

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

“INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA BAJA DE PRESIÓN EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR COMPRESIÓN CRDI HYUNDAI SANTA FÉ 2.0 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RUIDO ”

Tesis previa a la obtención del título
de Ingeniero Mecánico Automotriz

AUTOR:

IVAN ANDRES ORDOÑEZ ASTUDILLO

DIRECTOR:

ING. NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE.

Cuenca, Febrero 2015

Interpretación de los efectos de la baja de presión en un motor de combustión interna encendido por compresión CRDi Hyundai santa fe 2.0 mediante el análisis de ruido

Tesis Pregrado
Universidad Politécnica Salesiana

Cuenca, Febrero 2015

Iván Andrés Ordoñez Astudillo
Estudiante de Ingeniería Mecánica Automotriz

Director: Ing. Néstor Rivera
Ingeniero. Mecánico Automotriz

Ingeniería Mecánica Automotriz
Universidad Politécnica Salesiana
Cuenca - Ecuador

Correo electrónico: ivandres17@hotmail.com

Página web: <http://www.ups.edu.ec>

RESPONSABILIDAD

Los conceptos desarrollados, análisis realizados, programación del software y conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de Iván Andrés Ordoñez Astudillo. Autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana el uso de la misma con fines académicos.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo a la Autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cuenca, 19 de Febrero del 2015



Iván Andrés Ordoñez Astudillo

Yo, Ing. NÉSTOR DIEGO RIVERA CAMPOVERDE. Director de tesis del señor
Iván Andrés Ordoñez Astudillo

CERTIFICO:

Que el presente trabajo de tesis “INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS DE LA BAJA DE PRESIÓN EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR COMPRESIÓN CRDI HYUNDAI SANTA FÉ 2.0 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE RUIDO” fue realizado bajo mi supervisión y control.

Es todo cuanto puedo decir en honor a la verdad, facultando la presente al Sr. Iván Andrés Ordoñez Astudillo Iván Andrés Ordoñez Astudillo, para que hagan uso según crean conveniente.

ATENTAMENTE

Firma: _____



Ing. Néstor Rivera
DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con un cariño inmenso, a mi madre Cecilia Astudillo y a mi Padre Iván Ordoñez, por ser siempre la luz que guía mi camino y el apoyo en momentos en los que más los necesité ya que sin ellos no estuviera cumpliendo una meta más en mi vida.

Andrés

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos primeramente a dios por haberme dado la fortaleza y las ganas para seguir adelante en este proceso de estudio.

A mis abuelitas, mis padres y mi hermano que siempre estuvieron pendientes de mi trabajo y me ayudaron para que este sueño se cumpla.

Al Ing. Néstor Rivera por haberme brindado su ayuda incondicional en la realización de la presente tesis.

Para Andrea Fernández quien siempre me brindo sus consejos, experiencias y apoyo durante toda mi carrera.

Al Ing. Fernando Chica, por haber sido un apoyo durante toda la carrera y más en la etapa final de la misma.

Al Ing. Diego Valladolid por el aporte muy significativo y la ayuda brindada en el desarrollo de este estudio.

A la Ing. Mary Vergara PhD. por su ayuda desinteresada impulsó el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros que de una u otra forma contribuyeron para lograr este objetivo.

Andrés

INDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| FUNDAMENTAR TEÓRICAMENTE EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ALTERNATIVO DIESEL..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN..... | 1 |
| 1.2 FUNCIONAMIENTO TEÓRICO DE UN MOTOR ALTERNATIVO DIESEL..... | 2 |
| 1.2.1 Ciclos de un motor diesel..... | 2 |
| 1.2.1.1 Ciclo De Admisión | 2 |
| 1.2.1.2 Ciclo De Compresión | 3 |
| 1.2.1.3 Ciclo de Explosión | 4 |
| 1.2.1.4 CICLO DE ESCAPE..... | 5 |
| 1.3 LA INYECCIÓN DIESEL..... | 5 |
| 1.3.1 Circuito de baja presión | 6 |
| 1.3.2 Circuito de alta presión: | 7 |
| 1.4 CÁMARA DE COMBUSTIÓN..... | 7 |
| 1.5 EL INYECTOR..... | 8 |
| 1.5.1 Principio de funcionamiento del inyector | 8 |
| 1.5.2 Proceso de atomización..... | 9 |
| 1.5.3 Función de la tobera..... | 9 |
| 1.5.4 Partes del inyector Diesel..... | 10 |
| 2 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DE RUIDO OBTENIDA DEBIDO A LOS EFECTOS DE LA BAJA DE PRESIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR COMPRESIÓN. | 11 |
| INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 2.1 CIRCUITO DE ALTA PRESIÓN CRDI..... | 12 |
| 2.2 SENSOR DE PRESIÓN DEL RIEL | 12 |
| 2.3 VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIÓN EN EL RIEL | 13 |
| 2.4 SALA SEMI ANECOICA | 14 |
| 2.4.1 Difusión del sonido | 15 |
| 2.4.2 Transmisión..... | 15 |
| 2.4.3 Absorción | 15 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| 2.4.4 | Reflexión | 15 |
| 2.4.5 | Refracción | 16 |
| 2.4.6 | Dispersión | 16 |
| 2.5 | CENTRO ACÚSTICO EN EL MOTOR..... | 17 |
| 2.6 | Elementos de medición..... | 18 |
| 2.6.1 | Analizador de Señales Acústicas ADASH Modelo A3716U | 18 |
| 2.6.2 | El Micrófono | 18 |
| 2.7 | ANÁLISIS ESPECTRAL..... | 19 |
| 2.8 | TRATAMIENTO DE LA SEÑAL EN EL DOMINIO DE FRECUENCIA ... | 20 |
| 2.8.1 | Aliasing | 22 |
| 2.8.2 | Fugas laterales..... | 22 |
| CAPITULO III..... | | 23 |
| 3 | ANÁLISIS DE DATOS DE ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DE LOS FALLOS EN LA IGNICION DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA DIESEL..... | 23 |
| 3.1 | Diseño experimental..... | 23 |
| 3.1.1 | Introducción al diseño de experimentos..... | 23 |
| 3.2 | CONCEPTOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS..... | 24 |
| 3.2.1 | El experimento | 24 |
| 3.2.2 | Diseño del experimento..... | 24 |
| 3.2.3 | Determinar Factores y niveles..... | 24 |
| 3.2.3.1 | Revoluciones del motor..... | 24 |
| 3.2.3.2 | Presión de inyección..... | 25 |
| 3.2.3.3 | Aditivo del Diesel..... | 25 |
| 3.2.4 | Factores de bloqueo..... | 26 |
| 3.2.4.1 | Humedad relativa | 26 |
| 3.2.4.2 | Temperatura ambiente | 26 |
| 3.2.4.3 | Carga externa del motor. | 26 |
| 3.2.4.4 | Temperatura del refrigerante | 26 |
| 3.3 | OBTENCIÓN DE MUESTRAS..... | 27 |
| 3.4 | DESARROLLO DEL EXPERIMENTO..... | 27 |
| 3.4.1 | Control de la presión de combustible..... | 27 |
| 3.4.2 | Comando de las revoluciones por minuto del motor | 29 |
| 3.4.3 | Control de la densidad del Diesel..... | 29 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.4.4 | Toma de muestras | 31 |
| 3.4.5 | Unidad experimental | 32 |
| 3.4.6 | Variable de interés o respuesta..... | 32 |
| 3.4.7 | Tamaño del Experimento | 32 |
| 3.4.8 | Interacción de factores | 33 |
| 3.4.9 | Diseño equilibrado | 33 |
| 3.5 | PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS..... | 33 |
| 3.6 | Etapas del diseño experimental..... | 33 |
| 3.6.1 | Planeación..... | 34 |
| 3.6.1.1 | Definición de hipótesis..... | 34 |
| 3.6.1.2 | Selección del Diseño..... | 34 |
| 3.6.1.3 | Definición de la variable dependiente..... | 34 |
| 3.6.1.4 | Aleatorización | 35 |
| 3.6.1.5 | Planeación del trabajo..... | 36 |
| 3.6.2 | Análisis de datos..... | 37 |
| 3.6.3 | Interpretación..... | 38 |
| 3.6.4 | Conclusiones Finales..... | 38 |
| 3.7 | Diseño factorial..... | 38 |
| 3.8 | ANALISIS DE PARETO..... | 40 |
| 3.8.1 | Definición..... | 40 |
| 3.8.2 | Objetivo..... | 40 |
| 3.8.3 | Características principales..... | 40 |
| 3.8.4 | Diagramas de pareto..... | 41 |
| 3.8.4.1 | Diagrama de Pareto para Media | 41 |
| 3.8.4.2 | Diagrama de Pareto para Varianza | 42 |
| 3.8.4.3 | Diagrama de Pareto para la Desviación Estándar..... | 42 |
| 3.8.4.4 | Diagrama de Pareto para la Mediana..... | 43 |
| 3.8.4.5 | Diagrama de Pareto para Máximo..... | 43 |
| 3.8.4.6 | Diagrama de Pareto para Mínimo..... | 44 |
| 3.8.4.7 | Diagrama de Pareto para Potencia..... | 44 |
| 3.8.4.8 | Diagrama de Pareto para Energía..... | 45 |
| 3.8.4.9 | Diagrama de Pareto para el Factor De Curtosis..... | 45 |
| 3.8.4.10 | Diagrama de Pareto para Asimetría..... | 46 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.8.4.11 | Diagrama de Pareto para Valor RMS. | 46 |
| 3.8.4.12 | Diagrama de Pareto para Factor de Cresta..... | 47 |
| 3.8.4.13 | Diagrama de Pareto para Potencia de Intervalo..... | 47 |
| 3.9 | ANÁLISIS DE RESIDUOS..... | 48 |
| 3.9.1 | Gráficas de residuos para Media..... | 48 |
| 3.9.2 | Gráficas de residuos para Varianza..... | 49 |
| 3.9.3 | Gráficas de residuos para Desviación Estándar..... | 50 |
| 3.9.4 | Gráficas de residuos para Mediana..... | 50 |
| 3.9.5 | Gráficas de residuos para Máximo..... | 51 |
| 3.9.6 | Gráficas de residuos para Mínimo..... | 51 |
| 3.9.7 | Gráficas de residuos para Potencia..... | 52 |
| 3.9.8 | Gráfica de residuos para Energía..... | 52 |
| 3.9.9 | Gráficas de residuos para Factor de Curtosis..... | 53 |
| 3.9.10 | Gráficas de residuos para Valor RMS..... | 53 |
| 3.9.11 | Gráficas de residuos para Asimetría..... | 54 |
| 3.9.12 | Gráfica de residuos para Factor De Cresta..... | 54 |
| 3.9.13 | Gráfica de residuos para Potencia de Intervalo..... | 55 |
| 3.10 | ANÁLISIS DE INTERACCIONES Y EFECTOS PRINCIPALES..... | 56 |
| 3.10.1 | Análisis de Desviación Estándar..... | 56 |
| 3.10.2 | Análisis de Mediana..... | 57 |
| 3.10.3 | Análisis de Máximo..... | 58 |
| 3.10.4 | Análisis de Mínimo..... | 59 |
| 3.10.5 | Análisis de Energía..... | 60 |
| 3.10.6 | Análisis del Factor De Curtosis..... | 61 |
| 3.10.7 | Análisis de asimetría..... | 62 |
| 3.10.8 | Análisis de Valor RMS..... | 63 |
| 3.10.9 | Análisis de superficie..... | 65 |
| 3.10.10 | Análisis de Desviación Estándar..... | 65 |
| 3.10.11 | Análisis de Mediana..... | 66 |
| 3.10.12 | Análisis de superficie para Máximo..... | 67 |
| 3.10.13 | Análisis de superficie para Mínimo..... | 68 |
| 3.10.14 | Análisis de superficie para Energía..... | 69 |
| 3.10.15 | Análisis de Valor RMS..... | 70 |

| | | |
|-------------------------------------|---|----|
| 3.11 | OBTENCIÓN DE ESPECTROS CARACTERÍSTICOS..... | 71 |
| 3.11.1 | Obtención del espectro patrón a 820[rpm]..... | 72 |
| 3.11.2 | Obtención del espectro patrón a 1660[rpm]..... | 73 |
| 3.11.3 | Obtención del espectro patrón a 2500 [rpm]..... | 74 |
| CAPITULO IV..... | | 75 |
| 4 | CREACIÓN DE BASE DE DATOS DE ESPECTROS OBTENIDOS EN EL PRSENTE PROYECTO. | 75 |
| 4.1 | ESPECIFICACIONES DEL MOTOR..... | 75 |
| 4.2 | CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DURANTE LA TOMA DE MUESTRAS..... | 76 |
| 4.2.1 | Posición del micrófono para toma de muestras..... | 76 |
| 4.3 | EFECTOS CRÍTICOS EN 820 [RPM] | 76 |
| 4.4 | EFECTOS CRÍTICOS EN 1660 [RPM] | 78 |
| 4.5 | EFECTOS CRÍTICOS A 2500 [RPM] | 79 |
| 4.6 | ESPECTROS OBTENIDOS EN EL EXPERIMENTO..... | 81 |
| CONLCUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | | 87 |
| CONCLUSIONES | | 87 |
| RECOMENDACIONES | | 88 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 89 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Ciclo de admisión. | 2 |
| Figura 1.2 Ciclo de compresión. | 3 |
| Figura 1.3 Ciclo de explosión. | 4 |
| Figura 1.4 Momento de la inyección..... | 4 |
| Figura 1.5 Ciclo de escape. | 5 |
| Figura 1.6 Sistema de Inyección. | 6 |
| Figura 1.7 Bomba rotativa de inyección seccionada..... | 7 |
| Figura 1.8 cámara de combustión | 7 |
| Figura 1.9 Inyector CRDI | 8 |
| Figura 2.1 localización del sensor de presión..... | 13 |
| Figura 2.2 cámara semi anecoica. | 14 |
| Figura 2.3 Reflexión del sonido. | 16 |
| Figura 2.4 dispersión del sonido. | 16 |
| Figura 2.5 Centro acústico. | 17 |
| Figura 2.6 Ubicación del micrófono de muestreo..... | 17 |
| Figura 2.7 Micrófono condensador de precisión unidireccional..... | 19 |
| Figura 2.8 Espectro de ruidos y su transformada..... | 20 |
| Figura 3.1 Circuito para el control de voltajes de las señales..... | 27 |
| Figura 3.2 Esquema para control de voltajes de las señales. | 28 |
| Figura 3.3 Ubicación del motor en la cámara anecoica. | 31 |
| Figura 3.4 Interfaz del programa en Matlab. Fuente:..... | 37 |
| Figura 3.5 Diagrama de Pareto para la Media. Fuente:..... | 41 |
| Figura 3.6 Diagrama de Pareto para la Varianza. Fuente: | 42 |
| Figura 3.7 Diagrama de Pareto para la Desviación Estándar..... | 42 |
| Figura 3.8 Diagrama de Pareto para Mediana..... | 43 |
| Figura 3.9 Diagrama de Pareto para Máximo. | 43 |
| Figura 3.10 Diagrama de Pareto para Mínimo..... | 44 |
| Figura 3.11 Diagrama de Pareto para Potencia..... | 44 |
| Figura 3.12 Diagrama de Pareto para Energía. | 45 |
| Figura 3.13 Diagrama de Pareto para el Factor De Curtosis..... | 45 |
| Figura 3.14 Diagrama de Pareto para Asimetría..... | 46 |
| Figura 3.15 Diagrama de Pareto para Valor RMS. | 46 |
| Figura 3.16 Diagrama de Pareto para Factor De Cresta..... | 47 |
| Figura 3.17 Diagrama de Pareto para Potencia de Intervalo..... | 47 |
| Figura 3.18 Gráfica de Residuos para Media..... | 49 |
| Figura 3.19 Gráfica de Residuos para Varianza..... | 49 |
| Figura 3.20 Gráfica de Residuos para Desviación Estándar..... | 50 |
| Figura 3.21 Gráfica de Residuos para Mediana..... | 50 |
| Figura 3.22 Gráfica de Residuos para Máximo. | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 23 Gráfica de Residuos para Mínimo. | 51 |
| Figura 3. 24 Gráfica de Residuos para Potencia. | 52 |
| Figura 3. 25 Gráfica de Residuos para Energía. | 52 |
| Figura 3. 26 Gráfica de Residuos para Factor de Curtosis. | 53 |
| Figura 3. 27 Gráfica de Residuos para Valor RMS. | 53 |
| Figura 3. 28 Gráfica de Residuos para Asimetría. | 54 |
| Figura 3. 29 Gráfica de Residuos para Factor de Cresta. | 54 |
| Figura 3. 30 Gráfica de Residuos para Potencia de Intervalo. | 55 |
| Figura 3. 31 Gráfica de interacción para Desviación Estándar. | 56 |
| Figura 3. 32 Gráfica de efectos principales para Desviación Estándar. | 57 |
| Figura 3. 33 Gráfica de interacción para Mediana. | 57 |
| Figura 3. 34 Gráfica de efectos principales para mediana. | 58 |
| Figura 3. 35 Gráfica de interacción para Máximo. | 58 |
| Figura 3. 36 Gráfica de efectos principales para Máximo. | 59 |
| Figura 3. 37 Gráfica de interacción para Mínimo. | 59 |
| Figura 3. 38 Gráfica de efectos principales para Mínimo. | 60 |
| Figura 3. 39 Gráfica de interacción para Energía. | 60 |
| Figura 3. 40 Gráfica de efectos principales para Energía. | 61 |
| Figura 3. 41 Gráfica de interacción para Máximo. | 61 |
| Figura 3. 42 Gráfica de efectos principales para Factor de Curtosis. | 62 |
| Figura 3. 43 Gráfica de interacción para Asimetría. | 62 |
| Figura 3. 44 Gráfica de efectos principales para Asimetría. | 63 |
| Figura 3. 45 Gráfica de interacción para Valor RMS. Fuente | 63 |
| Figura 3. 46 Gráfica de efectos principales para Valor RMS. | 64 |
| Figura 3. 47 Gráfica de superficies para Desviación Estándar. | 65 |
| Figura 3. 48 Gráfica de superficie para Mediana. | 66 |
| Figura 3. 49 Gráfica de superficie para Máximo. | 67 |
| Figura 3. 50 Gráfica de superficie para Mínimo. | 68 |
| Figura 3. 51 Gráfica de superficie para Energía. | 69 |
| Figura 3. 52 Gráfica de superficie para Valor RMS. | 70 |
| Figura 3. 53 Gráfica de espectro patrón a 820[rpm]. | 73 |
| Figura 3. 54 Gráfica de espectro patrón a 1660 [rpm]. | 73 |
| Figura 3. 55 Gráfica de espectro patrón a 2500 [rpm]. | 74 |
| Figura 4. 1 Posicionamiento del motor para la toma de muestras. | 76 |
| Figura 4. 2 Espectros de ruido del efecto más crítico 820 [rpm]. | 77 |
| Figura 4. 3 Espectros de ruido del efecto más crítico 1660 [rpm]. | 79 |
| Figura 4. 4 Espectros de ruido del efecto más crítico 2500 [rpm]. | 80 |
| Figura 4. 5 Espectro a desviación 0 y 820 [rpm]. | 81 |
| Figura 4. 6 Espectro a desviación 0, 820 [rpm] y 50% de aditivo. | 81 |
| Figura 4. 7 Espectro a desviación -10, 820 [rpm] y 50% de aditivo. | 82 |
| Figura 4.8 Espectro a desviación 0, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. | 82 |
| Figura 4.9 Espectro a desviación 0, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. | 83 |
| Figura 4.10 Espectro a desviación -10, 1660 [rpm] y 100% de aditivo. | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.11 Espectro a desviación 10, 1660 [rpm] y 100% de aditivo. | 84 |
| Figura 4.12 Espectro a desviación 10, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. | 84 |
| Figura 4.13 Espectro a desviación -10, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. | 85 |
| Figura 4.14 Espectro a desviación 10, 2500 [rpm] y 50% de aditivo. | 85 |
| Figura 4.15 Espectro a desviación 0, 2500 [rpm] y 100% de aditivo. | 86 |
| Figura 4.16 Espectro a desviación 10, 2500 [rpm] y 50% de aditivo. | 86 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3. 1 Tabla de niveles de revoluciones por minuto. | 25 |
| Tabla 3. 2 Tabla de niveles de presión de inyección. | 25 |
| Tabla 3. 3 Tabla de niveles de ADITIVO de combustible. | 26 |
| Tabla 3. 4 Proceso para la medición de la ADITIVO. | 29 |
| Tabla 3. 5 Aditivo de las muestras de diesel modificado. | 31 |
| Tabla 3. 6 Orden de la toma de muestras. | 35 |
| Tabla 3. 7 Interacciones del diseño factorial. | 39 |
| Tabla 3. 8 Factores influyentes según los diagramas de Pareto. | 55 |
| Tabla 3. 9 Factores influyentes según las gráficas de interacciones y efectos principales. | 64 |
| Tabla 3. 10 Potencia de los espectros patrones. | 71 |
| Tabla 3. 11 Frecuencia de los elementos del motor a diferente régimen. | 72 |
| Tabla 4. 1 Especificaciones del banco didáctico. | 75 |
| Tabla 4. 2 Datos técnicos del motor. | 75 |
| Tabla 4. 3 Características de las muestras obtenidas a 820[rpm]. | 77 |
| Tabla 4. 4 Características de las muestras obtenidas a 820[rpm]. | 78 |
| Tabla 4. 5 Características de las muestras obtenidas a 2500 [rpm]. | 79 |
| Tabla 4. 6 Diferencia de potencia entre espectros critico y patrón a 1660 y a 2500 [rpm]. | 80 |

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad interpretar mediante el análisis de los espectros de ruido los efectos que causa la variación de presión en un motor de combustión interna encendido por compresión. Para el efecto se diseñó un circuito el cual permite cambiar la señal del sensor hacia la ECU por la enviada desde nuestra computadora mediante Matlab®.

Para empezar definimos los factores que se modifican que son: presión, porcentaje de aditivo en el diesel y revoluciones por minuto del motor, y los factores que están fuera de nuestro alcance tales como temperatura, humedad relativa y la carga externa del motor que en este caso será cero ya que se trata de un banco didáctico. Para controlar estos aspectos se creó un programa en Matlab para realizar la variación de presión que mediante la placa Arduino comandar el circuito diseñado para enviar la señal al sensor RPS (sensor de presión en el riel).

A continuación se ubicó el motor en el centro de la cámara semi anecoica con la finalidad de que la misma absorba la energía sonora, luego se determinó la posición específica para la ubicación del micrófono para captar de manera precisa el ruido emitido por la combustión y los elementos del motor; mediante el Adash® grabamos 45 muestras de ruido de cinco segundos a diferente régimen, presión y porcentaje de aditivo en el diesel, las muestras se tomaron en función del porcentaje de aditivo en el diesel es decir en el siguiente orden 0, 50, y 100% .

Las muestras obtenidas mediante el Adash® tienen formato .wav, para obtener los espectros de ruido tenemos que ingresar estas muestras en una interfaz de Matlab®, la misma que además de graficarnos el espectro nos entrega el valor de las variables de respuesta las cuales son: Media, Varianza, Desviación Estándar, Mediana, Máximo, Mínimo, Potencia, Energía, Factor de Curtosis, Asimetría, Valor RMS, factor de Cresta y potencia de Intervalo de frecuencia. Finalmente todos los valores de estas características se ingresan en un diseño factorial creado en el programa Minitab® para posteriormente realizar el análisis estadístico y determinar las características de mayor influencia en el resultado del experimento

CAPÍTULO I

FUNDAMENTAR TEÓRICAMENTE EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR ALTERNATIVO DIESEL.

INTRODUCCIÓN

Los motores térmicos son máquinas encargadas en transformar la energía calorífica en energía mecánica utilizable para realizar un trabajo.

La energía calorífica es obtenida mediante la combustión de combustibles líquidos y gaseosos, mientras que el trabajo se logra por el movimiento de órganos solidarios a estas máquinas teniendo así movimientos alternativos y rotativos.

Su clasificación según el lugar donde se produce la combustión:

- Combustión interna cuando el combustible es quemado en el interior del motor
- Combustión externa cuando esta se da fuera del motor

La combustión se realiza mediante una mezcla de un combustible y un comburente los combustibles normalmente utilizados son diesel o gasolina y el comburente es el oxígeno que se encuentra en el aire atmosférico.

1.1 MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Un motor de encendido por compresión es aquel que hace uso principalmente del aire atmosférico comprimiendo este hasta llegar a una temperatura elevada para que al mezclarse con un combustible (diesel) se produzca la combustión.

1.2 FUNCIONAMIENTO TEÓRICO DE UN MOTOR ALTERNATIVO DIESEL

A continuación se describe las etapas de funcionamiento de un motor diesel general, así como las partes más importantes del mismo.

1.2.1 Ciclos de un motor diesel

Los ciclos de funcionamiento son las etapas en las cuales el motor transforma la energía del combustible (diesel) en movimiento mecánico alternativo. A continuación se explica cada una de estas fases detalladamente.

1.2.1.1 Ciclo De Admisión



Figura 1.1 Ciclo de admisión. **Fuente:** [2]

Este ciclo comienza con la válvula de admisión abierta el pistón se mueve hacia abajo del cilindro debido a la rotación del cigüeñal. Durante su movimiento hacia abajo, el pistón crea una succión en el área arriba del pistón (cuando el volumen en el cilindro aumenta, la presión disminuye). Debido a que la presión atmosférica es

mayor que la presión en el cilindro, el aire se ingresa en el cilindro para llenar el espacio dejado por el movimiento hacia abajo del pistón. Es decir, el pistón intenta absorber un volumen de aire igual a su propio desplazamiento.

En algunos casos se ocupan turbo cargadores para la inducción de aire forzado para lograr mayor eficiencia.

El aire debe fluir al interior del cilindro para asegurar la elevada compresión y sin restricción alguna ya que en caso de que esta existiera fuera perjudicial para el funcionamiento del motor. En el momento en que el cilindro termina su carrera hacia abajo, es decir, se encuentra en el P.M.I. la válvula de admisión se cierra para dar paso al ciclo de compresión.

1.2.1.2 Ciclo De Compresión

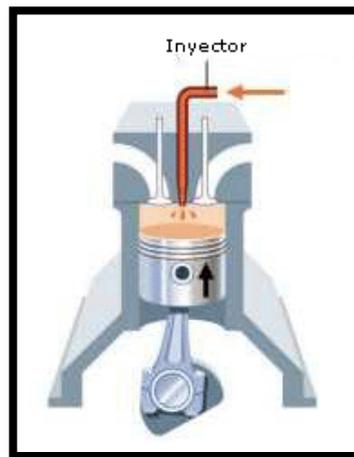


Figura 1.2 Ciclo de compresión. **Fuente:** [2]

Cuando el pistón pasa el P.M.I. y empieza a subir nuevamente, empieza el tiempo de compresión, la válvula de admisión se cierra y la válvula de escape permanece cerrada, el aire en el motor se comprime ahora a un volumen muy pequeño en la parte superior del cilindro, la compresión del aire es muy importante para desarrollar temperaturas lo suficientemente altas para encender la mezcla de aire y combustible.

Justo antes de que el pistón alcance el punto muerto superior del tiempo de compresión, el inyector de combustible libera un rocío fino de combustible en la cámara de combustión. La temperatura en el cilindro enciende la mezcla de manera que estará ya en progreso el quemado cuando empiece el tiempo de potencia. La idea es hacer que el punto de presión máxima en el cilindro se produzca en un punto ligeramente después de que el pistón alcance el punto muerto superior, de manera que el pistón pueda empujarse hacia abajo con la mayor fuerza.

1.2.1.3 Ciclo de Explosión

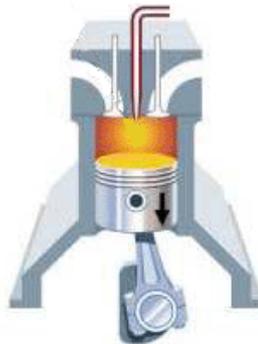


Figura 1.3 Ciclo de explosión. **Fuente:** [2]

Cuando la mezcla se enciende durante el final del tiempo de compresión, empieza a quemarse. Esto no es una explosión, sino un proceso de combustión lenta. Cuando la mezcla se quema, ocasiona un aumento rápido de la presión en el cilindro.

Este aumento de presión empuja hacia abajo la parte superior del pistón. Esta irrupción de potencia se transfiere al cigüeñal.

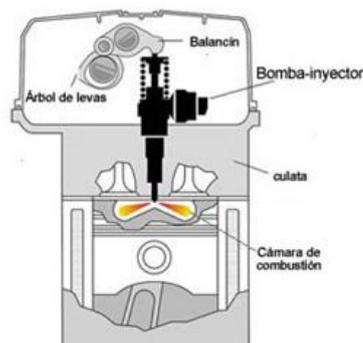


Figura 1.4 Momento de la inyección. **Fuente:** [5]

Dentro del ciclo de explosión intervienen factores como:

- La presión de combustible en el riel.
- El diseño de la cámara de combustión
- El inyector

Teniendo estos como los más importantes y significativos.

1.2.1.4 CICLO DE ESCAPE

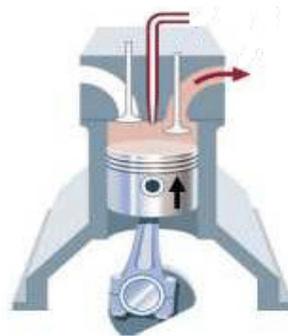


Figura 1.5 Ciclo de escape. **Fuente:** [2]

La válvula de escape se abre cuando la rotación del cigüeñal empuja el pistón hacia arriba en el cilindro. Esto fuerza los gases quemados hacia afuera a través del puerto de escape. Cuando el pistón se acerca al punto muerto superior, la válvula de admisión se abre nuevamente y el ciclo se vuelve a repetir. La válvula de escape se cierra poco tiempo después de que el pistón inicia su movimiento hacia abajo. [1]

El tiempo de escape no produce trabajo, pero gasta una cantidad de energía para empujar los gases de escape fuera del cilindro.

