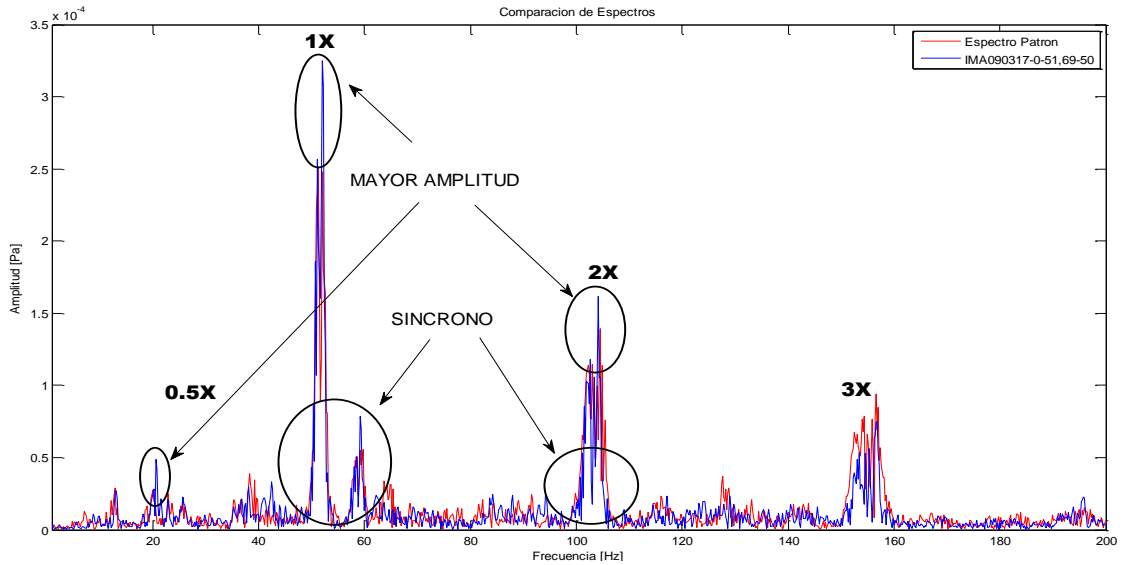
**Figura 45:** Gráfica de espectro patrón con 20% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

En los espectros patrones de la Figuras 43, 44 y 45 se puede apreciar que la distancia entre bandas es igual, además, se observa claramente los valores picos de amplitud en cada banda; los valores de las características temporales y de amplitud de vibración de estos espectros se detallan en las Tablas 10, 11 y 12, respectivamente.

## 6.3 Comparación de espectros con el espectro patrón

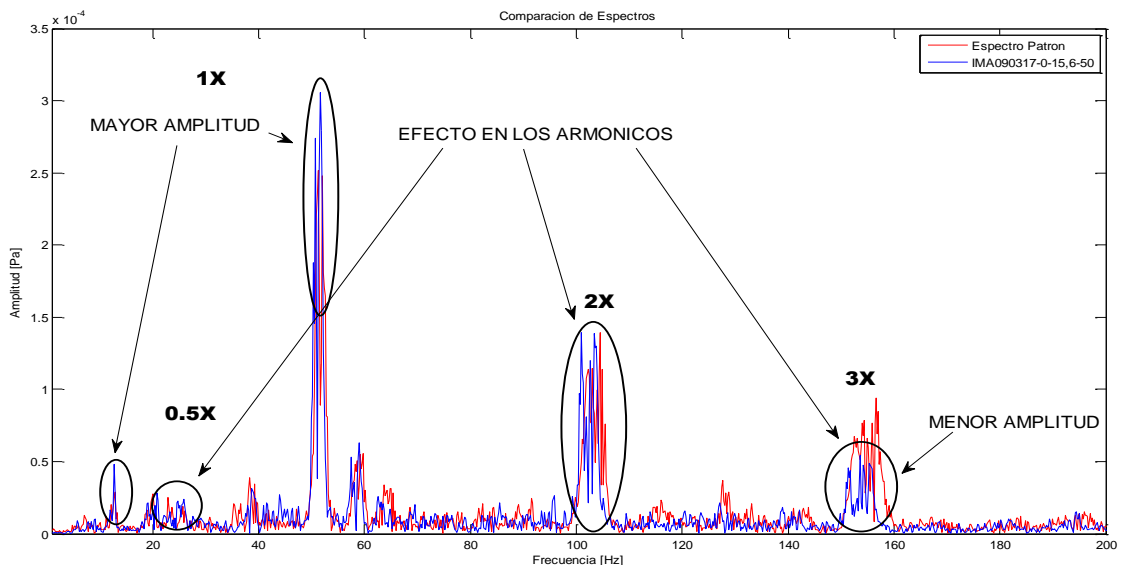
### 6.3.1 Análisis de espectros con desgaste al 0% de la válvula

La Figura 46 se tiene en la banda de 1X, 2X evidencia de frecuencia síncronas, es decir, que tienen una sincronía a través del tiempo de una configuración a otra, en las bandas 0.5X, 1X y 2X se tiene una mayor amplitud, lo que indica que la configuración del aceite patrón es mejor que la de esta comparación.



**Figura 46:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-51,69-50 con espectro patrón con 0% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

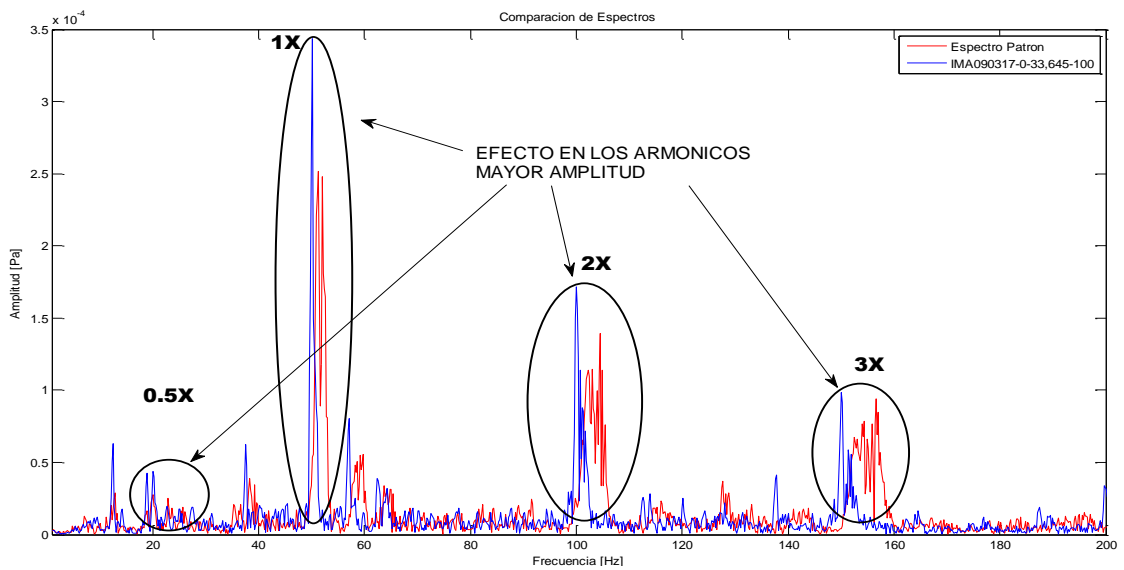
La Figura 47 indica que en las bandas de 0.5X, 2X, y 3X, se tiene efecto en los armónicos, como es la reducción del ancho de banda, también en la banda cercana a 0.5X y 1X se tiene una mayor amplitud de vibración, esto es indicativo de que el aceite es demasiado viscoso por lo que no ingresa en las holguras de forma adecuada.



**Figura 47:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-15,6-50 con espectro patrón con 0% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

La Figura 48 indica que en las bandas 0.5X, 1X, 2X, y 3X existe efecto en los armónicos, además, de un incremento de amplitud en todo el espectro, al igual que el

caso anterior el aceite es demasiado viscoso por lo que no permite que este ingrese entre las holguras.

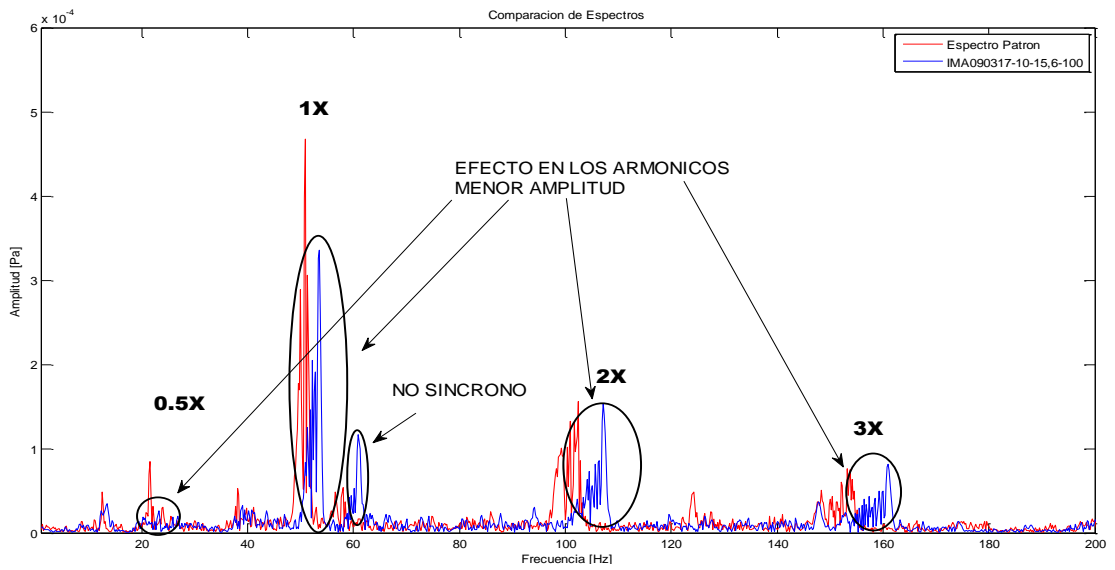


**Figura 48:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-0-33,645-100 con espectro patrón con 0% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

### 6.3.2 Análisis de espectros con desgaste al 10% de la válvula

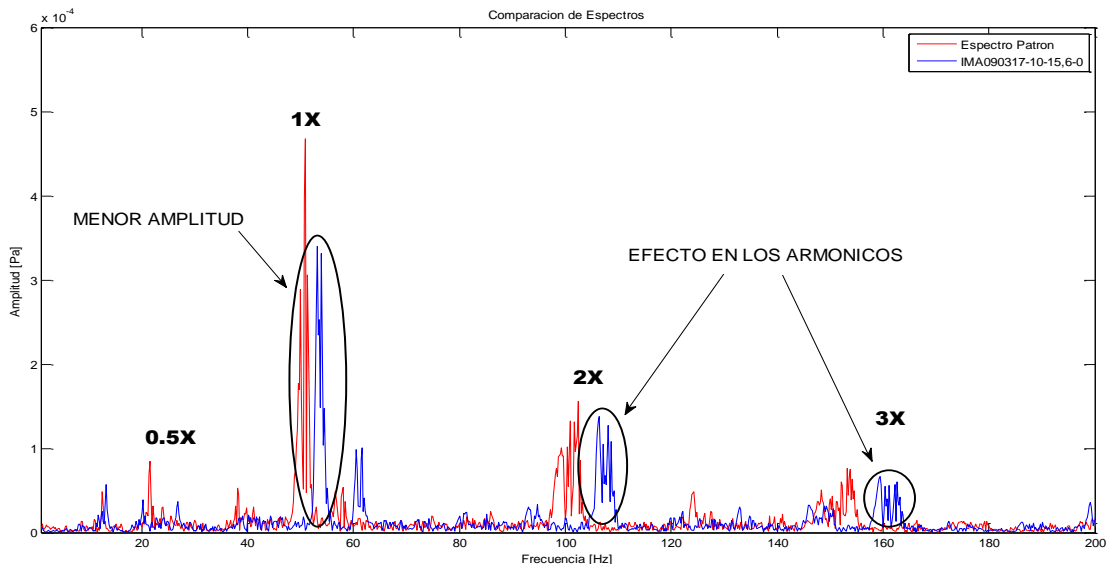
La Figura 49 indica un efecto en los armónicos de las bandas 0.5X, 1X, 2X y 3X, la distancia entre armónicos aumenta, además, de disminución en la amplitud, lo que indica que la configuración utilizada cumple con la función requerida por el sistema; también presenta un evento no síncrono cercano a 1X, es decir, existe un comportamiento propio de la muestra IMA 90317-10-15,6-100 (10% - desgaste, 10W30, 100% - aditivo).





**Figura 49:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-15,6-100 con espectro patrón con 10% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

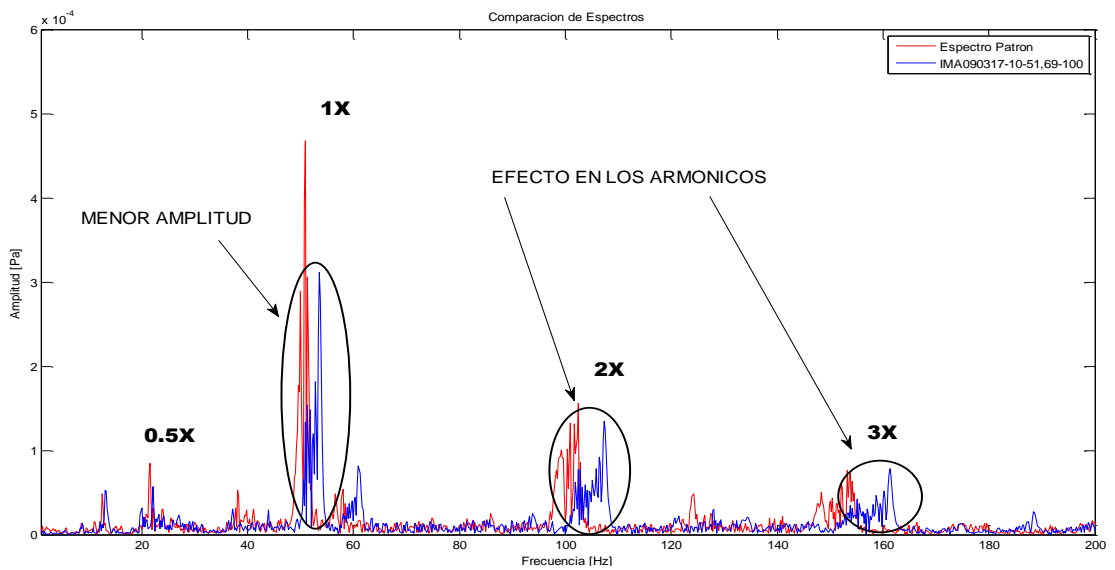
La Figura 50 indica efectos en los armónicos de las bandas señaladas, además de una disminución en amplitud en las bandas 1X y 2X, esto se debe a la presencia de un aceite menos viscoso, que por sus propiedades puede trabajar mejor en el motor.



**Figura 50:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317--10-15,6-0 con espectro patrón con 10% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

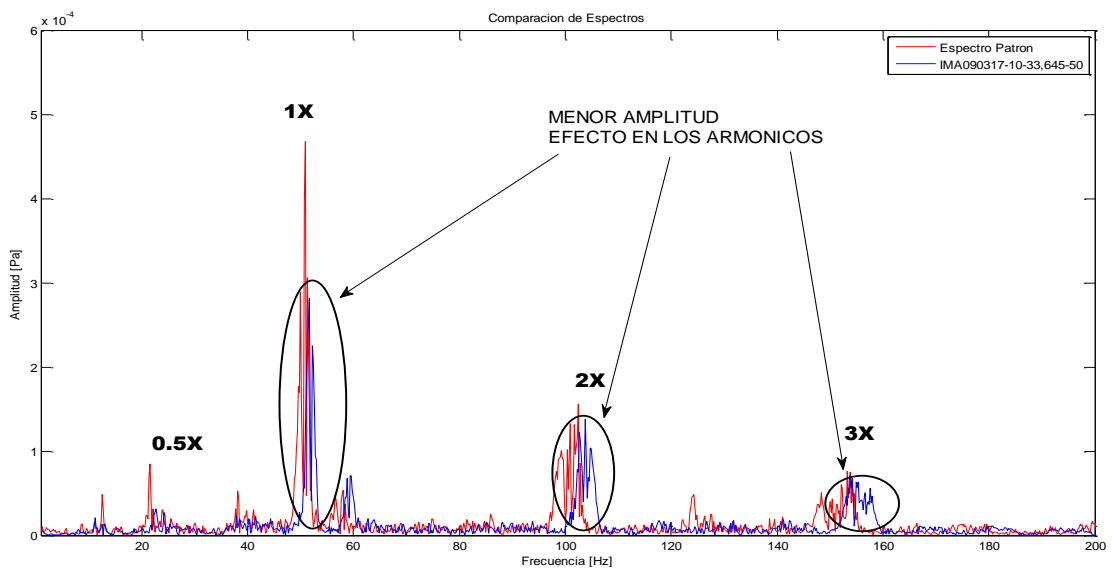
La Figura 51 nos presenta efectos en los armónicos 2X y 3X, además de disminución de la amplitud, esto indica que la configuración de la muestra IMA090317-10-51,69-

100 (10% - desgaste, 15W40, 100% - aditivo) utilizada disminuye el efecto de la vibración.



