

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE MATRIZ CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero

Mecánico Automotriz

TÍTULO

**“DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE
LUBRICACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA A GASOLINA HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L
MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES”**

AUTORES:

Christian Santiago Buestán Ramírez

Carlos Teodoro Jarama Herrera

DIRECTOR:

Ing. Néstor Rivera

Cuenca, abril de 2016

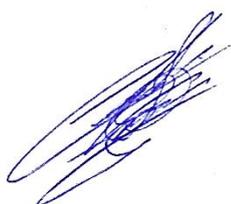
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecida en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana. En tal virtud los fundamentos técnicos-científicos y los resultados son exclusiva responsabilidad de los autores.

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



Christian Santiago Buestán Ramírez



Carlos Teodoro Jarama Herrera

CERTIFICADO

Que el presente proyecto de tesis " DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA HYUNDAI ACCENT DOHC 1.5L MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES ", realizado por los estudiantes: Christian Santiago Buestán Ramírez y Carlos Teodoro Jarama Herrera, fue dirigido por mi persona.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Néstor Rivera Campoverde', written over a horizontal line.

Ing. Néstor Rivera Campoverde

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Abel y Esperanza quienes son los pilares fundamentales en mi vida, ya que con su amor de padres me supieron comprender, motivar y apoyar durante mi formación estudiantil. A nuestro director de tesis el Ing. Néstor Rivera, quien nos transmitió sus conocimientos y experiencias además de su apoyo incondicional para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los profesores y autoridades de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz.

Christian

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres Luvia y Teodoro, y demás familiares quienes me apoyaron a lo largo de este ciclo estudiantil; a todos los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes a lo largo de la carrera impartieron sus conocimientos, en especial agradezco a nuestro director de tesis el Ing. Néstor Rivera, quien gracias a su ayuda fue posible el desarrollo de esta investigación.

Carlos

DEDICATORIA

A Dios.

Quién me dio fortaleza para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, por haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mi madre Esperanza.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi padre Abel.

Por enseñarme con el ejemplo la perseverancia, la constancia y la honestidad que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

A mi hijo Matías.

Por ser quién me motiva a luchar cada día, te amo hijo.

Christian

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a mis padres Teodoro y Lubia, que con su apoyo incondicional y desmesurado me han encaminado a ser una mejor persona y a conseguir este título; a mis hermanos Samantha, Gabriela y Christian que son mi guía y mi fuente de inspiración; y a mis amigos y compañeros a lo largo de este periodo universitario, que me han brindado su apoyo, su amistad desinteresada, y su ayuda para lograr mis objetivos.

Carlos

RESUMEN

En esta investigación se presenta el diagnóstico de fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna Hyundai Accent 1.5 mediante análisis de vibraciones.

Para este fin se usaron tres diferentes marcas de aceite, cada una con una viscosidad diferente, y tres desgastes distintos a los engranajes de la bomba de aceite del motor, para la toma de muestras de las vibraciones emitidas por el motor a distintos regímenes de giro, 700, 1600 y 2500 RPM.

Para la validación de la investigación se utilizó un diseño experimental de superficie de respuesta el mismo que nos dio el orden para la toma de muestras, resultando un diseño con un total de quince corridas y tres repeticiones.

Posteriormente se procedió a la obtención de las señales vibro-acústicas emitidas por el motor de combustión interna de acuerdo al diseño planteado, mediante un acelerómetro de tipo longitudinal y un equipo de adquisición de datos Adash. Las señales vibratorias fueron adquiridas en el dominio del tiempo, para un posterior análisis en el dominio de la frecuencia a través de la Transformada Rápida de Fourier FFT mediante el uso del software Matlab® para convertir todas las señales adquiridas y extraer de sus espectros las características y picos frecuenciales más representativos para ser analizados estadísticamente.

Una vez procesadas las señales se procedió al análisis de resultados, para lo que se eligió una muestra patrón para cada régimen de giro, la misma que se comparó con otro espectro más representativo perteneciente al mismo régimen, permitiendo determinar posibles fallos en el sistema de lubricación y ver como influyen las variables modificadas en el sistema.

Debido a la gran cantidad de muestras que se tiene, y que también cada una de estas tiene varias características, se utilizó un Análisis de Componentes Principales ACP para reducir la dimensionalidad de las variables (características) y poder determinar si las mismas son agrupables y comprobar la existencia de información redundante entre las distintas muestras. Con este análisis se redujo el número de variables a tres componentes principales.

Se concluyó que, al modificar algunos parámetros como viscosidad, desgaste en la bomba de aceite y RPM hubieron alteraciones en las señales resultantes en comparación con la muestra patrón en condiciones normales de funcionamiento.

Para el régimen de 700 RPM se observó que la muestra BM-700-10W30 presenta armónicos síncronos en el pico 1x, en el pico 1X, en el pico 2X se visualiza una disminución de la amplitud frecuencial con respecto a la muestra patrón debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite y al uso de un aceite de menor viscosidad.

ABSTRACT

This research presents the fault diagnosis in the lubrication system of an internal combustion engine Hyundai 1.5 using the vibration analysis.

For this purpose three different marks of oil, each one with a different viscosity, and three different wear on the gears of the engine oil pump were used to sample the vibrations emitted by the source at different engine speed: 700, 1600 and 2500 RPM.