1.3 LA INYECCIÓN DIESEL

Se conoce inyección diesel a todo el proceso que conlleva dirigir el combustible desde el depósito hasta la cámara de combustión, pasando por los diferentes filtros, bombas e inyectores.

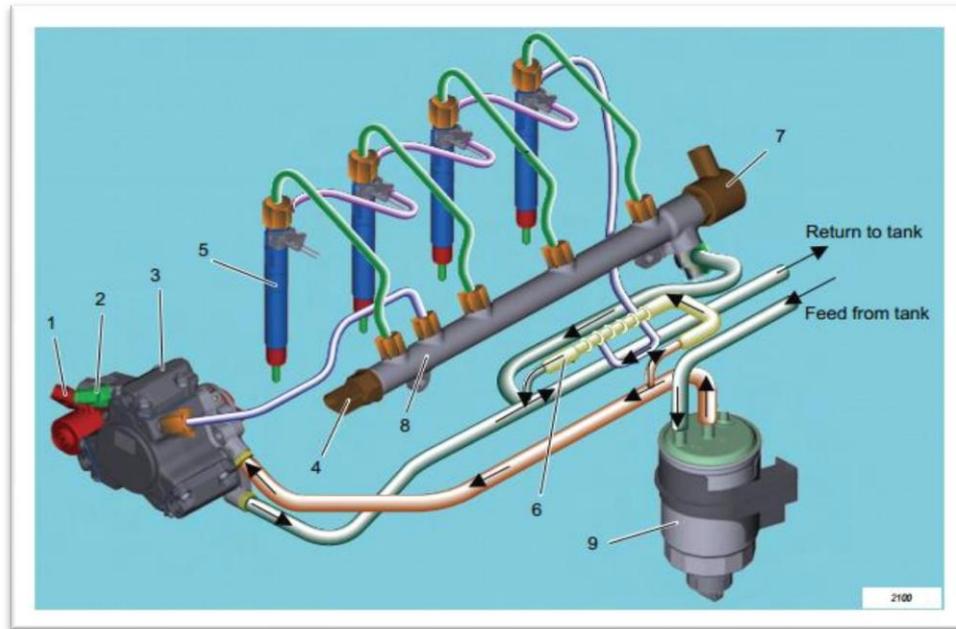


Figura 1.6 Sistema de Inyección. Fuente: [6]

El circuito de alimentación de combustible tiene la misión de hacer llegar el combustible desde el depósito donde se encuentra almacenado hasta la bomba de inyección que lo enviará a cada uno de los cilindros del motor, inyectándolo en los momentos oportunos.

El sistema de inyección se divide en dos partes fundamentales:

- Circuito de baja presión.
- Circuito de alta presión.

1.3.1 Circuito de baja presión

Maneja una presión de alrededor de 6 bares y tiene la misión de hacer llegar el combustible a la bomba de inyección, desde el depósito en el que se encuentra almacenado pasando por el separador de agua (trampa de agua) y por los filtros de combustible hasta la entrada de la bomba de inyección.

1.3.2 Circuito de alta presión:

La presión que maneja es de 1000 a 1400 bar y su misión es la de impulsar el combustible a una determinada presión, suficiente para ser introducido en la cámara de combustión. [1]

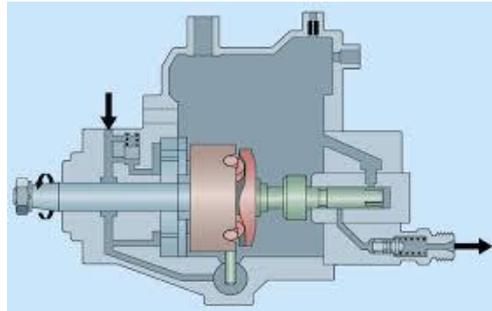


Figura 1.7 Bomba rotativa de inyección seccionada **Fuente:** [4]

1.4 CÁMARA DE COMBUSTIÓN

En el esquema que se muestra aparece un sistema de inyección directa típica. Donde la forma de la cabeza del pistón terminada en una punta en el centro favorece el arranque en frío ya que se calienta notablemente durante la compresión. Observe también que los conductos de admisión están contruidos para que produzcan un giro el aire de entrada, esto favorece la formación de la mezcla cuando se produce la inyección.

En este tipo de cámara es muy común que el inyector tenga más de un agujero de inyección para distribuir bien el combustible en la cámara dentro del pistón. [1]

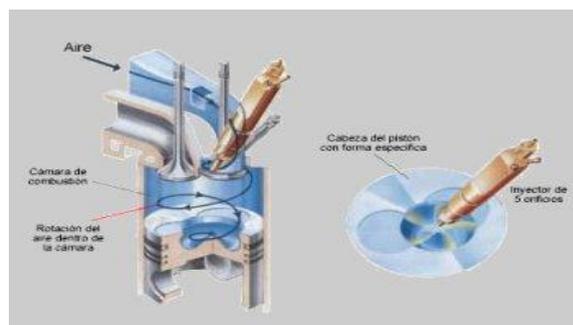


Figura 1.8 cámara de combustión **Fuente:** [5]

1.5 EL INYECTOR

La función es la de producir la inyección de combustible líquido finamente pulverizado en el momento indicado y en la cantidad justa de acuerdo al régimen de funcionamiento del motor.

De acuerdo a la secuencia de encendido de un motor que puede ser comandada mecánicamente o por una computadora, inyecta cierta cantidad de combustible a alta presión y finamente pulverizado en el ciclo de compresión del motor, el cual, al ponerse en contacto con el aire muy caliente, se mezcla y se enciende produciéndose la combustión.

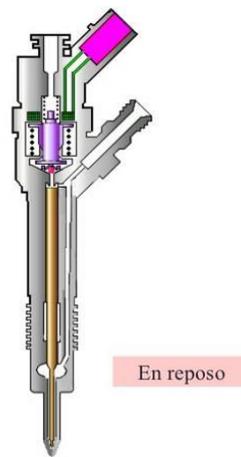


Figura 1.9 Inyector CRDI Fuente: [3]

1.5.1 Principio de funcionamiento del inyector

El combustible suministrado por la bomba de inyección llega a la parte superior del inyector y desciende por el cuerpo del inyector hasta llegar a una pequeña cámara situada en la base, que cierra la aguja del inyector posicionado sobre un asiento cónico con la ayuda de un resorte, situado en la parte superior de la aguja, que mantiene el conjunto cerrado.

El combustible, sometido a una presión muy similar al muelle, levanta la aguja y es inyectado en el interior de la cámara de combustión. Cuando la presión del combustible desciende, por haberse producido el final de la inyección en la bomba, el resorte devuelve a su posición a la aguja sobre el asiento del inyector y termina la inyección.

1.5.2 Proceso de atomización

La forma de descarga en los orificios de la tobera del inyector se llama patrón de atomización. Este patrón se determina por características como el número, tamaño, longitud y ángulo de los orificios y también por la presión del combustible dentro del inyector. Todos estos factores influyen en la forma y longitud de la atomización

1.5.3 Función de la tobera

La función de la tobera es inyectar una carga de combustible en la cámara de combustión de forma que pueda arder por completo. Para ello existen diversos tipos de toberas, todas con variaciones de la longitud, número de orificios y ángulo de atomización. El tipo de tobera que se emplee en el motor depende de los requisitos particulares de sus cámaras de combustión

Los sistemas de inyección electrónica cuentan con numerosos sensores que mandan información a la unidad de mando del motor para que esta de la señal de mando necesaria al inyector para que se realice la inyección del combustible en el momento oportuno. El inyector electrónico se activa mediante la señal eléctrica recibida de la unidad de mando y se cierra por recuperación de un muelle o resorte interior.

El inyector de diesel posee muchas formas y diferentes tipos de toberas. Este inyector hace el mismo funcionamiento del inyector de gasolina con la diferencia de que este lo hace con diesel.

En marcas de toberas existen: Bosch, Delphi, Siemens, Denso.

Cada inyector posee su propia tobera, según su aplicación la tobera lleva un ángulo de pulverización y no se le puede adherir una tobera distinta, sino el inyector no trabajaría o sencillamente la tobera no cabe en el inyector.

1.5.4 Partes del inyector Diesel

Los componentes del inyector diesel son:

- Retorno de combustible al deposito
- Conexión eléctrica
- Electro válvula
- Muelle
- Bola de válvula
- Estrangulador de entrada
- Estrangulador de salida
- Émbolo de control de válvula
- Canal de afluencia
- Aguja del inyector
- Entrada de combustible a presión
- Cámara de control

CAPÍTULO II

TRATAMIENTO DE LA SEÑAL DE RUIDO OBTENIDA DEBIDO A LOS EFECTOS DE LA BAJA DE PRESIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ENCENDIDO POR COMPRESIÓN.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una introducción general del concepto del tratamiento y análisis de los espectros obtenidos en la toma de muestras de un motor de combustión interna encendido por compresión en funcionamiento normal, cuando se provoca una variación de presión en el riel de inyectores con diferentes tipos de viscosidad del diesel y a diferente régimen de giro.

El ruido de combustión de los motores Diesel es uno de los aspectos más negativos dentro de la contaminación sonora en el ámbito automovilístico, ya que constituye la principal fuente de ruido en los vehículos equipados con este tipo de motor. En los convencionales y especialmente en los nuevos conceptos de combustión Diesel, el combustible se quema en condiciones de pre mezcla, haciendo que el ruido de la combustión tienda a empeorar. Lo anterior, justifica el interés de estudiar el ruido de combustión con las soluciones adoptadas en los motores Diesel para el cuidado del medio ambiente.

Posteriormente, se han descrito los principales métodos experimentales de predicción desarrollados para el estudio del ruido de combustión, entre los que se encuentra el análisis tiempo-frecuencia.

2.1 CIRCUITO DE ALTA PRESIÓN CRDI

El combustible que llega del circuito de baja presión pasa a través del filtro de combustible a la bomba de alta presión que lo fuerza dentro del acumulador (riel) de alta presión generando una presión máxima de 1.350 bares. Para cada inyección de combustible este es tomado desde el riel en el cual la presión debe permanecer constante para esto se tiene una válvula de control de presión para evitar así variación de presión en el riel.

La válvula de control de presión es activada por el ECU (Unidad de Control Electrónico). Una vez abierta, permite que el combustible regrese al tanque vía líneas de retorno y la presión del riel baja. Para que el ECU pueda activar la válvula de control de presión en forma correcta, se mide la presión del riel por medio de un sensor de presión.

Este circuito compuesto de los siguientes elementos:

- Bomba de alta presión
- Acumulador de alta presión (riel) con sensor
- Inyectores y cañerías

Dentro de este proyecto nos enfocaremos en los instrumentos de medición y regulación de presión en el riel.

2.2 SENSOR DE PRESIÓN DEL RIEL

La función del riel es de medir de forma precisa y rápida cada uno de los cambios de presión que se producen en el riel.

El combustible a presión actúa sobre el diafragma del sensor de presión y este a su vez transforma esta presión en una señal eléctrica que es enviada al ECU.

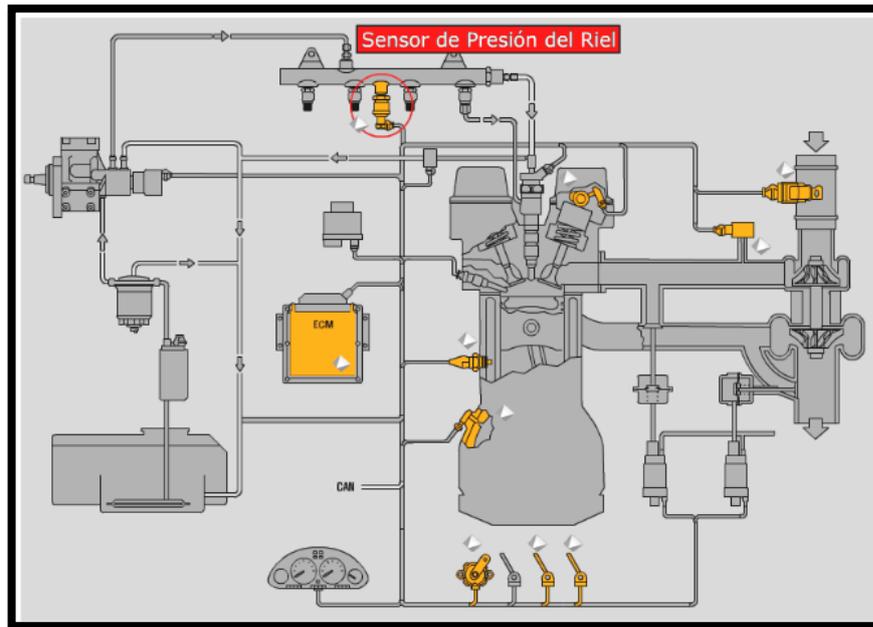


Figura 2.1 localización del sensor de presión. **Fuente:** [3]

2.3 VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIÓN EN EL RIEL

La función de esta válvula es la de mantener la presión a nivel constante en el riel, esto varía según las condiciones de funcionamiento del motor, Cuando la presión de combustible es excesiva se abre la válvula y el combustible regresa hacia el depósito por la línea de retorno. Caso contrario cuando la presión no sea la suficiente para el funcionamiento óptimo del motor la válvula se cierra y la bomba de alta presión del motor aumenta la presión en el riel hasta llegar a un nivel constante.

Una vez comprendido el funcionamiento del sensor y la válvula reguladora se procederá a realizar un diseño experimental para la obtención y tratamiento de señales de ruido cuando se varíe la presión en el riel. Para esto se modificara las lecturas del sensor de presión consiguiendo así una respuesta del motor y a su vez registrando esto en señales de audio para su procesamiento

2.4 SALA SEMI ANECOICA

Las salas semi anecoicas están formadas por una estructura aislada del exterior y en su interior, para evitar la reflexión de sonidos por las paredes, suelos y techos, se forra mediante unas cuñas de longitud a definir en función de la absorción deseada.

Estas cuñas se pueden fabricar de diversos tipos de materiales como son espumas, fibras de vidrio, lanas de roca esponja.

Las cuñas con el paso del tiempo tienden a deteriorarse de manera acelerada debido a las características de su material por lo que se debe tener absoluto cuidado al ingresar en la cámara semi anecoica.

La cámara semi anecoica ideal es un ambiente totalmente libre de reverberaciones acústicas, cualquier sonido proyectado, a cualquier frecuencia, es parcialmente absorbido.

En una cámara semi anecoica se debe tener muy en cuenta que mientras más grande sea esta, los materiales de absorción o cuñas deberán ser de menor tamaño, debido a que la tendrá menos energía que absorber.

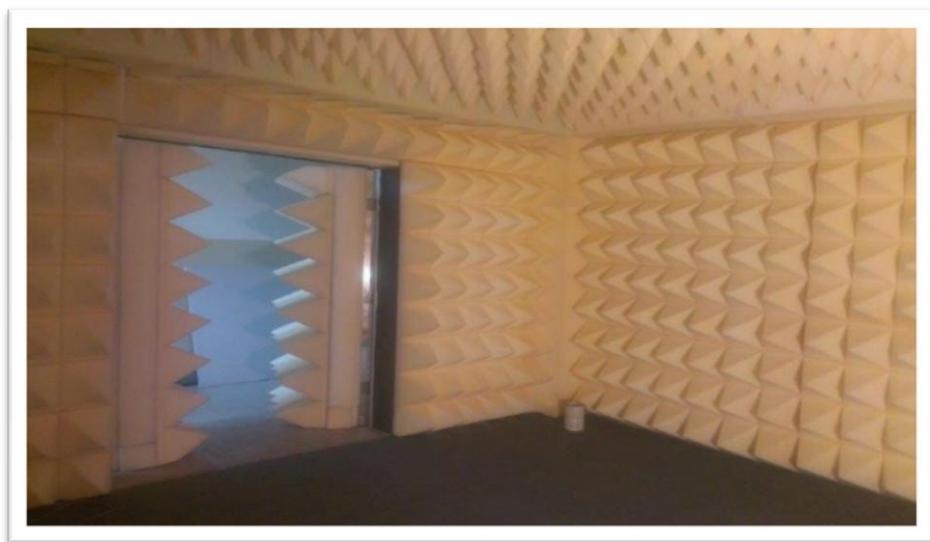


Figura 2.2 cámara semi anecoica. **Fuente:** [14]

2.4.1 Difusión del sonido

Cuando la onda choca con una superficie irregular la energía es reflejada en múltiples direcciones y diferentes ondas.

2.4.2 Transmisión

La velocidad con que se transmite el sonido depende, principalmente, de la elasticidad del medio, es decir, de su capacidad para recuperar su forma inicial. El acero es un medio muy elástico, en contraste con la plastilina, que no lo es. Otros factores que influyen son la temperatura y la ADITIVO.

2.4.3 Absorción

La capacidad de absorción del sonido de un material es la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo, cuando el sonido incide sobre el material. Su valor varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida).

2.4.4 Reflexión

Fenómeno por el cual una onda se refleja en un material no absorbente o parcialmente absorbente del sonido.

El eco se produce cuando este sonido es alterado por una constante que da como resultado un sonido que se refleja en un medio más denso y llega al oído de una persona con una diferencia de tiempo igual o superior a 0,1 segundos, respecto del sonido que recibe directamente de la fuente sonora.

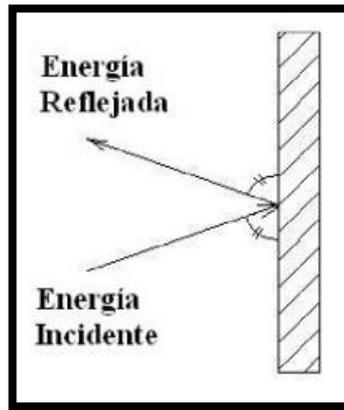


Figura 2.3 Reflexión del sonido. **Fuente:** [4]

2.4.5 Refracción

Cuando un sonido pasa de un medio a otro, se produce refracción. La desviación de la onda se relaciona con la rapidez de propagación en el medio.

El sonido se propaga más rápidamente en el aire caliente que en el aire frío.

2.4.6 Dispersión

Si el sonido encuentra un obstáculo en su dirección de propagación, en el borde del obstáculo se produce el fenómeno de difracción, por el que una pequeña parte del sonido sufre un cambio de dirección y puede seguir propagándose.

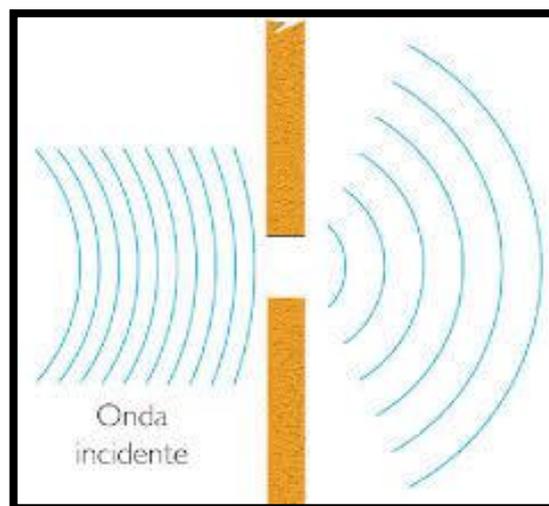


Figura 2.4 dispersión del sonido. **Fuente:** [5]

2.5 CENTRO ACÚSTICO EN EL MOTOR

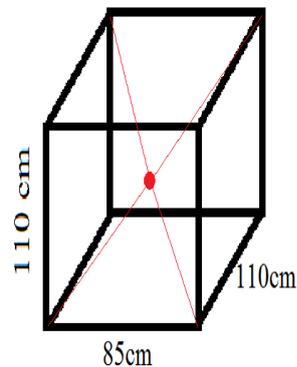


Figura 2.5 Centro acústico. Fuente: [5]

Para encontrar el centro acústico se toma al motor como si fuera un paralelepípedo de tal manera que el centro acústico se encontrara en el punto centro. Las medidas del motor son 110cm de largo, 85 cm de ancho y 110cm de profundidad. Por lo tanto el centro acústico estará en el punto medio de cada una de estas medidas.

Además el centro acústico será el punto $[0, 0,0]$ para la ubicación del micrófono dentro de la semiesfera de medición.

La ubicación del micrófono se vio en un previamente en un proyecto anterior el cual nos indicó que la mejor posición es la número 8 según la norma ISO 3745[13]

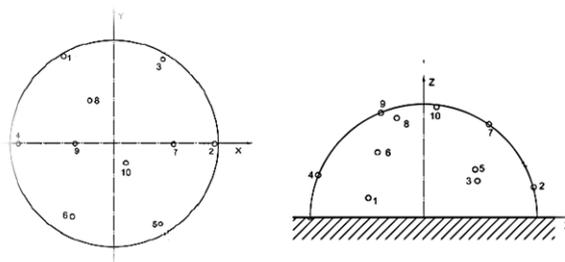


Figura 2 6 Ubicación del micrófono de muestreo. Fuente: [13]

Este punto está ubicado en las coordenadas:

$x=26\text{cm}$, $y=46\text{cm}$, $z= 96\text{cm}$ tomando como punto $[0, 0,0]$ el centro acústico calculado anteriormente.

2.6 Elementos de medición

Los elementos que se van a utilizar para la medición de señales se describen a continuación, tomamos en cuenta que estos nos han sido facilitados por la **Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca**.

2.6.1 Analizador de Señales Acústicas ADASH Modelo A3716U

Es un conjunto de hardware y software consta de

- 16 canales AC para entradas como el micrófono.
- 4 canales de taco. Para la entrada digital de señales.
- 16 canales DC permite la entrada digital de señales enviadas desde sensores.
- Software de adquisición de datos
- Software de configuración. Permite adecuar los parámetros para la grabación de señales.
- Software de visualización. Se puede observar las señales en tiempo real en tiempo y frecuencia.

2.6.2 El Micrófono

Es un aparato para transformar las ondas sonoras en energía en procesos de grabación de sonido; consiste esencialmente en un diafragma atraído intermitentemente por un electroimán, que, al vibrar, modifica la corriente transmitida por las diferentes presiones a un circuito, en nuestro caso será un micrófono piezoeléctrico marca PCB®.

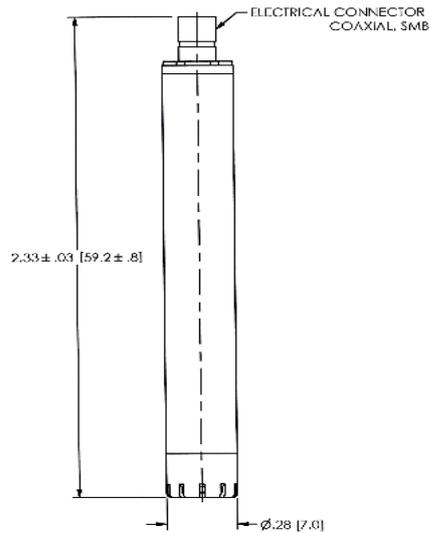


Figura 2 7 Micrófono condensador de precisión unidireccional. **Fuente:** El Autor

Las ondas sonoras hacen vibrar el diafragma y, el movimiento de éste, hace que se mueva el material contenido en su interior. La fricción entre las partículas del material genera sobre la superficie del mismo una tensión eléctrica.

2.7 ANÁLISIS ESPECTRAL

Análisis se refiere a la acción de descomponer algo complejo en partes simples o identificar en ese algo complejo las partes más simples que lo forman. Como se ha visto, hay una base física para modelar el sonido o las ondas de radio en superposición de diferentes frecuencias. Un proceso que cuantifique las diversas intensidades de cada frecuencia se llama análisis espectral.

Matemáticamente el análisis espectral está relacionado con una herramienta llamada transformada de Fourier. Dada una señal o fenómeno ondulatorio de amplitud $s(t)$ esta se puede escribir matemáticamente como la siguiente combinación lineal generalizada:

$$s(t) = \int A = A(\nu) e^{-2\pi i \nu t} d\nu \quad (2.1)$$

Es decir, la señal puede ser concebida como la transformada de Fourier de la amplitud

$$A = A(\nu) \quad (2.2)$$

Ese análisis puede llevarse a cabo para pequeños intervalos de tiempo, o menos frecuentemente para intervalos largos, o incluso puede realizarse el análisis espectral de una función determinista como $\frac{\text{sen } t}{t}$.

Es importante recordar que la transformada de Fourier de una onda aleatoria, mejor dicho estocástica, es también aleatoria. Un ejemplo de este tipo de onda es el ruido ambiental. Por tanto para representar una onda de ese tipo se requiere cierto tipo de promediado para representar adecuadamente la distribución de frecuencias.

2.8 TRATAMIENTO DE LA SEÑAL EN EL DOMINIO DE FRECUENCIA

El cálculo de la TDF (transformada discreta de Fourier), requiere de muchos recursos y obviamente lo hace más lento, por lo que se ocupara la transformada rápida de Fourier nos permite simplificar de forma importante el cálculo de la TDF, además de reducir el tiempo de cálculo también reduce el error.

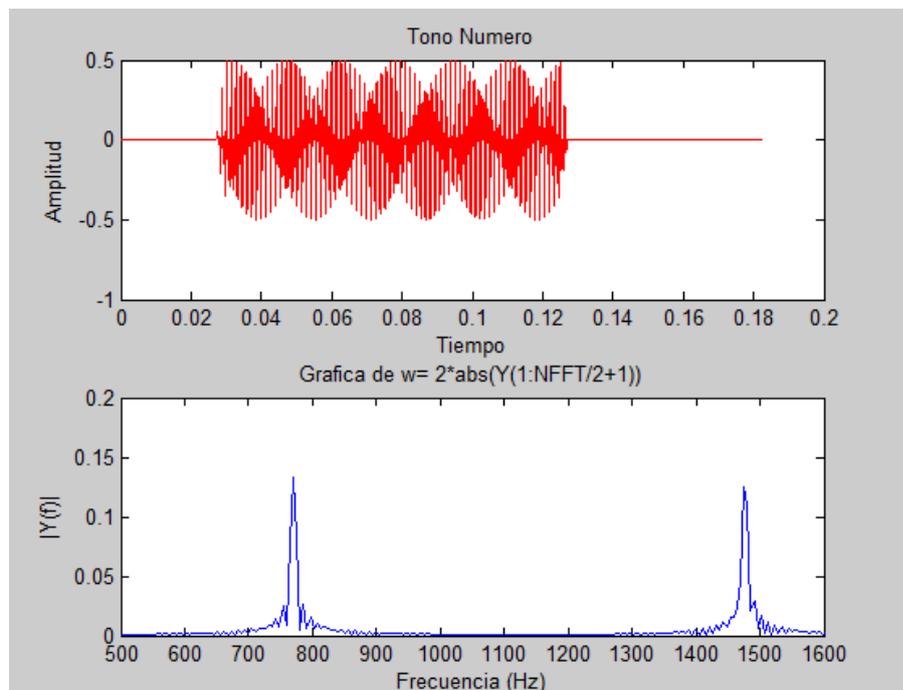


Figura 2 8 Espectro de ruidos y su transformada. **Fuente:** El Autor

El matemático Fourier demostró que cualquier función continua, podría ser producida por una suma infinita de ondas seno y coseno. Su resultado tiene implicaciones de largo alcance en la reproducción y la síntesis del sonido. Una onda sinusoidal pura, puede ser convertida en sonido por un altavoz y será percibida como un simple tono continuo puro.

Los sonidos de instrumentos orquestales consisten generalmente de una onda fundamental y un complemento de armónicos, que pueden ser considerados como una superposición de ondas sinusoidales, con una frecuencia fundamental f y múltiples enteros de esa frecuencia.

El proceso de descomponer un sonido de un instrumento musical o cualquier otra función periódica, en sus ondas senos y cosenos constituyentes, se llama análisis de Fourier.

La onda de sonido se puede caracterizar, en términos de las amplitudes de las ondas sinusoidales componentes que la conforman este conjunto de números, indica el contenido de armónicos de un sonido, y a veces es referido como el espectro armónico del sonido.

El análisis de Fourier de una función periódica se refiere a la extracción de series de senos y cosenos que cuando se superponen, reproducen la función original. La transformada rápida de Fourier (TRF) es un método matemático para la transformación de una función del tiempo en una función de la frecuencia.

Se describe como la transformación del dominio del tiempo al dominio de frecuencia. Es muy útil para el análisis de los fenómenos dependientes del tiempo.

Una de las aplicaciones más importantes es el análisis del sonido. Es importante evaluar la distribución de frecuencias de la energía que transmite un sonido.

Algunos problemas presentados con la transformada rápida de Fourier son:

2.8.1 Aliasing

Esto se genera cuando se usa una frecuencia de muestreo inadecuado y consiste en que la transformada rápida de Fourier calcula una frecuencia de menor valor que el real.

2.8.2 Fugas laterales

Si tenemos una señal armónica, con amplitud A , frecuencia f y longitud infinita, tendremos como resultado un espectro de una sola línea a la frecuencia f , la FFT considera una señal finita de tiempo, por lo que la señal a transformar se verá concentrada en una línea, sino que se esparcirá en lóbulos laterales. Este efecto es conocido como “Fugas Laterales”. [13]

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE DATOS DE ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DE LOS FALLOS EN LA IGNICION DE MOTORES DE COMBUSTION INTERNA DIESEL

Para recopilar las señales de ruido se debe crear un diseño experimental, el cual nos va a permitir tratar de mejor manera las señales y conseguir mejores resultados

3.1 Diseño experimental

3.1.1 Introducción al diseño de experimentos.

Uno de los factores más importantes dentro de la investigación es la experimentación ya que su finalidad es conseguir información real y con buenos resultados que nos permita desarrollar nueva tecnología además de realizar mejoras en algunos campos de la industria.

El diseño experimental es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental, nos indica también que variables debemos modificar, como debemos hacerlo, cuantas veces debemos repetir el proceso y en qué orden; para obtener en los resultados el mínimo margen de error y si los resultados presentan variabilidad que puede ser grande o pequeña. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento.