**Figura 51:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-51,69-100 con espectro patrón con 10% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

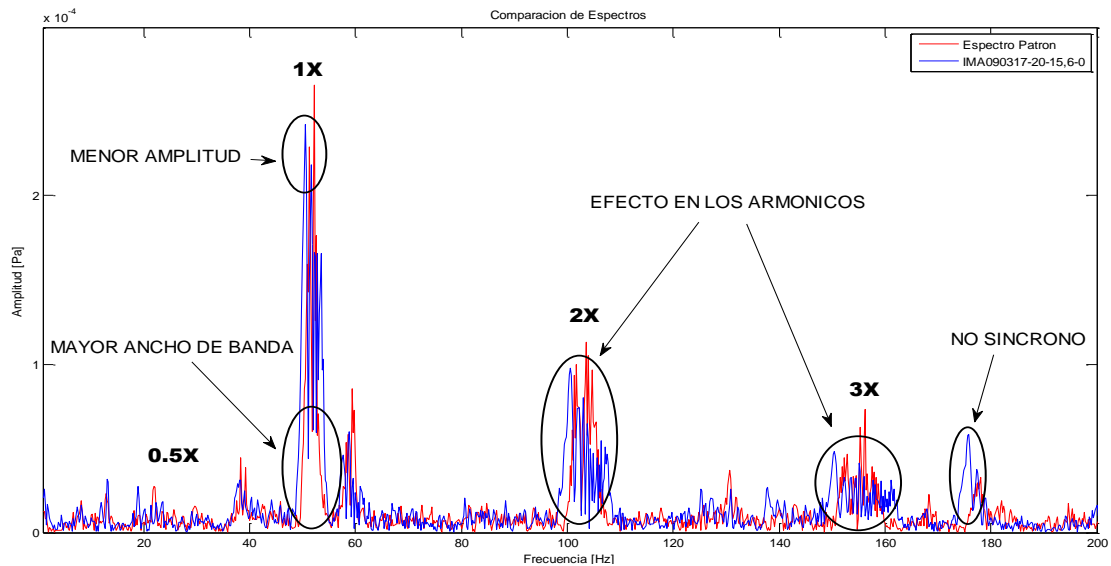
La Figura 52 indica efectos sobre los armónicos, y disminución de la amplitud que se aprecia mejor en la banda 1X, esto debido al grado de viscosidad que alcanza la configuración utilizada (10% - desgaste, 20W50, 50% - aditivo).



**Figura 52:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-10-33,645-50 con espectro patrón con 10% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

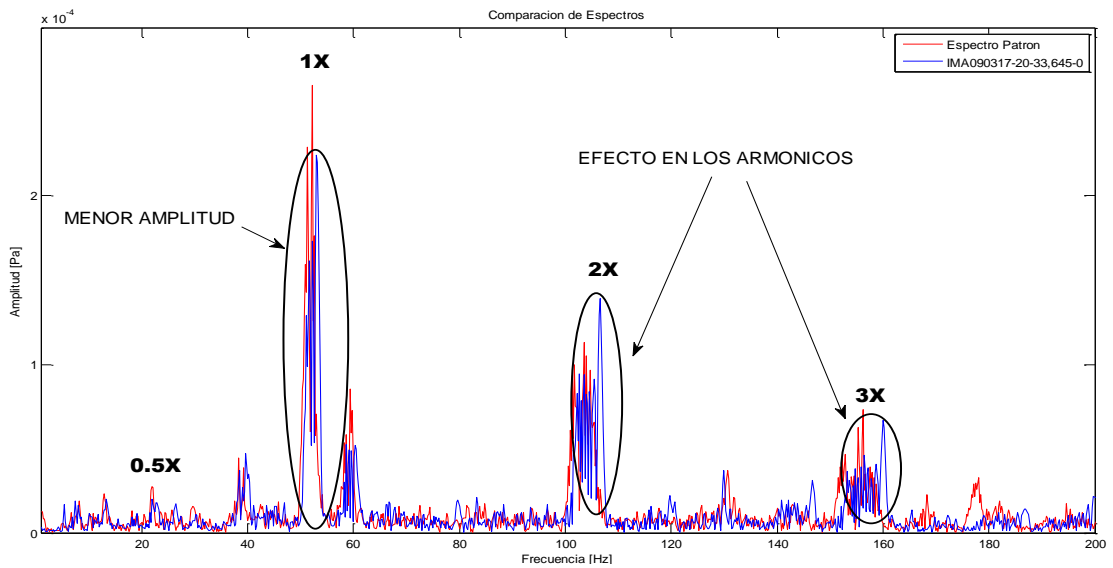
### 6.3.3 Análisis de espectros con desgaste al 20% de la válvula

La Figura 53 indica efectos en los armónicos de las bandas 2X y 3X, como aumento de ancho de banda, además de disminución de amplitud en todas las bandas, esto se debe a que la configuración analizada (20% - desgaste, 10W30, 0% - aditivo) es adecuada para contrarrestar la holgura entre guía y vástago de las válvulas.



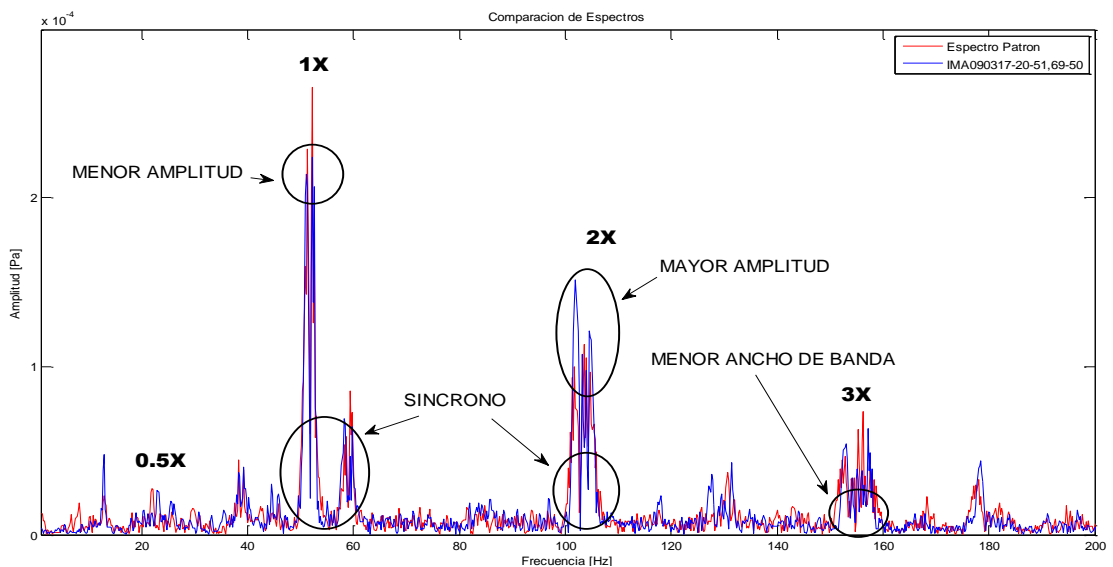
**Figura 53:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-15,6-50 con espectro patrón con 20% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

La Figura 54 indica efecto en los armónicos, como mayor distancia entre armónicos, además, de un incremento en la banda 2X, también presenta una disminución en la banda 1X, por lo cual se deduce que la configuración utilizada (20% - desgaste, 20W50, 0% - aditivo) trabaja mejor que saturándolo con aditivo.



**Figura 54:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-33,645-0 con espectro patrón con 20% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

La Figura 55 indica disminución en la amplitud de en las bandas 1X, y 3X, quiere decir que la viscosidad que presenta este tipo de configuración (20% - desgaste, 15W40, 50% - aditivo) es adecuada, además, presenta eventos sincronizados con el tiempo en las bandas 1X y 2X, es decir tiene eventos síncronos.



**Figura 55:** Gráfica de comparación entre espectro IMA090317-20-51,69-50 con espectro patrón con 20% de desgaste. **Fuente:** Los Autores.

## 6.4 Comparación de características temporales

### 6.4.1 Comparación de características temporales de espectros con desgaste nulo

En la Tabla 10 se observa que las características que mayormente varían son: la curtosis y asimetría, además, se muestra los valores de amplitud en cada banda de frecuencia; la configuración adecuada es IMA090317-0-33,645-0 (0% - desgaste, 20W50, 0% - aditivo), porque se reducen las amplitudes de vibración en las bandas de frecuencia 0.5X y 1X, siendo la segunda la de mayor importancia.

**Tabla 10:** Comparación de las características temporales con 0% de desgaste.

**Fuente:** Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -0-33,645-0</b>	<b>IMA090317 -0-51,69-50</b>	<b>IMA090317 -0-15,6-50</b>	<b>IMA090317 -0-33,645-100</b>
<b>0,5X</b>	1,33E-05	1,66E-05	1,97E-05	1,99E-05
<b>1X</b>	2,52E-04	3,25E-04	3,20E-04	3,59E-04
<b>2X</b>	1,15E-04	1,66E-04	1,41E-04	2,30E-05
<b>3X</b>	2,80E-05	6,48E-05	2,75E-05	3,92E-05
<b>MEDIA</b>	2,13E-05	2,10E-05	2,11E-05	1,98E-05
<b>VARIANZA</b>	1,15E-09	1,10E-09	1,09E-09	1,02E-09
<b>DES. EST.</b>	4,13E-05	4,52E-05	3,07E-05	2,91E-05
<b>POTENCIA</b>	1,57E-06	1,94E-06	1,41E-06	1,19E-06
<b>ENERGIA</b>	3,99E-11	5,31E-11	2,69E-11	3,28E-11
<b>CURTOSIS</b>	47,42	41,27	41,10	40,46
<b>ASIMETRIA</b>	6,51	5,24	5,43	6,77
<b>RMS</b>	3,86E-05	5,17E-05	3,75E-05	3,45E-05

### 6.4.2 Comparación de características temporales de espectros con desgaste al 10%

En la Tabla 11 se observa como varían las características temporales cuando el desgaste provocado es del 10%, al igual que en el caso anterior se tiene que las propiedades con valores altos son: la curtosis y asimetría; siendo la mejor

configuración IMA090317-10-33,645-50 (10% - desgaste, 20W50, 50% - aditivo), porque se tiene menores amplitudes de vibraciones en las bandas 0.5X, 1X y 2X.

**Tabla 11:** Comparación de las características temporales con 10% de desgaste.

**Fuente:** Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -10-51,69-0</b>	<b>IMA090317 -10-15,6- 100</b>	<b>IMA090317 -10-15,6-0</b>	<b>IMA090317 -10-51,69- 100</b>	<b>IMA090317 -10-33,645- 50</b>
<b>0,5X</b>	1,14E-05	2,03E-05	2,21E-05	1,89E-05	7,23E-06
<b>1X</b>	4,67E-04	3,44E-04	3,59E-04	3,17E-04	2,90E-04
<b>2X</b>	1,14E-04	1,42E-04	1,35E-04	1,35E-04	4,11E-05
<b>3X</b>	4,46E-05	7,30E-05	9,13E-06	7,28E-05	5,79E-05
<b>MEDIA</b>	2,13E-05	2,13E-05	2,10E-05	2,21E-05	2,11E-05
<b>VARIANZA</b>	1,22E-09	1,26E-09	1,05E-09	1,10E-09	1,21E-09
<b>DES. EST.</b>	3,21E-05	2,25E-05	2,72E-05	3,18E-05	2,81E-05
<b>POTENCIA</b>	1,43E-06	1,38E-06	1,38E-06	1,47E-06	1,54E-06
<b>ENERGIA</b>	2,92E-11	3,01E-11	2,24E-11	2,99E-11	3,36E-11
<b>CURTOSIS</b>	35,14	40,39	35,80	35,22	42,20
<b>ASIMETRIA</b>	5,87	5,49	4,49	5,27	6,12
<b>RMS</b>	3,86E-05	3,87E-05	3,43E-05	3,89E-05	3,52E-05

#### **6.4.3 Comparación de características temporales de espectros con desgaste al 20%**

En la Tabla 12 al igual que en los casos anteriores se presenta las características de los espectros para cuando el desgaste es del 20%, siendo la mejor configuración IMA090317-20-33,645-0 (20% - desgaste, 20W50, 0% - aditivo), porque se reduce la amplitud de vibración en la banda de frecuencia 1X, en esta banda se manejan valores altos por lo que es importante reducir dicho fenómeno de vibración.

**Tabla 12:** Comparación de las características temporales con 20% de desgaste.

**Fuente:** Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -20-33,645-100</b>	<b>IMA090317 -20-15,6-50</b>	<b>IMA090317 -20-51,69-50</b>	<b>IMA090317 -20-33,645-0</b>
<b>0,5X</b>	8,88E-06	1,01E-05	2,01E-05	1,78E-05
<b>1X</b>	2,66E-04	2,49E-04	2,43E-04	2,31E-04
<b>2X</b>	7,45E-05	1,67E-05	1,28E-04	1,07E-04
<b>3X</b>	1,76E-05	2,83E-05	2,78E-05	3,20E-05
<b>MEDIA</b>	3,17E-05	2,18E-05	2,18E-05	2,13E-05
<b>VARIANZA</b>	1,10E-09	1,02E-09	1,04E-09	1,01E-09
<b>DES. EST.</b>	3,13E-05	4,17E-05	2,96E-05	2,16E-05
<b>POTENCIA</b>	1,68E-06	1,96E-06	1,65E-06	1,45E-06
<b>ENERGIA</b>	3,13E-11	5,09E-11	2,58E-11	3,06E-11
<b>CURTOSIS</b>	45,80	44,70	33,98	35,62
<b>ASIMETRIA</b>	4,66	4,69	4,08	5,39
<b>RMS</b>	3,85E-05	4,79E-05	3,68E-05	3,81E-05

## **6.5 Análisis de emisiones contaminantes**

Para el análisis de emisiones contaminantes se continúa con el análisis de la muestra patrón, debido a que la NTE INEN 2204 especifica límites permisibles para dos gases; el análisis se centra en: hidrocarburos no combustionados (HC) y monóxido de carbono (CO).

### **6.5.1 Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 0%**

La Tabla 13 se muestra los datos obtenidos en emisiones contaminantes, al colocar un aceite 33,645 (20W50) se tiene 32 ppm de HC y 0% de CO, lo mismo sucede con la configuración IMA090317-0-15,6-50 (0 - desgaste, 10W30, 50% - aditivo), si al aceite multigrado 20W50 se le añade el 100% de aditivo (IMA090317-0-33,645-100) se reduce a 17 ppm (53%) los HC y se aumenta el CO en un 0,01%; al utilizar un aceite 15W40 con un 50% de aditivo (IMA090317-0-51,69-50) el CO se mantiene y se aumenta a 35 ppm los HC (9%).