To validate the research, an experimental design of surface response was used, this design gave us the order for sampling, resulting in a design with a total of fifteen runs and three repetitions.

Then, the process to obtain the vibroacoustic signals emitted by the internal combustion engine was executed according to the proposed design using a longitudinal accelerometer and an ADASH acquisition of data equipment. The vibration signals were acquired in the time domain for further analysis in the frequency domain using the Fast Fourier Transform through the software Matlab® to convert all acquired signal and extract from their spectra, characteristics and the most representative frequency peaks to be statistically analyzed.

Once processed the signals, the analyzing process of the results was taken, for which a pattern for each speed sample was chosen to compare with another more representative spectrum of the same speed, allowing to determine possible failures in the lubrication system and see how the modified variables influence in the setting.

Because to the large numbers of samples and each several features, a Principal Component Analysis PCA was used to reduce the dimensionality of the variables (characteristics) and determinate if they can be grouped together and check for redundant information between different samples. Whit this analysis the number of variables was reduced to three principal components.

The research concluded that, by modifying some parameters such as viscosity, wear on the oil pump and RPM there were alteration in the resulting signals compared to the standard sample under normal operating conditions.

For the speed of 700 RPM, the sample BM-700-10W30 presents synchronous harmonics at the 1X peak, the 2X peak presents a decreased frequency amplitude respect to the sample pattern because to medium wear generated on the pump oil and the use of a lower viscosity oil.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------|
| CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA | I |
| CERTIFICADO | II |
| AGRADECIMIENTO | III |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| DEDICATORIA | V |
| DEDICATORIA | VI |
| RESUMEN | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| ÍNDICE GENERAL | X |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XIV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. PROBLEMA | 1 |
| 3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 3 |
| 3.1 Objetivo General | 3 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 3 |
| 4. ESTADO DEL ARTE | 3 |
| 4.1 El motor de combustión interna y su sistema de lubricación | 3 |
| 4.1.1 Sistema de lubricación a presión | 4 |
| 4.1.2 Elementos del sistema de lubricación a presión | 4 |
| 4.2 Análisis de vibraciones | 7 |
| 5. MARCO METODOLÓGICO | 9 |
| 5.1 Implementación del diseño experimental y adquisición de muestras | 9 |
| 5.1.1 Modelo experimental para la obtención de las Señales Vibratorias 10 | |
| 5.1.2 Adquisición de las señales vibratorias | 13 |
| 5.2 Procesamiento de las señales adquiridas | 16 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 18 |
| 6.1 Análisis ANOVA | 19 |
| 6.1.1 Análisis de residuos a 700 RPM | 19 |
| 6.1.2 Análisis de residuos a 1600 RPM | 21 |
| 6.1.3 Análisis de residuos a 2500 | 22 |
| 6.2 Análisis de espectros característicos | 24 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2.1 | Espectro patrón para un régimen de 700, 1600 y 2500 RPM | 24 |
| 6.2.2 | Comparación de los efectos críticos para los regímenes de 700, 1600 y 2500 RPM | 27 |
| 6.2.3 | Comparación de las características temporales | 31 |
| 6.3 | Análisis de Componentes Principales ACP..... | 33 |
| 6.3.1 | ACP para un régimen de 700 RPM | 34 |
| 6.3.2 | ACP para un régimen de 1600 RPM | 39 |
| 6.3.3 | ACP para un régimen de 2500 RPM | 43 |
| 6.4 | Discusión de los resultados obtenidos por el ACP..... | 47 |
| 6.4.1 | Discusión de Resultados del ACP A 700 RPM | 47 |
| 6.4.2 | Discusión de Resultados del ACP A 1600 RPM | 48 |
| 6.4.3 | Discusión de Resultados del ACP A 2500 RPM | 49 |
| 6.5 | Análisis de superficie de respuesta | 50 |
| 6.5.1 | Análisis de Componente principal 1 (CP1)..... | 50 |
| 6.5.2 | Análisis de Componente principal 2 (CP2)..... | 53 |
| 6.5.3 | Análisis de Componente principal 3 (CP3)..... | 57 |
| 6.5.4 | Análisis de la Asimetría | 60 |
| 7. | METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN MEDIANTE FFT Y ACP | 64 |
| | CONCLUSIONES | 66 |
| | RECOMENDACIONES | 68 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 69 |
| | ANEXOS 1 | 71 |
| | ANEXOS 2 | 78 |
| | ANEXOS 3 | 82 |
| | ANEXOS 4 | 86 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Maqueta didáctica, motor Hyundai Accent..... | 10 |
| Figura 2. Desgaste del rotor interno de la bomba de aceite..... | 11 |
| Figura 3. Esquema de medida de las vibraciones mecánicas..... | 13 |
| Figura 4. ADASH® y Acelerómetro..... | 14 |
| Figura 5. Señal de tipo WAV entregada por el ADASH..... | 14 |
| Figura 6. Ubicación del acelerómetro en el motor..... | 15 |
| Figura 7. Pirómetro y Escáner Carman Scan VG64..... | 16 |
| Figura 8. Señal adquirida en el dominio del tiempo..... | 16 |
| Figura 9. Señal transformada al dominio de la frecuencia mediante FFT..... | 17 |
| Figura 10. Bandas frecuenciales..... | 18 |
| Figura 11. ANOVA para régimen de 700 RPM..... | 20 |
| Figura 12. Diferencia de medias para kurtosis 700 RPM..... | 20 |
| Figura 13. ANOVA para régimen de 1600 RPM..... | 21 |
| Figura 14. Diferencia de medias para kurtosis 1600 RPM..... | 22 |
| Figura 15. ANOVA para régimen de 2500 RPM..... | 23 |
| Figura 16. Diferencia de medias para kurtosis 2500 RPM..... | 23 |
| Figura 17. Espectro patrón 700 RPM..... | 25 |
| Figura 18. Espectro patrón 1600 RPM..... | 26 |
| Figura 19. Espectro patrón 2500 RPM..... | 26 |
| Figura 20. Comparación de espectros 700 RPM..... | 28 |