Dentro del campo automotriz la experimentación tiene una gran importancia ya que en el MEC se pueden manipular una gran cantidad de variables como revoluciones del motor, presión en el ingreso de aire, ADITIVO del diesel, etc. Para obtener resultados que permitan mejorar o crear nuevos componentes dentro del motor

También debemos tener en cuenta que el experimento factorial es una herramienta principal que en los últimos años los investigadores han ocupado para conseguir interpretar cual es el efecto más significativo en cada interacción, mediante la

combinación de cada una de las Variables para obtener los resultados de las pruebas realizadas dentro del experimento e identificar el efecto de mayor interés dentro de la investigación.

3.2 CONCEPTOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

3.2.1 El experimento

El diseño experimental es una estructura de investigación donde al menos se manipula una variable y las unidades son asignadas aleatoriamente a los distintos niveles o categorías de la variable manipulada para detectar cambios significativos en la respuesta

3.2.2 Diseño del experimento

Dentro del experimento a realizar tenemos tres factores los cuales van a ser modificados, estos factores contienen tres niveles, tomamos en cuenta también los factores de bloqueo los cuales deben ser establecidos antes de la obtención de muestras.

3.2.3 Determinar Factores y niveles

Para comenzar a realizar el experimento el paso principal es determinar los factores que se van a modificar para obtener las diferentes respuestas requeridas

3.2.3.1 Revoluciones del motor

Las revoluciones por minuto del motor son un factor muy importante ya que influye directamente en la presión en el riel, por esto basándonos en la NORMA TÉCNICA

ECUATORIANA NTE INEN 2 202:2000 GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. DETERMINACIÓN DE LA OPACIDAD DE EMISIONES DE ESCAPE DE MOTORES DE DIESEL MEDIANTE LA PRUEBA ESTÁTICA. MÉTODO DE ACELERACIÓN LIBRE. Se estableció los niveles que nos indica que las muestras se deben tomar a ralentí y a 2500 rpm.

Tabla 3. 1 Tabla de niveles de revoluciones por minuto. **Fuente:** [el autor]

| REVOLUCIONES POR MINUTO | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| NIVEL 1 | 820 [rpm] régimen en ralentí |
| NIVEL 2 | 1660 [rpm] valor promedio establecido |
| NIVEL 3 | 2500 [rpm] valor que indica la norma |

3.2.3.2 Presión de inyección

Para definir este valor la ECU toma en cuenta diferentes valores de los sensores por lo que vamos a aumentar y disminuir 10 bares en el valor a calcular, con esto logramos provocar el fallo de motor por la baja y aumento de presión.

Tabla 3. 2 Tabla de niveles de presión de inyección. **Fuente:** [el autor]

| PRESIÓN DE IYECCION | |
|---------------------|---|
| NIVEL 1 | -10 bares del valor normal de funcionamiento |
| NIVEL 2 | Valor normal de funcionamiento |
| NIVEL 3 | + 10 bares del valor normal de funcionamiento |

3.2.3.3 Aditivo del Diesel

La densidad es la relación entre la masa y el volumen de un líquido y puede expresarse en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) a una temperatura de referencia, por lo general a 60 grados Fahrenheit. La ADITIVO teórica del gasoil es de $850 \text{ kg}/\text{m}^3$.

La variación de la ADITIVO del combustible influye en el cambio de presión en el riel de inyección, para lograr esta variación se puede colocar aditivos con la finalidad de variar esta propiedad del diesel. Los niveles se basan en la cantidad de aditivo agregado en un mismo volumen de diesel, el 100% de aditivo corresponde a 237 ml colocado en cinco galones de combustible.

Tabla 3. 3 Tabla de niveles de ADITIVO de combustible. Fuente: [el autor]

| ADITIVO DEL COMBUSTIBLE | |
|-------------------------|-----------------------------|
| NIVEL 1 | Sin aditivo(diesel normal) |
| NIVEL 2 | 50 % de aditivo |
| NIVEL 3 | 100 % de aditivo |

3.2.4 Factores de bloqueo

Los factores de bloqueo son aquellos que están fuera de nuestro control, estos deben ser identificados antes de comenzar a realizar las pruebas.

3.2.4.1 Humedad relativa

Los datos se obtienen en tiempo real mediante internet en la página METEORED.

3.2.4.2 Temperatura ambiente

La temperatura de la cámara anecoica debe estar entre 23 y 27 grados Celsius para la obtención de muestras

3.2.4.3 Carga externa del motor.

En este caso la carga externa del motor será nula ya que el mismo no está montado en un vehículo sino que es un banco didáctico.

3.2.4.4 Temperatura del refrigerante

La temperatura del refrigerante del motor debe estar entre 88 y 92 grados Celsius, para la obtención de muestras, además se debe tener en cuenta que el ventilador del motor debe estar apagado; en caso contrario agregara ruido indeseado a la muestra.

3.3 OBTENCIÓN DE MUESTRAS

Una vez identificado los niveles a modificar y los factores que influyen en el experimento se procede a hacer la orden de muestreo, esta debe tener todas las combinaciones posibles, lo que se recomienda es realizar aleatoriamente la obtención de muestras pero en este caso debido al cambio de diesel (debido a la ADITIVO) se realizará las pruebas con cada diesel para evitar pérdidas de tiempo.

3.4 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

Previo a la recolección de muestras debemos basarnos en cómo controlar cada uno de los factores que debemos modificar para llegar a cada uno de sus niveles.

3.4.1 Control de la presión de combustible

La variación de presión de combustible que debemos obtener es de 10 bares para esto se creó un circuito que nos permita enviar una señal falsa del sensor de presión en el riel **RPS** hacia la ECU.

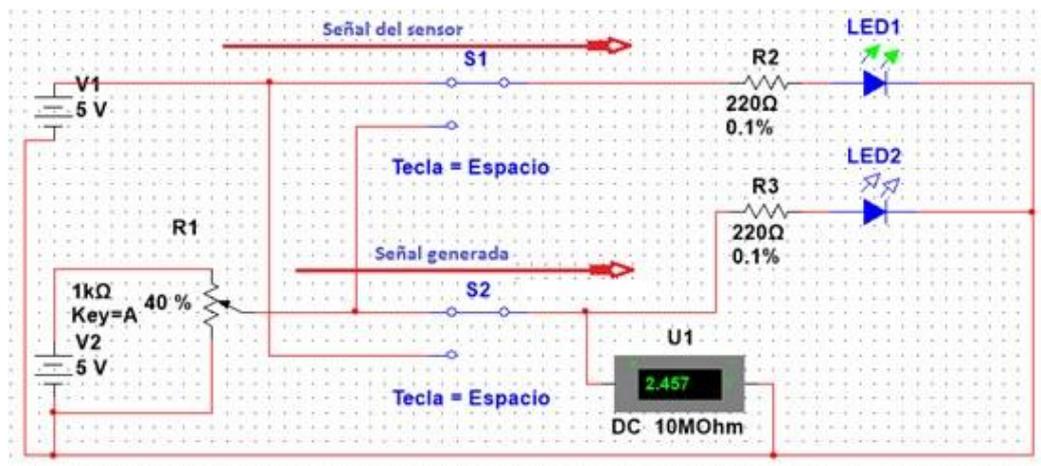


Figura 3. 1 Circuito para el control de voltajes de las señales. Fuente: [El autor]

El voltaje V1 es el que representa la señal que envía el sensor de presión **RPS** hacia la ECU la misma que está representada por el LED 1, en cambio, el voltaje V2 es generado y pasa por un potenciómetro el cual nos va a permitir variar el voltaje que va hacia el led 2.

Para realizar la variación de presión en el riel se necesita de dos relés S1 y S2 que cambian la dirección de la corriente, es decir, quitan la señal del sensor y envían la señal generada hacia la ECU.

En la figura 3.2 se puede ver como se realiza el cambio de señal que nos permite controlar la presión en el riel.

Para poder controlar el voltaje generado y el voltaje que viene desde el sensor es necesario ingresarlos al programa Matlab ® mediante la placa Arduino, para identificar cual sería el voltaje óptimo para generar la presión que necesitamos para la toma de muestras.

La figura 3.4 nos muestra el esquema en Simulink de Matlab® como se controla los voltajes para obtener las presiones requeridas. Los pines 7 y 8 están configurados para la entrada de la señal del sensor de presión **RPS** y el voltaje generado que ingresa a la ECU, estos valores se pueden constatar en las pantallas de este programa llamadas “voltaje RPS” y “Voltaje Generado”, mientras que para observar el valor de presión que calcula la ECU y el voltaje enviado debemos observar las pantallas “presión RPS” y “Presión Generado”

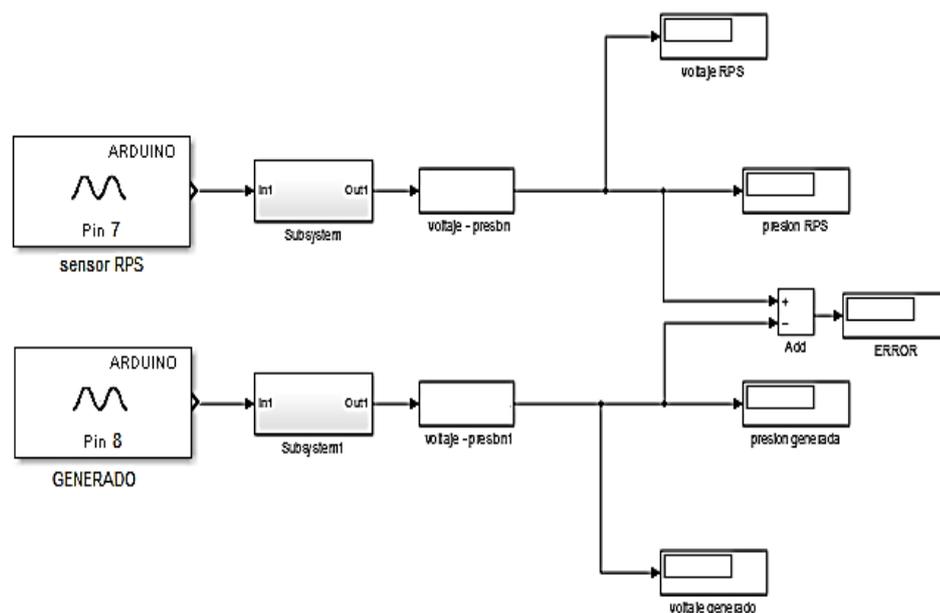


Figura 3. 2 Esquema para control de voltajes de las señales. Fuente: [El autor]

3.4.2 Comando de las revoluciones por minuto del motor

Para controlar las revoluciones por minuto del motor se lo va a realizar de forma directa, es decir desde el mando del banco didáctico, ya que este cuenta con un dispositivo de control directo para rpm.

3.4.3 Control de la densidad del Diesel

Previamente se indicó que el diesel tendrá tres diferentes densidades es debido a que se agregó aditivo en un determinado volumen de combustible. Se debe verificar que el diesel haya cambiado de densidad para esto se realiza una medición de esta propiedad de cada tipo de diesel.

Tabla 3. 4 Proceso para la medición de la ADITIVO. **Fuente:** [El autor]

| MEDICION DE LA ADITIVO DEL DIESEL | |
|--|--|
| Llenar el recipiente con agua y llevarla a 30 grados Celsius Luego vaciamos el recipiente y lo volvemos a llenar de agua |  |
| Se debe llenar el picnómetro, para esto se usa el vaso de precipitación, y se lo coloca en el recipiente para calentarlo a 30 grados Celsius |  |

| | |
|---|--|
| <p>Una vez que la temperatura se encuentre en 30 grados Celsius se debe retirar el picnómetro, secar el agua del exterior del mismo y pesarlo en la balanza digital; para garantizar que el valor sea correcto se realizan alrededor de tres mediciones</p> |  |
| <p>Sabiendo que el volumen de diesel es de 10 ml, debemos restar el peso del picnómetro y sacar un promedio de los tres valores medidos para tener un valor más real, y luego mediante la fórmula de la densidad obtenemos los valores de esta propiedad.</p> | $d = \frac{m}{v}$ <p>donde:</p> <p>d = densidad m = masa v = volumen</p> |

Los materiales empleados en este proceso fueron:

- Picnómetro de 10 ml
- Termometro
- Vaso de precipitación
- Hornilla
- Un recipiente
- Balanza digital
-

Luego de realizar cada una de las mediciones necesarias se obtuvo los siguientes valores de densidad.

Tabla 3. 5 Aditivo de las muestras de diesel modificado **Fuente:** [El autor]

| ADITIVO DE LAS MUESTRAS DE DIESEL | |
|--|--------------------------|
| Diesel sin aditivo | 795.19 kg/m ³ |
| Diesel con 50% de aditivo | 808.60 kg/m ³ |
| Diesel con 100% de aditivo | 830.07 Kg/m ³ |

3.4.4 Toma de muestras

Para la recolección de muestras el motor está ubicado en una cámara anecoica, para evitar ingreso de ruido, y que la adquisición de datos sea lo más real y pura posible.



Figura 3. 3 Ubicación del motor en la cámara anecoica. **Fuente:** [El autor]

Para la grabación de las muestras ocupamos el software Adash® que nos guarda las muestras en formato .wav. Para abrir este tipo de formato se usa un programa creado en Matlab donde los principales valores que se deben analizar son: media, varianza, desviación, estándar, mediana, máximo, mínimo, potencia, energía, factor de curtosis, asimetría, valor RMS, factor de cresta y potencia intervalo de frecuencia.

En la figura 3.6 se muestra la interfaz del programa el cual nos muestra cada una de las señales de ruido en dominio de frecuencia con la opción de exportar todos los datos a Excel.

3.4.5 Unidad experimental

El sujeto o unidad experimental es la unidad básica sobre la que se efectúa el proceso de medida.

3.4.6 Variable de interés o respuesta

Es la variable que se desea estudiar y controlar su variabilidad

Tenemos 13 variables las cuales son:

- **Media**
- **Varianza**
- **Desviación estándar**
- **Mediana**
- **Máximo**
- **Mínimo**
- **Potencia**
- **Energía**
- **Factor de curtosis**
- **Asimetría**
- **Valor RMS**
- **Factor de Cresta**
- **Potencia de intervalo de frecuencia**

Tomando cada una como respuesta a las interacciones realizadas en el experimento.

3.4.7 Tamaño del Experimento

Es el número total de observaciones recogidas en el diseño que en este caso serán 45 muestras de ruido para su posterior análisis.

3.4.8 Interacción de factores

Existe interacción entre dos factores a y b si el efecto de algún nivel de a varía al cambiar de nivel en b. Esta definición puede hacerse de forma simétrica y se puede generalizar a interacciones de orden tres o superior.

3.4.9 Diseño equilibrado

Es el diseño en el que todos los tratamientos son asignados a un número igual de unidades experimentales

3.5 PRINCIPIOS BÁSICOS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Al planificar un experimento hay tres principios básicos que se deben tener siempre en cuenta:

- El principio de aleatorización.
- El bloqueo.
- La factorización del diseño.

Los dos primeros son estrategias eficientes para asignar los tratamientos a las unidades experimentales sin preocuparse de qué tratamientos considerar. Por el contrario, la factorización del diseño define una estrategia eficiente para elegir los tratamientos sin considerar en absoluto como asignarlos después a las unidades experimentales.

3.6 Etapas del diseño experimental

Lo primordial en el diseño experimental es identificar que procesos se van a realizar y cuantas veces se va a repetir cada uno de estos.

3.6.1 Planeación.

Compuesta por las actividades encaminadas a entender el problema, el diseño y la realización de las pruebas experimentales adecuadas. Un planteamiento claro del problema contribuye a menudo en forma sustancial a un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema. El proceso de planeación consiste en los siguientes puntos:

3.6.1.1 Definición de hipótesis.

En este punto se plantea el problema de forma concreta y se definen claramente los objetivos, los alcances y limitaciones del experimento, esto contribuye a mejorar el conocimiento del fenómeno, por ende a la solución del mismo. Se deben obtener datos que demuestren el impacto del problema, para lo cual es necesario medir y definir el punto de partida. Generalmente los objetivos se afinan durante el proceso de diseño del experimento.

3.6.1.2 Selección del Diseño.

Seleccionar el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento. Es en este momento donde conviene establecer el número de muestras que han de tomarse y la forma en como han de hacerse las corridas del experimento. Cabe mencionar, que entre mayor sea la cantidad de datos recolectados y las repeticiones del experimento, se tendrá un mejor punto de comparación, para establecer la relación entre las variables.

3.6.1.3 Definición de la variable dependiente.

La variable dependiente es el resultado del experimento, se puede afirmar que es la variable que proporciona la información que se está estudiando. Para evitar confusión entre la variable dependiente y otras variables, se ha de definir los factores de ruido y las variables de bloqueo puesto que pueden afectar de forma indirecta a la variable dependiente, por lo que se han de tomar medidas para contra restar sus efectos.

3.6.1.4 Aleatorización

La aleatorización consiste en asignar los sujetos a los distintos niveles de tratamiento al azar, con la certeza de que los efectos extraños se contrarresten entre los distintos sujetos y observaciones que componen cada nivel de tratamiento (condición experimental).

Tabla 3. 6 Orden de la toma de muestras. **Fuente:** [El autor]

| NUM | MUESTRA | PRESIÓN | RPM | % ADITIVO EN DIESEL |
|-----|------------------|---------|------|---------------------|
| 1 | CRDI -10 1660 0 | -10 | 1660 | 0 |
| 2 | CRDI 10 1660 0 | 10 | 1660 | 0 |
| 3 | CRDI 0 820 0 | 0 | 820 | 0 |
| 4 | CRDI 0 2500 0 | 0 | 2500 | 0 |
| 5 | CRDI -10 1660 0 | -10 | 1660 | 0 |
| 6 | CRDI 10 1660 0 | 10 | 1660 | 0 |
| 7 | CRDI 0 820 0 | 0 | 820 | 0 |
| 8 | CRDI 0 2500 0 | 0 | 2500 | 0 |
| 9 | CRDI -10 1660 0 | -10 | 1660 | 0 |
| 10 | CRDI 10 1660 0 | 10 | 1660 | 0 |
| 11 | CRDI 0 820 0 | 0 | 820 | 0 |
| 12 | CRDI 0 2500 0 | 0 | 2500 | 0 |
| 13 | CRDI -10 820 50 | -10 | 820 | 50 |
| 14 | CRDI 10 820 50 | 10 | 820 | 50 |
| 15 | CRDI 10 820 50 | -10 | 2500 | 50 |
| 16 | CRDI -10 2500 50 | 10 | 2500 | 50 |
| 17 | CRDI 10 2500 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 18 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 19 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 20 | CRDI 0 1660 50 | -10 | 820 | 50 |
| 21 | CRDI -10 820 50 | 10 | 820 | 50 |
| 22 | CRDI -10 820 50 | -10 | 2500 | 50 |
| 23 | CRDI 10 2500 50 | 10 | 2500 | 50 |
| 24 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 25 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 26 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 27 | CRDI -10 820 50 | -10 | 820 | 50 |
| 28 | CRDI 10 820 50 | 10 | 820 | 50 |
| 29 | CRDI -10 2500 50 | -10 | 2500 | 50 |
| 30 | CRDI 10 2500 50 | 10 | 2500 | 50 |
| 31 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 32 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 50 |
| 33 | CRDI 0 1660 50 | 0 | 1660 | 100 |

| | | | | |
|----|-------------------|-----|------|-----|
| 34 | CRDI -10 1660 100 | -10 | 1660 | 100 |
| 35 | CRDI 10 1660 100 | 10 | 1660 | 100 |
| 36 | CRDI 0 820 100 | 0 | 820 | 100 |
| 37 | CRDI 0 2500 100 | 0 | 2500 | 100 |
| 38 | CRDI -10 1660 100 | -10 | 1660 | 100 |
| 39 | CRDI 10 1660 100 | 10 | 1660 | 100 |
| 40 | CRDI 0 820 100 | 0 | 820 | 100 |
| 41 | CRDI 0 2500 100 | 0 | 2500 | 100 |
| 42 | CRDI -10 1660 100 | -10 | 1660 | 100 |
| 43 | CRDI 10 1660 100 | 10 | 1660 | 100 |
| 44 | CRDI 0 820 100 | 0 | 820 | 100 |
| 45 | CRDI 0 2500 100 | 0 | 2500 | 100 |

Ventajas de Aleatorizar los factores no controlados:

- Transforma la variabilidad sistemática no planificada en variabilidad no planificada o ruido aleatorio. Es decir, aleatorizar previene contra la introducción de sesgos en el experimento.
- Evita la dependencia entre observaciones al aleatorizar los instantes de la recolección de muestras.
- Valida muchos de los procedimientos estadísticos más comunes.

3.6.1.5 Planeación del trabajo.

Planear y organizar el trabajo experimental con base en el diseño seleccionado. Se recomienda seguir un diagrama de flujo en donde se tomen en cuenta cada punto del diseño del experimento.

En este caso primero se acondiciona la cámara semi anecoica para ubicar el motor, una vez el motor en la posición correcta (el centro de la cámara), conectamos cada uno de los tubos de desfogue de gases y de entrada de aire hacia el motor, luego conectamos la placa Arduino hasta el sensor de presión en el riel, para enviar la señal desde la computadora y lograr la variación de presión; una vez con todo esto listo procedemos a ubicar el micrófono en la posición adecuada explicada anteriormente (2.5). Ponemos en marcha el funcionamiento del motor y comprobamos que cada componente del experimento funcione correctamente, es ahí cuando procedemos a

cerrar las puertas de la cámara y tomamos la muestra, con la ayuda del Adash®. En nuestro caso se deberá abrir nuevamente la cámara para realizar los cambios de diesel y las variaciones en el régimen de giro [rpm], ya que la variación de presión se realizará desde la computadora ubicada en la parte exterior de la cámara.

Luego de concluir con la planeación se toma en cuenta lo siguiente que se va a realizar que será de gran importancia para la ejecución del experimento, en este caso será obtener los datos y espectros de cada una de las muestras obtenidas.

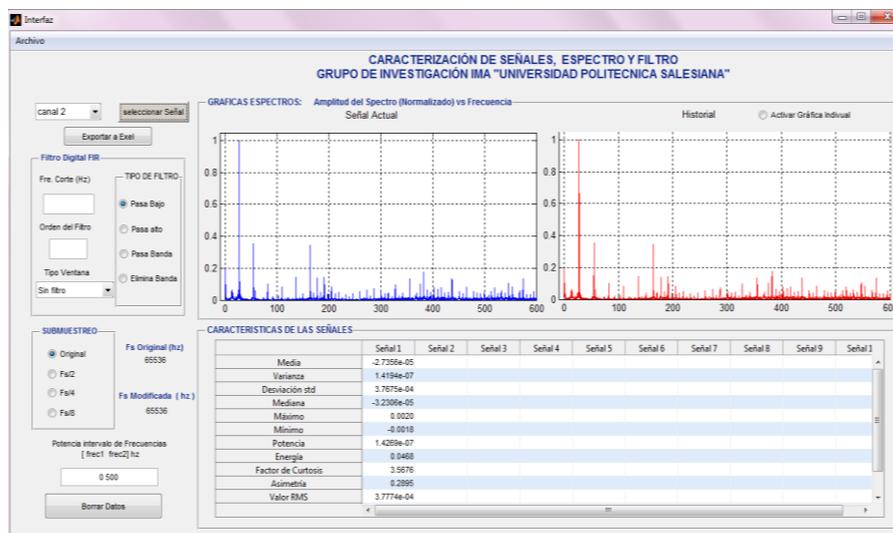


Figura 3. 4 Interfaz del programa en Matlab. **Fuente:** [El autor]

Una vez que tenemos todos los valores de cada una de las 45 muestras de ruido obtenidas las ingresamos en el diseño realizado en el programa Minitab® para realizar el análisis de resultados.

3.6.2 Análisis de datos.

Se debe determinar el modelo de análisis de varianza o la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos, lo cual no sólo permite al investigador tener un adecuado manejo de los datos, sino que al mismo tiempo puede servir para realizar estimaciones del comportamiento futuro del fenómeno.

3.6.3 Interpretación.

Más allá del análisis estadístico formal, se debe analizar a detalle todo el proceso de experimentación para observar los nuevos aprendizajes que se lograron durante todo el proceso y observar si existe una mejor manera de llevarlo a cabo ya que por lo general todo experimento es repetitivo.

3.6.4 Conclusiones Finales.

Una vez que se han analizado e interpretado los datos, se debe extraer conclusiones prácticas de los resultados. También deben realizarse pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento, y con base en los resultados, formular nuevas hipótesis.

3.7 Diseño factorial

Un diseño factorial es una estrategia experimental que consiste en cruzar los niveles de todos los factores tratamiento en todas las combinaciones posibles. Cuando el número de factores es grande, la cantidad de experimentos a realizar en un diseño factorial completo puede resultar inmanejable. Por ejemplo, un diseño factorial completo de 10 factores a 2 niveles requiere 1024 experimentos. Para estos casos, se utilizan los diseños factoriales fraccionados, en los cuales el experimentador selecciona un subconjunto de ensayos del total de combinaciones posibles, a cambio de una incertidumbre en la información que obtenemos del sistema.

Los ensayos se escogen de forma que se confundan los efectos de los factores principales con algunas de las interacciones. Esta estrategia presupone que la probabilidad de que los efectos principales influyan en el sistema es superior al de algunas de las interacciones.

Por ejemplo, para un sistema de 3 factores (A, B, C) a 2 niveles, un diseño factorial fraccionado 2^{3-1} permite estudiar el sistema con sólo 4 experimentos, con la penalización de que los factores principales y las interacciones se confunden entre sí (A=BC; B=AC; C=AB).

Tabla 3. 7 Interacciones del diseño factorial. **Fuente:** [1]

| DESVIACION [BAR] | REGIMEN [RPM] | ADITIVO [%] |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------|
| 0 | 820 | 50 |
| 10 | 820 | 50 |
| 0 | 2500 | 50 |
| 10 | 2500 | 50 |
| 0 | 820 | 100 |
| 10 | 820 | 100 |
| 0 | 2500 | 100 |
| 10 | 2500 | 100 |
| 0 | 820 | 50 |
| 10 | 820 | 50 |
| 0 | 2500 | 50 |
| 10 | 2500 | 50 |
| 0 | 820 | 100 |
| 10 | 820 | 100 |
| 0 | 2500 | 100 |
| 10 | 2500 | 100 |
| 0 | 820 | 50 |
| 10 | 820 | 50 |
| 0 | 2500 | 50 |
| 10 | 2500 | 50 |
| 0 | 820 | 100 |
| 10 | 820 | 100 |
| 0 | 2500 | 100 |
| 10 | 2500 | 100 |

Ventajas de utilizar los diseños factoriales

- Permiten detectar la existencia de efectos interacción entre los diferentes factores tratamiento.
- Es una estrategia más eficiente que la estrategia clásica de examinar la influencia de un factor manteniendo constantes el resto de los factores.

3.8 ANALISIS DE PARETO

3.8.1 Definición

El Análisis de Pareto es un balance cuantitativo y ordenado de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto.

Sirve para establecer prioridades y para enfocar y dirigir las acciones a desarrollar posteriormente. Permite basar la toma de decisiones en parámetros objetivos.

3.8.2 Objetivo

Utilizar los hechos para identificar la máxima concentración de potencial del efecto en estudio (Magnitud del problema, costes, tiempo, etc.) en el número mínimo de elementos que a él contribuyen.

Clasificar dichos elementos o factores en dos categorías: Los elementos de relevancia o importantes y los elementos de irrelevancia, para así tener claro los aspectos que influyen en nuestro experimento.

3.8.3 Características principales

Priorización: Identifica los elementos que más peso o importancia tienen dentro de un grupo.

Unificación de Criterios: Enfoca y dirige el esfuerzo de los componentes del grupo de trabajo hacia un objetivo prioritario común.

Carácter objetivo: Su utilización fuerza al grupo de trabajo a tomar decisiones basadas en datos y hechos objetivos.

3.8.4 Diagramas de Pareto

El Diagrama de Pareto nos indica de forma clara y de sencilla interpretación cada uno de los factores y las interacciones que nos afectan de manera significativa en cada una de nuestras características. Para que el factor o interacción se considere influyente debe sobrepasar la línea de referencia que se encuentra en el valor 2.12

3.8.4.1 Diagrama de Pareto para Media

En este caso nos podemos dar cuenta los factores A, B, C y además ninguna de las interacciones son influyentes en esta característica.

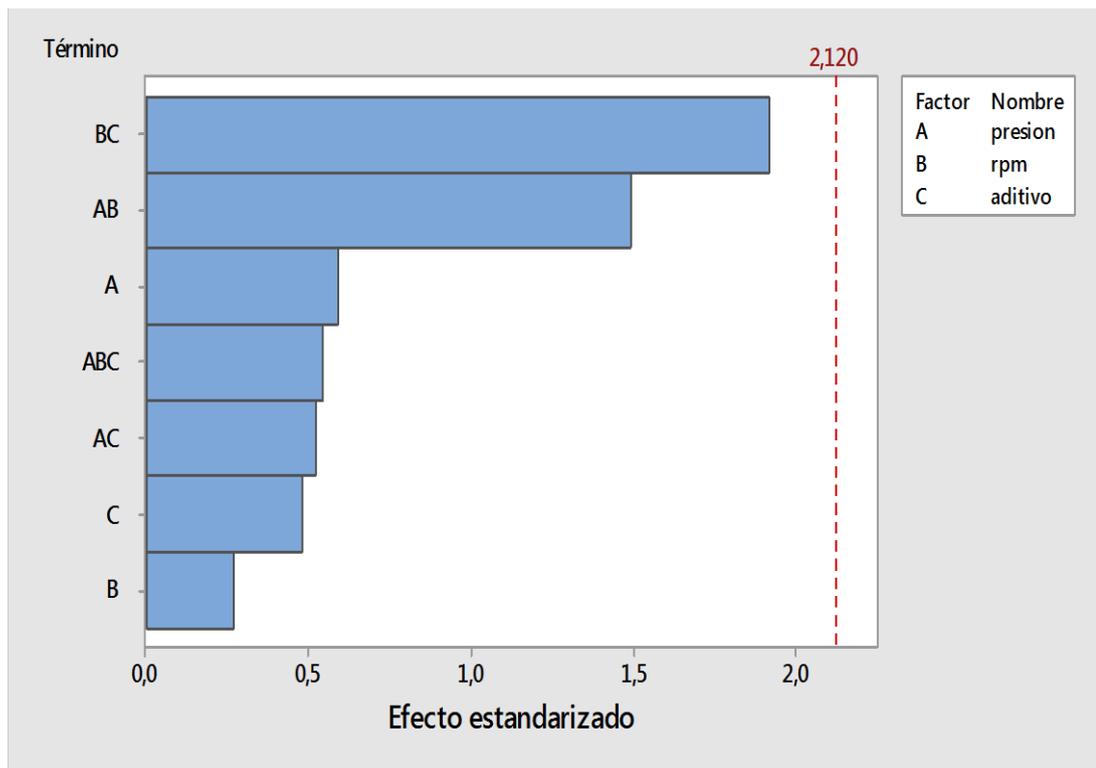


Figura 3. 5 Diagrama de Pareto para la Media. Fuente: [El autor]

3.8.4.2 Diagrama de Pareto para Varianza

En esta característica ninguno de los factores e interacciones influyen de manera significativa.