**Tabla 13:** Comparación de emisiones contaminantes con 0% de desgaste. **Fuente:**  
Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -0-33,645-0</b>	<b>IMA090317 -0-51,69-50</b>	<b>IMA090317 -0-15,6-50</b>	<b>IMA090317 -0-33,645-100</b>
<b>HC (ppm)</b>	32	35	32	17
<b>CO (%)</b>	0	0	0	0,01

### 6.5.2 Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 10%

La Tabla 14 indica que al colocar un aceite 15W40 (IMA090317-10-51,69-0) se tiene 16 ppm de HC y 0% de CO, si a este aceite se le añade el 100% de aditivo se aumentan los HC a 29 ppm (81%) y el CO en un 0,11%; al utilizar un aceite 10W30 (IMA090317-10-15,6-0) se tiene 41 ppm de HC y 0,09% de CO, al añadir un 100% de aditivo se reducen a 37 ppm (10%) de HC y 0,01% en CO; utilizando la configuración IMA090317-10-33,645-50 (20W50, 50% - aditivo) se tiene 39 ppm de HC y 0,05% de CO.

**Tabla 14:** Comparación de emisiones contaminantes con 10% de desgaste. **Fuente:**  
Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -10-51,69-0</b>	<b>IMA090317 -10-15,6- 100</b>	<b>IMA090317 -10-15,6-0</b>	<b>IMA090317 -10-51,69- 100</b>	<b>IMA090317 -10-33,645- 50</b>
<b>HC (ppm)</b>	16	37	41	29	39
<b>CO (%)</b>	0	0,08	0,09	0,11	0,05

### 6.5.3 Comparación de emisiones contaminantes con desgaste al 20%

La Tabla 15 indica los valores de gases contaminantes, al colocar un aceite 20W50 (IMA090317-20-33,645-0) se tiene 36 ppm de HC y 0,06% de CO, al añadirle un 100% de aditivo los HC se reduce a 32 ppm (12%) al igual que el CO en un 0,03%; al utilizar la configuración IMA090317-20-15,6-50 (20% - desgaste, 10W30, 50% - aditivo) se tiene 50 ppm de HC y 0,08% de CO, si se cambia el grado del aceite por un 15W40 (IMA090317-20-51,69-50) se reducen HC en un 44% y CO en un 0,06%.



**Tabla 15:** Comparación de emisiones contaminantes con 20% de desgaste. **Fuente:**  
Los Autores.

<b>MUESTRA</b>	<b>IMA090317 -20-33,645-100</b>	<b>IMA090317 -20-15,6-50</b>	<b>IMA090317 -20-51,69-50</b>	<b>IMA090317 -20-33,645-0</b>
<b>HC (ppm)</b>	32	50	32	36
<b>CO (%)</b>	0,03	0,08	0,02	0,06

## 7. CONCLUSIONES

- El mantenimiento predictivo hoy en día es uno de los más utilizados por lo que reduce costos y tiempo de trabajo en comparación con el mantenimiento correctivo que usualmente se aplicaba. Una de las técnicas para aplicar el mantenimiento predictivo es el análisis de vibraciones mediante el cual se puede obtener información relevante de un proceso en funcionamiento, captando señales de aceleración, con la finalidad de evitar averías que permitan un paro repentino de funcionamiento.
- El análisis de gases de escape en MCIA es de vital importancia porque es la principal fuente de contaminación del medio ambiente por el gran número de vehículos que transitan en la ciudad, una de las causas es el mal funcionamiento de un automotor como: inadecuada lubricación y desgaste excesivo.
- Al aplicar un diseño de experimentos, protocolos de adquisición de señales y una nomenclatura para el almacenamiento de muestras obtenidas en el desarrollo de esta investigación, garantiza la adquisición de datos para su posterior análisis.
- En el análisis de vibraciones mediante el análisis de efectos principales de las variables de entrada frente a las variables de salida, indica que la característica que más relevancia tiene es la Curtosis, al incrementar la viscosidad la Curtosis aumenta, al incrementar la holgura la Curtosis descende y al incrementar el aditivo la Curtosis aumenta de una forma menos notable que la viscosidad esto se debe a que la media de un aceite puro es menos que la media de un aceite con aditivo al 100%.
- El análisis de interacciones entre las variables de entrada y salida indica los factores que tienen correlación son viscosidad\*holgura y holgura\*aditivo.
- El análisis de efectos principales de las variables de entrada frente a las variables de salida para gases de escape, indica que los HC descenden conforme

aumenta la viscosidad mientras el CO disminuye, en cuanto al factor holgura el HC y CO aumentan y con el factor aditivo el HC aumenta hasta un 50% de aditivo al aplicar más aditivo hasta el 100% disminuye el HC, el CO aumenta conforme aumenta la cantidad de aditivo.

➤ El análisis de interacciones para gases de escape indica que el HC tiene interacción con viscosidad\*holgura y viscosidad\*aditivo y el CO tiene interacción con viscosidad\*aditivo.

➤ El análisis de espectros mediante la Transformada de Fourier permite obtener información relevante de las señales en el dominio de la frecuencia, información con la cual no es posible detectar en el dominio del tiempo.

➤ Al analizar cuando la holgura es nula o 0% entre vástago y guía de válvula la muestra patrón es IMA090317-0-33,645-0 (20W50, 0% - aditivo) fue comparada con las muestras IMA090317-0-51,69-50 (15W40, 50% - aditivo), IMA090317-0-15,6-50 (10W30, 50% - aditivo) y IMA090317-0-33,645-100 (20W50, 100% - aditivo). En la primera comparación presenta que en las bandas de frecuencias 1X y 2X existe sincronía, en las bandas 0.5X, 1X y 2X se tiene una mayor amplitud, esto indica que el aceite patrón es más viscoso. En la segunda comparación indica que en las bandas de 0.5X, 2X, y 3X, se tiene efectos en los armónicos, además, en la banda cercana a 0.5X y 1X presentan mayor amplitud de vibración, esto es indicativo de que el aceite es demasiado viscoso por lo que no sella las holguras de forma adecuada. En la tercera comparación indica que en las bandas 0.5X, 1X, 2X, y 3X existe efectos en los armónicos, además, de un incremento de amplitud en todo el espectro, es decir, al no existir desgaste en el vástago de la válvula y al incrementar la viscosidad aumentan las vibraciones. Para el análisis de gases indica que al colocar un aceite 33,645 (20W50) se tiene 32 ppm de HC y 0% de CO, lo mismo sucede con la configuración IMA090317-0-15,6-50 (0 - desgaste, 10W30, 50% - aditivo), si al aceite multigrado 20W50 se le añade el 100% de aditivo (IMA090317-0-33,645-100) se reduce a 17 ppm (53%) los HC y se aumenta el CO en un 0,01%, al utilizar un aceite 15W40 con un 50% de aditivo (IMA090317-0-51,69-50) el CO se mantiene y se aumenta a 35 ppm los HC (9%).

➤ Al tener una holgura del 10% entre vástago y guía de válvula la muestra patrón es IMA090317-10-51,69-0 (15W40, 0% - aditivo), esta es comparada con las muestras IMA090317-10-15,6-100 (10W30, 100% - aditivo), IMA090317-10-15,6-0 (10W30, 0% - aditivo), IMA090317-10-51,69-100 (15W40, 100% - aditivo) e

IMA090317-10-33,645-50 (20W50, 50% - aditivo). En la primera comparación indica un efecto en los armónicos de las bandas 0.5X, 1X, 2X y 3X, además, disminución en la amplitud. En la segunda comparación se observa reducción en la amplitud en las bandas 1X y 2X. En la tercera comparación indica en los armónicos 2X y 3X una disminución de la amplitud. En la cuarta comparación se observa reducción de la amplitud notablemente en el armónico 1X, es decir al provocar un descaste del 10% en el vástago de la válvula y realizando una mezcla de viscosidad y aditivo sella el desgaste provocado. De la misma manera se realizó una comparación con los gases contaminantes lo que indica que al colocar un aceite 15W40 (IMA090317-10-51,69-0) se tiene 16 ppm de HC y 0% de CO, si a este aceite se le añade el 100% de aditivo se aumentan los HC a 29 ppm (81%) y el CO en un 0,11%; al utilizar un aceite 10W30 (IMA090317-10-15,6-0) se tiene 41 ppm de HC y 0,09% de CO, al añadir un 100% de aditivo se reducen a 37 ppm (10%) de HC y 0,01% en CO; utilizando la configuración IMA090317-10-33,645-50 (20W50, 50% - aditivo) se tiene 39 ppm de HC y 0,05% de CO.

Cuando la holgura entre vástago y guía de válvula es del 20% la muestra patrón es IMA090317-20-33,645-100 (20W50, 100% - aditivo) fue comparada con las muestras IMA090317-20-15,6-50 (10W30, 50% - aditivo), IMA090317-20-33,645-0 (20W50, 0% - aditivo) y IMA090317-20-51,69-50 (15W40, 50% - aditivo). La primera comparación indica efectos en los armónicos de las bandas 2X y 3X, además, disminución en la amplitud en todas las bandas. La segunda comparación indica efectos en los armónicos, además, de un incremento en la banda 2X, también presenta una disminución en la banda 1X. La tercera comparación indica una disminución en la amplitud de en las bandas 1X y 3X, es decir, al existir una mayor holgura en el vástago de la válvula disminuye las vibraciones pero no sella por completo el desgaste provocado. En la comparación con los gases contaminantes lo que indica que al colocar un aceite 20W50 (IMA090317-20-33,645-0) se tiene 36 ppm de HC y 0,06% de CO, al añadirle un 100% de aditivo los HC se reduce a 32 ppm (12%) al igual que el CO en un 0,03%; al utilizar la configuración IMA090317-20-15,6-50 (20% - desgaste, 10W30, 50% - aditivo) se tiene 50 ppm de HC y 0,08% de CO, si se cambia el grado del aceite por un 15W40 (IMA090317-20-51,69-50) se reducen HC en un 44% y CO en un 0,06%.

- Pretender estandarizar una viscosidad específica para la obtención de valores bajos de vibraciones y emisiones contaminantes resulta complejo pues depende del estado del motor, sin embargo, el fenómeno de vibración se vio reducido al utilizar un aceite 20W50, así como las emisiones contaminantes decrecieron con viscosidades de 20W50 y 15W40 dependiendo directamente del estado de la válvula (holgura).
- En esta investigación se concluye que no se cumple con la hipótesis planteada: “Al incrementar la viscosidad del lubricante sellamos holguras y disminuimos las emisiones contaminantes”, debido que los resultados obtenidos indican que si la viscosidad no es adecuada, aumentan los fenómenos de vibraciones porque se dificulta la formación de película de aceite entre ciertas holguras, además, las emisiones contaminantes se ven alteradas debido que mientras más viscoso sea el aceite mayor energía de impulsión se necesita, la cual es obtenida directamente del poder calorífico del combustible.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Realizar nuevos proyectos aplicando el análisis de vibraciones en diferentes sistemas del motor para poder establecer una base de datos para el mantenimiento predictivo del mismo.
- A más del análisis de vibraciones aplicar otras técnicas para el mantenimiento predictivo como son: termografía, análisis de aceite, ruido, entre otros.
- Los futuros proyectos se pueden realizar en un automóvil, para poder adquirir información en condiciones reales o específicas.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones*. U.S.A.: Azima DLI.
- [2] MORESA. Daños más frecuentes en válvulas para motores a gasolina [online] México, 2014. Available at: <http://tumotor.mx/2014/05/danos-mas-frecuentes-en-valvulas-para-motores-a-gasolina/> [Accessed 3 Jun. 2016].
- [3] Bueno, D. A. (2010). *Evolución del rendimiento de un motor de combustión interna. Aplicación a pistones*. Cataluña, España.
- [4] Villegas, A. M. (2007). *Motores de Combustión Interna*.
- [5] Tormos, B. (2005). *Diagnóstico de Motores Diésel Mediante el Análisis de Aceite usado*. España: Reverte.
- [6] Montoya, P. J. (2008). *Mejoramiento del sistema de lubricación de los motores DIESEL CUMMINS SERIE ISM*. Veracruz, México.
- [7] Manual de taller del motor Accent Hyundai, [online]. Available at: [https://es.scribd.com/search?page=1&content\\_type=documents&query=manualtaller-motoraccenthyundai-140125200924-phpapp02](https://es.scribd.com/search?page=1&content_type=documents&query=manualtaller-motoraccenthyundai-140125200924-phpapp02), [Accessed: 20 Apr. 2016].
- [8] Payri, F., & Desantes, J. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Barcelona: Reverté S.A.
- [9] Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta ed.). Mexico: PEARSON.
- [10] MAHLE. (2012). *Manual de Fallas. Fallas Prematuras*.
- [11] Albarracín Méndez, R. Á., & Huiñisaca Quizhpe, J. B. (2015). *Estudio mediante la técnica de vibraciones de los efectos de la variación de presión en el riel de combustible sobre la combustión de un motor CRDI modelo Hyundai Santa Fé 2.0*. Cuenca, Ecuador.
- [12] Matienzo, J. R. (1996). *Diagnostico por vibraciones en motores de combustión interna*. La Habana, Cuba.

- [13] PICKUPS, T. (10 de Noviembre de 2016). Acerca de nosotros: TAV PICKUPS. Obtenido de TAV PICKUPS: <http://www.tav.net/transductores/transductores-02.pdf>
- [14] Kreysig, E. (2003). Matemáticas Avanzadas para Ingeniería. Mexico: Limusa, S.A.
- [15] NTE INEN 2204
- [16] Gutierrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). Análisis y Diseño de Experimentos. Mexico: McGraw-Hill.
- [17] “Erbessd Instruments.”
- [18] International Standard, ISO 10816-6 - Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non rotating parts-Part 6:Reciprocating machines with power ratings above 100 kW, 1995.
- [19] Mercado, A. V. (2010). Análisis de Vibración para el Mantenimiento Predictivo de Maquinaria. National Instrumens.
- [20] MINITAB. (13 de 10 de 2016). Acerca de nosotros: Minitab. Obtenido de Minitab: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>
- [21] Buestán, C., & Jarama, T. (Abril de 2016). Diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna a gasolina Hyundai Accent DOHC 1.5l mediante análisis de vibraciones. Cuenca, Azuay, Ecuador.