| Figura 21. Comparación de espectros 1600 RPM..... | 29 |
| Figura 22. Comparación de espectros 2500 RPM..... | 30 |
| Figura 23. Gráfica de sedimentación para 700 rpm..... | 35 |
| Figura 24. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 700 rpm..... | 36 |
| Figura 25. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 700 rpm..... | 36 |
| Figura 26. Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 700 rpm.. | 38 |
| Figura 27. Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 700 rpm.. | 38 |
| Figura 28. Gráfica de sedimentación para 1600 rpm..... | 39 |
| Figura 29. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 1600 rpm..... | 40 |
| Figura 30. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 1600 rpm..... | 41 |
| Figura 31. Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 1600 rpm | 42 |
| Figura 32. Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 1600 rpm. | 42 |
| Figura 33. Gráfica de sedimentación para 2500 rpm..... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 34. <i>Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 2500 rpm.</i> | 44 |
| Figura 35. <i>Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 2500 rpm.</i> | 45 |
| Figura 36. <i>Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 2500 rpm</i> | 46 |
| Figura 37. <i>Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 2500 rpm</i> | 46 |
| Figura 38. <i>Gráfica de efectos principales en CP1.</i> | 51 |
| Figura 39. <i>Gráfica de interacciones en CP1.</i> | 52 |
| Figura 40. <i>Gráfica de superficie CP1, valor fijo de la bomba 0,3.</i> | 52 |
| Figura 41. <i>Gráfica de superficie CP1, valor fijo de 1600 RPM</i> | 53 |
| Figura 42. <i>Gráfica de superficie CP1, valor fijo aceite 20W50</i> | 53 |
| Figura 43. <i>Gráfica de efectos principales en CP2</i> | 54 |
| Figura 44. <i>Gráfica de interacciones en CP2</i> | 55 |
| Figura 45. <i>Gráfica de superficie CP2, valor fijo de la bomba 0,3.</i> | 55 |
| Figura 46. <i>Gráfica de superficie CP2, valor fijo de 1600 RPM.</i> | 56 |
| Figura 47. <i>Gráfica de superficie CP2, valor fijo aceite 20W50</i> | 56 |
| Figura 48. <i>Gráfica de efectos principales en CP3</i> | 58 |
| Figura 49. <i>Gráfica de interacciones en CP3</i> | 58 |
| Figura 50. <i>Gráfica de superficie CP3, valor fijo de la bomba 0,3.</i> | 59 |
| Figura 51. <i>Gráfica de superficie CP3, valor fijo de 1600 RPM</i> | 59 |
| Figura 52. <i>Gráfica de superficie CP3, valor fijo aceite 20W50</i> | 60 |
| Figura 53. <i>Gráfica de efectos principales en la Asimetría</i> | 61 |
| Figura 54. <i>Gráfica de interacciones en la Asimetría.</i> | 62 |
| Figura 55. <i>Gráfica de superficie de la asimetría, valor fijo de la bomba 0,3.</i> | 62 |
| Figura 56. <i>Gráfica de superficie de la asimetría, valor fijo de 1600 RPM.</i> | 63 |
| Figura 57. <i>Gráfica de superficie la asimetría, valor fijo aceite 20W50</i> | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1. Datos del motor Hyundai Accent.....</i> | <i>10</i> |
| <i>Tabla 2. Variables de entrada y sus respectivos niveles.</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabla 3. Corridas experimentales.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabla 4. Variables controlables.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Tabla 5. Nomenclatura para régimen de 700, 1600 y 2500 RPM.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Tabla 6. Parámetros de funcionamiento del motor</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabla 7. Parámetros de funcionamiento del motor</i> | <i>29</i> |
| <i>Tabla 8. Parámetros de funcionamiento del motor</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabla 9. Comparación de las características temporales 700 RPM.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Tabla 10. Comparación de las características temporales 1600 RPM.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabla 11. Comparación de las características temporales 2500 RPM.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabla 12. Componentes a analizar por ACP.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla 13. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 700 rpm.</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabla 14. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 700 rpm.</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabla 15. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 1600 rpm... </i> | <i>39</i> |
| <i>Tabla 16. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 1600 rpm.</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabla 17. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 2500 rpm.. </i> | <i>43</i> |
| <i>Tabla 18. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 2500 rpm.</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 19. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 700 rpm.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Tabla 20. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 1600 rpm.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Tabla 21. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 2500 rpm.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Tabla 22. Análisis de varianza</i> | <i>50</i> |
| <i>Tabla 23. Análisis de varianza</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabla 24. Análisis de varianza</i> | <i>57</i> |

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto trata temas importantes referente al uso de herramientas de mantenimiento predictivo de análisis de vibraciones, el mismo que propone una técnica no invasiva para la detección y diagnóstico de fallas en maquinaria, con el fin de detectar posibles anomalías en elementos propensos a desgastes sin la necesidad de detener el funcionamiento del elemento en estudio. Pudiéndose monitorear constantemente la maquinaria y proponer soluciones rápidas que beneficien a la operación de la misma.