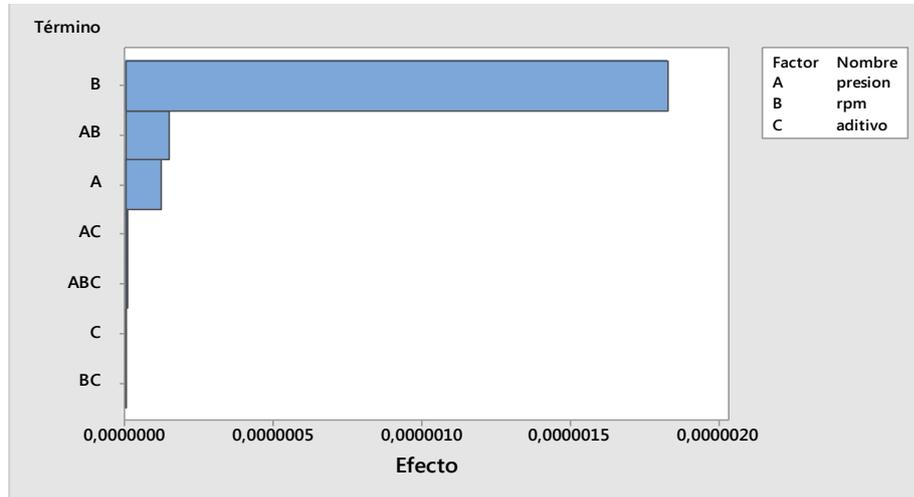


Figura 3. 6 Diagrama de Pareto para la Varianza. Fuente: [El autor]

3.8.4.3 Diagrama de Pareto para la Desviación Estándar.

Para la desviación estándar el factor B es el único que influye de manera significativa.

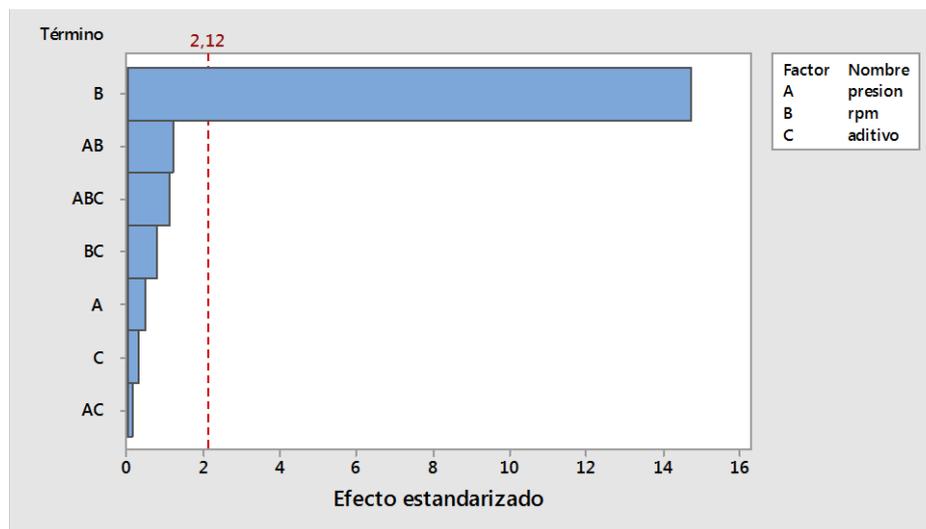


Figura 3. 7 Diagrama de Pareto para la Desviación Estándar. Fuente: [El autor]

3.8.4.4 Diagrama de Pareto para la Mediana.

La iteración doble AB, es la de mayor influencia para esta característica y los factores B y C también influyen de menor manera.

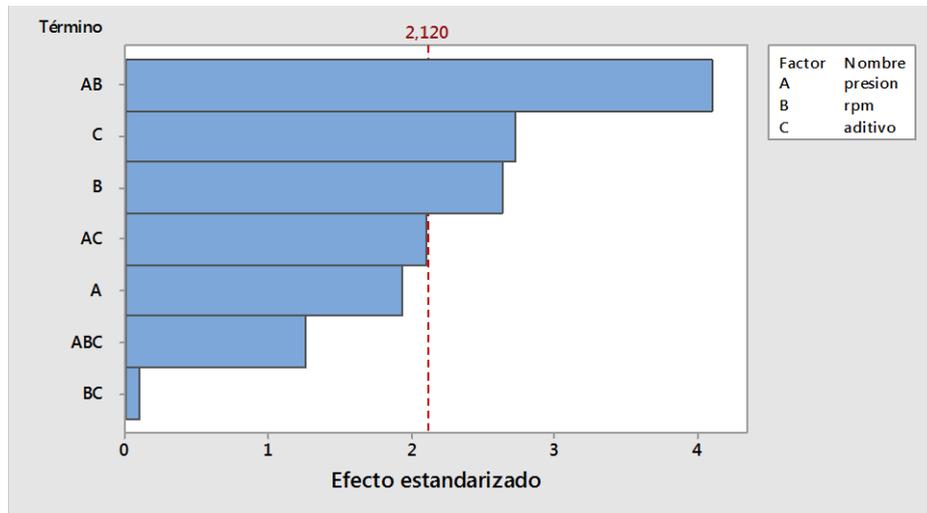


Figura 3. 8 Diagrama de Pareto para Mediana. Fuente: [El autor]

3.8.4.5 Diagrama de Pareto para Máximo.

Para esta característica el factor que más influye es el B, y la iteración AB también influye pero de menor manera.

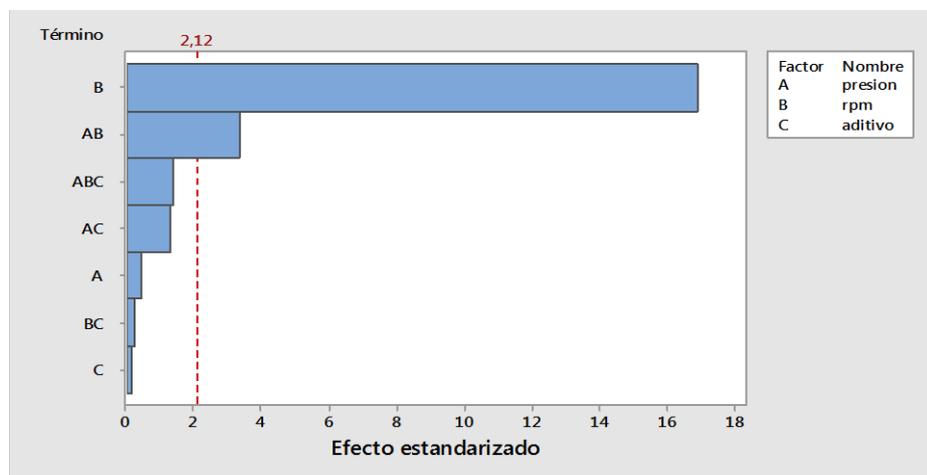


Figura 3. 9 Diagrama de Pareto para Máximo. Fuente: [El autor]

3.8.4.6 Diagrama de Pareto para Mínimo.

En este caso el factor B es el más influyente sin dejar de lado las interacciones AB y ABC que también tienen alto grado de importancia.

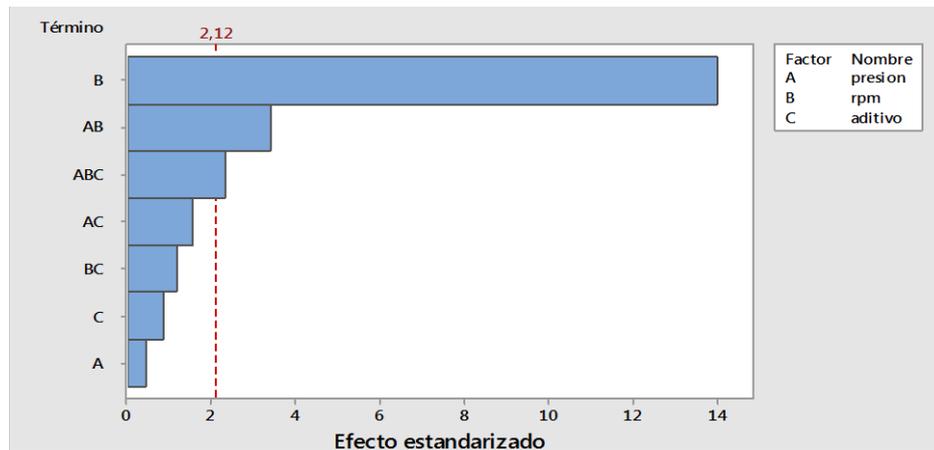


Figura 3. 10 Diagrama de Pareto para Mínimo. Fuente: [El autor]

3.8.4.7 Diagrama de Pareto para Potencia.

En esta característica los factores A, B, C, las interacciones AB, AC, BC, al igual que la iteración triple ABC no son influyentes.

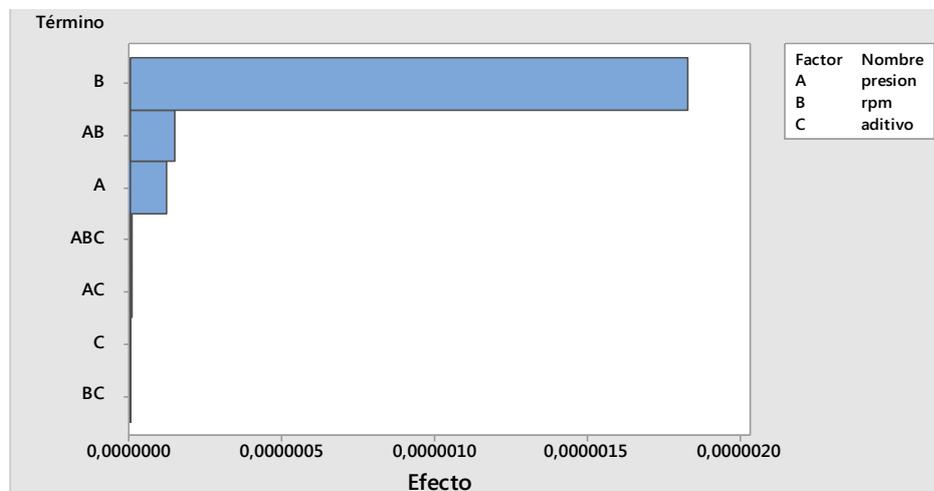


Figura 3. 11 Diagrama de Pareto para Potencia. Fuente: [El autor]

3.8.4.8 Diagrama de Pareto para Energía.

El factor B y la iteración doble AB son las más significativas para esta característica.

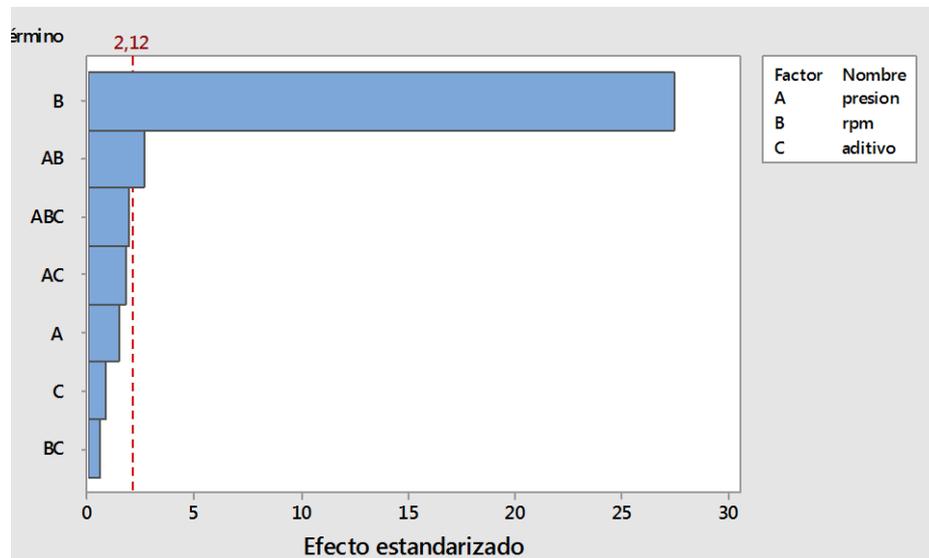


Figura 3. 12 Diagrama de Pareto para Energía. Fuente: [El autor]

3.8.4.9 Diagrama de Pareto para el Factor De Curtosis.

El único factor influyente es el B, para esta característica

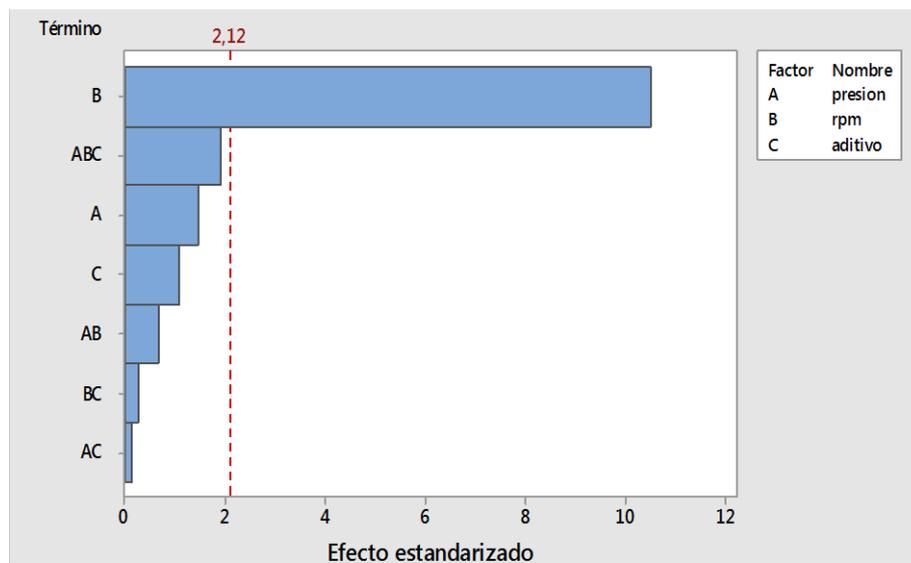


Figura 3. 13 Diagrama de Pareto para el Factor De Curtosis. Fuente: [El autor]

3.8.4.10 Diagrama de Pareto para Asimetría.

Para la asimetría el factor B es el más influyente y la iteración AB es también de gran importancia.

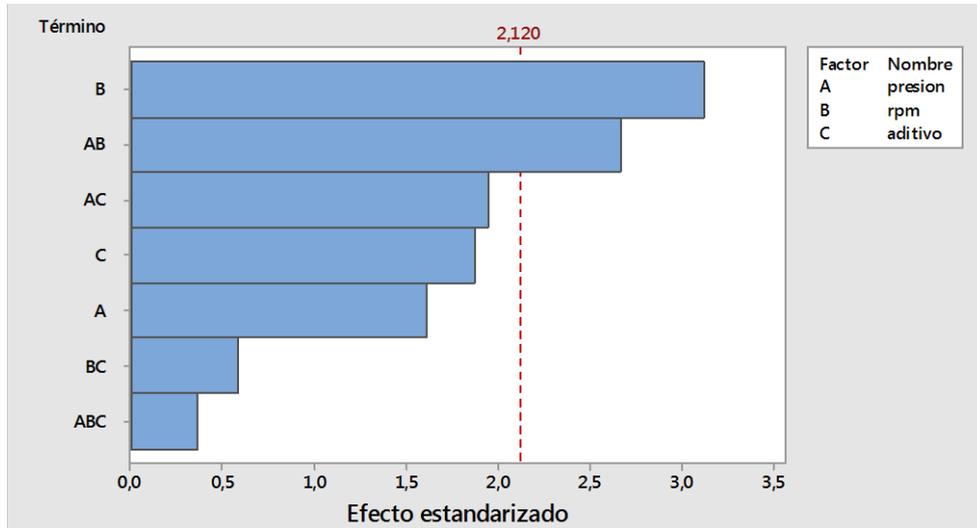


Figura 3. 14 Diagrama de Pareto para Asimetría. Fuente: [El autor]

3.8.4.11 Diagrama de Pareto para Valor RMS.

El factor que más influye es el factor B, sin dejar de lado la iteración doble AB que tiene también gran importancia.

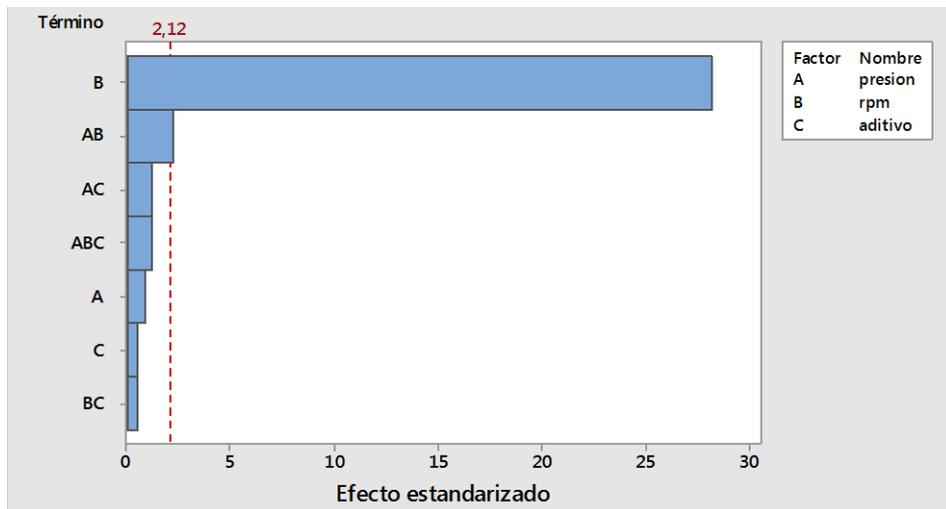


Figura 3. 15 Diagrama de Pareto para Valor RMS. Fuente: [El autor]

3.8.4.12 Diagrama de Pareto para Factor de Cresta.

Para esta característica los valores de todos los factores e interacciones no son influyentes.

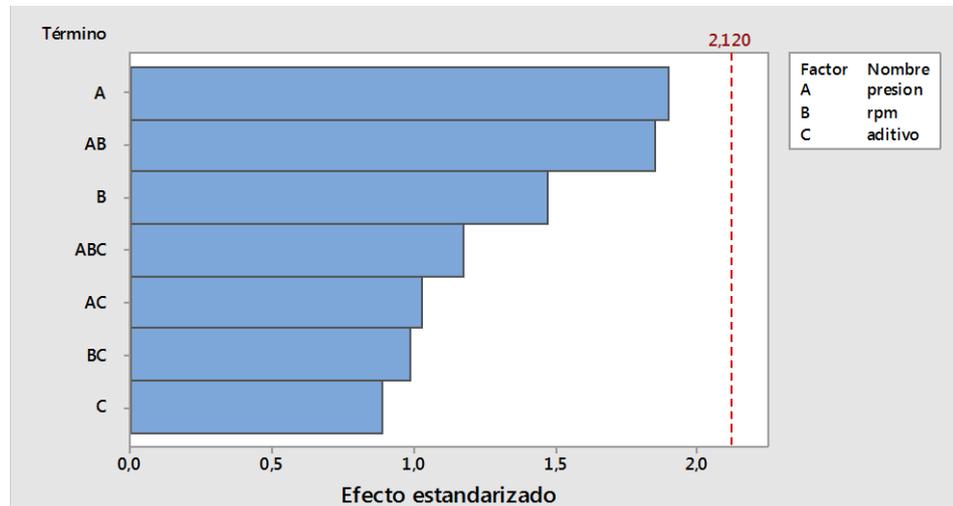


Figura 3. 16 Diagrama de Pareto para Factor De Cresta. Fuente: [El autor]

3.8.4.13 Diagrama de Pareto para Potencia de Intervalo.

En esta característica los factores A, B, C, las interacciones AB, AC, BC, al igual que la iteración triple ABC no son influyentes.

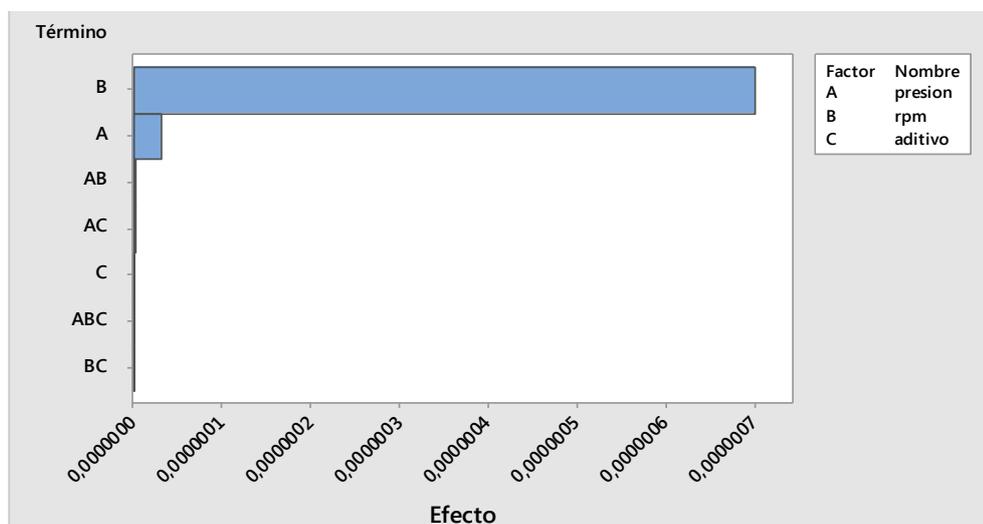


Figura 3. 17 Diagrama de Pareto para Potencia de Intervalo. Fuente: [El autor]

3.9 ANÁLISIS DE RESIDUOS

Con el objetivo de identificar que factor o iteración es la más influyente se ha obtenido un gráfico de análisis de residuos para cada característica, con esto podemos interpretar cual es la característica que más se ajusta al diseño experimental.

El análisis de residuos permite verificar si se están cumpliendo las premisas de linealidad de las relaciones y normalidad de los residuos. La gráfica de probabilidad normal representa los residuos versus sus valores esperados cuando la distribución es normal.

Los residuos del análisis deben estar distribuidos normalmente. En la práctica, para datos con un número grande de observaciones, los distanciamientos moderados con respecto a la normalidad no afectan seriamente los resultados.

El histograma nos indica si los datos son asimétricos o si existen valores atípicos en los datos mientras que el gráfico de Residuos versus valores ajustados indica si la varianza es constante, si existe una relación no lineal o si existen valores atípicos en los datos y el gráfico de Residuos versus orden de los datos indica si hay efectos sistemáticos en los datos debido al tiempo o al orden de recolección de los datos.

3.9.1 Gráficas de residuos para Media.

Los puntos siguen la recta de regresión con puntos atípicos al final esto puede darse por un error en la recolección o ingreso de datos, en el gráfico de orden podemos ver los puntos aleatoriamente alrededor de cero lo que nos indica una varianza que no es constante mientras que en la gráfica de orden no sigue ningún patrón.

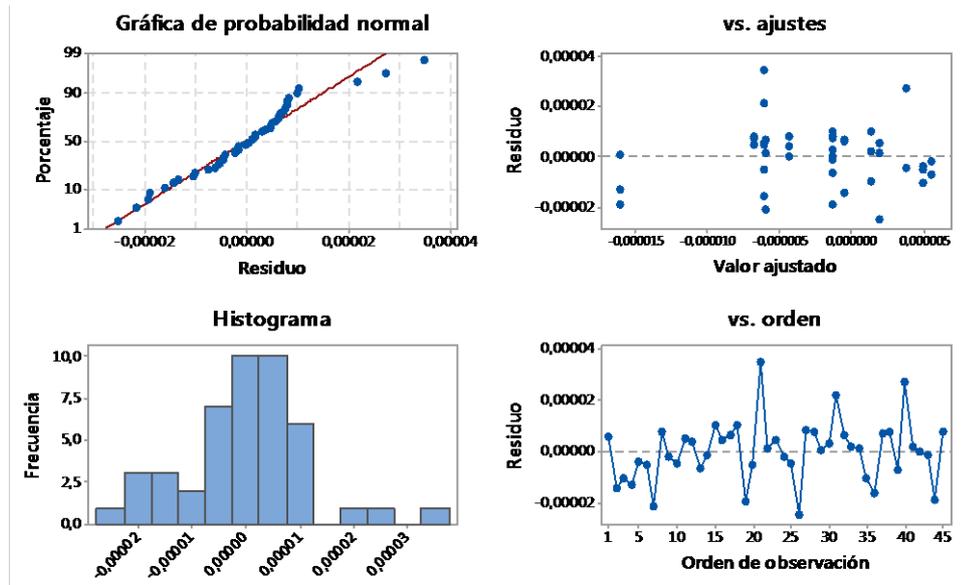


Figura 3. 18 Gráfica de Residuos para Media. Fuente: [El autor]

3.9.2 Gráficas de residuos para Varianza

Podemos observar un punto atípico negativo lejano de cero en la gráfica de probabilidad normal y en el histograma, los puntos en la gráfica de ajuste están en forma aleatoria y son positivos, mientras en la gráfica de orden se mantiene la aleatorización de las muestras.

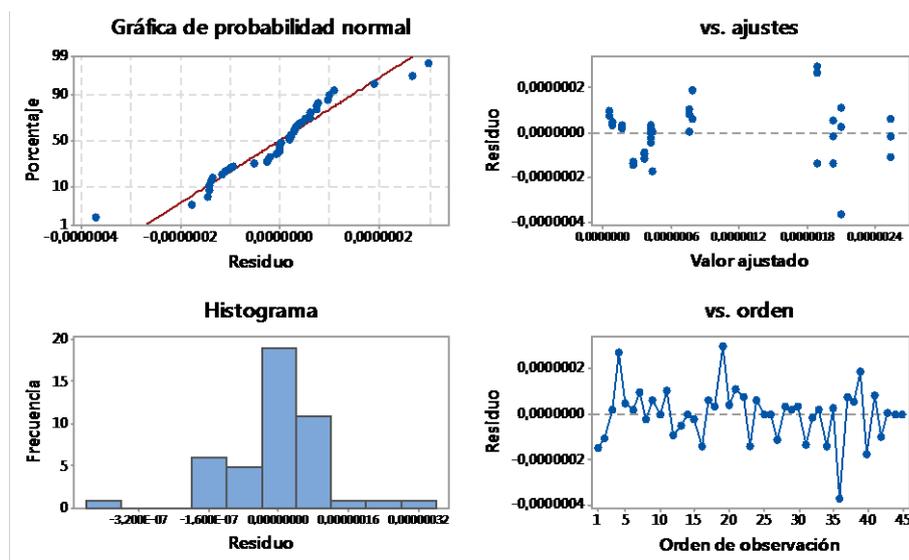


Figura 3. 19 Gráfica de Residuos para Varianza. Fuente: [El autor]

3.9.3 Gráficas de residuos para Desviación Estándar.

Los puntos siguen la recta de regresión como se esperaba en la gráfica de probabilidad normal y esto se muestra en el histograma, en la gráfica de ajustes vemos puntos positivos dispersos a lo largo del valor ajustado mientras en la gráfica de orden se mantiene la aleatorización de las muestras.

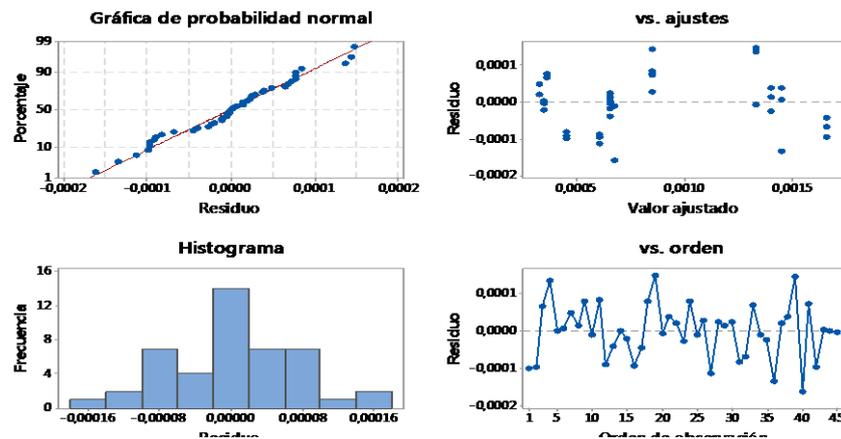


Figura 3. 20 Gráfica de Residuos para Desviación Estándar. Fuente: [El autor]

3.9.4 Gráficas de residuos para Mediana.

En el gráfico de probabilidad normal podemos observar dos puntos atípicos un positivo y un negativo sin ningún tipo de simetría lo que podemos confirmar en el histograma, la gráfica de ajustes nos muestra puntos dispersos a lo largo del valor ajustado y la gráfica de orden nos indica que los puntos no siguen ningún patrón.