**10. ANEXO 1: TABLA DE CARACTERISTICAS TEMPORALES Y  
EMISIONES DE ESCAPE**

**Tabla 16:** Tabla de características temporales y emisiones de escape. **Fuente:** Los Autores.

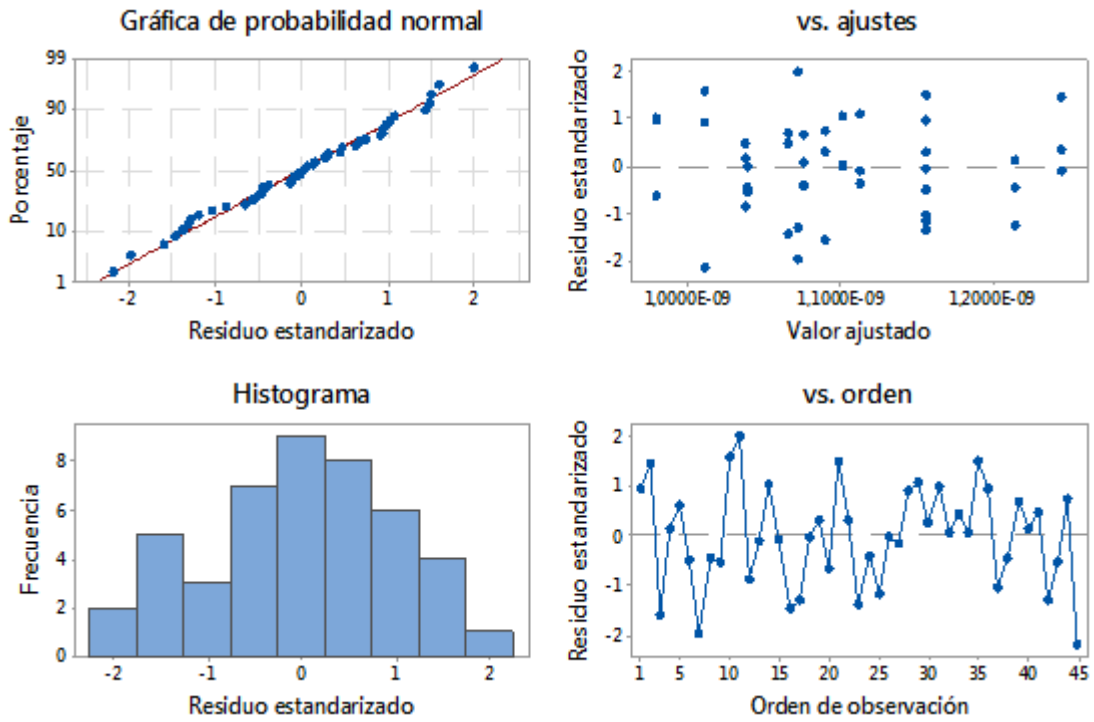
Orden	Viscosidad	Holgura	Aditivo	Amplitud x/2	Amplitud 1x	Amplitud 2x	Amplitud 3x	Media	Des. Est.	Varianza	Potencia	Energía	Curtosis	Asimetría	RMS	HC	O2	CO2	CO
1	15,6	0	50	1,88E-05	3,37E-04	1,17E-04	5,30E-05	2,10E-05	3,15E-05	1,08E-09	1,31E-06	2,19E-11	42,33	4,69	3,82E-05	26	0,18	17,7	0
2	51,69	0	50	2,13E-05	3,23E-04	1,49E-04	6,58E-05	2,05E-05	4,17E-05	1,10E-09	1,79E-06	5,03E-11	45,27	5,23	4,77E-05	40	0,32	17,4	0
3	15,6	20	50	1,16E-05	2,38E-04	8,97E-05	3,91E-05	2,15E-05	4,04E-05	1,02E-09	1,97E-06	3,80E-11	44,24	4,61	4,83E-05	58	0,71	17,7	0,04
4	51,69	20	50	1,40E-05	2,40E-04	1,35E-04	4,96E-05	2,16E-05	3,14E-05	1,07E-09	1,68E-06	3,03E-11	35,98	4,15	3,87E-05	49	0,51	17,9	0,06
5	15,6	10	0	1,91E-05	4,08E-04	1,35E-04	6,95E-05	2,10E-05	3,05E-05	1,01E-09	1,37E-06	2,61E-11	41,38	4,53	3,70E-05	50	0,14	17,6	0,04
6	51,69	10	0	1,93E-05	3,36E-04	8,81E-05	4,48E-05	2,13E-05	3,21E-05	1,22E-09	1,43E-06	2,92E-11	35,14	5,87	3,86E-05	16	0,11	17,2	0
7	15,6	10	100	1,47E-05	4,28E-04	1,09E-04	5,41E-05	2,13E-05	2,14E-05	1,24E-09	1,42E-06	3,09E-11	40,13	5,82	3,78E-05	20	0,07	17,5	0,03
8	51,69	10	100	3,03E-05	4,01E-04	1,53E-04	1,04E-04	2,10E-05	3,29E-05	1,08E-09	1,48E-06	3,02E-11	34,35	4,59	3,93E-05	32	0,08	17,6	0,05
9	33,645	0	0	2,24E-05	3,19E-04	1,12E-04	8,41E-05	2,13E-05	4,13E-05	1,15E-09	1,57E-06	3,99E-11	47,42	6,51	3,86E-05	32	0,18	17,3	0
10	33,645	20	0	1,23E-05	2,62E-04	1,30E-04	5,33E-05	2,13E-05	2,13E-05	1,01E-09	1,50E-06	3,60E-11	34,32	5,55	3,87E-05	34	0,49	17,9	0,04
11	33,645	0	100	1,57E-05	4,17E-04	1,99E-04	7,83E-05	2,11E-05	3,15E-05	1,00E-09	1,35E-06	3,15E-11	42,98	6,59	3,79E-05	30	0,08	17,6	0
12	33,645	20	100	1,25E-05	2,71E-04	1,37E-04	5,81E-05	3,03E-05	3,11E-05	1,03E-09	1,73E-06	3,29E-11	49,15	5,14	3,70E-05	36	0,24	17,8	0,06
13	33,645	10	50	9,39E-06	3,56E-04	1,10E-04	6,77E-05	2,33E-05	3,36E-05	1,15E-09	1,75E-06	3,67E-11	47,44	6,25	2,95E-05	30	0,2	17,5	0,07
14	33,645	10	50	1,85E-05	3,47E-04	1,19E-04	6,04E-05	2,10E-05	3,14E-05	1,12E-09	1,40E-06	4,23E-11	46,08	6,76	2,94E-05	24	0,22	17,7	0,11
15	33,645	10	50	1,35E-05	2,92E-04	9,92E-05	4,27E-05	2,10E-05	2,97E-05	1,22E-09	1,60E-06	3,24E-11	45,99	6,14	3,49E-05	23	0,22	17,7	0,12
16	15,6	0	50	1,87E-05	3,01E-04	1,40E-04	6,01E-05	2,08E-05	3,16E-05	1,01E-09	1,43E-06	2,92E-11	39,06	5,38	3,80E-05	37	0,07	17,7	0
17	51,69	0	50	2,53E-05	3,12E-04	1,32E-04	4,94E-05	2,10E-05	4,52E-05	1,10E-09	1,94E-06	5,31E-11	41,27	5,24	5,17E-05	35	0,08	17,7	0
18	15,6	20	50	1,00E-05	2,88E-04	9,60E-05	4,20E-05	2,18E-05	4,17E-05	1,02E-09	1,96E-06	5,09E-11	44,70	4,69	4,79E-05	50	0,68	17,7	0,08
19	51,69	20	50	2,04E-05	2,98E-04	1,19E-04	5,16E-05	2,18E-05	2,96E-05	1,04E-09	1,65E-06	2,58E-11	33,98	4,08	3,68E-05	38	0,45	18	0,02
20	15,6	10	0	2,13E-05	3,50E-04	1,12E-04	6,83E-05	2,13E-05	3,34E-05	1,04E-09	1,48E-06	3,01E-11	40,11	5,11	3,97E-05	41	0,39	17,4	0,13
21	51,69	10	0	1,67E-05	3,79E-04	1,16E-04	6,46E-05	2,12E-05	2,18E-05	1,17E-09	1,43E-06	3,91E-11	36,96	5,84	3,91E-05	19	0,16	16,8	0,01
22	15,6	10	100	1,15E-05	3,59E-04	1,19E-04	4,96E-05	2,13E-05	2,25E-05	1,26E-09	1,38E-06	3,01E-11	40,39	5,49	3,87E-05	37	0,43	17,5	0,08
23	51,69	10	100	2,99E-05	3,61E-04	1,29E-04	7,43E-05	2,14E-05	3,16E-05	1,06E-09	1,45E-06	3,04E-11	32,99	4,89	3,80E-05	33	0,24	17,7	0,1



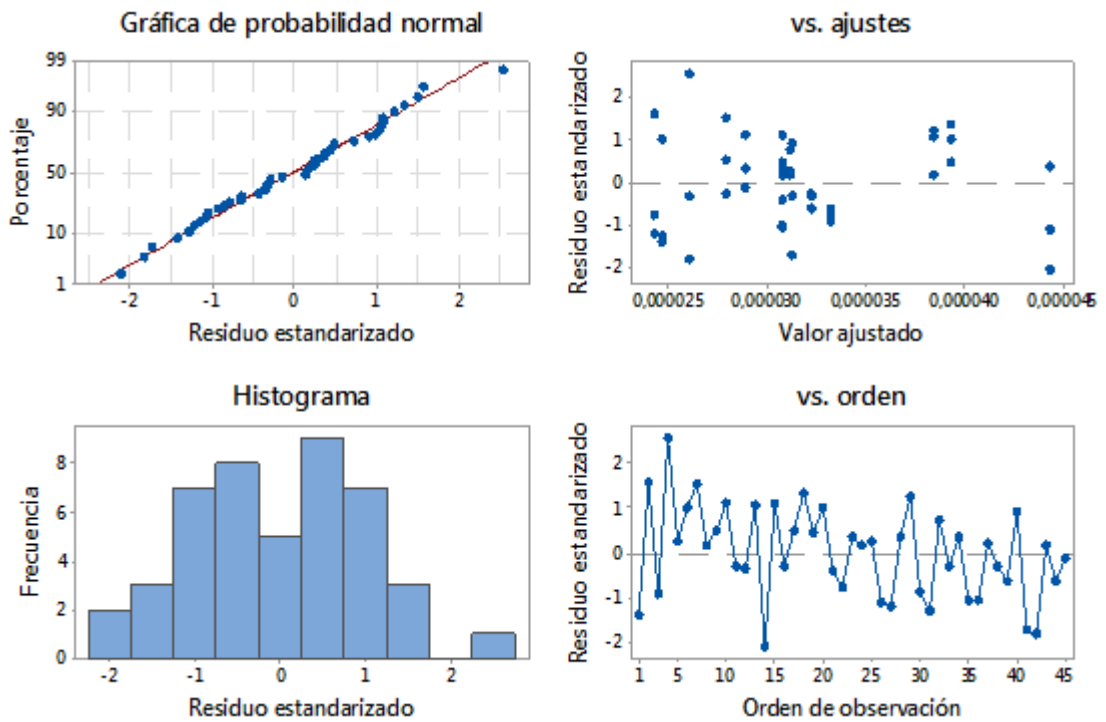
**Tabla 17:** Tabla de características temporales y emisiones de escape (Continuación). **Fuente:** Los Autores.

Orden	Viscosidad	Holgura	Aditivo	Amplitud x/2	Amplitud 1x	Amplitud 2x	Amplitud 3x	Media	Des. Est.	Varianza	Potencia	Energía	Curtosis	Asimetría	RMS	HC	O2	CO2	CO
24	33,645	0	0	1,93E-05	3,24E-04	1,59E-04	8,18E-05	2,13E-05	4,09E-05	1,11E-09	1,47E-06	3,99E-11	43,19	6,42	3,79E-05	32	0,09	17,8	0
25	33,645	20	0	1,43E-05	2,33E-04	1,16E-04	4,04E-05	2,13E-05	2,16E-05	1,01E-09	1,45E-06	3,06E-11	35,62	5,39	3,81E-05	36	0,38	17,9	0,06
26	33,645	0	100	2,20E-05	3,22E-04	2,06E-04	7,61E-05	1,84E-05	2,72E-05	1,14E-09	1,07E-06	3,04E-11	43,54	6,51	3,27E-05	23	0,17	17,6	0
27	33,645	20	100	9,02E-06	3,11E-04	1,30E-04	4,94E-05	3,21E-05	3,18E-05	1,12E-09	1,52E-06	3,12E-11	49,52	5,10	3,85E-05	38	0,26	18	0,1
28	33,645	10	50	1,02E-05	3,06E-04	1,26E-04	7,14E-05	2,04E-05	3,17E-05	1,10E-09	1,48E-06	3,01E-11	47,90	6,33	3,97E-05	23	0,2	17,9	0,1
29	33,645	10	50	1,07E-05	3,25E-04	1,46E-04	4,82E-05	2,12E-05	3,19E-05	1,17E-09	1,57E-06	4,00E-11	47,98	6,14	3,81E-05	35	0,21	17,9	0,06
30	33,645	10	50	1,01E-05	2,74E-04	1,27E-04	4,39E-05	2,22E-05	3,12E-05	1,14E-09	1,51E-06	4,05E-11	40,21	5,20	3,81E-05	33	0,19	17,8	0,06
31	15,6	0	50	1,49E-05	3,23E-04	1,05E-04	5,80E-05	2,11E-05	3,07E-05	1,09E-09	1,41E-06	2,69E-11	41,10	5,43	3,75E-05	32	0,39	17,5	0
32	51,69	0	50	2,45E-05	3,16E-04	1,57E-04	4,92E-05	1,98E-05	3,94E-05	1,14E-09	1,99E-06	5,28E-11	43,09	5,49	5,45E-05	25	0,4	17,6	0
33	15,6	20	50	9,11E-06	2,94E-04	8,92E-05	2,91E-05	2,14E-05	4,25E-05	1,04E-09	1,66E-06	2,97E-11	45,79	4,77	4,51E-05	56	0,68	17,7	0,1
34	51,69	20	50	1,62E-05	2,98E-04	1,34E-04	4,81E-05	2,29E-05	2,85E-05	9,32E-10	1,54E-06	2,55E-11	33,06	4,95	3,66E-05	37	0,47	17,8	0,06
35	15,6	10	0	2,42E-05	3,87E-04	1,19E-04	8,47E-05	2,10E-05	2,72E-05	1,05E-09	1,38E-06	2,24E-11	35,80	4,49	3,43E-05	41	0,42	17,4	0,09
36	51,69	10	0	2,20E-05	3,77E-04	1,14E-04	6,13E-05	2,10E-05	2,53E-05	1,20E-09	1,50E-06	3,29E-11	35,64	5,44	3,46E-05	17	0,16	16,8	0,01
37	15,6	10	100	1,32E-05	3,76E-04	1,09E-04	5,43E-05	1,98E-05	2,80E-05	1,30E-09	1,24E-06	3,21E-11	37,93	5,70	3,41E-05	35	0,35	17,4	0,1
38	51,69	10	100	2,54E-05	3,77E-04	1,37E-04	9,86E-05	2,21E-05	3,18E-05	1,10E-09	1,47E-06	2,99E-11	35,22	5,27	3,89E-05	29	0,21	17,7	0,11
39	33,645	0	0	2,41E-05	3,33E-04	1,38E-04	7,01E-05	2,18E-05	3,88E-05	1,10E-09	1,58E-06	3,44E-11	47,27	6,83	3,57E-05	25	0,24	17,9	0
40	33,645	20	0	1,60E-05	2,96E-04	1,11E-04	6,40E-05	2,12E-05	2,70E-05	9,55E-10	1,37E-06	2,24E-11	33,92	5,13	3,42E-05	34	0,33	18	0,07
41	33,645	0	100	1,92E-05	4,17E-04	2,05E-04	6,31E-05	1,98E-05	2,91E-05	1,02E-09	1,19E-06	3,28E-11	40,46	6,77	3,45E-05	17	0,18	17,9	0,01
42	33,645	20	100	1,33E-05	3,14E-04	1,35E-04	5,48E-05	3,17E-05	3,13E-05	1,10E-09	1,68E-06	3,13E-11	45,80	4,66	3,85E-05	32	0,22	17,9	0,03
43	33,645	10	50	1,04E-05	2,96E-04	1,14E-04	5,20E-05	2,12E-05	3,14E-05	1,11E-09	1,56E-06	3,78E-11	41,62	6,40	3,82E-05	42	0,2	17,8	0,05
44	33,645	10	50	1,33E-05	2,87E-04	1,50E-04	4,33E-05	2,11E-05	2,81E-05	1,21E-09	1,54E-06	3,36E-11	42,20	6,12	3,52E-05	39	0,21	17,8	0,05
45	33,645	10	50	1,47E-05	2,89E-04	1,09E-04	5,95E-05	1,97E-05	2,81E-05	1,19E-09	1,45E-06	3,20E-11	46,79	6,32	3,34E-05	36	0,25	17,7	0,09

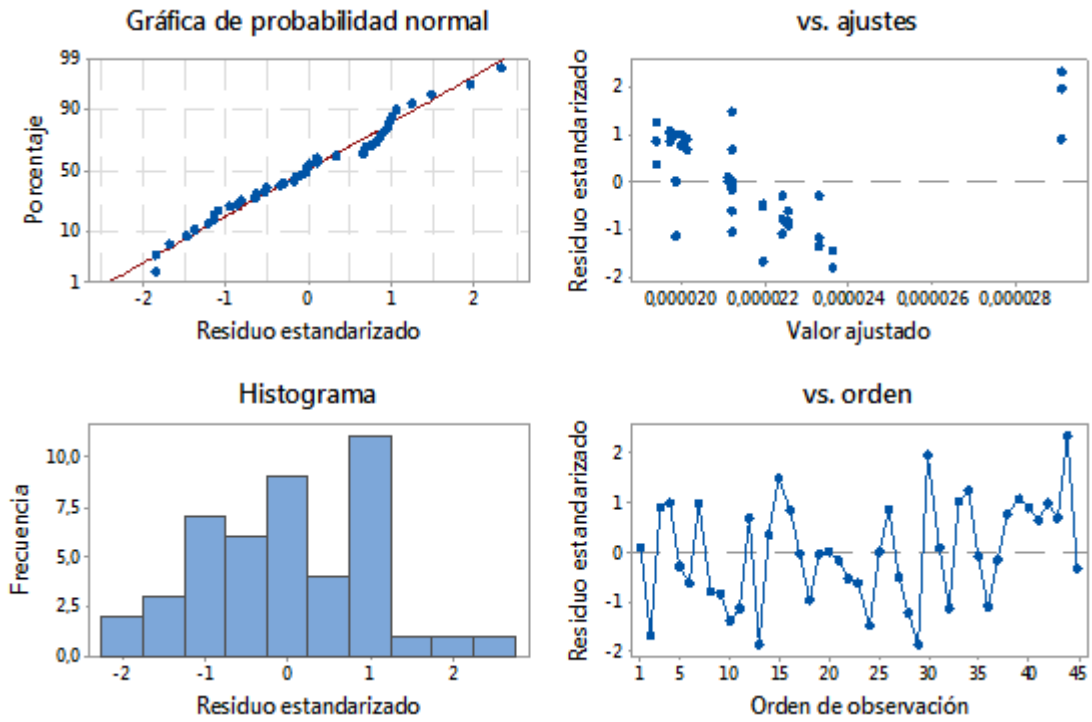
## **11. ANEXO 2: FIGURAS DE ANALISIS DE RESIDUOS**