Esta investigación se basa y fundamenta en el uso de ésta técnica para diagnosticar fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna a gasolina, alterando sus condiciones normales de funcionamiento.

Para lo que se modifica los principales factores que intervienen en el sistema en análisis como son: viscosidad del aceite, desgaste de la bomba de aceite y régimen de giro del motor.

La adquisición de muestras se evalúa experimentalmente para asegurarse que estos sean correctos, donde mediante técnicas matemáticas y estadísticas como la Transformada Rápida de Fourier FFT y el Análisis de Componente Principales ACP se interpretarán los datos obtenidos.

Los resultados alcanzados servirán para verificar si las condiciones normales de funcionamiento se ven alteradas al modificar los factores antes mencionados, pudiéndose hacer uso de esta investigación como base para futuras investigaciones referidas a profundizar en el análisis del sistema de lubricación de los motores de combustión interna a gasolina.

2. PROBLEMA

En la actualidad para analizar fallas en los componentes principales del motor de combustión interna, específicamente en el sistema de lubricación, se requieren realizar pruebas intrusivas, lo que obliga a detener el funcionamiento del motor para efectuar

un diagnóstico de dichas fallas, empleándose una gran cantidad de tiempo, afectando al costo final de reparación.

Al no contar con una herramienta de mantenimiento predictivo que diagnostique tempranamente posibles averías en el sistema de lubricación del motor de combustión interna alternativo, ocasiona que la vida útil del motor se reduzca.

La constante innovación de técnicas no invasivas como el análisis de vibraciones se ha convertido en la actualidad parte fundamental y clave para obtener la mayor eficiencia de los equipos y maquinaria constituyéndose el mantenimiento predictivo en una herramienta fundamental. El análisis de vibraciones posibilita la menor intervención en el componente a estudiar siendo muy utilizada hoy en día.

En el presente proyecto se analizarán las fallas que se presentan en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna alternativo a gasolina mediante análisis de vibraciones, con el fin de optimizar su correcto funcionamiento, ya que al determinar tempranamente daños en este se podrá prolongar la vida útil del motor.

Esta investigación busca implementar una técnica de mantenimiento predictivo para el diagnóstico de fallos presentes en el sistema de lubricación sin necesidad de interrumpir el funcionamiento del motor.

Esta investigación va dirigida a el Grupo de Investigación de Ingeniería de Transporte GIIT, de la Carrera de Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, a través de su línea de investigación de Ingeniería del Mantenimiento Automotriz; el mismo que se ha enfocado en aplicar nuevas técnicas de detección y diagnóstico automático de fallos. Tomando como medio de condición, la variación de temperatura en el colector de escape, el ruido generado en el normal funcionamiento y las vibraciones emitidas por los distintos sistemas del motor de combustión interna alternativo.

Con este proyecto se contribuiría al desarrollo de herramientas de diagnóstico no invasivas de los fallos más significativos en el sistema de lubricación de los motores de combustión interna alternativos a gasolina.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Objetivo General

- Diagnosticar las fallas en el sistema de lubricación de un motor de combustión interna a gasolina Hyundai Accent DOHC 1.5L mediante análisis de vibraciones.

3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las características del sistema de lubricación del motor de combustión interna alternativo a gasolina.
- Implementar el diseño experimental para la adquisición de muestras de las señales vibro-acústicas generadas por el sistema de lubricación.
- Procesar las señales adquiridas
- Analizar los resultados obtenidos.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 El motor de combustión interna y su sistema de lubricación

El motor de combustión interna a gasolina en su interior consta de varias piezas que se encuentran en constante rozamiento, que, de no controlarse, generaría un desgaste excesivo de estas piezas, así como también aumento en la temperatura.

Por estos motivos, el motor utiliza un sistema de lubricación, el cual mediante un fluido principalmente, en parte o gran medida mitiga el desgaste de las piezas del motor, así como también el aumento de temperatura en el mismo.

Este sistema debe mantener todo el transcurso de funcionamiento de motor, lubricados sus componentes principales, a una presión constante, así el lubricante crea una película entre las piezas en rozamiento, evitando el contacto directo entre estas y la fricción excesiva de estas, además este lubricante cumple la función de refrigerar estos elementos, absorbiendo el calor que en estos se produce al estar en constante fricción.

[1]

4.1.1 Sistema de lubricación a presión

Con el paso del tiempo, los fabricantes han creado diferentes medios para lubricar los elementos internos del motor. En la actualidad, en la gran mayoría de vehículos se utiliza un sistema de lubricación a presión.

El funcionamiento es básicamente el siguiente: Una bomba toma el líquido lubricante de un depósito, y lo hace circular por todos los conductos de lubricación del motor, antes de esto pasa por un filtro el cual extrae las impurezas que posee este líquido.