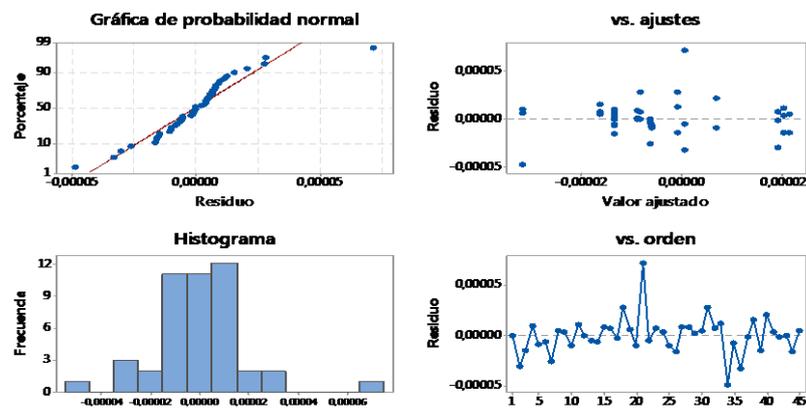


Figura 3. 21 Gráfica de Residuos para Mediana. Fuente: [El autor]

3.9.5 Gráficas de residuos para Máximo.

En la gráfica de probabilidad podemos ver un punto alejado de cero en la parte negativa mientras que en el histograma podemos ver la gráfica de una campana mejor que las anteriores, en la gráfica de ajustes vemos puntos dispersos a lo largo del valor ajustado y los puntos de la gráfica de orden no siguen ningún patrón.

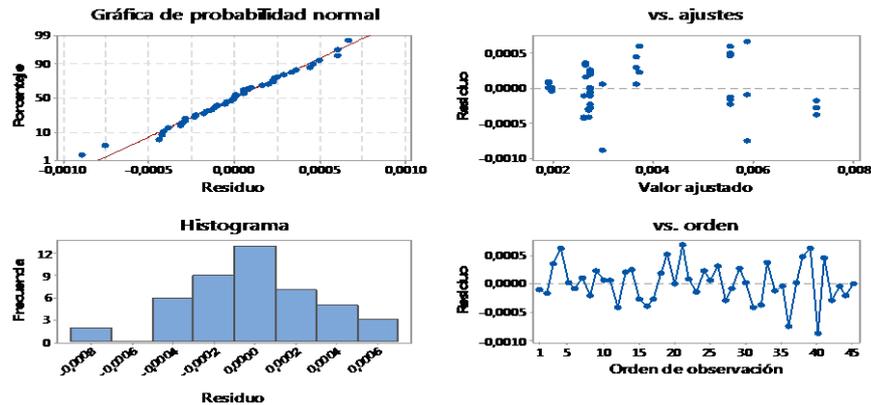


Figura 3. 22 Gráfica de Residuos para Máximo. Fuente: [El autor]

3.9.6 Gráficas de residuos para Mínimo.

En la gráfica de probabilidad normal los puntos siguen la recta de regresión siendo la mejor de todas las muestras y el histograma muestra una campana mejor graficada, de la misma manera los puntos de la gráfica de ajuste están dispersos a lo largo del valor ajustado y los puntos en el orden de observación aleatorios asegurando una toma de muestras de forma correcta.

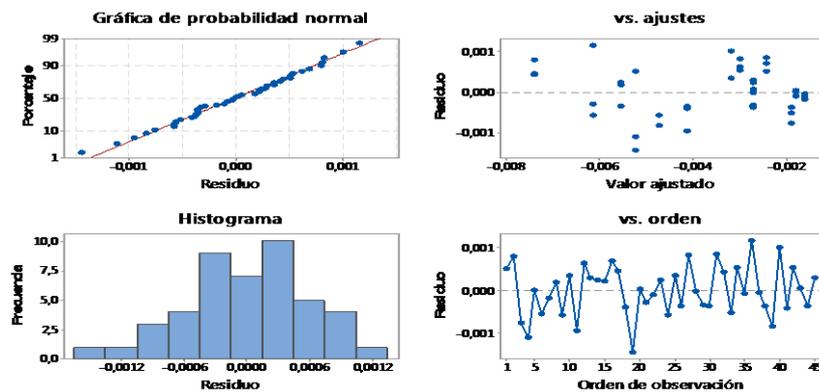


Figura 3. 23 Gráfica de Residuos para Mínimo. Fuente: [El autor]

3.9.7 Gráficas de residuos para Potencia

Se observa un punto muy lejano del cero en la gráfica de probabilidad normal y en el histograma, los puntos en la gráfica de ajuste son aleatorios y positivos, en la de orden se mantiene una aleatorización de las muestras.

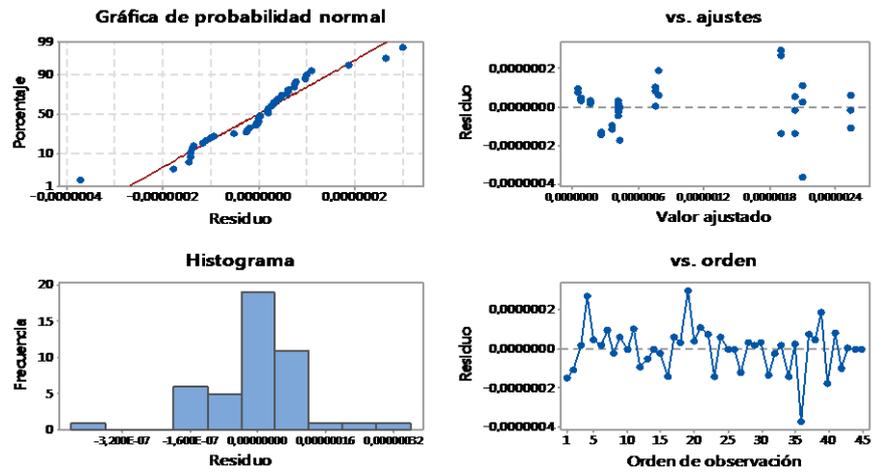


Figura 3. 24 Gráfica de Residuos para Potencia. Fuente: [El autor]

3.9.8 Gráfica de residuos para Energía

Se puede observar un punto atípico negativo lejano de cero en la gráfica de probabilidad normal y en el histograma, los puntos en la gráfica de ajuste son aleatorios y positivos mientras que la de orden se mantiene la aleatorización de muestras.

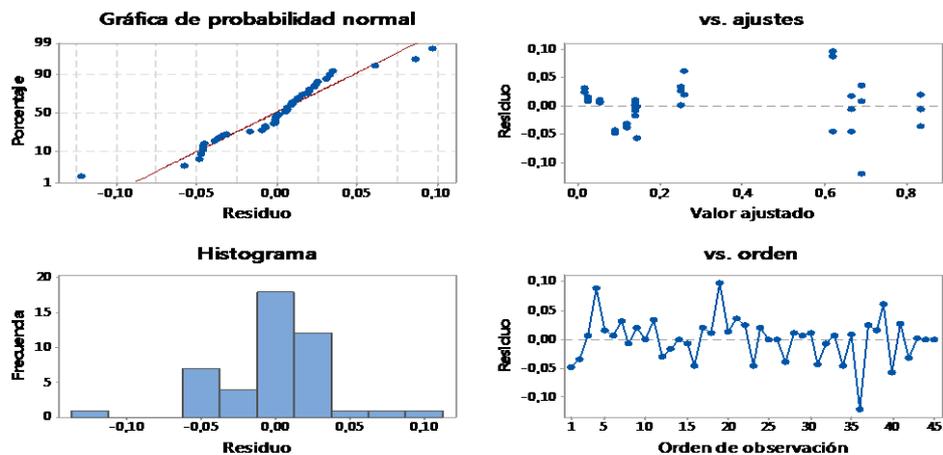


Figura 3. 25 Gráfica de Residuos para Energía. Fuente: [El autor]

3.9.9 Gráficas de residuos para Factor de Curtosis.

La gráfica de probabilidad normal nos muestra puntos atípicos positivos que se confirman en el histograma esto puede ser fallos en la recolección de datos o al ingreso de los mismos, en la gráfica de ajustes todos los puntos son positivos, mientras que los puntos de orden de observación aleatorios aseguran una buena toma de muestras.

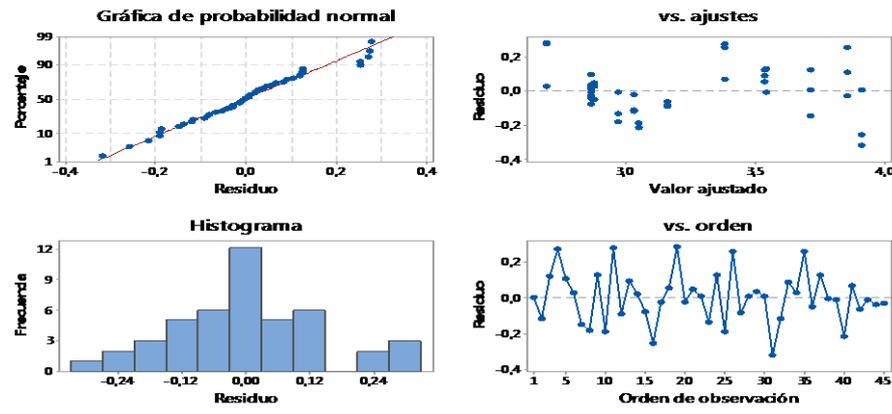


Figura 3. 26 Gráfica de Residuos para Factor de Curtosis. Fuente: [El autor]

3.9.10 Gráficas de residuos para Valor RMS

En la gráfica de probabilidad podemos observar que los puntos siguen la recta de regresión de manera correcta, en el histograma se ve una gráfica en forma de campana, en la gráfica de ajustes se puede ver que todos los puntos son positivos y en la gráfica de orden los puntos no siguen ningún patrón.

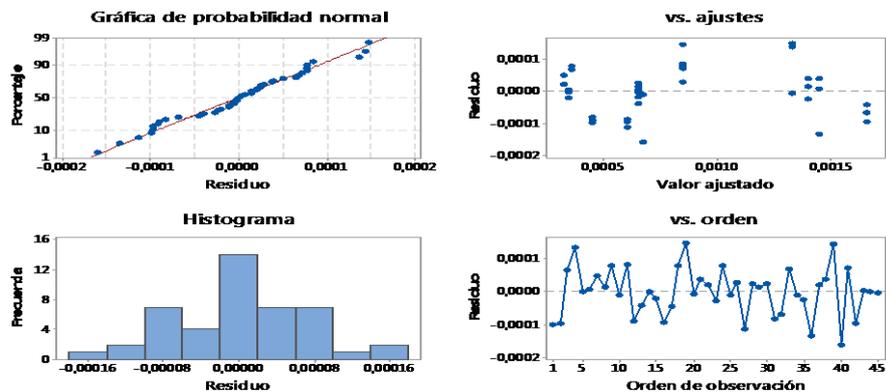


Figura 3. 27 Gráfica de Residuos para Valor RMS. Fuente: [El autor]

3.9.11 Gráficas de residuos para Asimetría.

En la gráfica de probabilidad normal vemos un punto atípico negativo el mismo que se confirma en el histograma, los puntos de la gráfica de ajuste están dispersos a lo largo del valor ajustado y en la gráfica de orden los puntos no siguen ningún patrón definido.

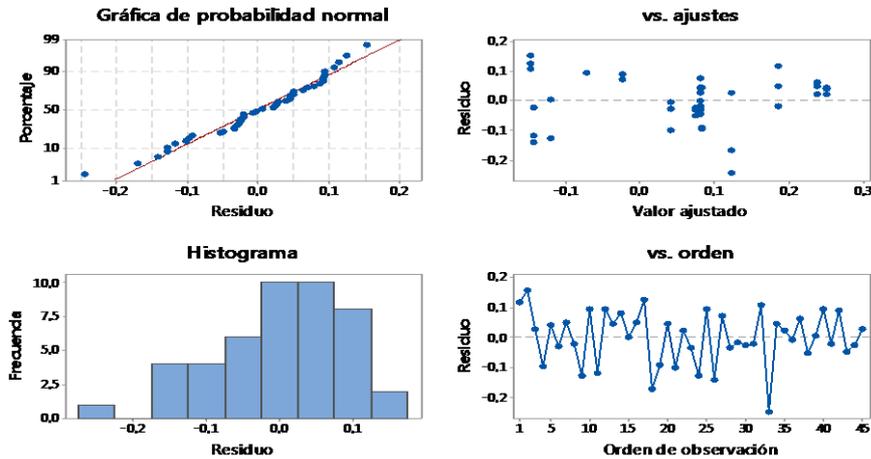


Figura 3. 28 Gráfica de Residuos para Asimetría. Fuente: [El autor]

3.9.12 Gráfica de residuos para Factor De Cresta

En la gráfica de probabilidad podemos observar que los puntos siguen la recta de regresión de manera correcta sin embargo tenemos un punto atípico positivo lejano de cero, lo que se puede confirmar en el histograma, en la gráfica de ajuste podemos observar que todos los puntos son positivos y mientras que los puntos de orden de observación aleatorios aseguran una buena toma de muestras.

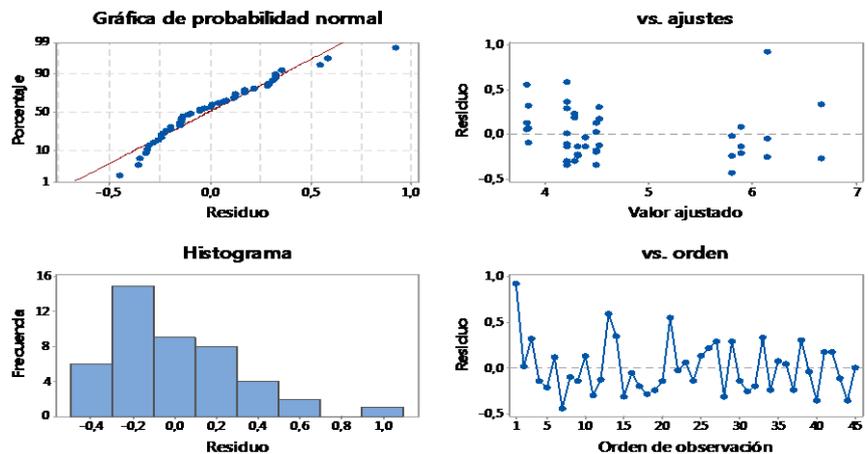


Figura 3. 29 Gráfica de Residuos para Factor de Cresta. Fuente: [El autor]

3.9.13 Gráfica de residuos para Potencia de Intervalo

Se presenta un punto lejano asimétrico y atípico por debajo del cero que se confirman en el histograma. La de ajustes nos muestra el mismo patrón y en la de orden los residuos son independientes al no presentarse simetría en los puntos.

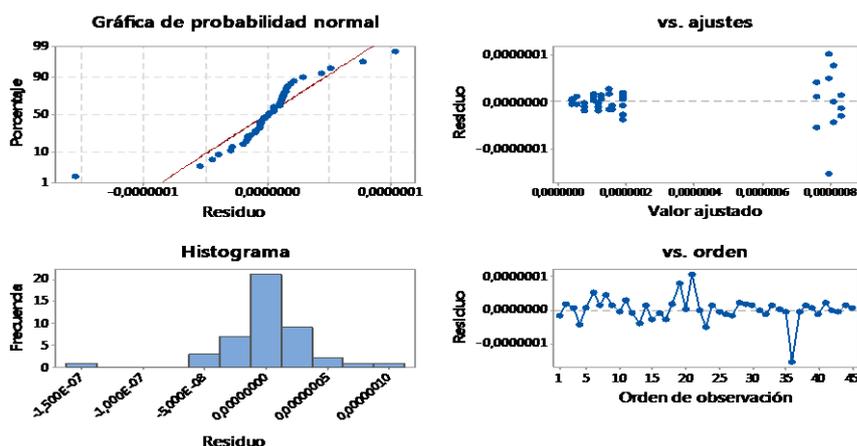


Figura 3. 30 Gráfica de Residuos para Potencia de Intervalo. Fuente: [El autor]

Una vez interpretados los datos se los tabula para tener claro cuáles son los factores y las interacciones más influyentes del experimento.

Tabla 3. 8 Factores influyentes según los diagramas de Pareto. Fuente: [El autor]

| características del espectro | Desviación [bar] A | Régimen[rpm] B | Aditivo[%] C | Interacciones | | | |
|------------------------------|--------------------|----------------|--------------|---------------|----|----|-------|
| | | | | AB | AC | BC | A B C |
| Media | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Varianza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Desviación STD | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mediana | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Máximo | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Mínimo | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 |
| Potencia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Energía | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Factor de Curtosis | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Asimetría | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Valor RMS | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Factor de Cresta | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pot. Intervalo De Frecuencia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

En la tabla 3.5 podemos darnos cuenta que en la Media, Varianza, Potencia, Factor de cresta y Potencia de intervalo de frecuencia no se realizara ningún análisis debido a que ningún factor ni iteración son influyentes en las respuestas.

3.10 ANÁLISIS DE INTERACCIONES Y EFECTOS PRINCIPALES

Para cada una de las interacciones y efectos principales se va a realizar un análisis y comparar su valor de p con cada una de las figuras para su mayor veracidad.

3.10.1 Análisis de Desviación Estándar

Podemos observar que para Desviación Estándar se da una iteración de magnitud considerable esto se puede verificar en el panel ya que las líneas se intersecan y el valor de p para RPM * PRESIÓN es de 0,017 mientras que para PRESIÓN * DENSIDAD el valor de p es 0,743 y para RPM * ADITIVO es 0,496 dentro de nuestro análisis debemos tener en cuenta que para que exista una iteración significativa el valor de p debe ser menor a 0,05

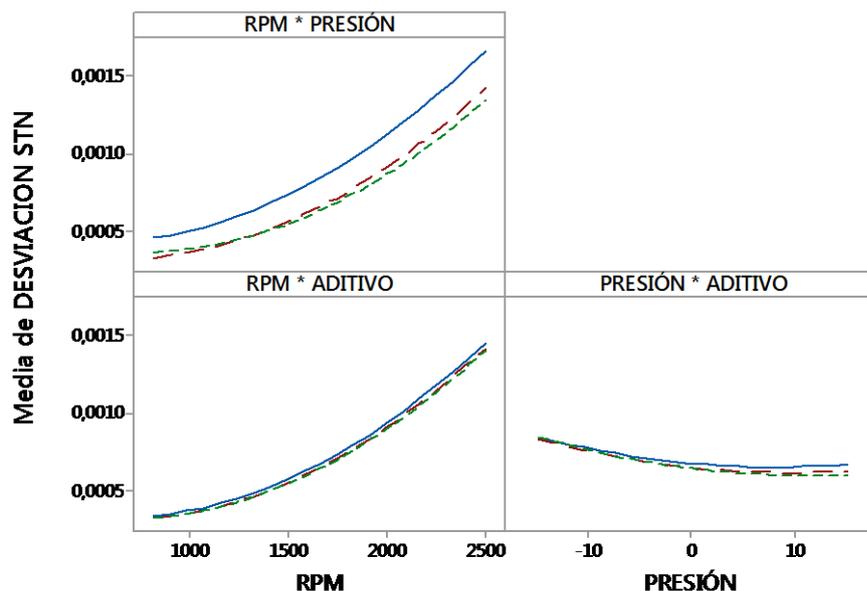


Figura 3. 31 Gráfica de interacción para Desviación Estándar. Fuente: [El autor]

En la gráfica de efectos principales podemos observar que el factor RPM es el más influyente para esta característica ya que su valor de p es 0,000 por lo que asumimos que tiene gran importancia, la misma situación tenemos para PRESIÓN ya que su valor de p es 0,000. Sin embargo en la ADITIVO tenemos que su valor es de 0,331 lo que nos indica su importancia así la gráfica no lo refleje.

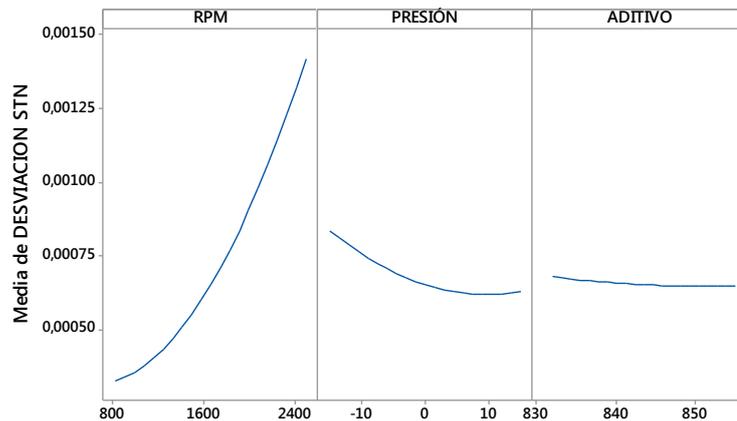


Figura 3. 32 Gráfica de efectos principales para Desviación Estándar. **Fuente:** [El autor]

3.10.2 Análisis de Mediana

Dentro de este grafico podemos observar que hay una fuerte interacción ya que nos muestra una intersección de las líneas de gran magnitud lo que se puede comprobar con el valor de p que para RPM * PRESIÓN es de 0,020 siendo este el más influyente para esta característica, para RPM * ADITIVO el valor de p es 0,486 y para PRESIÓN * ADITIVO es 0,544

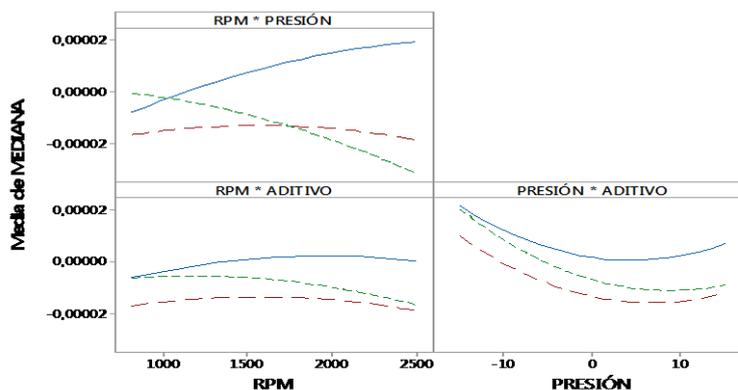


Figura 3. 33 Gráfica de interacción para Mediana. **Fuente:** [El autor]

En los efectos principales podemos ver que la PRESIÓN es la que más influye ya que su valor de p es 0,014 mientras que RPM es 0,834, que serian los dos factores más influyentes para esta característica, mientras que ADITIVO tiene un valor de p de 0,318

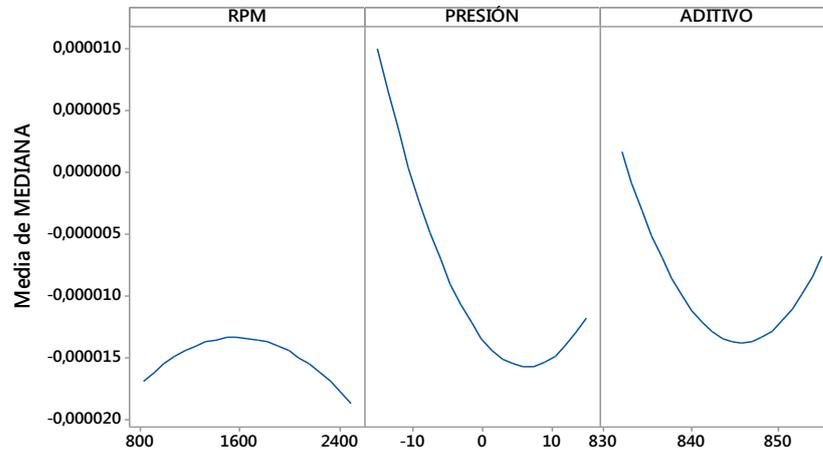


Figura 3. 34 Gráfica de efectos principales para mediana. Fuente: [El autor]

3.10.3 Análisis de Máximo.

En la gráfica de Máximo se da una iteración de magnitud considerable esto se puede verificar en el panel ya que las líneas se intersecan y el valor de p para RPM * PRESIÓN es de 0,000 mientras que para PRESIÓN * DENSIDAD el valor de p es 0,580 y para RPM * ADITIVO es 0,532

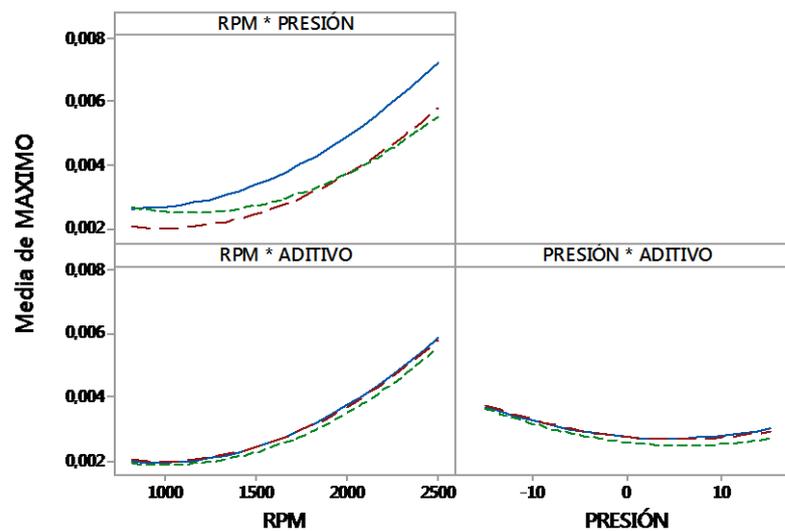


Figura 3. 35 Gráfica de interacción para Máximo. Fuente: [El autor]

En la gráfica de efectos principales podemos observar que el factor RPM es muy influyente para esta característica ya que su valor de p es 0,000 por lo que asumimos que tiene gran importancia, la misma situación tenemos para PRESIÓN ya que su valor de p es 0,000. Sin embargo en la ADITIVO tenemos que su valor es de 0,254 lo que nos indica que descartamos la importancia de este factor.

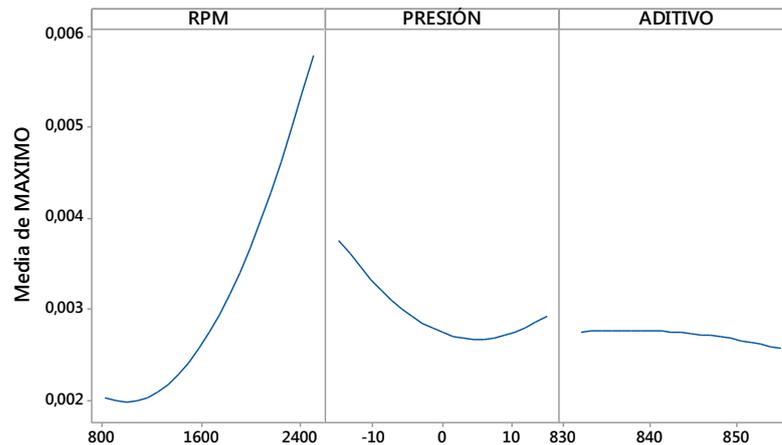


Figura 3. 36 Gráfica de efectos principales para Máximo. Fuente: [El autor]

3.10.4 Análisis de Mínimo.

Dentro de este grafico podemos observar que hay una fuerte interacción ya que nos muestra una intersección de las líneas de gran magnitud lo que se puede comprobar con el valor de p que para RPM * PRESIÓN es de 0,033 siendo esta la más influyente para esta característica, para RPM * *ADITIVO el valor de p es 0,561 y para PRESIÓN * ADITIVO es 0,579

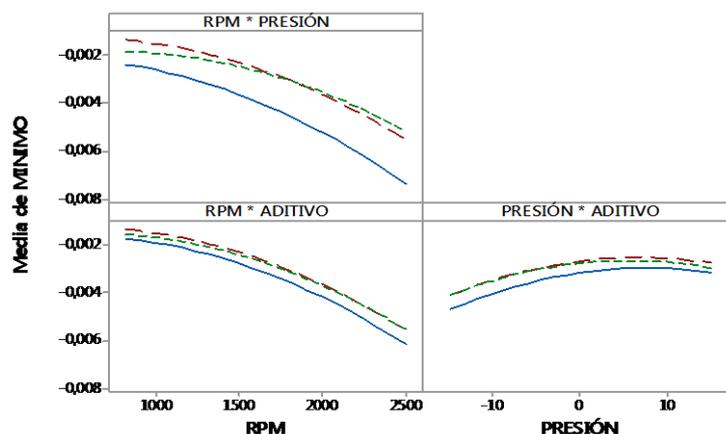


Figura 3. 37 Gráfica de interacción para Mínimo. Fuente: [El autor]

Al igual que en gráficas anteriores podemos observar que el factor RPM es muy influyente para esta característica ya que su valor de p es 0,000 por lo que asumimos que tiene gran importancia, la misma situación tenemos para PRESIÓN ya que su valor de p es 0,000. Sin embargo en la ADITIVO tenemos que su valor es de 0,144 lo que nos indica que descartamos la importancia de este factor.

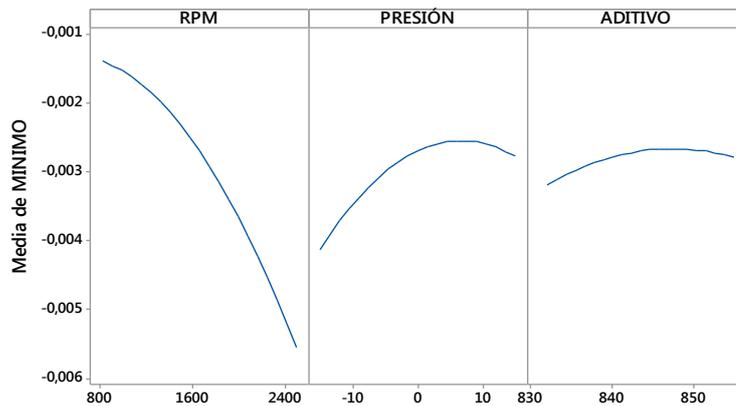


Figura 3. 38 Gráfica de efectos principales para Mínimo. **Fuente:** [El autor]

3.10.5 Análisis de Energía.

Para energía se puede observar en el panel que tenemos una interacción influyente en RPM * PRESIÓN ya que su valor de p es 0,001, mientras que para RPM * *ADITIVO el valor de p es 0,757 lo que nos indica que esta, no tiene importancia y para la interacción de PRESIÓN * ADITIVO es 0,751

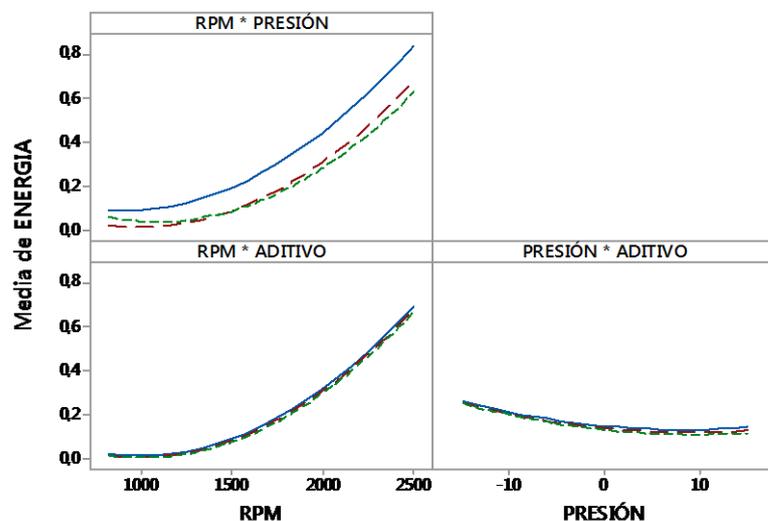


Figura 3. 39 Gráfica de interacción para Energía. **Fuente:** [El autor]

En los efectos principales podemos observar en los paneles que le más influyente es RPM ya que tiene una curva creciente y comparando su valor de p el cual es 0,000 al igual que la PRESIÓN así no lo demuestre el grafico, mientras que el valor de p para la ADITIVO es 0,328.