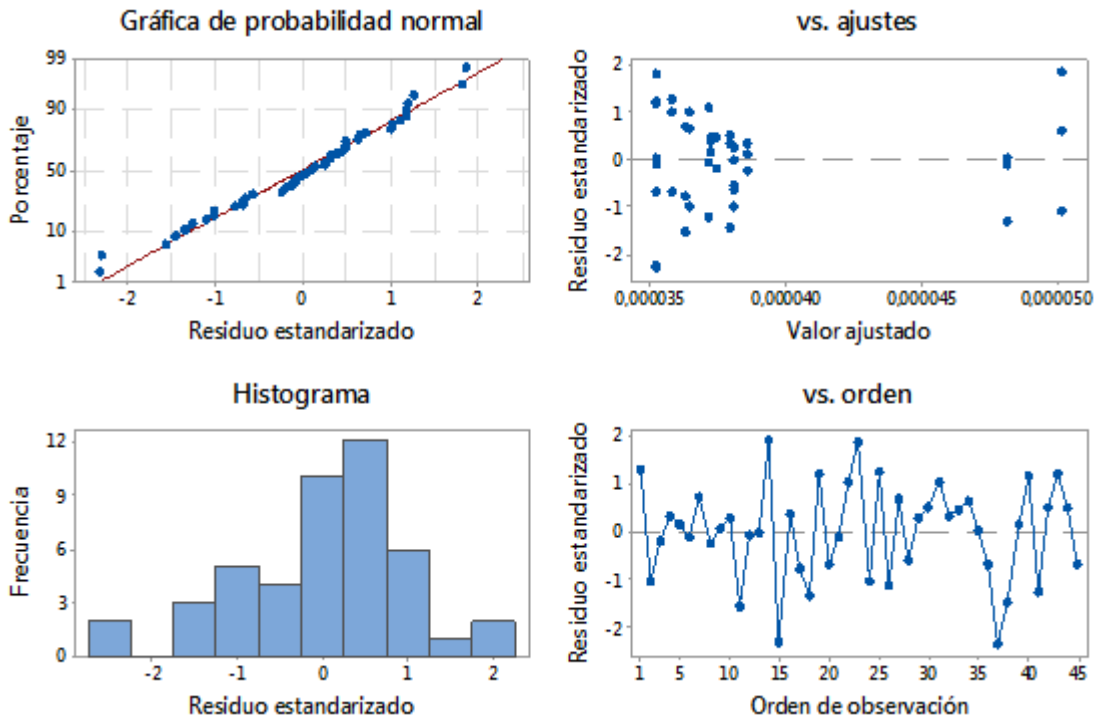
**Figura 56:** Gráfica de residuos para Varianza. **Fuente:** Los Autores.



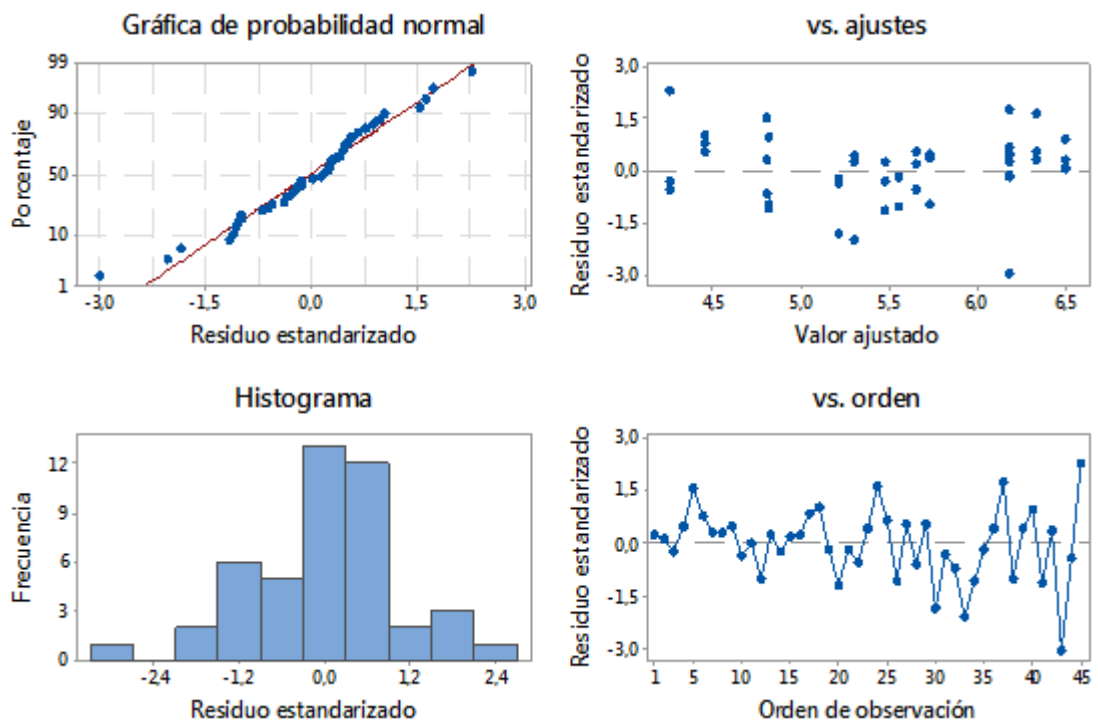
**Figura 57:** Gráfica de residuos para Desviación Estándar. **Fuente:** Los Autores.



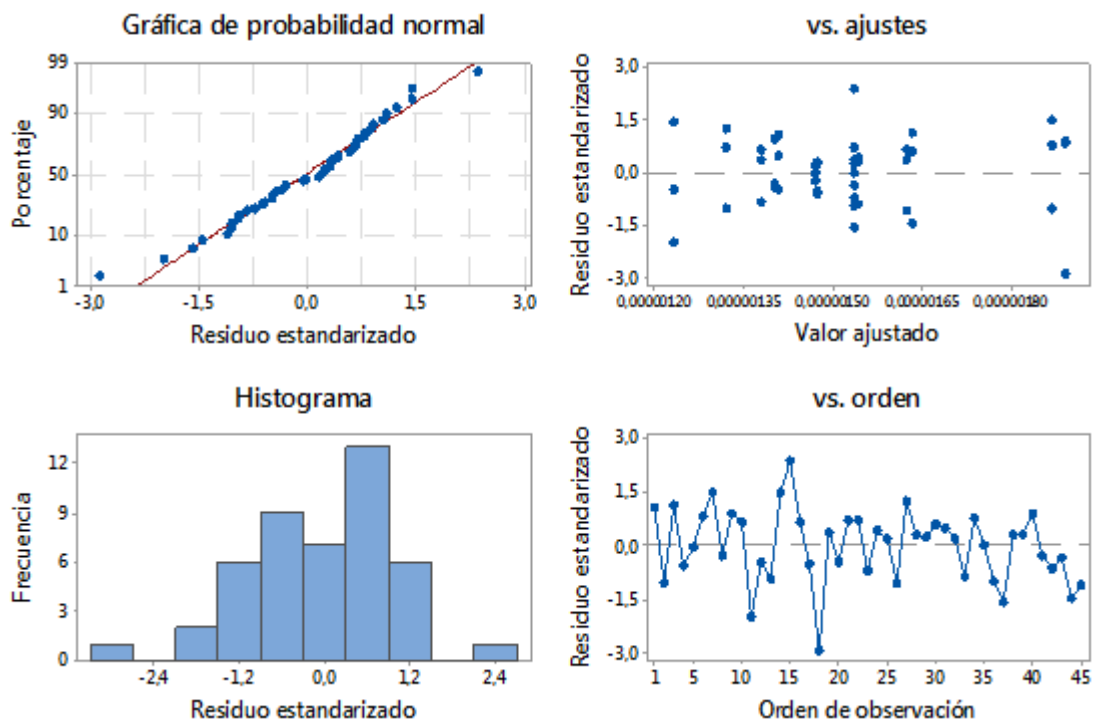
**Figura 58:** Gráfica de residuos para la Media. **Fuente:** Los Autores.



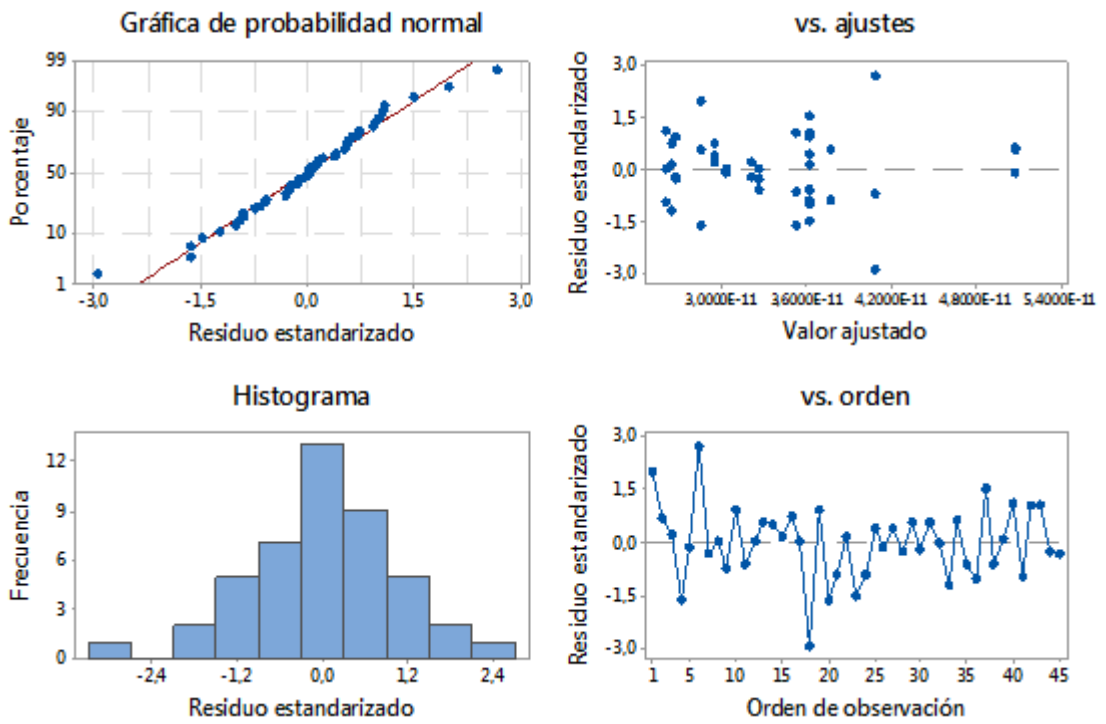
**Figura 59:** Gráfica de residuos para RMS. **Fuente:** Los Autores.



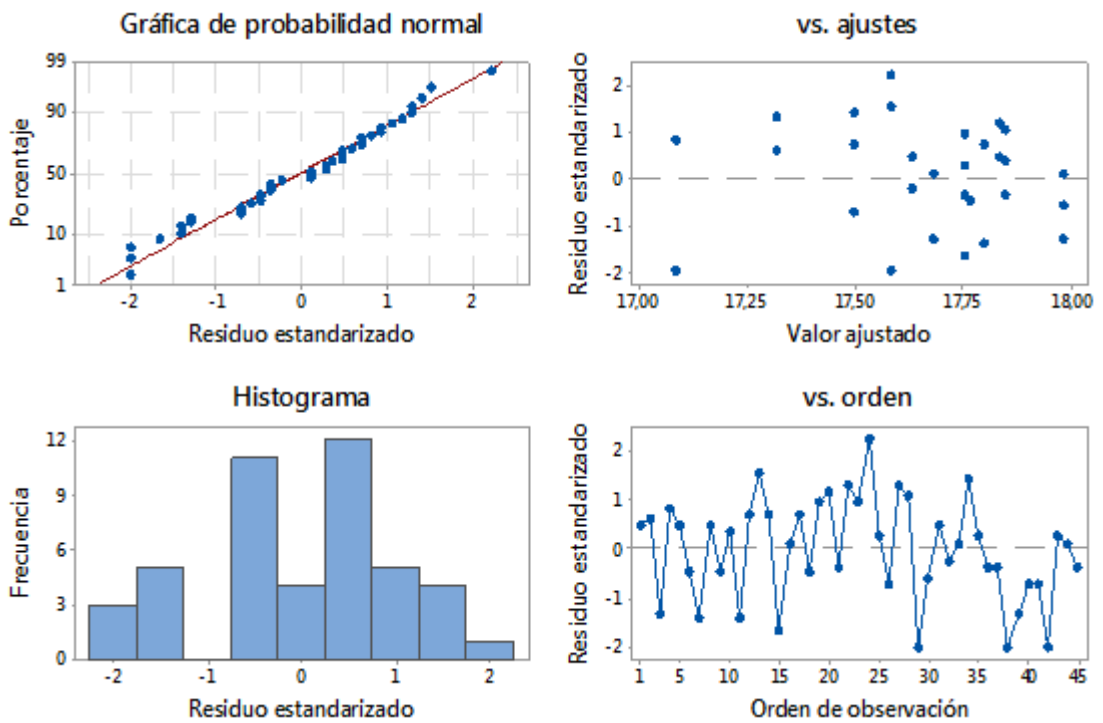
**Figura 60:** Gráfica de residuos para Asimetría. **Fuente:** Los Autores.



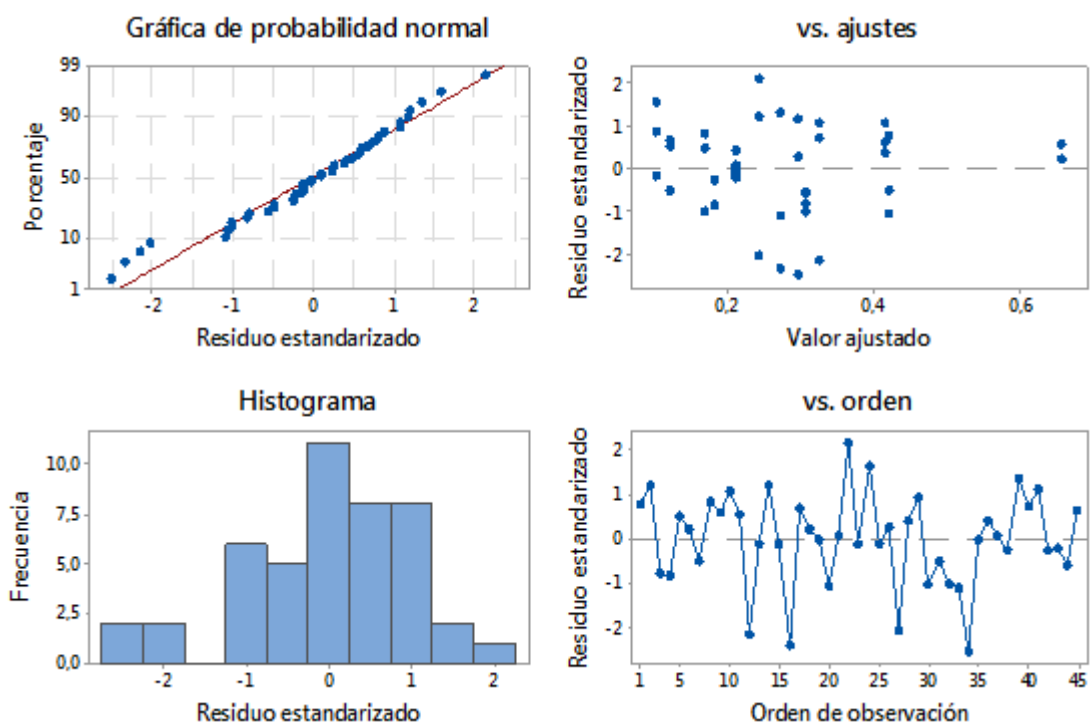
**Figura 61:** Gráfica de residuos para Potencia. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 62:** Gráfica de residuos para Energía. **Fuente:** Los Autores.