El sistema logra lubricar de una manera más eficiente, elementos a los que era difícil llegar, tales como cojinetes de biela y cigüeñal, balancines y empujadores de válvulas. También se lubrica de una mejor manera las paredes del cilindro. [2]

4.1.2 Elementos del sistema de lubricación a presión

4.1.2.1 Depósito o Cáster

Este elemento sirve como depósito del líquido lubricante. También cumple en cierta medida la refrigeración del aceite, al encontrarse en la parte inferior del motor, y estar en contacto directo con el medio ambiente, por lo que es fabricado de materiales que faciliten la disipación de calor, tales como chapa de acero o también en fundición de aluminio.

Debido al movimiento del vehículo, El interior del Cáster está dividido por tabiques, lo que evita la formación de espuma en el aceite. Además, consta de un perno tapón en su parte inferior, para la extracción del fluido lubricante cuando sea necesario un recambio del mismo. [2]

4.1.2.2 Bomba

Este elemento tiene como función la de distribuir el líquido refrigerante por todo el sistema, a una presión constante. Para cumplir con este cometido, este elemento se acciona por el movimiento del motor.

Está compuesta de un colador, el cual evita que la bomba se quede sin líquido. Este elemento en su interior tiene una rejilla, así evita el paso de elementos o partículas extrañas. [3]

Existen varios tipos de bombas, cada una con diferentes características:

4.1.2.2.1 Bomba de engranajes

Este tipo de bomba está compuesta de un par de engranajes, el uno conductor gracias al movimiento del motor, y el otro conducido. Al darse el movimiento de estos, el aceite es absorbido por medio de un conducto de admisión, pasa entre los dientes de los engranajes, y sale a presión hacia el circuito de lubricación. [4]

4.1.2.2.2 Bomba de paletas

Este tipo de bomba está compuesto de un rotor, el cual consta de unas paletas que se pueden mover longitudinalmente. Este rotor se encuentra dispuesto excéntricamente dentro de una carcasa, y al realizarse su movimiento gracias al giro del motor, se genera presión gracias a la variación de volumen producida por las paletas. [4]

4.1.2.2.3 Bomba de rotor excéntrico

En este caso el engranaje conductor se encuentra dentro del conducido. El conducido se mueve de forma excéntrica dentro de la carcasa, generando en el conducto de salida de esta bomba la presión necesaria para el circuito.

4.1.2.3 Filtro

El aceite al poseer propiedades detergentes, al momento de circular por el motor arrastra partículas, las cuales pueden ocasionar daños a los elementos. El filtro según como recomiende el fabricante del vehículo, debe de cambiarse.

Para evitar estos daños se utiliza un filtro, el cual en su interior tiene un papel con resina, que retiene estas partículas dañinas para el motor. [2]

4.1.2.4 Lubricante

El aceite que se ha de utilizar en el automóvil viene especificado por el fabricante del mismo. Este tiene varias funciones para el correcto funcionamiento del motor tales como:

- Crea una película entre los elementos en funcionamiento para evitar el desgaste excesivo de estos.
- Absorbe el calor producido por los elementos internos del motor, regresando al Cárter, donde es refrigerado.
- Sirve de sello entre el anillo del pistón y el cilindro.
- Sirve como un detergente, al momento de circular por el motor. Lleva la suciedad al Cárter, donde en gran parte estas se quedan, mientras la otra parte es retenida por el filtro. [5]

Con el pasar de los años, para cumplir con los objetivos antes mencionados, el aceite ha ido variando sus características, dependiendo del motor en el cual es empleado, además de que ha obtenido otras que lo mantienen estable a las temperaturas del motor tales como un bajo índice de volatilidad, no ser inflamable, y mantener estable su viscosidad. [5]

En la actualidad, los aceites son clasificados de acuerdo a la Sociedad de Ingenieros Automotrices o al Instituto Americano del Petróleo:

4.1.2.4.1 Sociedad de Ingenieros Automotrices o al Instituto Americano del Petróleo (SAE)

Esta sociedad clasifica a los aceites de acuerdo a su viscosidad, pudiendo ser monogrados o multigrados.

En lo que se refiere a los aceites monogrados, su principal característica es que estos varían de manera significativa su viscosidad al variar la temperatura.

Por otro lado, los multigrados varían su viscosidad, pero no lo hacen en gran medida, con respecto a los monogrado. [5]

4.1.2.4.2 Instituto Americano del Petróleo (API)

Esta sociedad en cambio clasifica al tipo de lubricante según el motor en el cual va a ser utilizado, pudiendo ser motores a gasolina, designados con la letra S, o motores a diésel designados con la letra C. [5]

4.2 Análisis de vibraciones

En el sistema anteriormente estudiado, y en general en todos los sistemas del motor de combustión interna, los métodos para la detección de fallos se dan mediante técnicas intrusivas. El desarmado del motor, para la detección de este tipo de fallos conlleva a una problemática en lo que específicamente se refiere al tiempo que se emplea en esto para conseguir este fin.