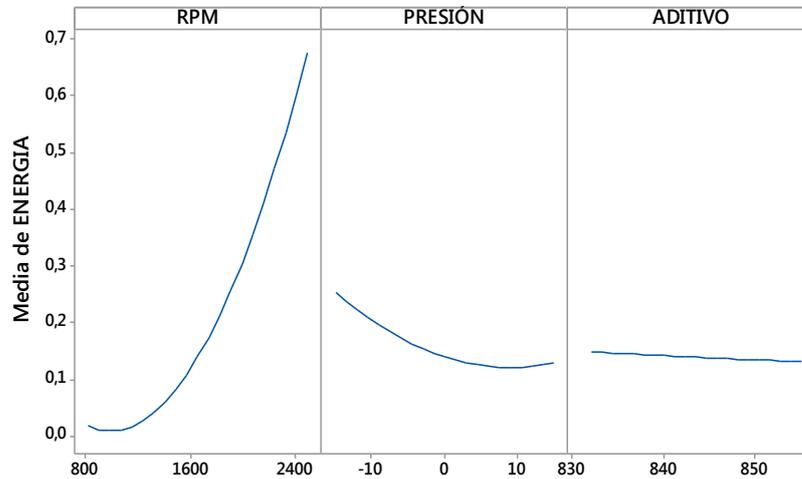


Figura 3. 40 Gráfica de efectos principales para Energía. Fuente: [El autor]

3.10.6 Análisis del Factor De Curtosis.

Para el Factor de Curtosis vemos que el valor de para RPM * PRESIÓN es de 0,855, para RPM * ADITIVO es de 0,215 y para PRESIÓN * ADITIVO es de 0,138, esto indica que las interacciones de estos factores no son significativas q pesar que en los gráficos se vean pequeñas intersecciones, lo cual se puede considerar dentro del error

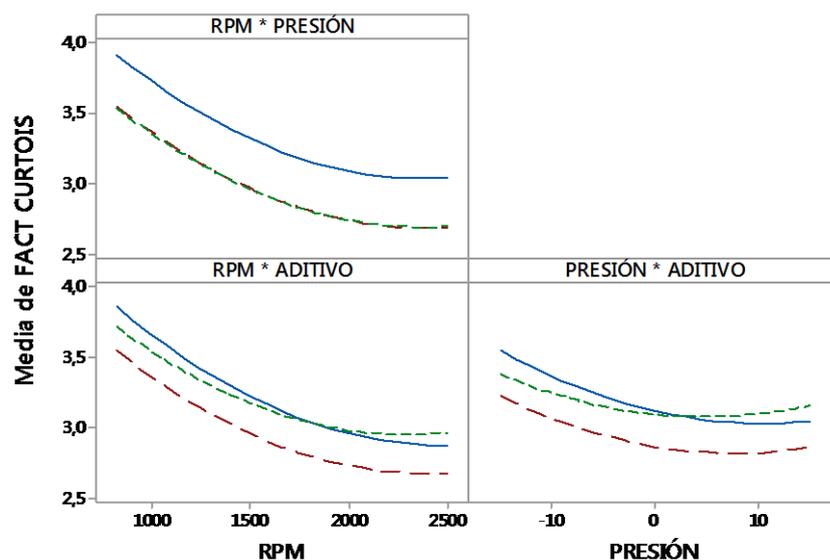


Figura 3. 41 Gráfica de interacción para Máximo. Fuente: [El autor]

Para los efectos principales podemos observar en la gráfica que RPM y PRESIÓN son los más influyentes teniendo ambos un valor de p igual a 0,000 mientras que la ADITIVO no es de importancia ya que su valor de p es 0,706.

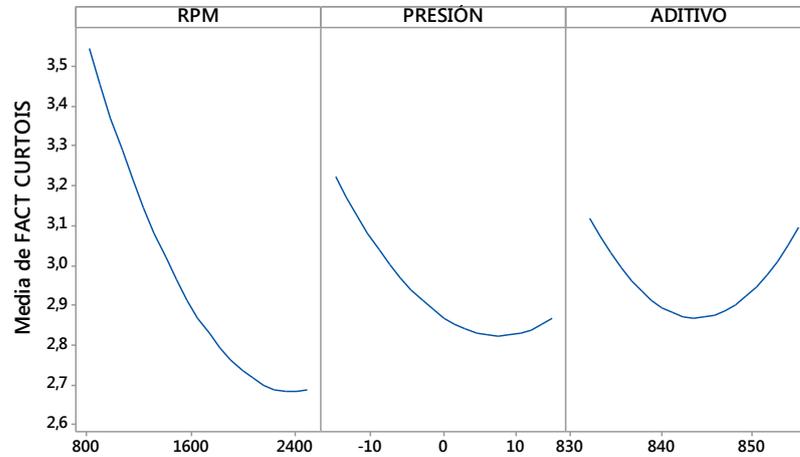


Figura 3. 42 Gráfica de efectos principales para Factor de Curtosis. **Fuente:** [El autor]

3.10.7 Análisis de asimetría

Para Asimetría vemos en el primer panel que existe una fuerte interacción ya que hay un cruce de líneas de gran magnitud y esto podemos corroborar porque el valor de p para RPM * PRESIÓN es 0,013, mientras que para RPM * ADITIVO es 0,677 y para PRESIÓN * ADITIVO es 0,534 lo que nos indica que no tienen influencia en esta interacción.

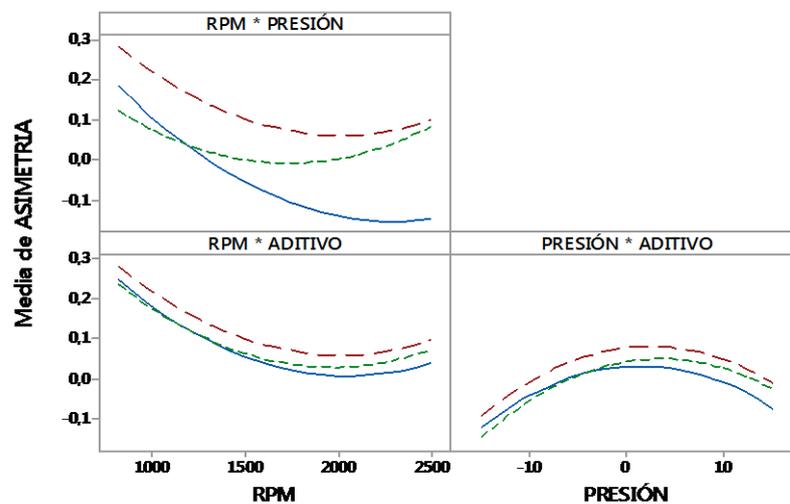


Figura 3. 43 Gráfica de interacción para Asimetría. **Fuente:** [El autor]

En los efectos principales para Asimetría tenemos que el factor más influyente es RPM como se observa en la gráfica y se confirma por su valor de p el mismo que es 0,000, también la PRESIÓN se debe tener en cuenta ya que su valor de p es 0,043 mientras que la ADITIVO tiene un valor de p igual a 0,769 por lo que descartamos su importancia.

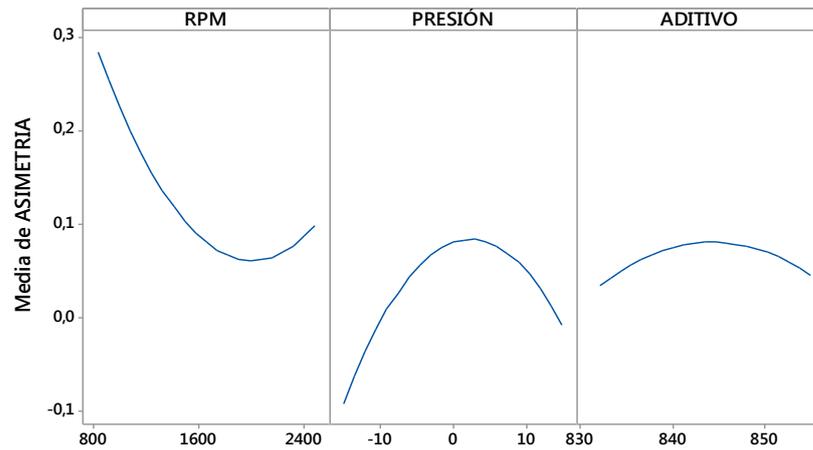


Figura 3. 44 Gráfica de efectos principales para Asimetría. Fuente: [El autor]

3.10.8 Análisis de Valor RMS.

Podemos observar que en la gráfica de RPM * PRESIÓN hay una intersección de líneas lo que nos indica que es una interacción fuerte y su valor de p igual a 0,017 lo corrobora, mientras que RPM* ADITIVO con un valor de p 0,739 no influye al igual que PRESIÓN * ADITIVO ya que su valor de p es 0,494

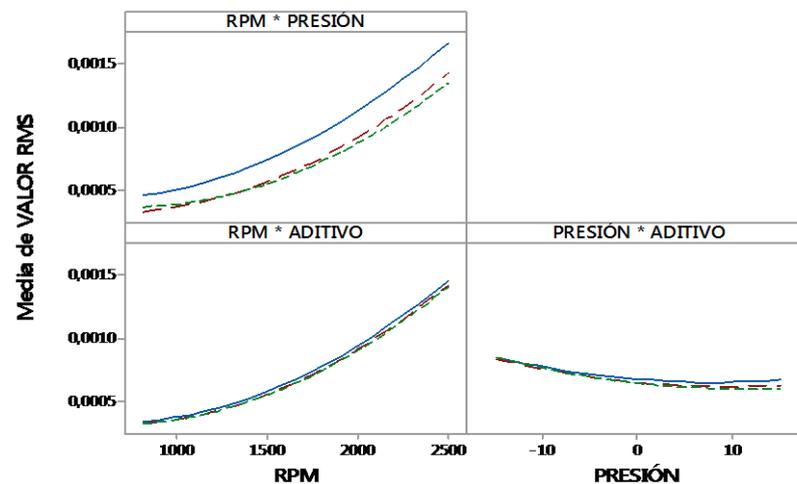


Figura 3. 45 Gráfica de interacción para Valor RMS. Fuente: [El autor]

En los efectos principales se observa que RPM es de gran magnitud y se comprueba ya que su valor de p es 0,000 al igual que PRESIÓN, mientras que se descarta la influencia del ADITIVO debido a que su valor de p es 0,331.

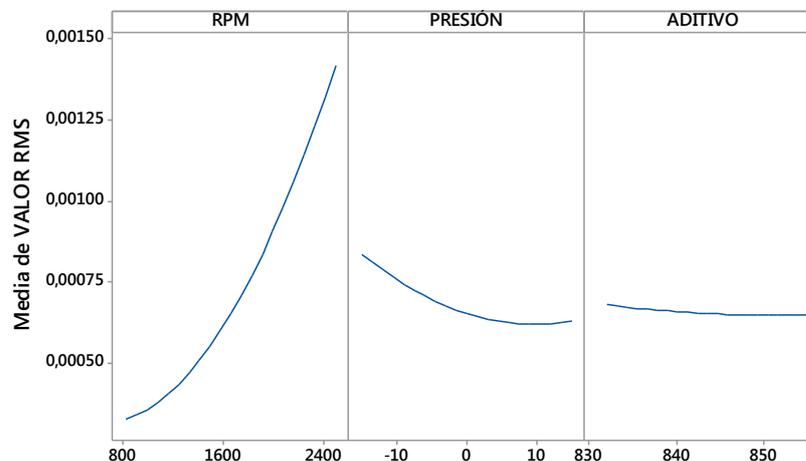


Figura 3. 46 Gráfica de efectos principales para Valor RMS. **Fuente:** [El autor]

De las gráficas de interacciones y efectos principales se puede interpretar que en la mayoría de casos la Desviación es el factor que más influye seguido por el Régimen excepto en Mediana, Máximo y Mínimo, mientras que el aditivo para el análisis de ruido no tiene ninguna influencia. En cambio para las interacciones la única que influye es AB en Desviación estándar y Energía.

Tabla 3. 9 Factores influyentes según las gráficas de interacciones y efectos principales.

Fuente: [El autor]

| Características del espectro | Desviación [bar] A | Régimen[rpm] B | Aditivo[%] C | Interacciones | | | |
|------------------------------|--------------------|----------------|--------------|---------------|----|----|-----|
| | | | | AB | AC | BC | ABC |
| Desviación STD | SI | SI | NO | SI | NO | NO | NO |
| Mediana | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Máximo | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Mínimo | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| Energía | SI | SI | NO | SI | NO | NO | NO |
| Factor de Curtosis | SI | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| Asimetría | SI | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| Valor RMS | SI | SI | NO | NO | NO | NO | NO |

3.10.9 Análisis de superficie

El análisis de superficie consiste en graficar dos factores y el tercero mantenerlo fijo, en nuestro caso el valor de RPM será el fijo ya que es un valor del cual el ruido es imposible eliminarlo por lo que las gráficas de superficie serán entre los dos factores restantes. Únicamente se analizará los elementos de relevancia contenidos en la tabla 3.9.

3.10.10 Análisis de Desviación Estándar

Para ralentir al momento de bajar la Presión el valor de la Desviación Estándar aumenta el mismo efecto causa al incrementar la Presión pero con menos relevancia. Para el aditivo el comportamiento es irrelevante. En cambio para 2500[rpm] la Desviación Estándar aumentará cuando la Presión disminuya.

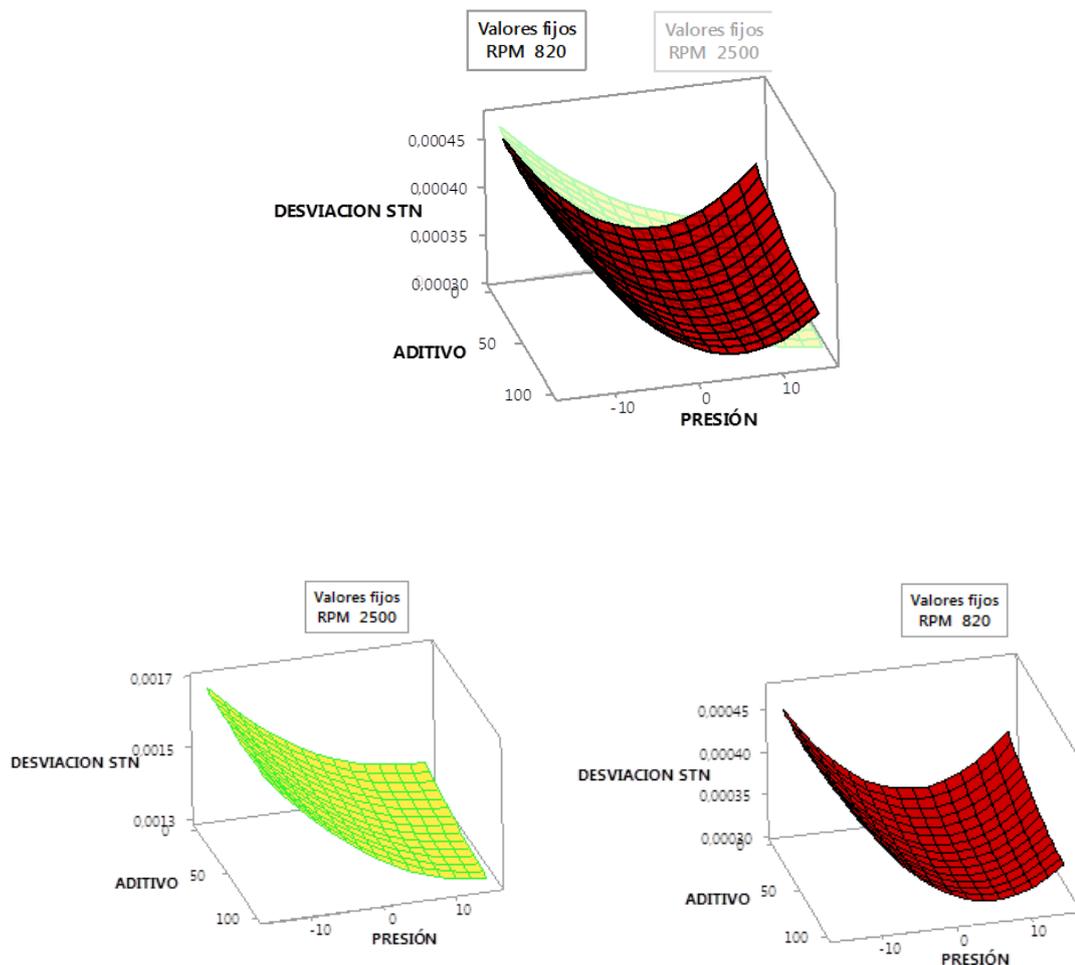


Figura 3. 47 Gráfica de superficies para Desviación Estándar. Fuente: [El autor]

3.10.11 Análisis de Mediana

Podemos observar en el régimen de 820 [rpm] en la superficie de color rojo que a medida que se varía la presión sea esta variación mayor o menor a la normal la mediana aumenta. Algo similar ocurre con el aditivo al momento que tenemos diesel normal el valor de la mediana es alto, al aumentar el porcentaje de aditivo la mediana baja hasta un punto (50%) en el que se eleva nuevamente. En cambio para el caso de 2500 [rpm] el comportamiento es opuesto por lo que podemos concluir que a ralentí si variamos la presión sea positiva o negativamente la mediana va a subir mientras que a 2500 [rpm] la mediana disminuirá si bajamos la presión.

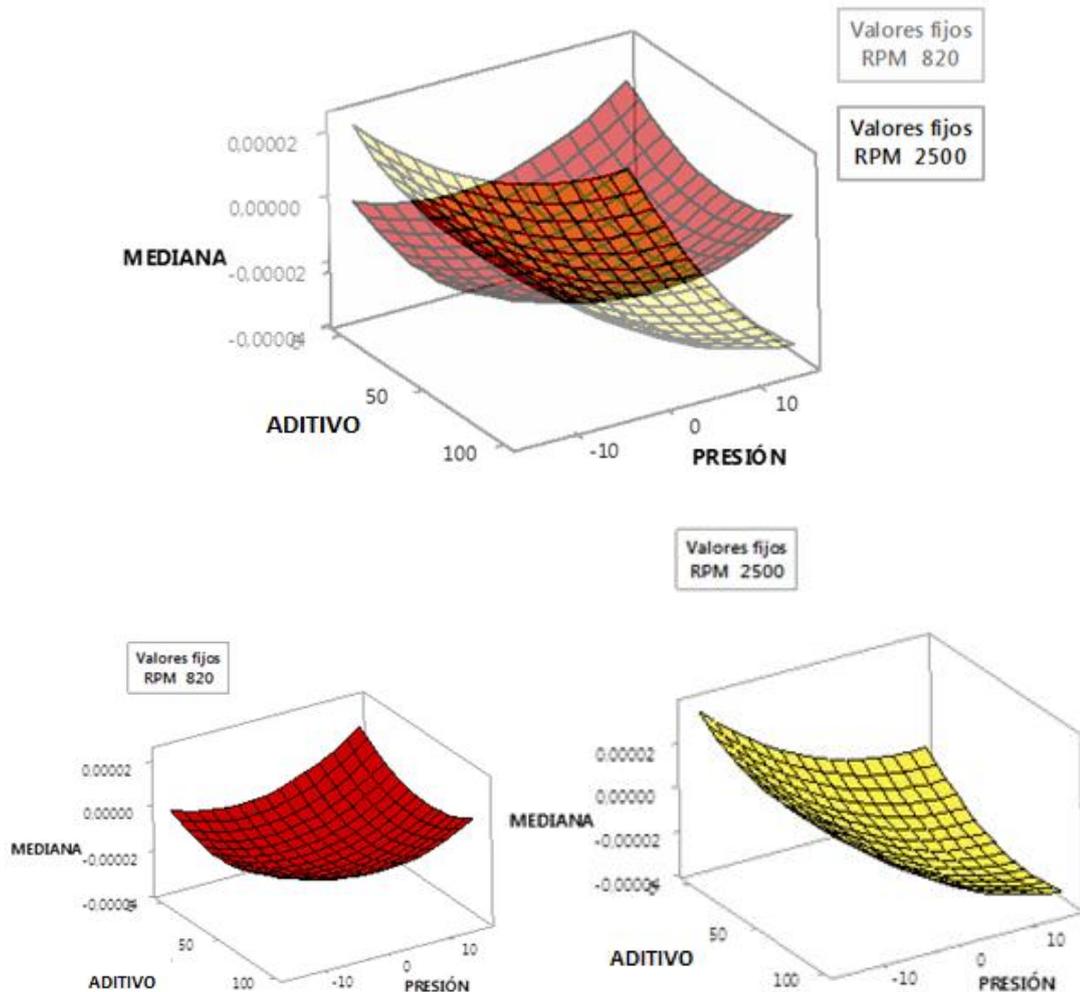


Figura 3. 48 Gráfica de superficie para Mediana. Fuente: [El autor]

3.10.12 Análisis de superficie para Máximo.

El comportamiento de la presión para 820 [rpm] en Máximo es la forma de una parábola en el que su punto centro es cuando el motor tiene un funcionamiento normal, es decir que si se da una variación sea cual sea su signo el Máximo va a aumentar, en cambio para el aditivo tenemos que a medida que aumenta el porcentaje de aditivo en el diesel el Máximo tiende a subir. Para 2500 [rpm] el comportamiento del Máximo es inversamente proporcional a la presión es decir si aumentamos la presión el Máximo tiende a disminuir, mientras que al aumentar el aditivo presenta una ligera caída en el Máximo pero esto se puede descartar y asumir que el comportamiento es lineal.

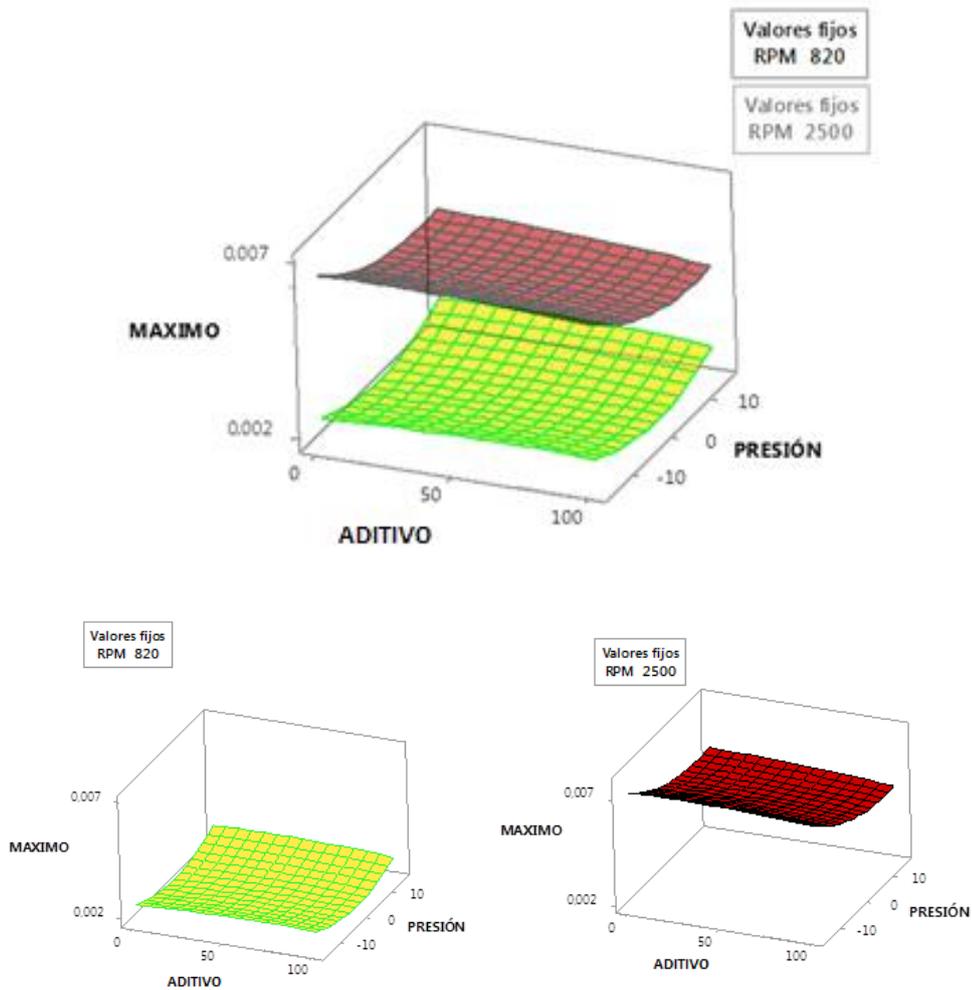


Figura 3. 49 Gráfica de superficie para Máximo. Fuente: [El autor]

3.10.13 Análisis de superficie para Mínimo.

El comportamiento de la superficie de Mínimo para ambos regímenes es bastante similar, la única diferencia es que a mayor número de RPM los valores de toda la superficie empiezan y terminan en un rango menor.

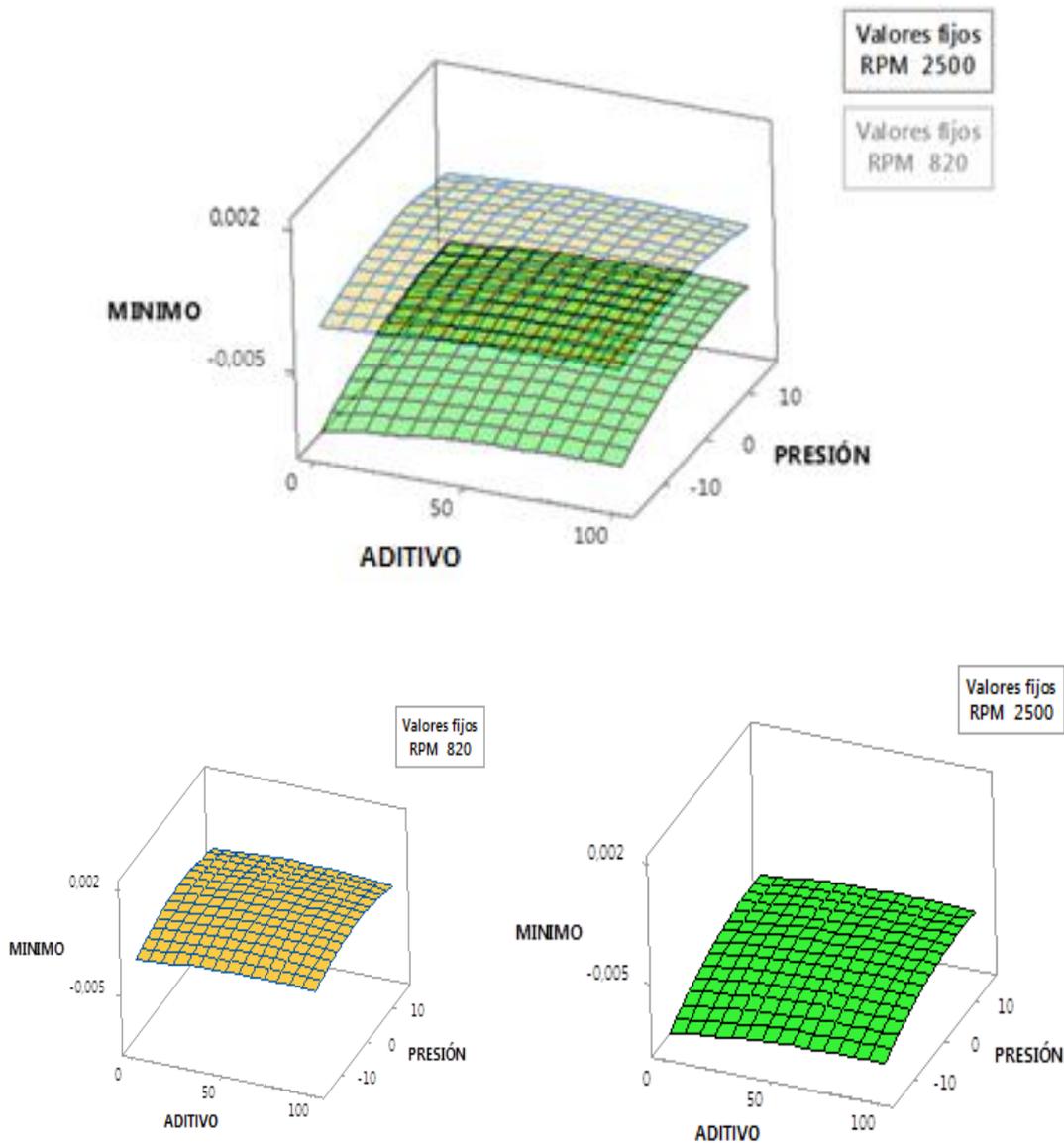


Figura 3. 50 Gráfica de superficie para Mínimo. **Fuente:** [El autor]

3.10.14 Análisis de superficie para Energía.

Para ralentí en la gráfica podemos observar que la superficie de energía tendrá valores más altos cuando la presión descienda, también se interpreta que el comportamiento de la Energía es lineal al variar el aditivo. En cambio para 2500 [rpm] cuando la presión está bajo el nivel normal de funcionamiento la Energía está en su punto máximo y al aumentar la presión esta desciende de manera considerable.