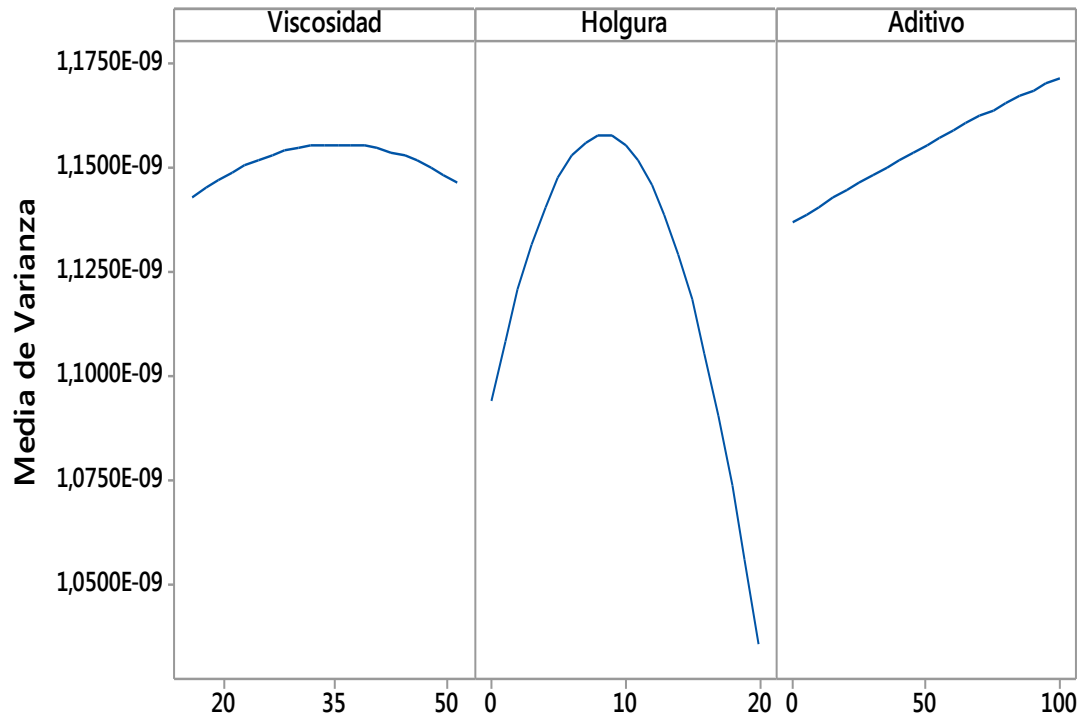
**Figura 63:** Gráfica de residuos para CO2. **Fuente:** Los Autores.



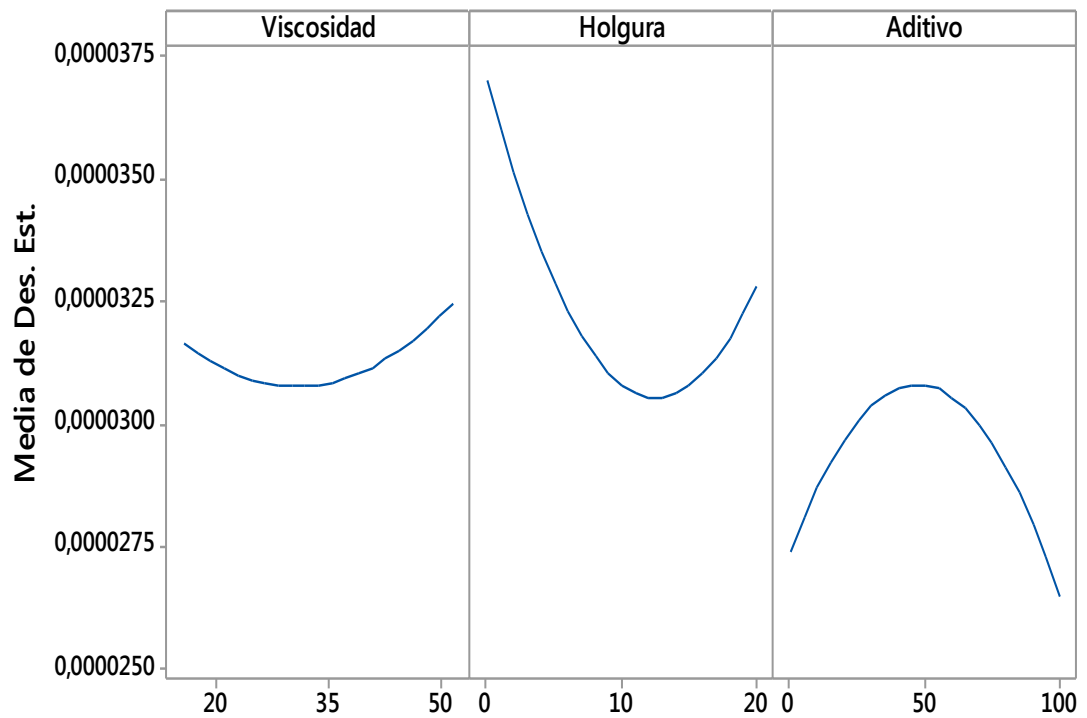
**Figura 64:** Gráfica de residuos para O2. **Fuente:** Los Autores.

## **12. ANEXO 3: FIGURAS DE EFECTOS PRINCIPALES**

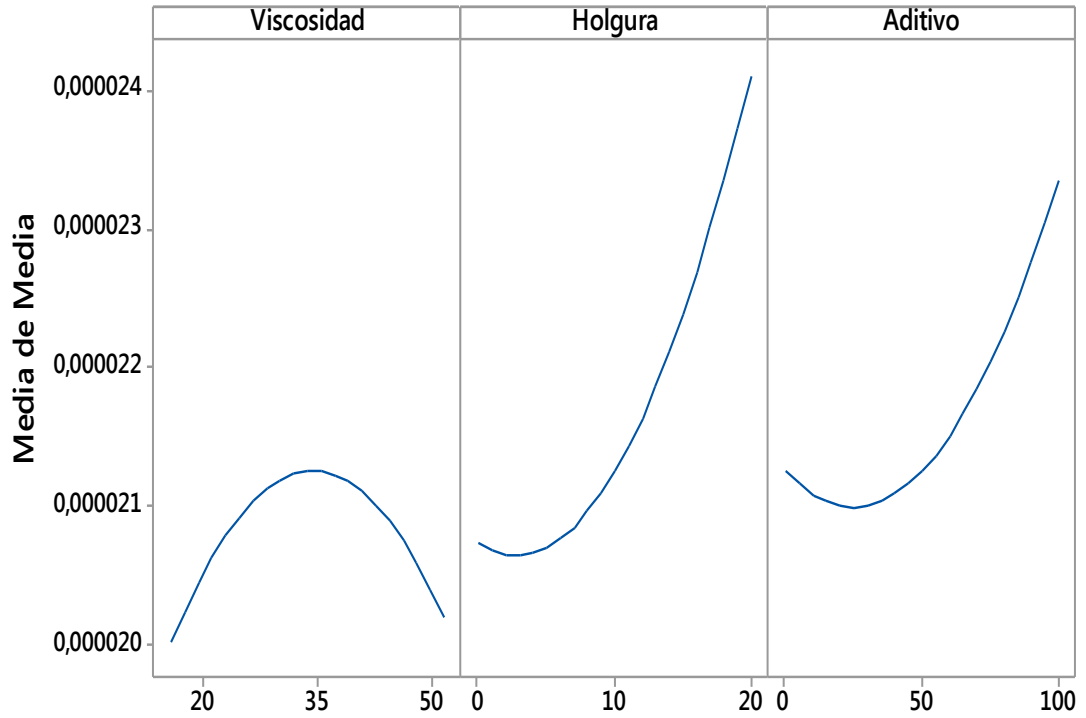




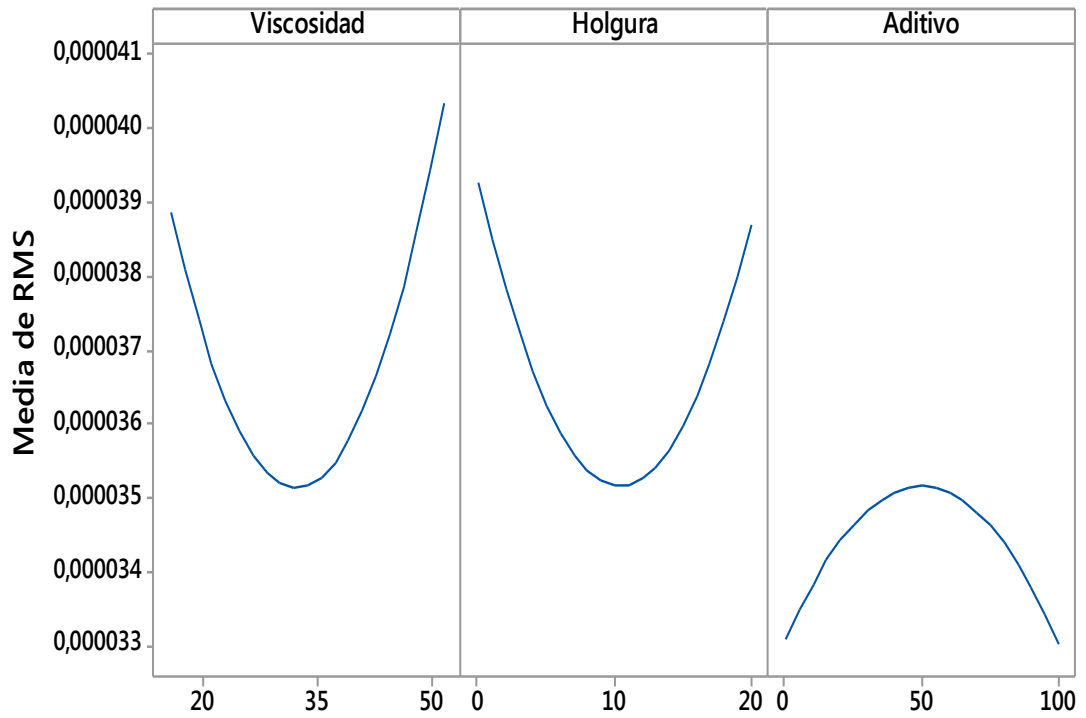
**Figura 65:** Gráfica de efectos principales para Varianza. **Fuente:** Los Autores.



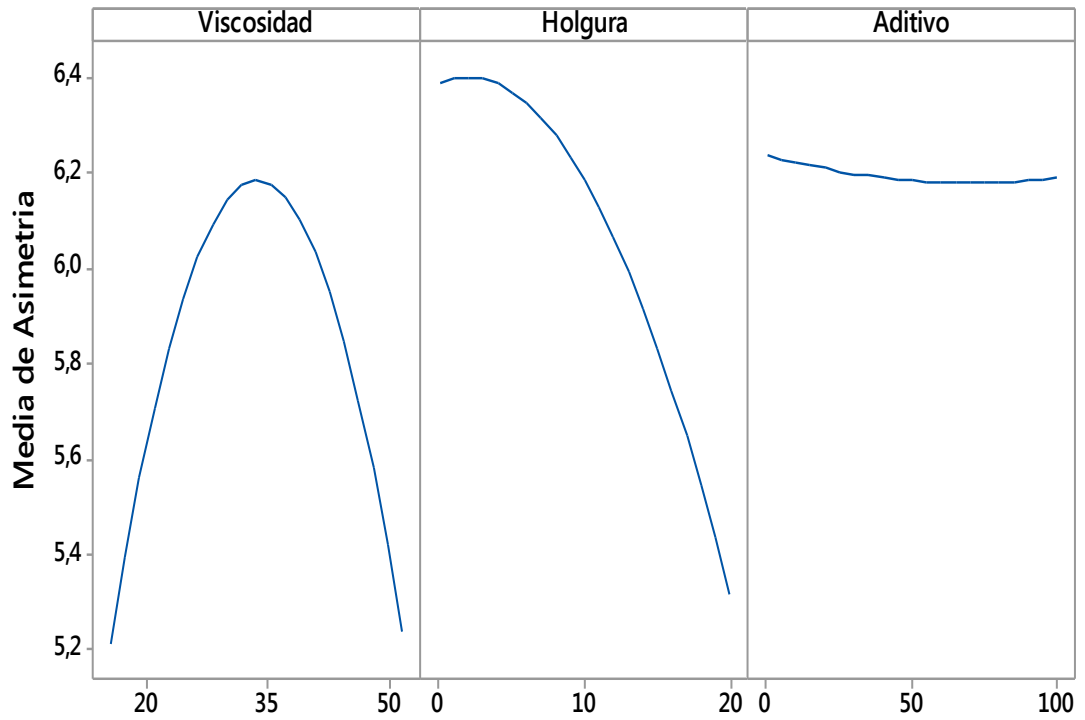
**Figura 66:** Gráfica de efectos principales para Desviación Estándar. **Fuente:** Los Autores.



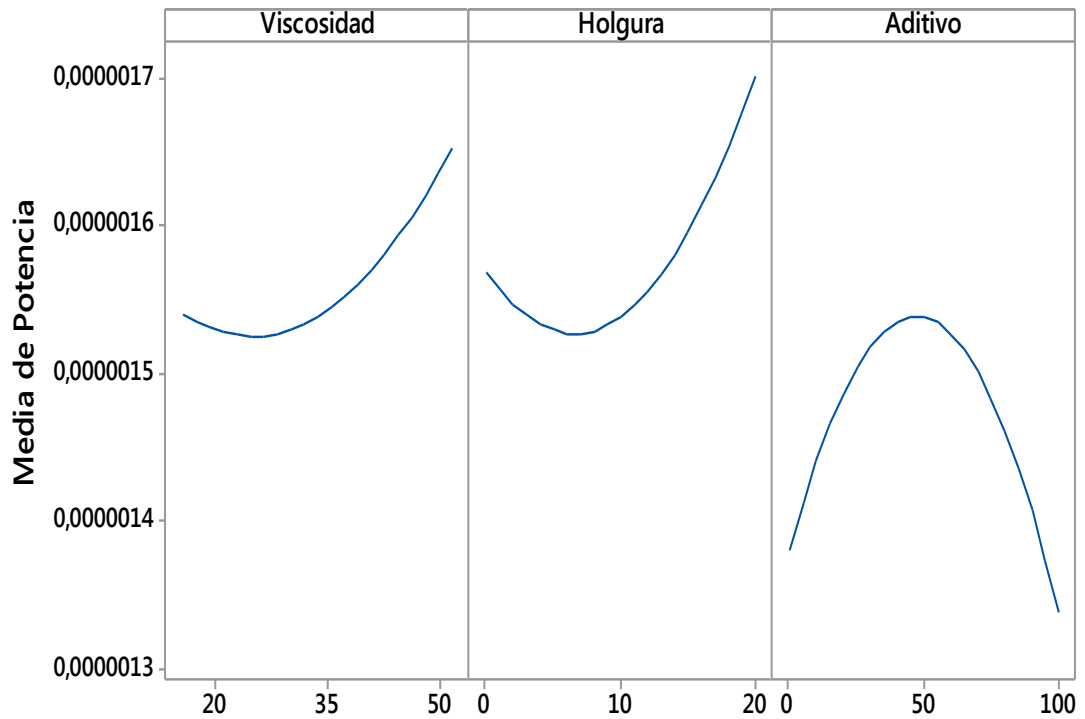
**Figura 67:** Gráfica de efectos principales para la Media. **Fuente:** Los Autores.