Hoy en día en el medio, la constante innovación de técnicas no invasivas como el análisis de vibraciones se ha convertido en un método, con el cual se estudia el comportamiento de los motores de combustión interna. Analizando las vibraciones obtenidas, se pueden diagnosticar fallos en este tipo de motores, dando o complementando en gran medida un mantenimiento predictivo; así como también creando bases de datos para futuras investigaciones. El motor tiene en su funcionamiento normal su curva de vibración que lo caracteriza; al darse un fallo en cualquier sistema o elemento de este, esta curva se altera. [7]

En el medio, específicamente en la ciudad de Cuenca, Ecuador, en la Universidad Politécnica Salesiana, en el ámbito automotriz, existen ya investigaciones que han utilizado este método. En el año 2014 se inició con un diagnóstico en los fallos en un motor de combustión interna a diésel mediante análisis de vibraciones, los autores en esta investigación procedieron a dar fallos al sistema de lubricación, para así obtener los espectros característicos del motor estudiado (espectros en condiciones normales y con fallas), y así realizar el análisis de la variación de las características obtenidas por las señales vibratorias. [8]

La investigación anteriormente citada, marco el inicio para que en el 2015 se den otro tipo de investigaciones en base al análisis de vibraciones. En este caso, se dió investigaciones como el estudio de los efectos de la variación de la presión en el riel

de combustible, sobre la combustión, en un motor modelo Hyundai Santa Fe 2.0. En este estudio, los autores al variar las características de la presión y la densidad del combustible, obtuvieron señales vibratorias, que ayudaron al análisis de como varia la combustión en este motor. [9]

Para estos estudios, se hizo necesario un análisis frecuencial, técnica que permite manipular y caracterizar las señales vibratorias obtenidas (convertir las señales vibratorias que están en función del tiempo, a señales en función de la frecuencia. Con esto el cambio o aparición de las componentes en la frecuencia (armónicos) dieron características propias de cada señal. Este método utiliza la transformada de Fourier, la cual se puede aplicar de una manera mucho más práctica por medio de softwares.) [8] [9]

En las investigaciones mencionadas anteriormente, se puede apreciar los datos obtenidos mediante el análisis frecuencial (datos de cada señal vibratoria), que, debido a su cantidad, hacen tedioso el análisis de cada uno de los espectros obtenidos.

Para apreciar de una manera mucho más sencilla el comportamiento y la relación que tienen las características de las señales de vibración obtenidas por la transformada de Fourier se pueden utilizar un método de componentes principales (ACP). En el medio no existen investigaciones de este tipo que incluyan el método ACP. En países como Venezuela existen investigaciones que utilizan este método, pero están encaminadas al campo agropecuario. En estas investigaciones se puede apreciar también una gran cantidad de datos a analizar, motivo por el cual utilizan el ACP. [10] [11]

Al ser este método descriptivo, se puede utilizar para analizar datos obtenidos de las vibraciones del motor. Este permite obtener componentes principales (correlaciones de las características de las señales) que permiten apreciar de una manera mucho más sencilla el comportamiento y la relación que tienen las características de las señales de vibración obtenidas por la transformada de Fourier. Dicho de otra manera, el conjunto de n estados del motor (señales vibratorias) y sus p variables o características, mediante el ACP permite adquirir nuevas variables (componentes principales), denominadas $Y(k)$, combinaciones lineales de las variables originales $X(j)$. La constante $l(jk)$ permite implantar condiciones características del ACP. [12]

$$Y(k) = \sum_{j=1}^p l(jk)X(j) \quad (1)$$

$$k = 1, \dots, p \quad (2)$$

Dependiendo del estudio, se obtendrá que cantidad de componentes agruparan la mayoría de información [12], información con la cual se llega a interpretar el comportamiento del motor en sus diferentes estados.

5. MARCO METODOLÓGICO

El análisis se basó en la implementación de un diseño experimental, el cual es una técnica estadística que nos permite identificar como cuantificar las causas de un efecto dentro de nuestro estudio experimental. Para esto se manipularon aleatoriamente una o más variables, vinculadas a las causas, para así poder medir el efecto que éstas tuvieron sobre otra variable de interés.

5.1 Implementación del diseño experimental y adquisición de muestras

Para obtener las señales vibratorias que se dan en el motor, en los diferentes estados que se establecieron para su estudio, se creó un diseño experimental. Este tipo de diseño brinda una metodología adecuada de obtención de las señales, así como también elementos para determinar que estas son válidas para el estudio.

El motor utilizado en este experimento, así como sus datos se pueden apreciar a continuación en la Figura 1 y Tabla 1 respectivamente.

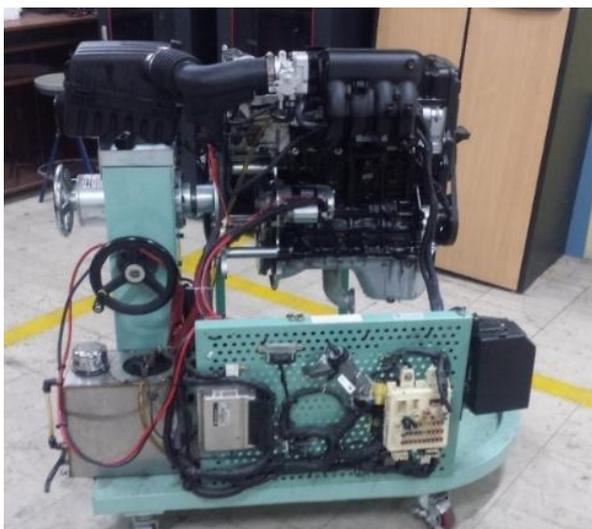


Figura 1. Maqueta didáctica, motor Hyundai Accent.