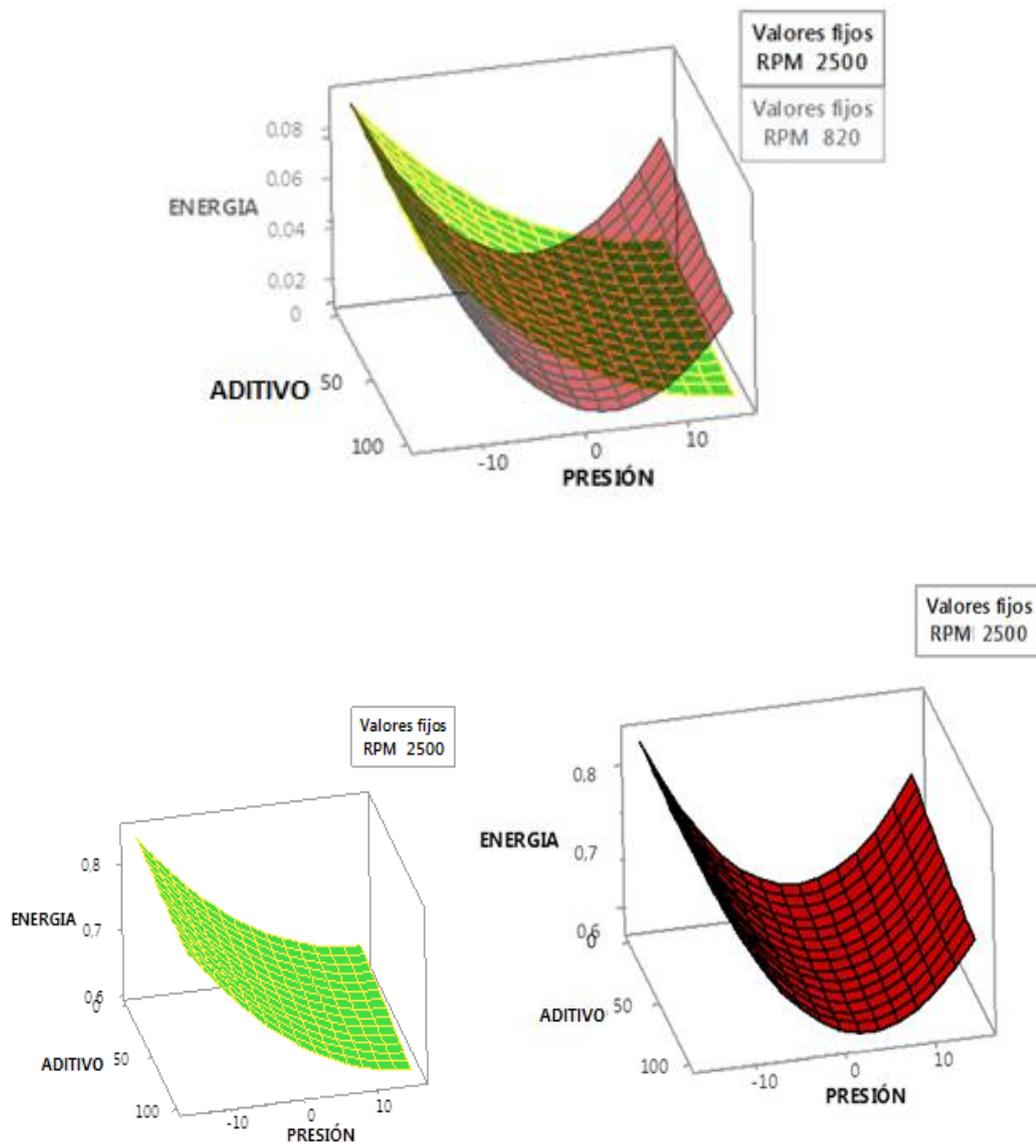


Figura 3. 51 Gráfica de superficie para Energía. Fuente: [El autor]

3.10.15 Análisis de Valor RMS

Par el Valor RMS a ralentí el factor que más influye es la presión ya que en el momento que se tiene una baja de presión el valor de esta característica se encuentra en su punto más alto y este valor decrece hasta el valor normal de funcionamiento mientras que al aumentar la presión nuevamente se vuelve a incrementar el mismo, el aditivo tiene un comportamiento sin variación. El comportamiento a 2500 [rpm] del Valor RMS es inversamente proporcional ya que este valor aumenta al disminuir la Presión.

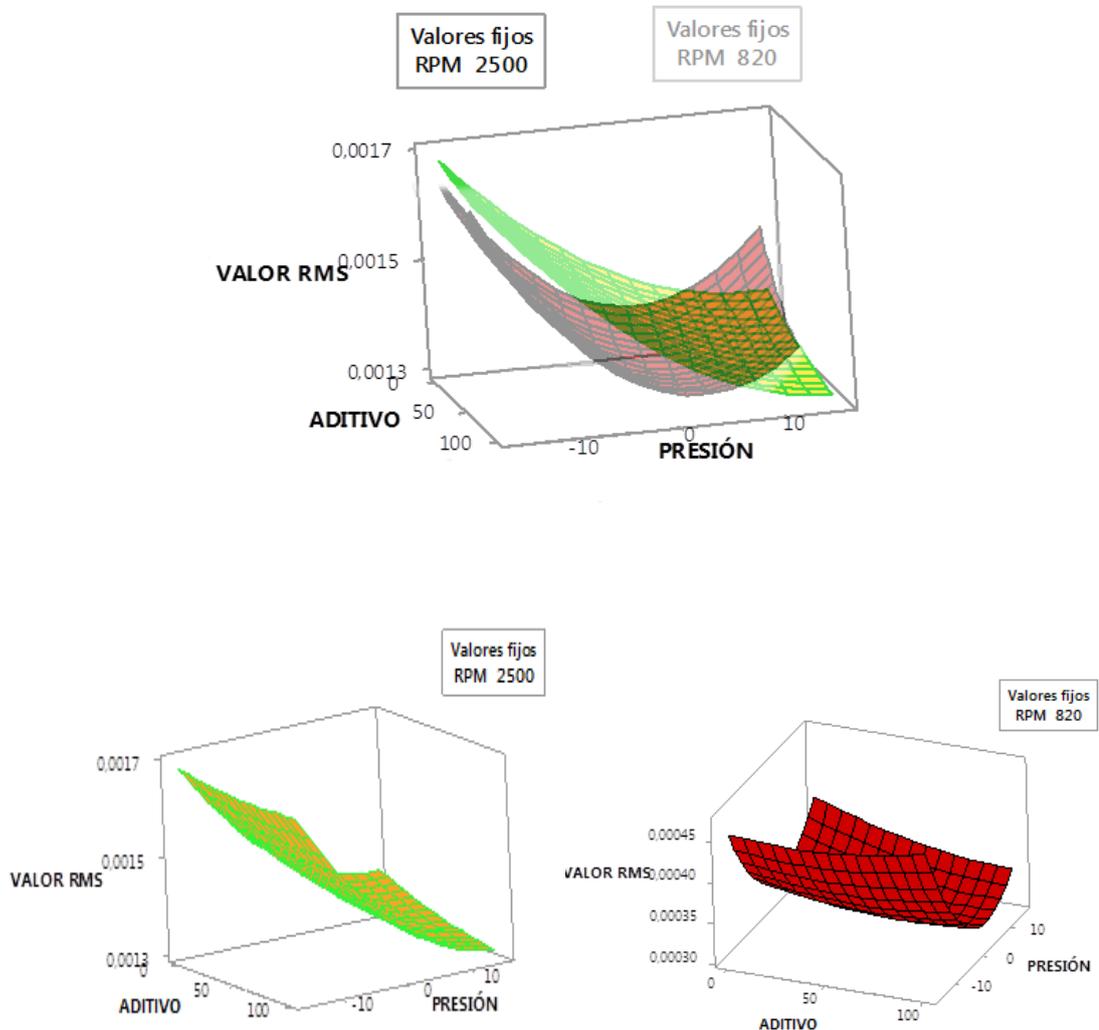


Figura 3. 52 Gráfica de superficie para Valor RMS. Fuente: [El autor]

3.11 OBTENCIÓN DE ESPECTROS CARACTERÍSTICOS

Durante el desarrollo del experimento se determinó que los regímenes ideales para la toma de señales serían a 820, 1660 y 2500[rpm]. Para cada régimen tenemos **n** muestras patrónes las mismas que están grabadas en formato .wav, estas muestras se analizan en el programa Matlab® mediante una interfaz donde se puede observar la señal de ruido en el dominio de frecuencia durante un tiempo definido.

El análisis consiste en sumar todos los datos de la potencia de la señal y dividir para el número total de los mismos, esta operación es llamada también promedio o media aritmética.

El análisis se realizara en el rango de frecuencia de 0 a 200 Hz ya que este intervalo permite el análisis de los espectros para determinar los fallos en la combustión del motor.

Una vez obtenida la media aritmética procedemos a comparar los valores de la potencia, el valor de la señal que más se asemeje a nuestro será el espectro patrón.

Tabla 3. 10 Potencia de los espectros patrónes. **Fuente:** [El autor]

| Régimen [rpm] | Muestra | Potencia |
|---------------|----------------|------------------------|
| 820 | CRDi 820 ok_4 | 1.1737e ⁻⁰⁷ |
| 1660 | CRDi 1660 ok_3 | 4.6730e ⁻⁰⁷ |
| 2500 | CRDi 2500 ok_5 | 2.1297e ⁻⁰⁶ |

Dentro del régimen del motor el margen de error fueron 30 rpm ya que era imposible estabilizarla en un valor fijo.

$$\text{frecuencia de funcionamiento} = \frac{\text{régimen}}{60} \quad (3.1)$$

El motor gira a 820 revoluciones por minuto, esto nos da una frecuencia fundamental de 13,67 Hz para cada giro del cigüeñal. Cada elemento del motor posee su propia frecuencia y esta es un múltiplo o submúltiplo de la frecuencia fundamental.

Para que el árbol de levas de gire una vez el cigüeñal debe girar dos veces, por lo que la frecuencia de este elemento es de X/2.

Durante un giro del cigüeñal dos inyectores introducen combustible en los cilindros, la frecuencia de 2X pertenece a estos elementos.

Durante un giro del cigüeñal 4 levas se accionan, debido a esto se deduce que la frecuencia para estos elementos es de 4X.

El motor posee cuatro válvulas por cilindro, dos de admisión y dos de escape, por lo que en una vuelta del cigüeñal se mueven 8 válvulas, por lo que se deduce que la frecuencia para las válvulas es de 8X.

Tabla 3. 11 Frecuencia de los elementos del motor a diferente régimen. **Fuente:** [El autor]

| Elemento | Frecuencias \ RPM | 820 [rpm] | 1620[rpm] | 2570[rpm] |
|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Árbol de levas | X/2 | 6,833 Hz. | 13,5 Hz. | 21,417 Hz. |
| Cigüeñal | X | 13,667 Hz. | 27 Hz. | 42,833 Hz. |
| Inyectores | 2X | 27,334 Hz. | 54 Hz. | 85,667 Hz. |
| Levas | 4X | 54,667 Hz. | 108 Hz. | 171,333 Hz. |
| Válvulas | 8X | 109,336 Hz. | 216 Hz. | 342,664 Hz. |

3.11.1 Obtención del espectro patrón a 820[rpm]

En el régimen de 820, se tomaron 6 muestras en las que la 1 y 6 tienen un comportamiento fuera de lo común por lo que se asume que las muestras tuvieron un error el momento de su recolección. Con las muestras restantes se determinó que la muestra patrón para este régimen será la muestra 4(CRDi 820 ok_4), la cual podemos visualizar en la siguiente figura.

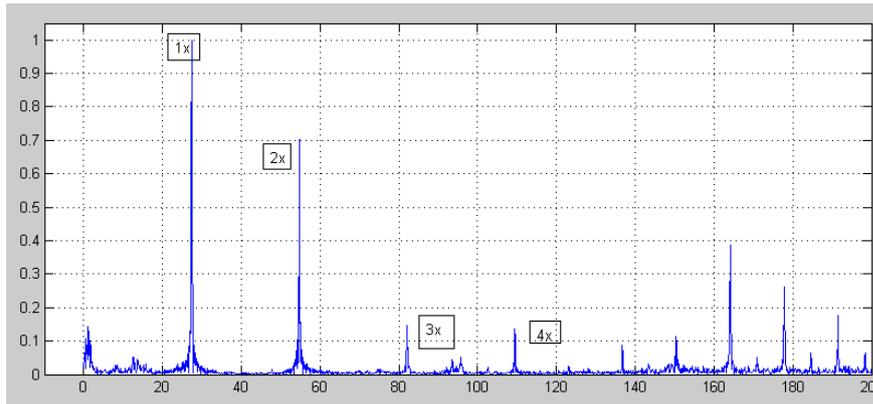


Figura 3. 53 Gráfica de espectro patrón a 820[rpm]. **Fuente:** [El autor]

El cilindro realiza una etapa de inyección y explosión por cada dos vueltas del cigüeñal lo que nos indica que

$$13.67 \times 2 = 27,35$$

Lo que nos indica que el pico a 27,35 Hz. Representa el ruido de la combustión.

3.11.2 Obtención del espectro patrón a 1660[rpm]

Para el espectro patrón en 1660 [rpm] se tomaron 6 muestras de las cuales las que muestran un comportamiento correcto únicamente son las muestras 3 y 5 en las otras muestras se asume un error en la toma de las mismas ya que la variación de potencia es muy significativa. Luego del análisis de las muestras correctas se determinó que será la (CRDi 1660 ok_3)

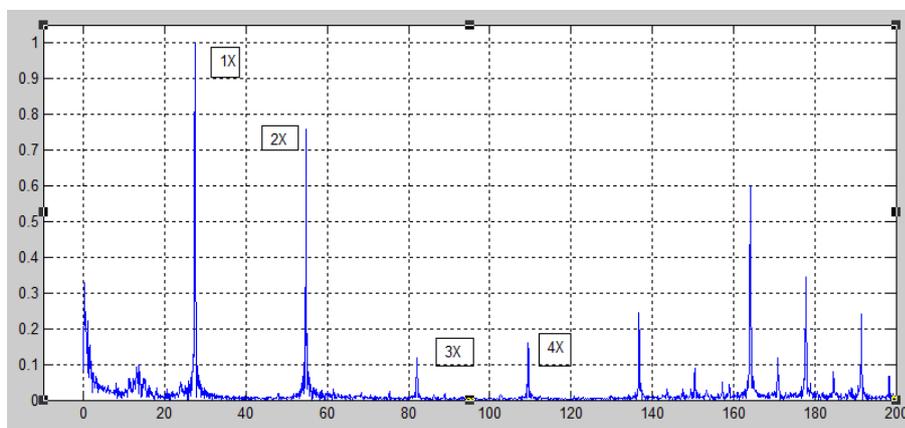


Figura 3. 54 Gráfica de espectro patrón a 1660 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

En este caso el pico del ruido de combustión se produce a 55.35 Hz. Ya que la frecuencia varía al elevar las revoluciones por minuto del cigüeñal.

3.11.3 Obtención del espectro patrón a 2500 [rpm].

En el caso del espectro patrón a 2500 [rpm] se recolectaron 5 muestras las cuales no tenían mayor variación en sus valores por la cual obtuvimos como espectro patrón la muestra (CRDi 2500 ok_5) la misma que se representa en la siguiente figura.

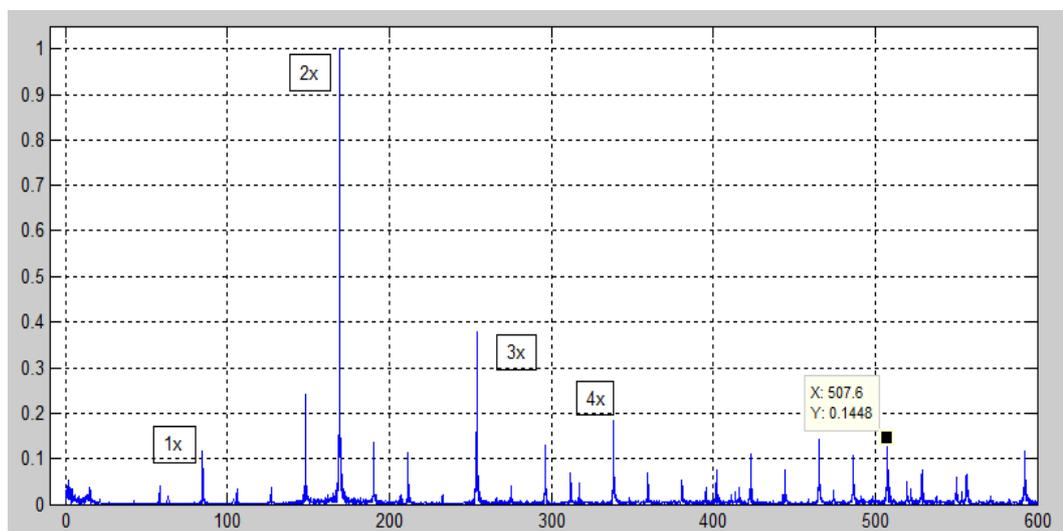


Figura 3.55 Gráfica de espectro patrón a 2500 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

Para 2500[rpm] el pico del ruido de la combustión se encuentra a 83.34 Hz. Debido al aumento de RPM.

CAPITULO IV

CREACIÓN DE BASE DE DATOS DE ESPECTROS OBTENIDOS EN EL PRSENTE PROYECTO.

En el presente capítulo se va a crear una base de datos con los espectros obtenidos en el proyecto con un análisis y comparación de la muestra que tenga el efecto más crítico a cada uno de los regímenes con el espectro patrón. En este caso tenemos que tener presente que significa cada pico en los valores de frecuencia para esto debemos reconocer que todo estará basado en el cigüeñal, es decir la frecuencia de funcionamiento del motor se establecerá en función de los giros del mismo.

4.1 ESPECIFICACIONES DEL MOTOR.

Tabla 4. 1 Especificaciones del banco didáctico. Fuente: [13]

| | |
|---------------------------|--|
| Nombre del equipo: | Equipo de Capacitación Educativo CRDI Diesel ENG, Y sistema de control A/ T |
| MODELO | G120212 |
| DIMENSIONES | 250 x 80 x 180 cm (L x W x H) |
| PESO | 250 Kg. |

Tabla 4. 2 Datos técnicos del motor. **Fuente:** [13]

| DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR | |
|--------------------------|----------------------|
| DESCRIPCIÓN | ESPECIFICACIÓN |
| Numero de Cilindros | 4 |
| Cilindrada | 1991 cm ³ |
| Diámetro del cilindro | 83 mm |
| Carrera | 92 mm |
| Relación de compresión | 17.7 : 1 |
| Orden de inyección | 1-3-4-2 |
| Torque/ rpm | 421N*m/1800 |
| Potencia máxima | 110,445 KW |

4.2 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DURANTE LA TOMA DE MUESTRAS.

4.2.1 Posición del micrófono para toma de muestras.



Figura 4. 1 Posicionamiento del motor para la toma de muestras. **Fuente:** [El Autor]

4.3 EFECTOS CRÍTICOS EN 820 [RPM]

De la misma manera que se analizó para determinar los espectros patrones, se puede definir una sola muestra de n repeticiones tomadas en el experimento, para esto consideramos que la potencia de la señal en el dominio del tiempo es inversamente proporcional al rendimiento del motor.

Para obtener el fallo más crítico de nuestras muestras se compara la potencia de cada una de ellas y se interpreta el resultado comparándola con los valores de la misma característica del espectro patrón, con el fin de determinar si es beneficioso o no para el funcionamiento del motor.

Tabla 4. 3 Características de las muestras obtenidas a 820[rpm]. **Fuente:** [El autor]

| Régimen [rpm] | Muestra (.wav) | Desviación [bar] | Aditivo[%] | Potencia |
|---------------|--------------------|------------------|------------|-----------------|
| 820 | CRDi 0 820 100 44 | 0 | 100 | $1.4269e^{-07}$ |
| | CRDi 10 820 50 22 | 10 | 50 | $1.9357e^{-07}$ |
| | CRDi -15 820 50 20 | -10 | 50 | $1.2988e^{-07}$ |

Al comparar la potencia de cada una de las muestras con la potencia del espectro patrón podemos ver que el efecto más crítico se encuentra en la muestra con presión aumentada y el aditivo al 50%, el cual aumenta el índice de cetano y la ADITIVO del combustible. Por lo tanto podemos concluir que el uso de este aditivo es perjudicial en bajas revoluciones ya que aumenta la resistencia a fluir del diesel volviéndose un combustible pesado, el cual contiene mayor concentración de hidrocarburos provocando fallas en la inyección con mala pulverización en los chorros y autoencendido.

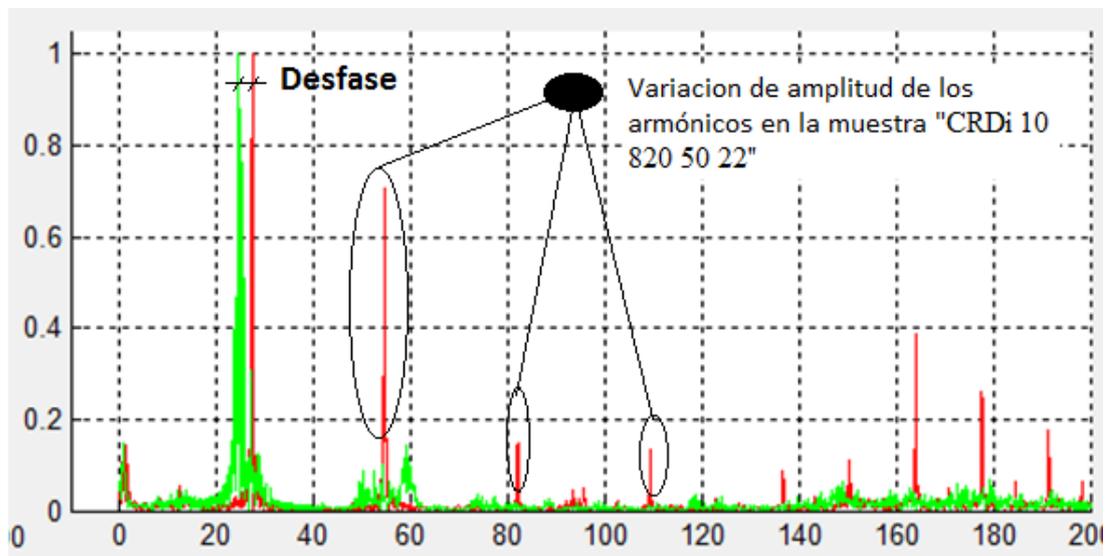


Figura 4. 2 Espectros de ruido del efecto más crítico 820 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

Comparando el espectro de la muestra con cambios en la presión (color verde) y aditivo con el espectro patrón dibujado en la gráfica (color rojo) varía de importante su amplitud por lo que se corrobora lo comparado mediante la Potencia.

4.4 EFECTOS CRÍTICOS EN 1660 [RPM]

Para el régimen de 1660 [rpm] se tomaron 5 muestras con diferentes variaciones de los factores, las mismas se muestran en la tabla 4.2, la cual indica los valores de Potencia que se deben comparar para el análisis.

Tabla 4. 4 Características de las muestras obtenidas a 820[rpm]. **Fuente:** [El autor]

| Régimen [rpm] | Muestra (.wav) | Desviación [bar] | Aditivo[%] | Potencia |
|---------------|----------------------|------------------|------------|------------------------|
| 1660 | CRDi 0 1660 50 32 | 0 | 50 | 4.2444e ⁻⁰⁷ |
| | CRDi -10 1660 0 5 | -10 | 0 | 9.8308e ⁻⁰⁷ |
| | CRDi 10 1660 0 10 | 10 | 0 | 2.7784e ⁻⁰⁷ |
| | CRDi -10 1660 100 38 | -10 | 100 | 7.6645e ⁻⁰⁷ |
| | CRDi 10 1660 100 43 | 10 | 100 | 2.6792e ⁻⁰⁷ |

Comparando los valores de la potencia del espectro patrón con la muestra para el régimen de 1660 [rpm] el efecto más crítico se produce en CRDi -10 1660 0 5. La cual tiene mayor potencia.

Tomando en cuenta el rendimiento del motor, este disminuye considerablemente debido a que el sensor RPS envía una señal diferente a la normal y por consiguiente la ECU calcula nuevos valores para la apertura de la válvula reguladora de presión, para compensar esta caída la ECU aumenta el valor de la presión en el riel y por ende crece el flujo másico provocando un cambio en la relación aire combustible y surgiendo como efecto nocivo para el motor autoencendido, mayor contaminación y mayor consumo de combustible.

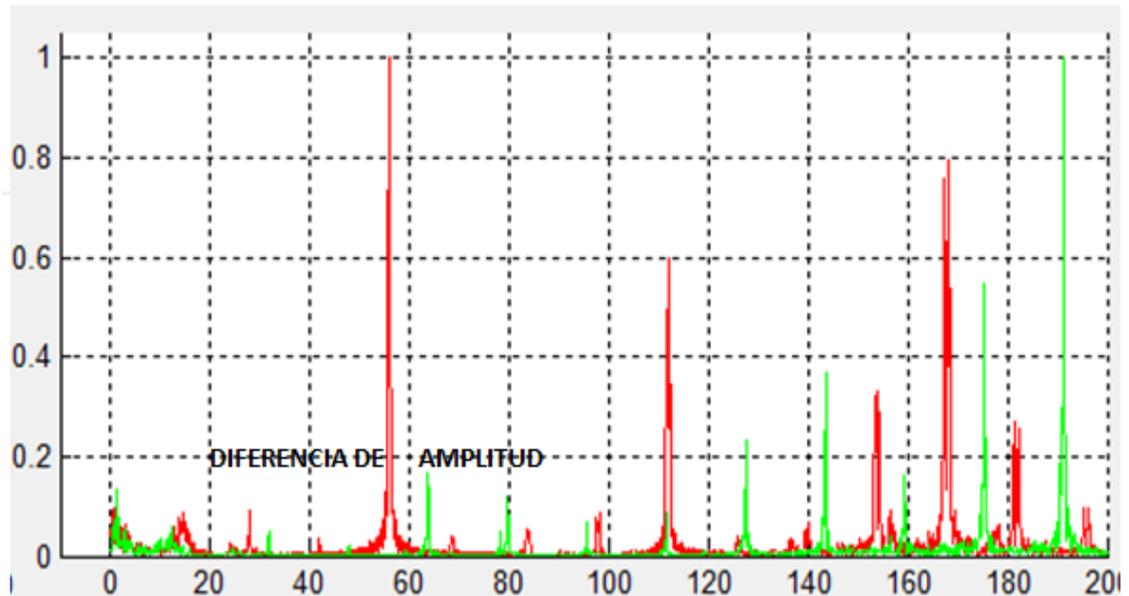


Figura 4. 3 Espectros de ruido del efecto más crítico 1660 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

En la gráfica podemos corroborar que el espectro con falla (color verde) tiene una amplitud mucho más baja al espectro patrón (color rojo) lo que significa que en la explosión no está llegando el combustible necesario, esto se debe a que la presión es demasiado baja.

4.5 EFECTOS CRÍTICOS A 2500 [RPM]

De igual forma en 2500 [rpm] se tomaron 3 muestras de los efectos que producen en el MEC al variar la presión como la ADITIVO, en la tabla 4.3, la cual indica los valores de cada una de las muestras.

Tabla 4. 5 Características de las muestras obtenidas a 2500 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

| Régimen [rpm] | Muestra (.wav) | Desviación [bar] | Aditivo[%] | Potencia |
|---------------|---------------------|------------------|------------|-----------------|
| 2500 | CRDi -10 2500 50 30 | -10 | 50 | $2.5324e^{-06}$ |
| | CRDi 10 2500 50 16 | 10 | 50 | $1.8951e^{-06}$ |
| | CRDi 0 2500 100 37 | 0 | 100 | $2.0835e^{-06}$ |



Figura 4. 4 Espectros de ruido del efecto más crítico 2500 [rpm]. Fuente: [El autor]

Al igual que en los análisis anteriores se compara la potencia de cada una de las muestras con la potencia del espectro patrón, teniendo como más crítica a la muestra CRDi -10 2500 50 30 para este régimen.

En el régimen de 2500 [rpm] como se observa en la figura 4.4 se produce un desfase que aumenta al aumentar la frecuencia de trabajo esto se debe a que para contrarrestar la caída de presión la ECU envía mayor cantidad de flujo másico de combustible y por consiguiente se elevan las revoluciones por minuto.

Si comparamos las muestras de los efectos críticos con los patrones vamos a tener la diferencia en la potencia la cual nos indica si es beneficioso o perjudicial para el motor adicionar aditivo al diesel.

Tabla 4. 6 Diferencia de potencia entre espectros crítico y patrón a 1660 y a 2500 [rpm].

Fuente: [El autor]

| Régimen [rpm] | Muestra (.wav) | Desviación [bar] | Aditivo[%] | Potencia | Diferencia de potencia |
|---------------|---------------------|------------------|------------|------------------|------------------------|
| 2500 | CRDi -10 2500 50 30 | -10 | 50 | $2.5324e^{-06}$ | $0.4027 e^{-06}$ |
| | CRDi 2500 ok_5 | 0 | 0 | $2.1297 e^{-06}$ | |
| 1600 | CRDi -10 1660 0 5 | -10 | 0 | $9.8308e^{-07}$ | $5.1578 e^{-06}$ |
| | CRDi 1660 ok_3 | 0 | 0 | $4.6730e^{-07}$ | |

En la tabla 4.4 podemos darnos cuenta de que la potencia aumenta considerablemente al utilizar el 50% de aditivo y en un régimen de media carga, es decir se concluye que para revoluciones bajas es perjudicial mientras que para media y plena carga se muestra beneficioso.