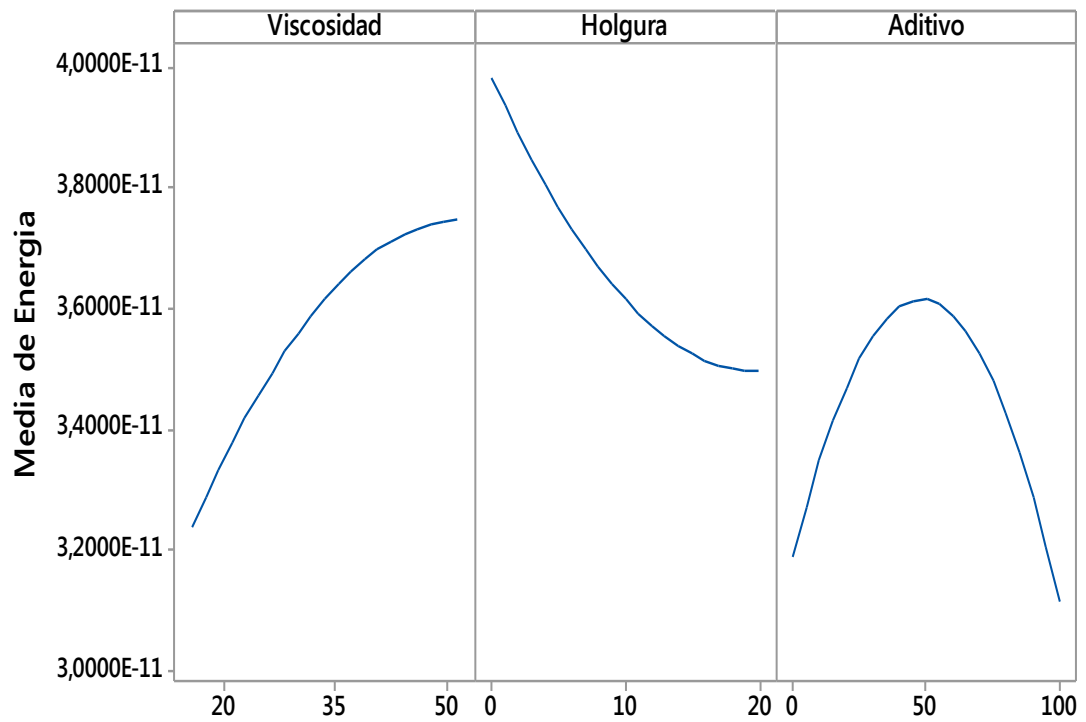
**Figura 68:** Gráfica de efectos principales para RMS. **Fuente:** Los Autores.



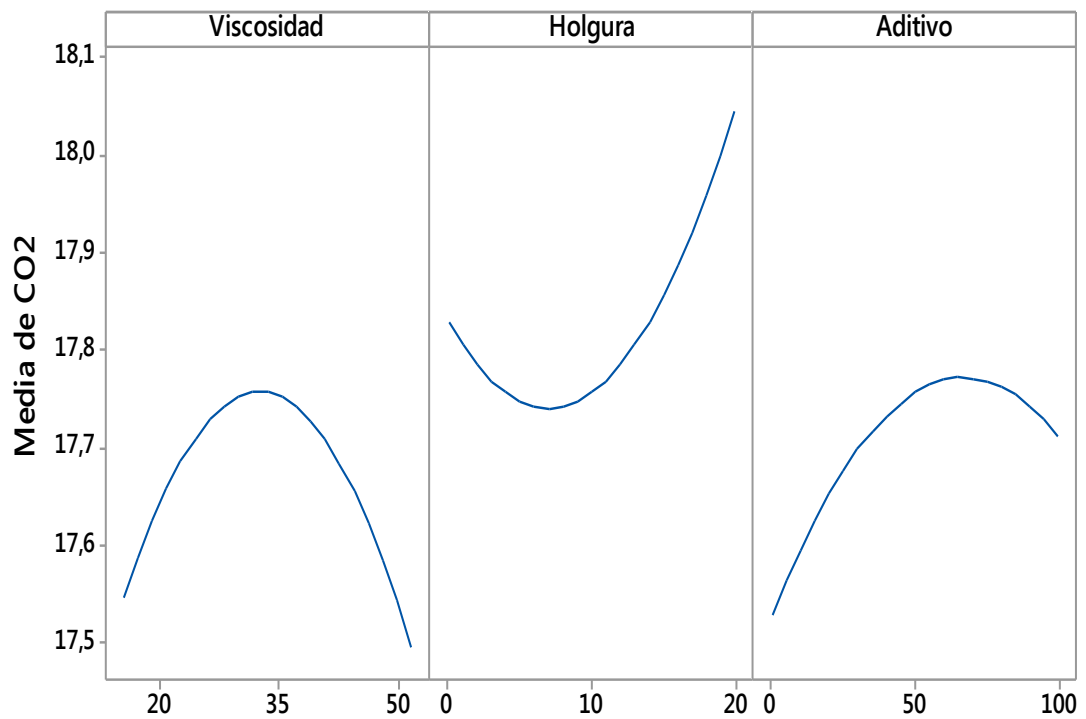
**Figura 69:** Gráfica de efectos principales para Asimetría. **Fuente:** Los Autores.



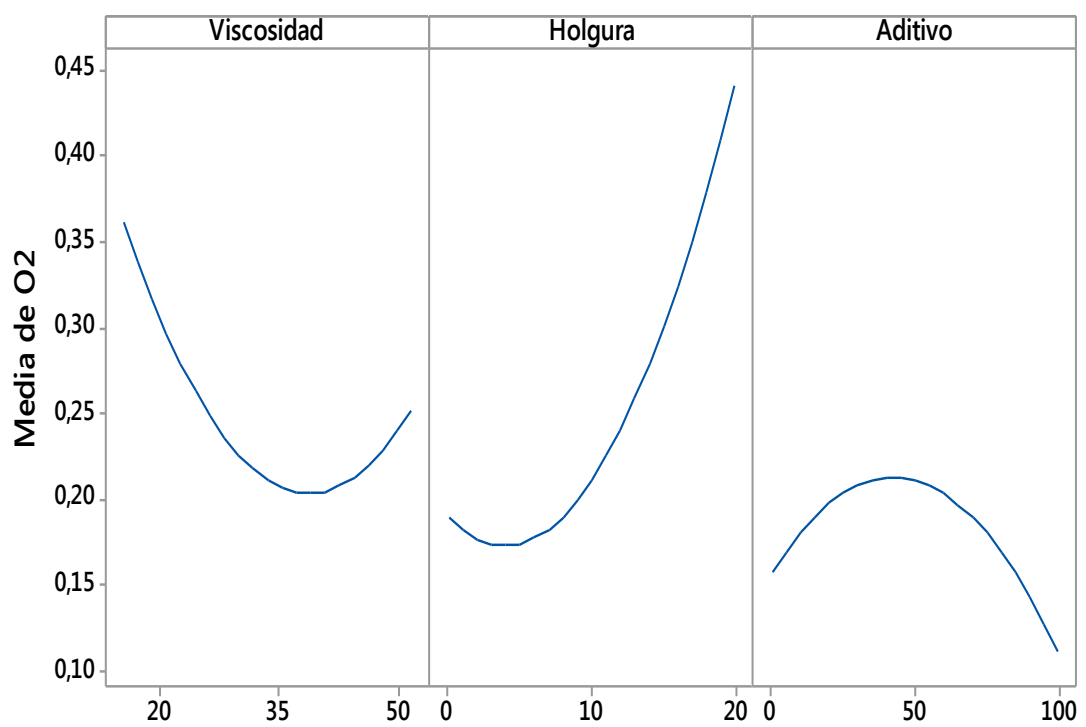
**Figura 70:** Gráfica de efectos principales para Potencia. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 71:** Gráfica de efectos principales para Energía. **Fuente:** Los Autores.

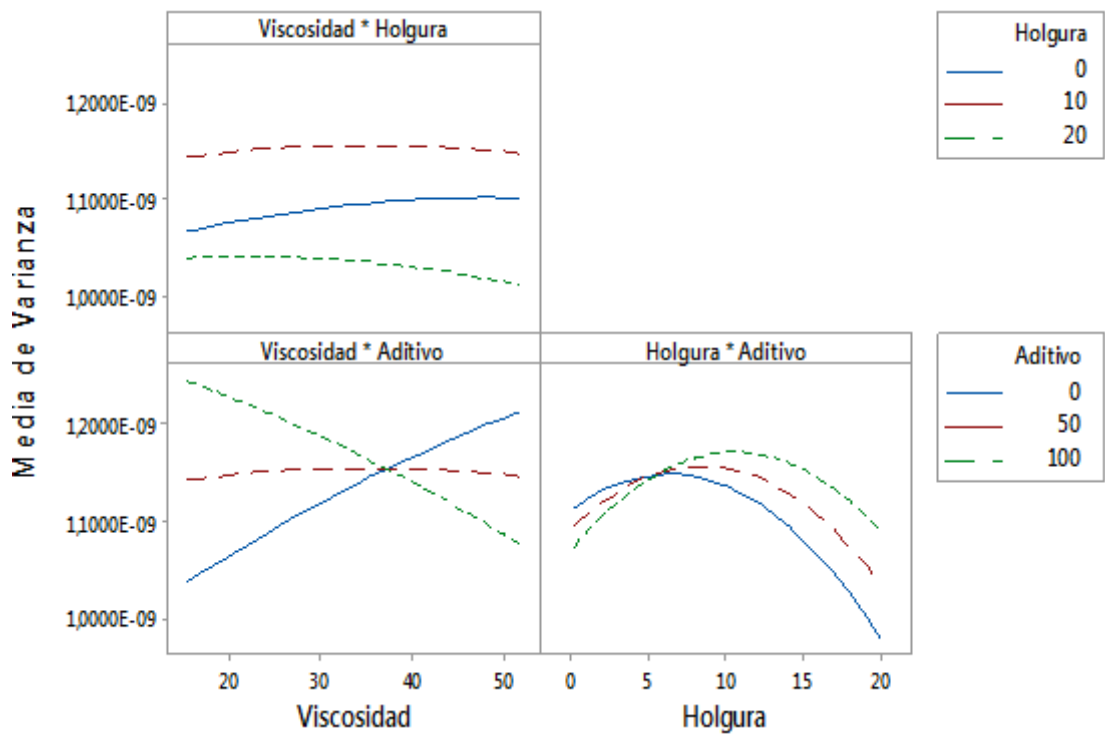


**Figura 72:** Gráfica de efectos principales para CO2. **Fuente:** Los Autores.

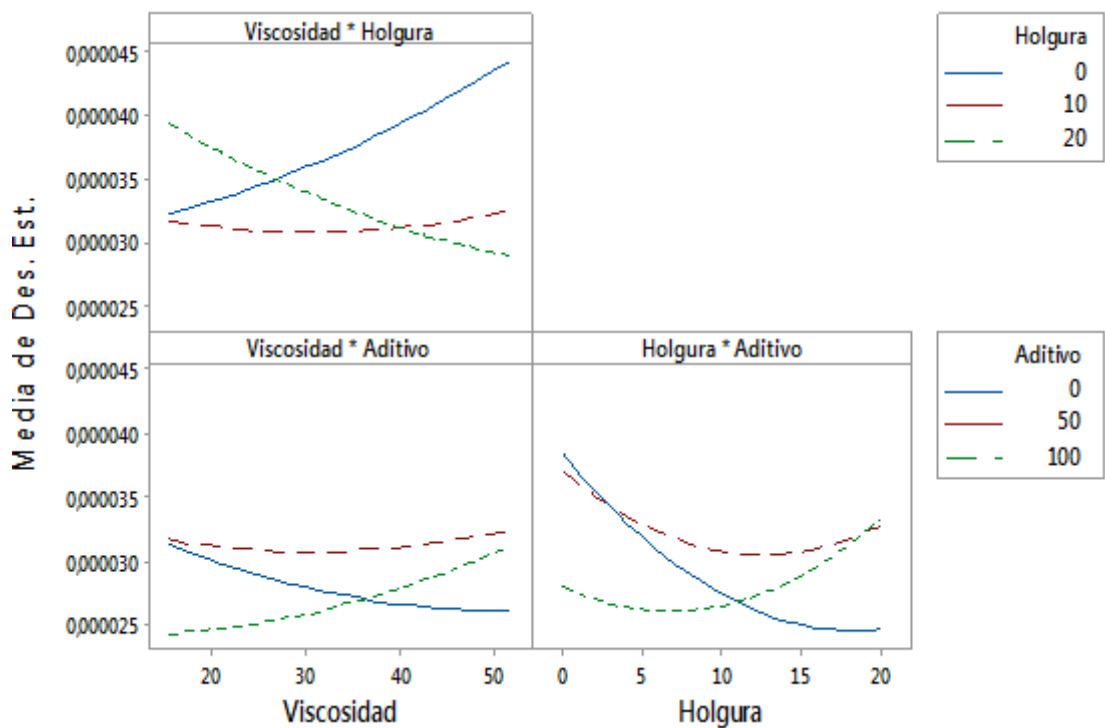


**Figura 73:** Gráfica de efectos principales para O2. **Fuente:** Los Autores.

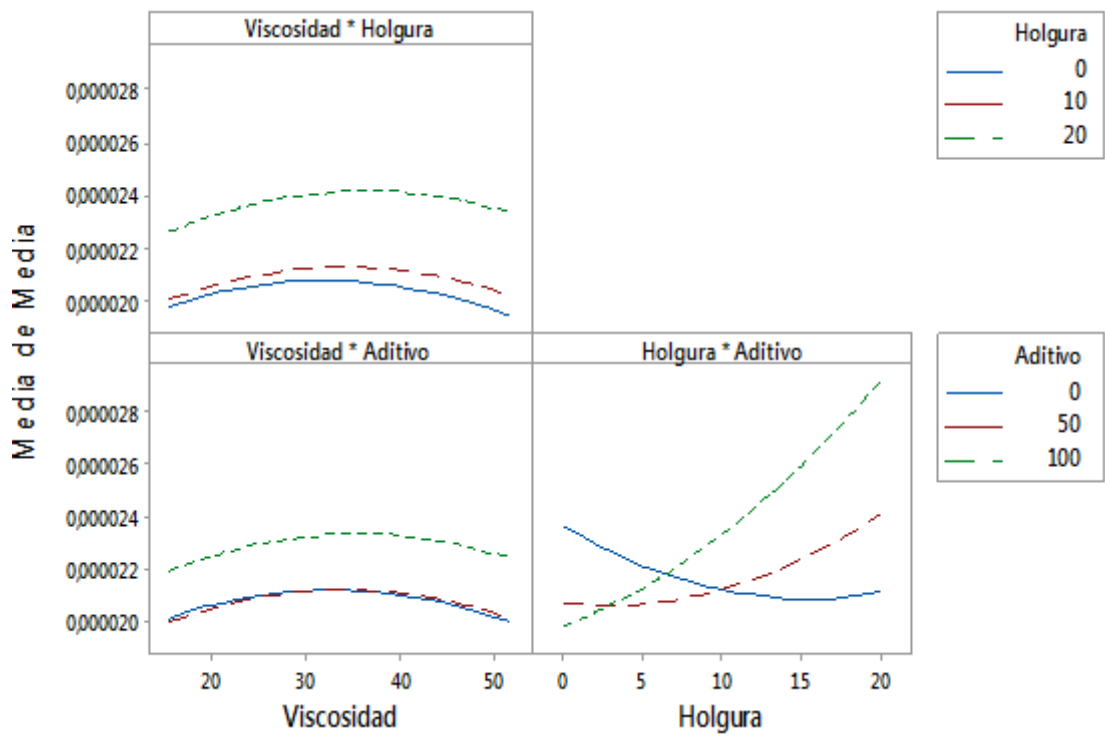
### **13. ANEXO 4: FIGURAS DE INTERACCIONES**