Fuente: Los Autores

Tabla 1. Datos del motor Hyundai Accent

Fuente: Manual Hyundai Accent

| Motor Hyundai Accent | |
|-----------------------------|-------------------|
| Motor | Alpha II |
| Modelo | G4FK |
| Cilindrada | 1.5 L |
| Potencia Máxima | 74 KW @ 6000 RPM |
| Torque Máximo | 134 Nm @ 4000 RPM |
| Relación de compresión | 9,5:1 |
| Distribución | DOHC |

5.1.1 Modelo experimental para la obtención de las Señales Vibratorias

Para la obtención de las señales se empleó el método de superficie de respuesta (modelo Box-Behnken). Éste método es una estrategia experimental y de análisis que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso. [13]

Para el modelado de este método se utilizaron tres variables. Estas variables influyen directamente en el sistema de lubricación de motor, por lo que al variar cada uno de

estas obtendremos una señal vibratoria propia de ese estado en el que se encuentra el motor.

5.1.1.1 Variables de entrada

Las variables utilizadas en el experimento fueron la bomba de aceite, el aceite, y el régimen de giro del motor. Un desgaste en los engranajes interiores de la bomba de aceite se ve reflejado directamente en el funcionamiento del sistema de lubricación, y por ende en el correcto funcionamiento del motor [14]. Se utilizó una bomba nueva, como variable con valor inicial (nivel bajo), y otra bomba con las mismas características, a la cual se le dio dos valores diferentes de desgaste (Nivel medio y nivel alto) en el engranaje conductor interior Figura 2. La viscosidad del aceite también es otro factor importante en la lubricación, esta influye directamente en la correcta lubricación de los componentes del motor, por este motivo se consideraron tres tipos diferentes de aceites, cada uno con distinta viscosidad [15]. Las variables anteriormente especificadas se analizarán a tres distintos regímenes de giro del motor (RPM). En la Tabla 2 se pueden apreciar estas variables, así como sus niveles, considerados para la realización del experimento.



Figura 2. Desgaste del rotor interno de la bomba de aceite.

Fuente: Los Autores

Tabla 2. Variables de entrada y sus respectivos niveles.

Fuente. Los Autores

| Factor | Nivel Bajo | Nivel Medio | Nivel Alto |
|---------------|------------|-------------|------------|
| Bomba A. (mm) | 0 | 0,3 | 0,6 |
| RPM | 700 | 1600 | 2500 |
| Aceite | 30 | 45 | 60 |

Con las variables anteriormente descritas, el método de superficie de respuesta nos brindó una metodología adecuada para la obtención de las señales. Se tienen quince corridas (combinaciones de las variables) base, pero se consideraron tres replicas para cada una de estas combinaciones, por lo que se obtendrán en total cuarenta y cinco muestras en total. Esta metodología se la puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Corridas experimentales.

Fuente: Los Autores

| Orden | RPM | Bomba | Aceite | Orden | RPM | Bomba | Aceite | Orden | RPM | Bomba | Aceite |
|-------|------|-------|--------|-------|------|-------|--------|-------|------|-------|--------|
| 1 | 700 | 0 | 45 | 16 | 700 | 0 | 45 | 31 | 700 | 0 | 45 |
| 2 | 2500 | 0 | 45 | 17 | 2500 | 0 | 45 | 32 | 2500 | 0 | 45 |
| 3 | 700 | 0,6 | 45 | 18 | 700 | 0,6 | 45 | 33 | 700 | 0,6 | 45 |
| 4 | 2500 | 0,6 | 45 | 19 | 2500 | 0,6 | 45 | 34 | 2500 | 0,6 | 45 |
| 5 | 700 | 0,3 | 30 | 20 | 700 | 0,3 | 30 | 35 | 700 | 0,3 | 30 |
| 6 | 2500 | 0,3 | 30 | 21 | 2500 | 0,3 | 30 | 36 | 2500 | 0,3 | 30 |
| 7 | 700 | 0,3 | 60 | 22 | 700 | 0,3 | 60 | 37 | 700 | 0,3 | 60 |
| 8 | 2500 | 0,3 | 60 | 23 | 2500 | 0,3 | 60 | 38 | 2500 | 0,3 | 60 |
| 9 | 1600 | 0 | 30 | 24 | 1600 | 0 | 30 | 39 | 1600 | 0 | 30 |
| 10 | 1600 | 0,6 | 30 | 25 | 1600 | 0,6 | 30 | 40 | 1600 | 0,6 | 30 |
| 11 | 1600 | 0 | 60 | 26 | 1600 | 0 | 60 | 41 | 1600 | 0 | 60 |
| 12 | 1600 | 0,6 | 60 | 27 | 1600 | 0,6 | 60 | 42 | 1600 | 0,6 | 60 |
| 13 | 1600 | 0,3 | 45 | 28 | 1600 | 0,3 | 45 | 43 | 1600 | 0,3 | 45 |
| 14 | 1600 | 0,3 | 45 | 29 | 1600 | 0,3 | 45 | 44 | 1600 | 0,3 | 45 |
| 15 | 1600 | 0,3 | 45 | 30 | 1600 | 0,3 | 45 | 45 | 1600 | 0,3 | 45 |

5.1.1.2 Variables de bloqueo y variables controlables

Antes de seguir con esta metodología, se consideraron otros factores (variables de bloqueo y variables controlables) [13]. En lo que refiere a variables de bloqueo, estas

podieron afectar los resultados obtenidos. En este caso se consideró la humedad relativa, temperatura ambiente y la carga a la que está sometida el vehículo. Tanto para la humedad relativa como la temperatura ambiente, se buscaron condiciones similares en los días que se realizó el experimento (clima). Las pruebas fueron realizadas en una maqueta didáctica, motivo por el cual la carga en el motor no existe. Respecto a las variables controlables, en estas se aseguró que sus valores sean los mismos en todo el transcurso del experimento. Este tipo de variables y sus valores controlados se pueden apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4. Variables controlables.