4.6 ESPECTROS OBTENIDOS EN EL EXPERIMENTO

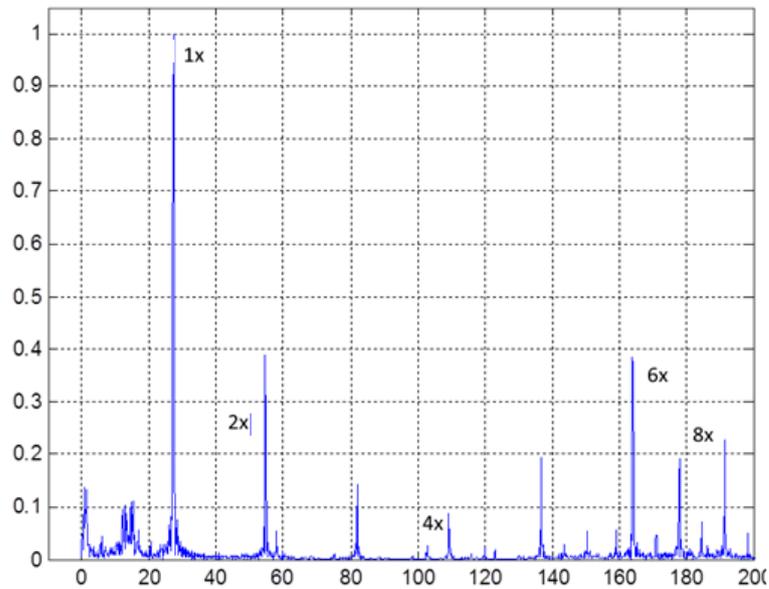


Figura 4. 5 Espectro a desviación 0 y 820 [rpm]. **Fuente:** [El autor]

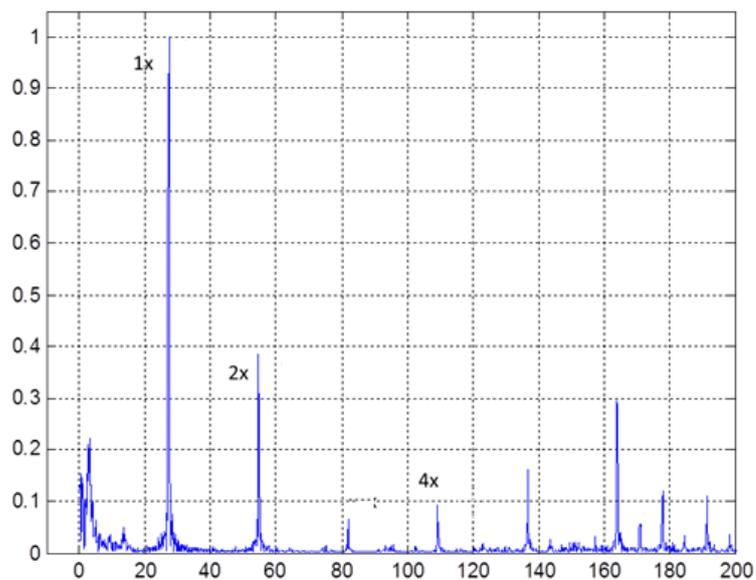


Figura 4. 6 Espectro a desviación 0, 820 [rpm] y 50% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

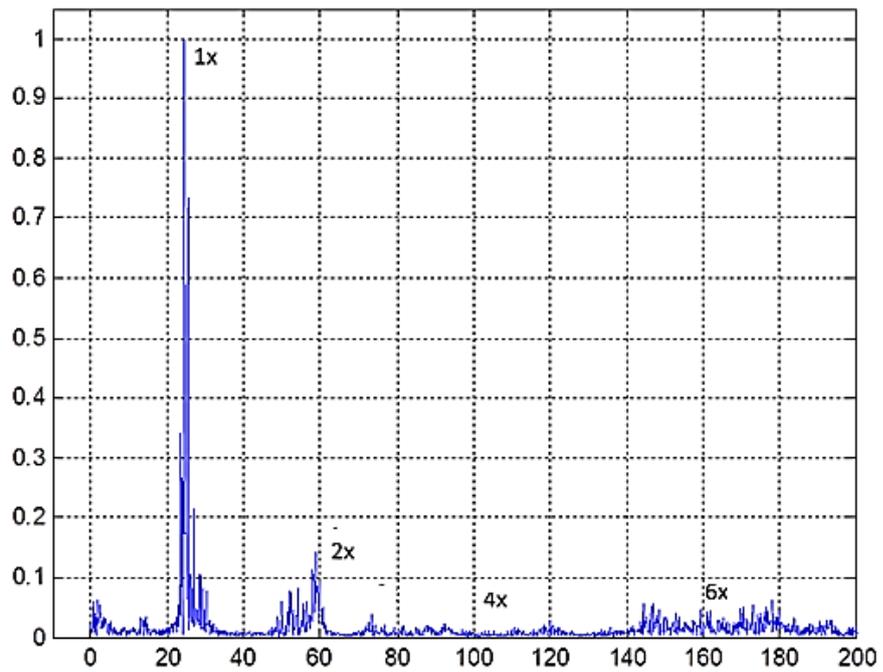


Figura 4.7 Espectro a desviación -10, 820 [rpm] y 50% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

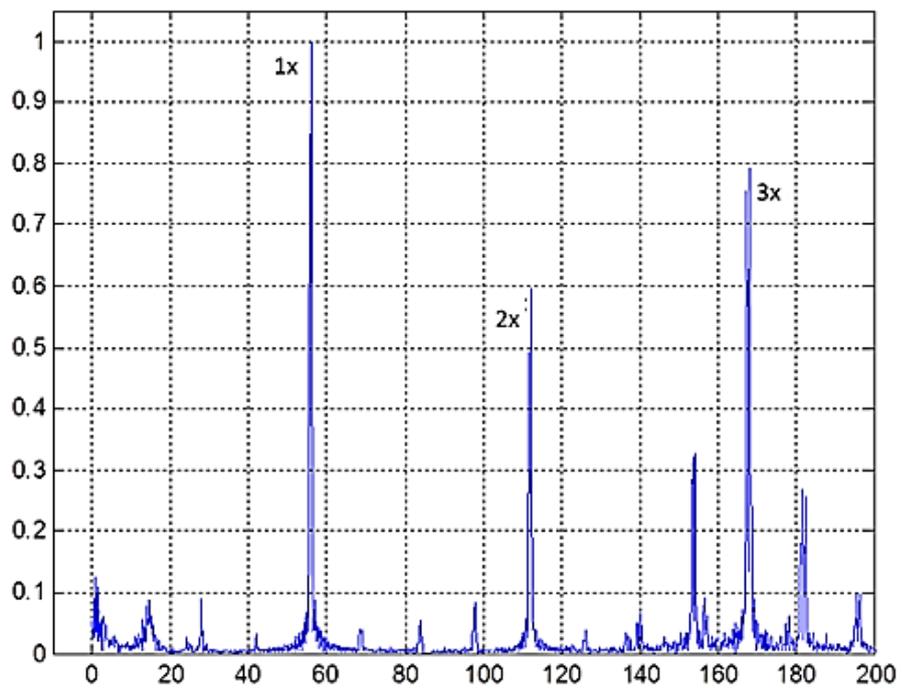


Figura 4.8 Espectro a desviación 0, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

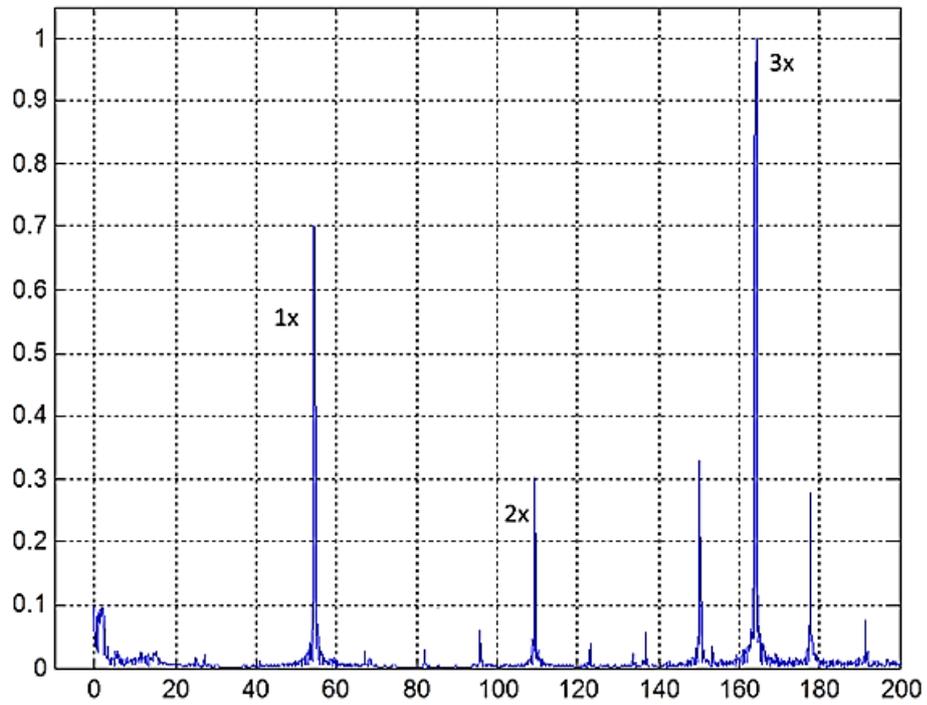


Figura 4.9 Espectro a desviación 0, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

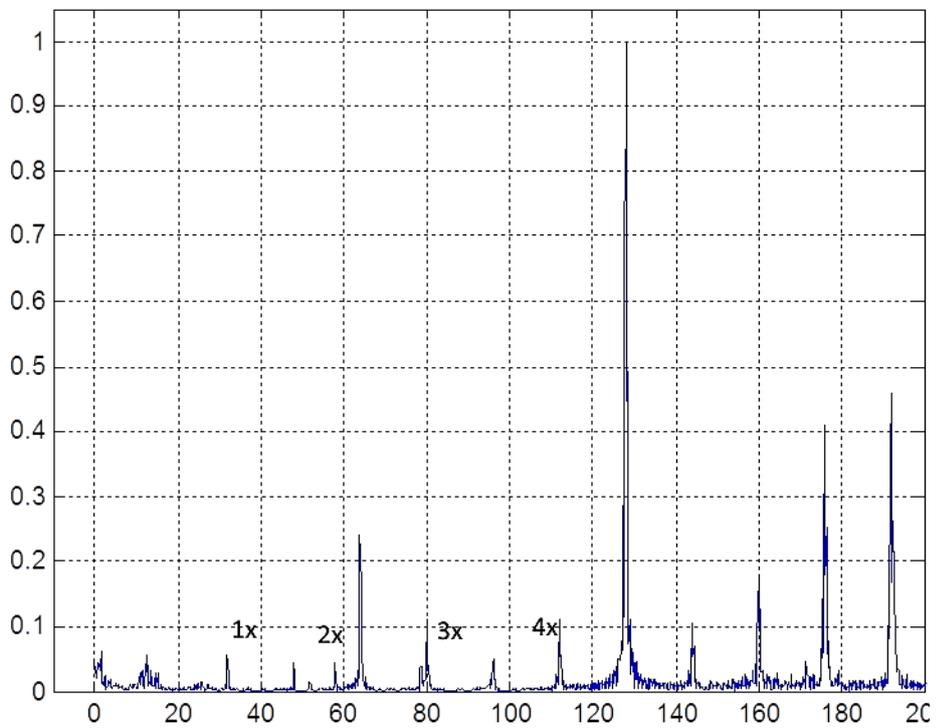


Figura 4.10 Espectro a desviación -10, 1660 [rpm] y 100% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

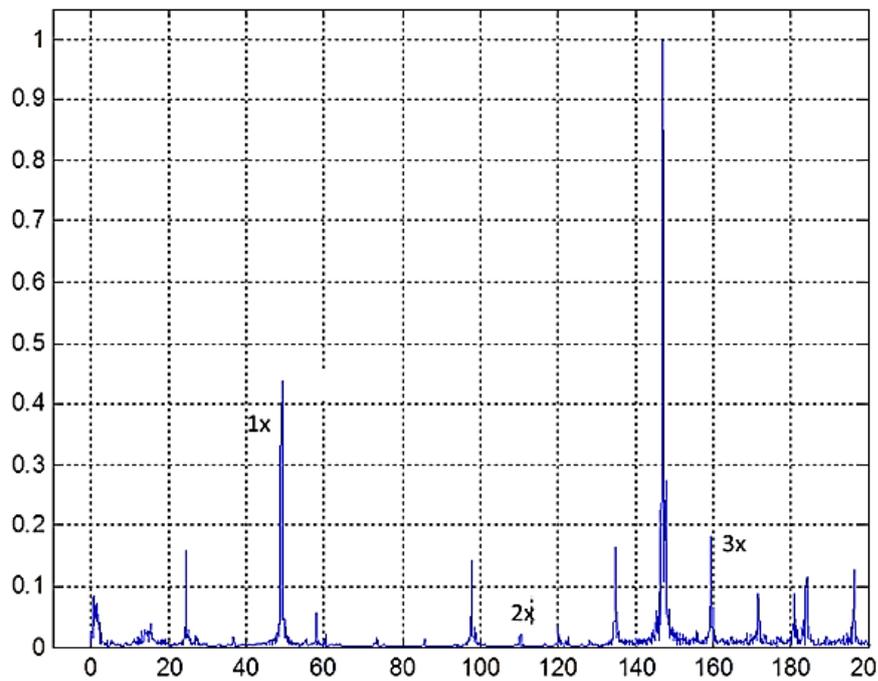


Figura 4.11 Espectro a desviación 10, 1660 [rpm] y 100% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

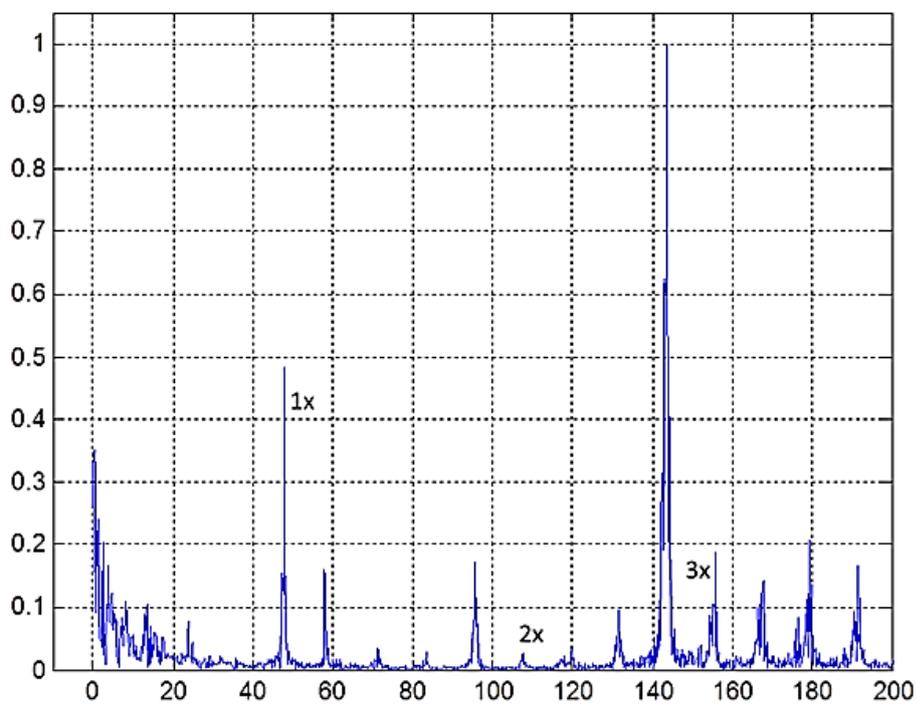


Figura 4.12 Espectro a desviación 10, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

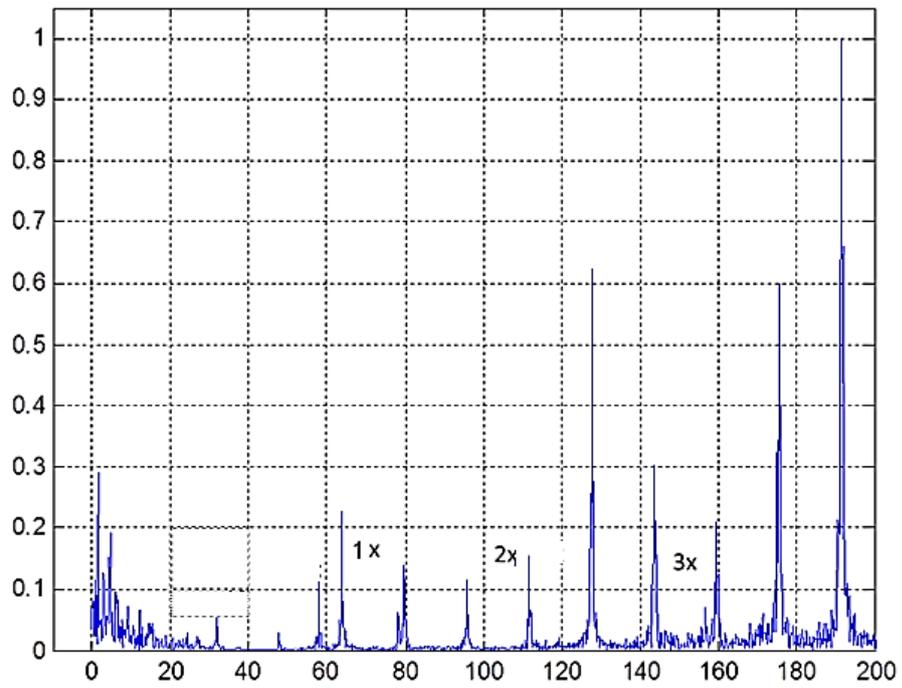


Figura 4.13 Espectro a desviación -10, 1660 [rpm] y 0% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

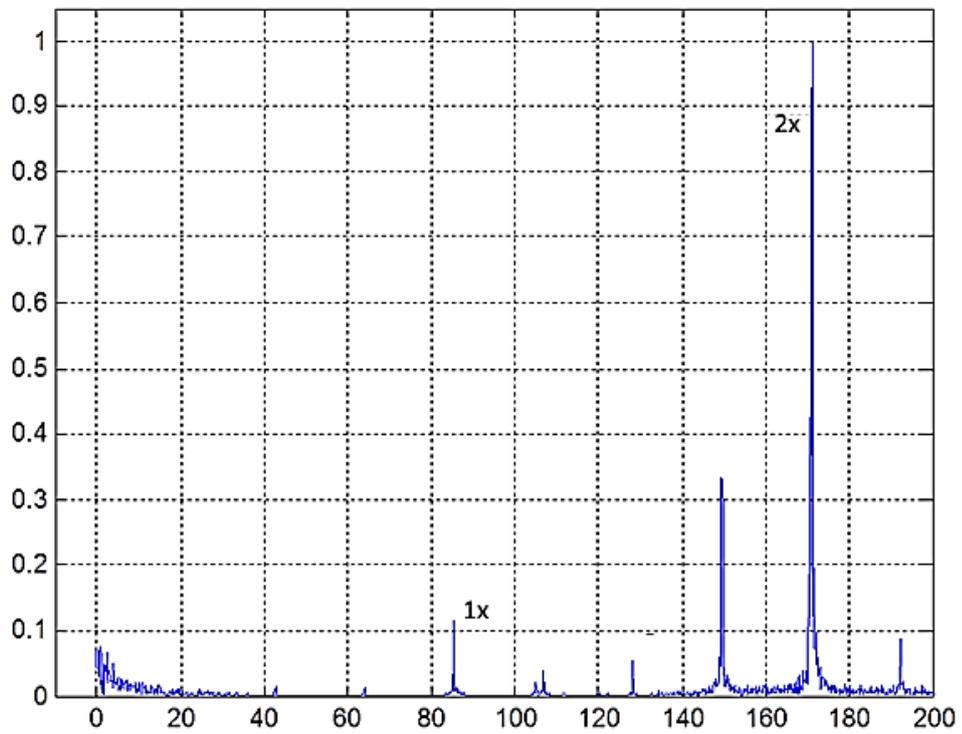


Figura 4.14 Espectro a desviación 10, 2500 [rpm] y 50% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

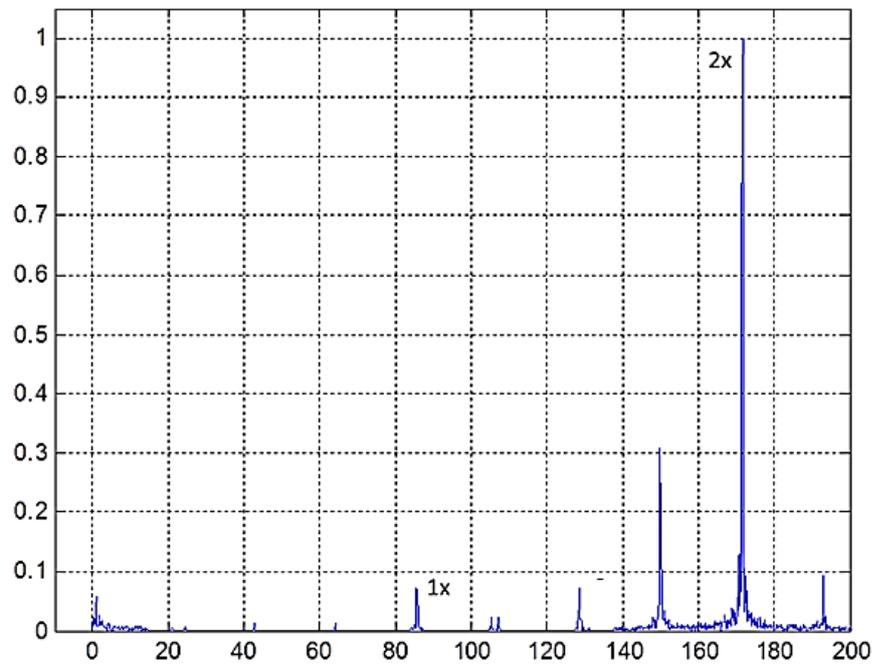


Figura 4.15 Espectro a desviación 0, 2500 [rpm] y 100% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

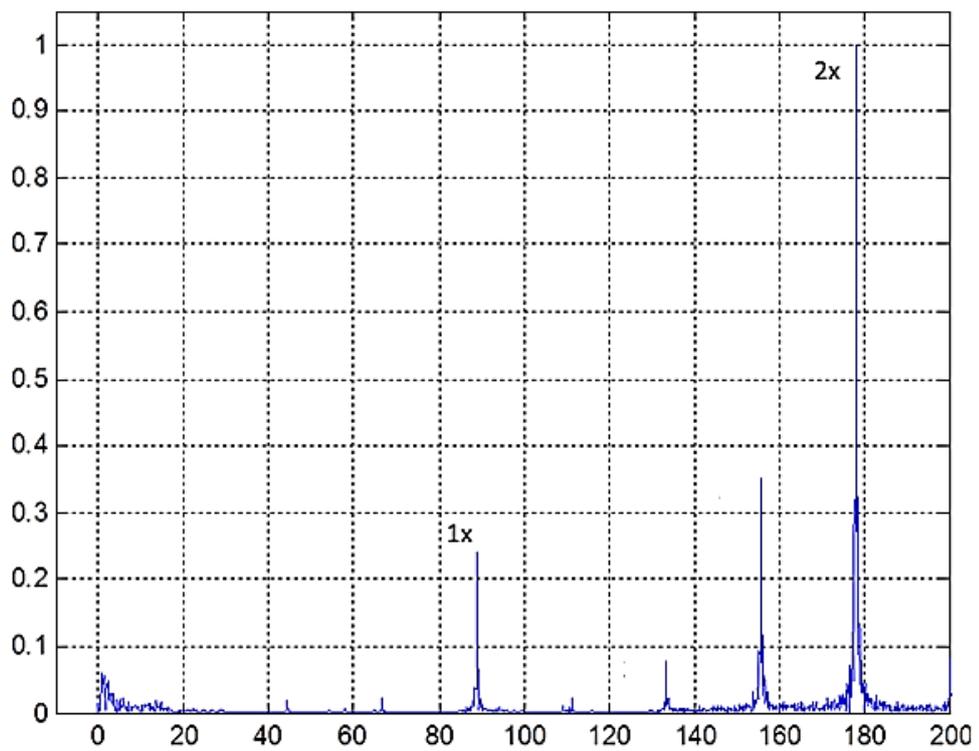


Figura 4.16 Espectro a desviación 10, 2500 [rpm] y 50% de aditivo. **Fuente:** [El autor]

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El centro acústico se determinó tomando el motor como un paralelepípedo ya que su geometría imposibilita la ubicación del punto centro.
- En este estudio la cámara anecoica permitió realizar análisis de sonidos mediante la obtención de espectros de ruido de un motor de combustión interna de encendido por compresión.
- El factor que más influyó en este diseño experimental fue la desviación de la presión, porque tenemos una influencia considerable en 8 de las 13 respuestas al experimento.
- Con la ayuda del análisis de Pareto concluimos que: la Media, Varianza, Potencia, Factor de cresta y Potencia de Intervalo de Frecuencia no son respuestas significativas para el estudio.
- Gracias al análisis de interacciones y efectos principales se determinó que las características significativas para el análisis del experimento son: Desviación Standard, Mediana, Máximo, Mínimo, Energía, Factor de Curtosis, Asimetría y valor RMS.
- En 2500 [rpm] cuando se disminuye la presión en el riel por lo general sube el valor de las respuestas excepto para máximo y mínimo.
- Luego del análisis se determinó que las respuestas más sensibles para este experimento son la Energía y la Desviación Estándar ya que al disminuir la presión estas aumentan en forma considerable su valor independientemente del porcentaje de aditivo en el diesel.

RECOMENDACIONES

- Utilizar circuitos electrónicos más ajustables ya que la ECU al momento de variar la presión tiende a recalcular las variables por la falla provocada y ajustarse automáticamente.
- Para obtener datos aún más reales se debería realizar el experimento en motores ubicados en vehículos ya que el presente proyecto se realizó en un banco didáctico y no tiene cargas externas ni entradas de ruido que influyan en la captación de muestras.
- A futuro se debe tener en cuenta la colocación de un dispositivo de control de temperatura dentro de la cámara semi anecoica ya que al estar el motor funcionando por un tiempo prolongado la temperatura de la misma se eleva y varía también la humedad relativa.

BIBLIOGRAFÍA

Páginas web:

[1][En Línea]

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18464/memoria.pdf?sequence=1>

[2] [En Línea]

<http://genesis.uag.mx/edmedia/material/quimicaII/pdf/Gasindicesoctano.pdf>

[3] [En Línea] [http:// www.training.kia.co.kr](http://www.training.kia.co.kr)

[4] [En Línea]

<http://www.monografias.com/trabajos4/salasanecoicas/salasanecoicas.shtml>

[5] [En Línea] http://www.meyersound.com/sp/chamber_sp.htm

[6] [En Línea] <http://www.acieroid.es/acustica/index.htm>

[7] [En Línea] <http://www.mclink.it/com/bruel/eng/anecho.htm>

[8] [En Línea] <http://www.rockfibras.com>

[9] [En Línea]

<http://www.monografias.com/trabajos4/salasanecoicas/salasanecoicas.shtml#ixzz3PYS7gwOX>

[10] Kurt C. Rolle, “Termodinámica”, sexta edición, pág. 469, disponible en:

<http://books.google.es/books?id=1rIBBXQhmCwC&pg=PA496&dq=gasolina+caracteristicas&hl=es&sa=X&ei=uw4SVOOQIIqQsQSVtYKgDA&ved=0CDwQ6AEwAg#v=onepage&q=gasolina%20caracteristicas&f=false>

[11] Manuel Orovio Astudillo, “Tecnología del automóvil”, edición 2010, pág. 208, disponible en:

<http://books.google.es/books?id=JRSqKKaK9zcC&pg=PA192&dq=lambda+gasolina&hl=es&sa=X&ei=Jg4SVIDHDfTCsAS9xIDYBg&ved=0CEoQ6AEwCQ#v=onepage&q=lambda%20gasolina&f=false>

[12] Frank Fahy, John Walker, “Fundamentals of noise and vibration”, edition 1998, pag. 1 – 4, disponible en:

<http://books.google.es/books?id=hWhLWbfVwAoC&printsec=frontcover&dq=noise&hl=es&sa=X&ei=SQwSVJrhELPgsASy1ICYCA&ved=0CFAQ6AEwBg#v=onepage&q=noise&f=false>

[13] LAZO KLEVER GUARANGO DIEGO “Diagnóstico de fallos en el proceso de combustión en motores alternativos de encendido por compresión utilizando el método de análisis de ruido”

- [14] CARLOS GABRIEL ORDOÑEZ JARA Y PABLO ANDRÉS VÉLEZ PONCE, “Estudio, diseño e implementación de una cámara anecoica para el análisis acústico de sistemas mecánicos del motor de combustión interna alternativo”
- [15] Quiroga, Mac, Víctor; Manual Práctico Para El Análisis De Experimentos De Campo, Editorial Instituto Interamericano De Ciencias Agrícolas.
- [16]http://books.google.es/books/about/Probabilidad_y_Estadística_para_Ingenieros.html?hl=es&id=9DWw696jLbMC
- [17]:<http://www.automotriz.biz/coches/fuels/diesel-fuel/134890.html> . Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, Platteville: Prentice Hall.
- [20] J. Alvares, Motores Alternativos de Combustión Interna, Catalunya: Politex, 2005.
- [21] J. D. R. Jose Font Mezquita, Tratado sobre automoviles, Valencia : upvalencia , 2004.
- [22] M. d. Castro, Inyección de Gasolina, Ceac, S.A., 1998.
- [23] A. M. Parera, Encendido Electrónico, Marcombo, 1991. [En línea]. Available: <http://www.cesvimexico.com.mx>.
- [24] P. F. P. -. P. J. M. Desantes, Motor de combustión interna alternativa, Barcelona: Revèrte, 2011.
- [25] A. Belendez, "Acústica, Fluidos y Termodinámica", Alicante, 1992.