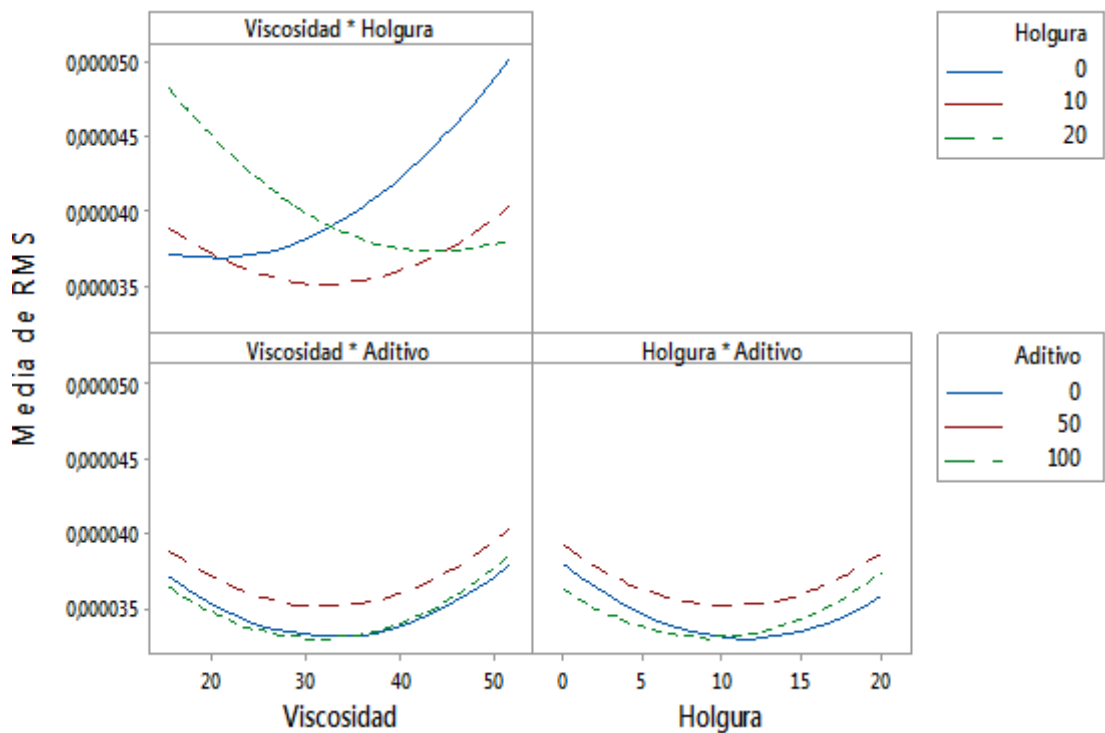
**Figura 74:** Gráfica de interacción para Varianza. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 75:** Gráfica de interacción para Desviación Estándar. **Fuente:** Los Autores.

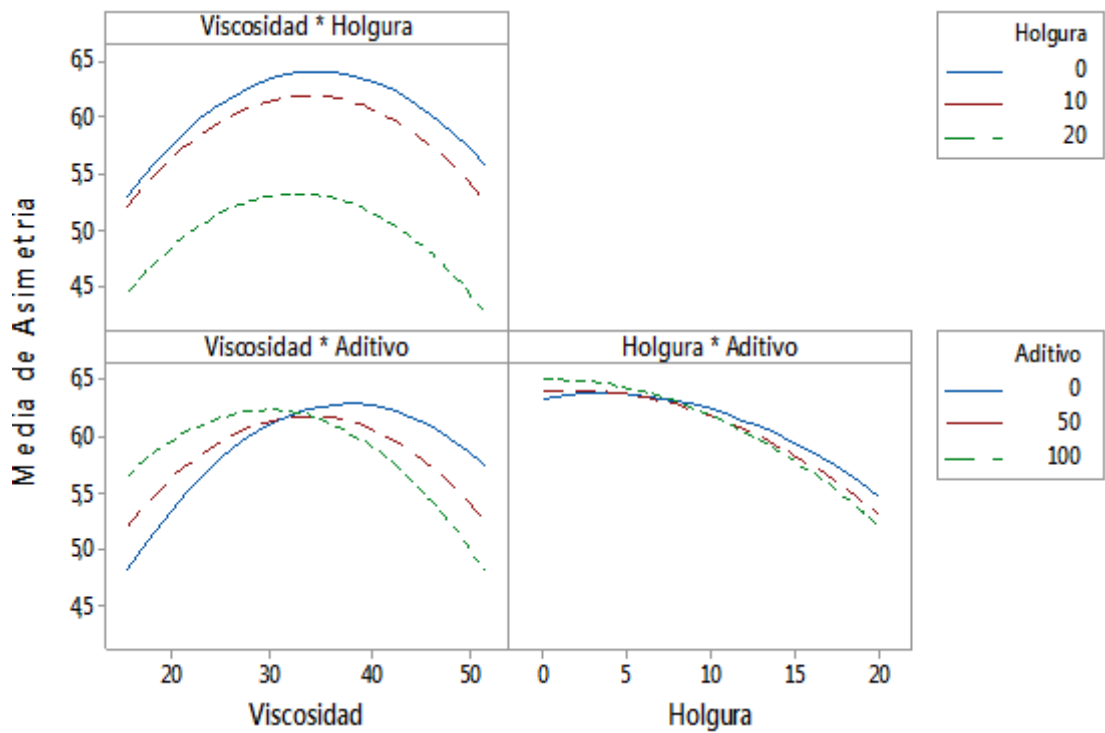


**Figura 76:** Gráfica de interacción para la Media. **Fuente:** Los Autores.

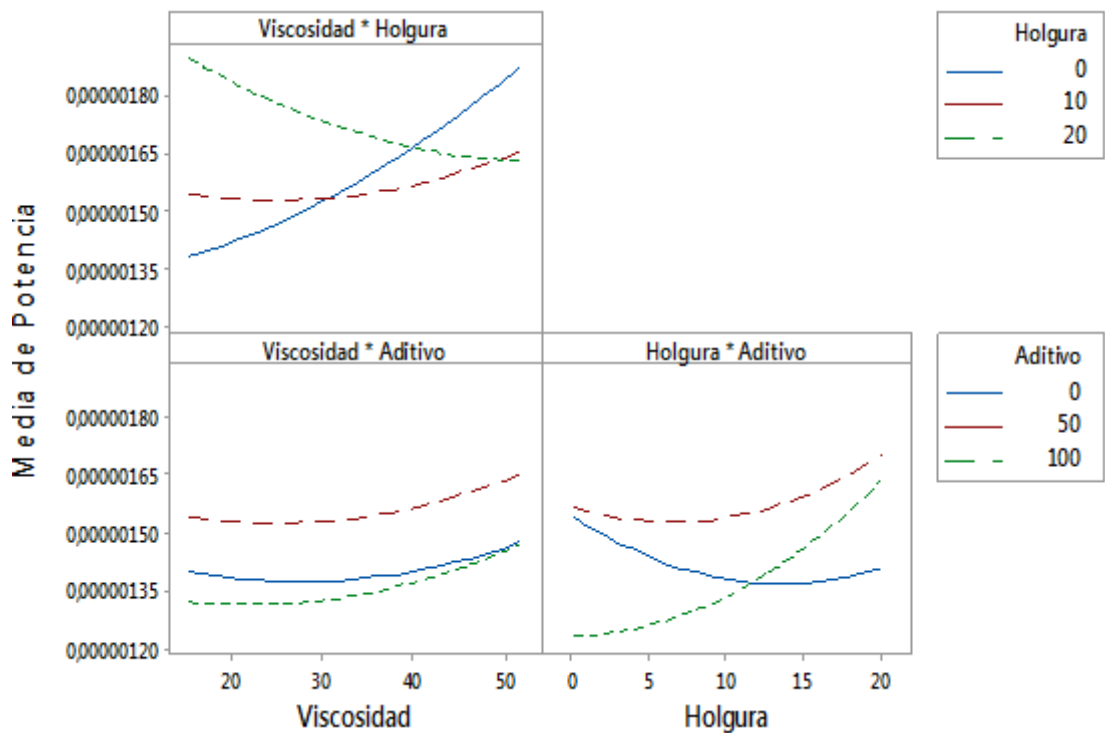


**Figura 77:** Gráfica de interacción para RMS. **Fuente:** Los Autores.

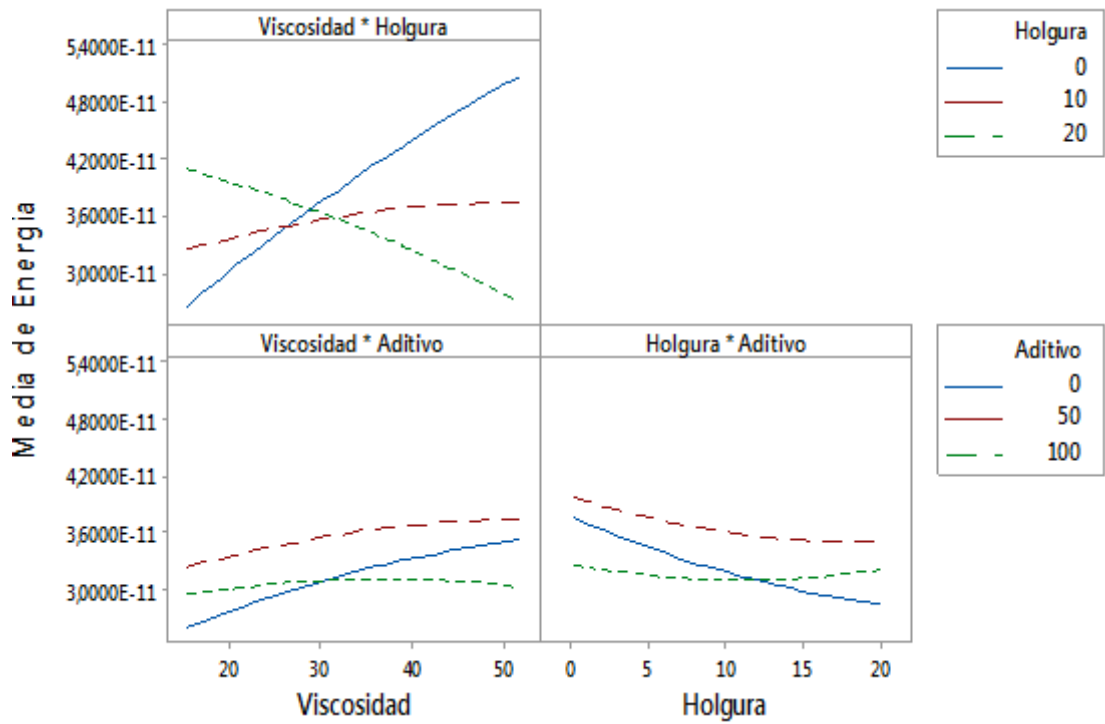




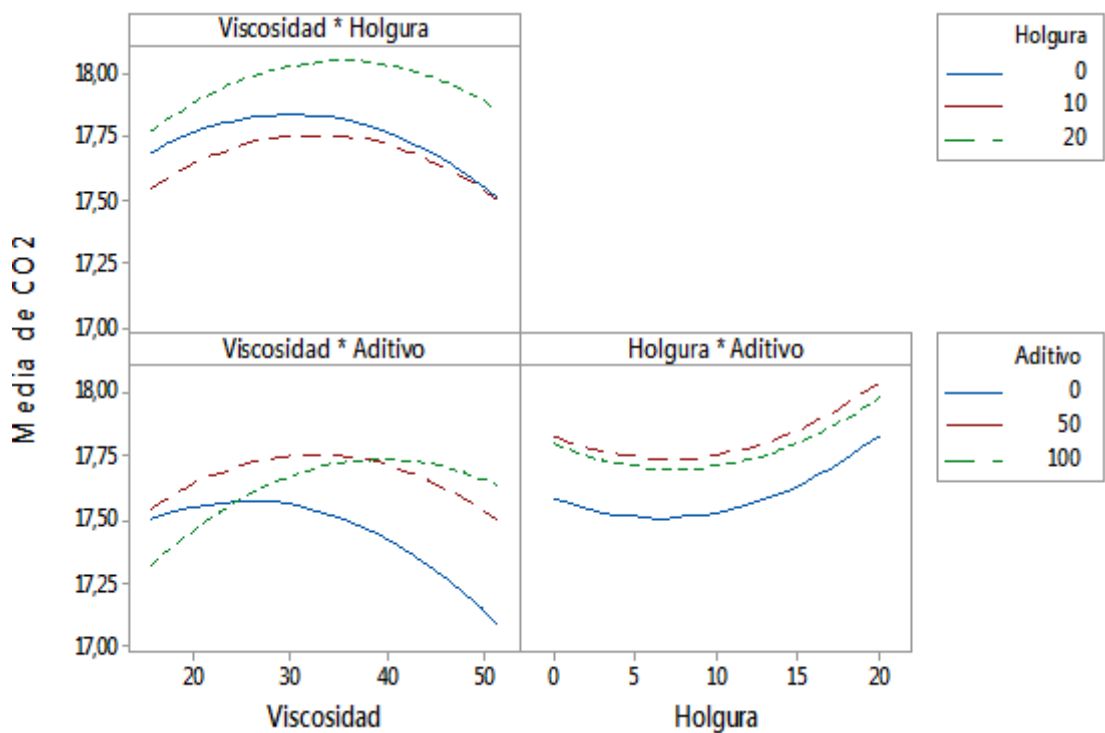
**Figura 78:** Gráfica de interacción para Asimetría. **Fuente:** Los Autores.



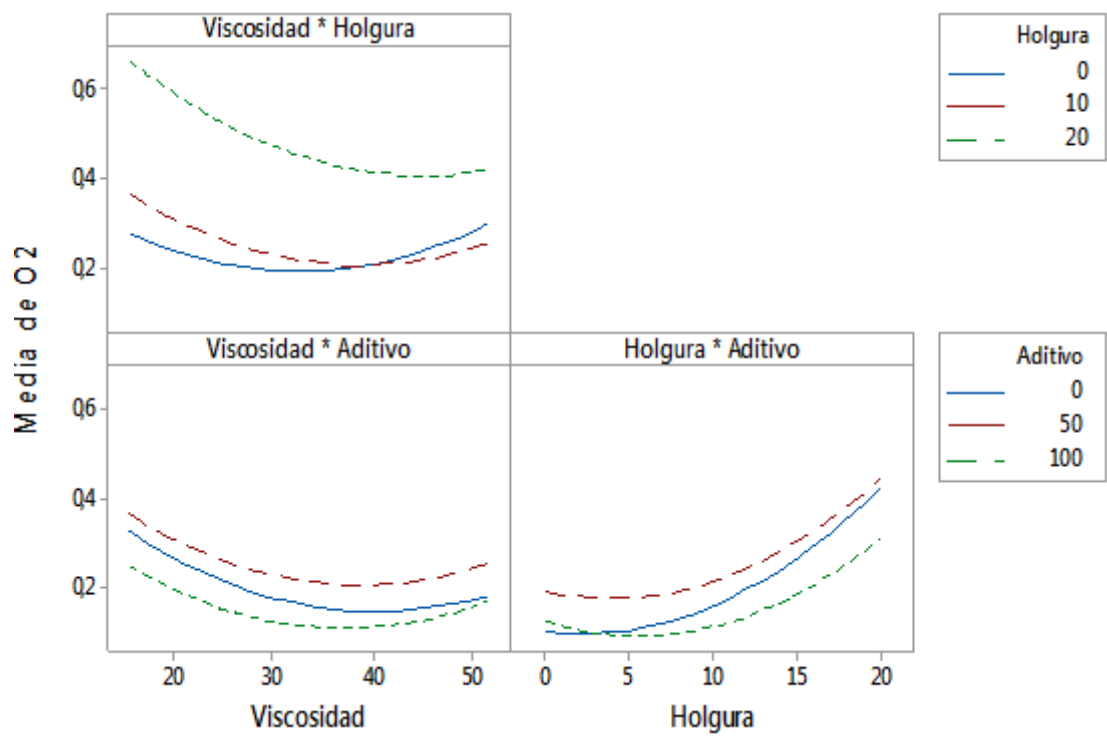
**Figura 79:** Gráfica de interacción para Potencia. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 80:** Gráfica de interacción para Energía. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 81:** Gráfica de interacción para CO2. **Fuente:** Los Autores.



**Figura 82:** Gráfica de interacción para O2. **Fuente:** Los Autores.