Fuente: Los Autores

| Factores | Rangos |
|-------------------------------------|-----------------|
| RPM | 700, 1600, 2500 |
| Temperatura del refrigerante | 93-98 °C |
| Temperatura del cárter | 59 °C |

5.1.2 Adquisición de las señales vibratorias.

Se adquirieron las señales vibratorias mecánicas del motor, que por medio de un acelerómetro se convirtieron en tensiones eléctricas. El esquema de la Figura 3 muestra un sistema de medida de las vibraciones mecánicas.

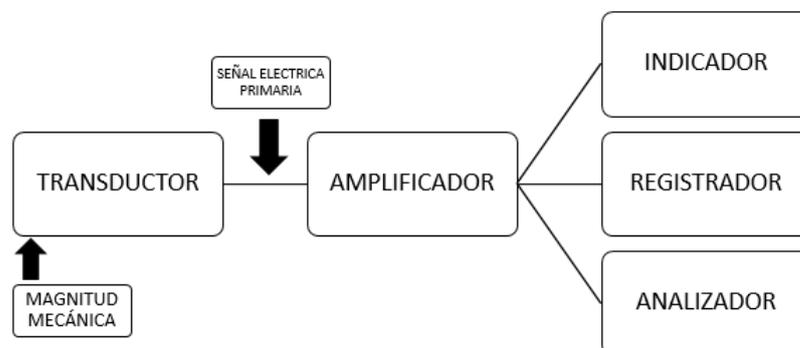


Figura 3. Esquema de medida de las vibraciones mecánicas.

Fuente: Autores

Para realizar la medición de las señales se utilizó el equipo ADASH®. Este es un analizador de señales acústicas (Modelo A3716 2 U, N° Serie 624971). A este se acoplo un acelerómetro uniaxial (Modelo ACS 3411LN, sensibilidad 102 mV/g), el cual, conectado al motor, captó las señales vibratorias. Estos elementos se pueden apreciar en la Figura 4.



Figura 4. ADASH® y Acelerómetro.

Fuente: Los Autores

Las señales adquiridas mediante el equipo ADASH® fueron guardadas en formato .wav Figura 5. Cabe mencionar que estas señales al encontrarse en el dominio del tiempo, mediante un análisis frecuencial su dominio paso a ser frecuencial, así se podrá analizarlas de mejor manera.

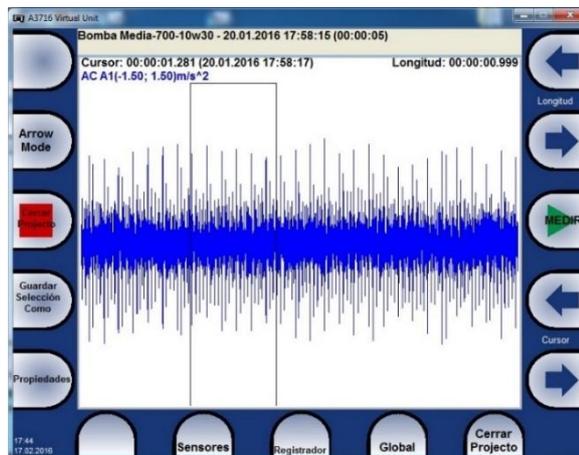


Figura 5. Señal de tipo WAV entregada por el ADASH.

Fuente: Los Autores

No existen normativas que especifiquen el procedimiento a seguir en este tipo de experimentos, a motores que presenten variación en su sistema de lubricación, por lo que se tuvo que utilizar una normativa general para este tipo de motores ISO 10816-6: 1995 [16]. Esta normativa indica que, para experimentos de adquisición de señales vibratorias, el acelerómetro debe ir conectado lo más cerca posible al elemento a estudiar (Bomba de aceite). En la Figura 6 se puede apreciar cómo se conectó el acelerómetro en todo el experimento.



Figura 6. Ubicación del acelerómetro en el motor.

Fuente: Los Autores

En cada cambio de aceite, para realizar cada prueba, se aseguró el drenado completo de estos. Con esto se evitó la variación de las propiedades de cada uno de estos, al mezclarse unos con otros. También se utilizó un pirómetro, así se aseguró, que la temperatura en el motor sea la adecuada en cada adquisición de muestras. Además, para controlar las revoluciones del motor, se utilizó el acelerador propio del motor, el cual tiene un mecanismo de regulación por tornillo que brinda la velocidad deseada para la adquisición de las señales, este aspecto fue complementado con un escáner Carman Scan VG64, en el cual se pudo apreciar las revoluciones del motor. Estos elementos utilizados se pueden apreciar en la Figura 7

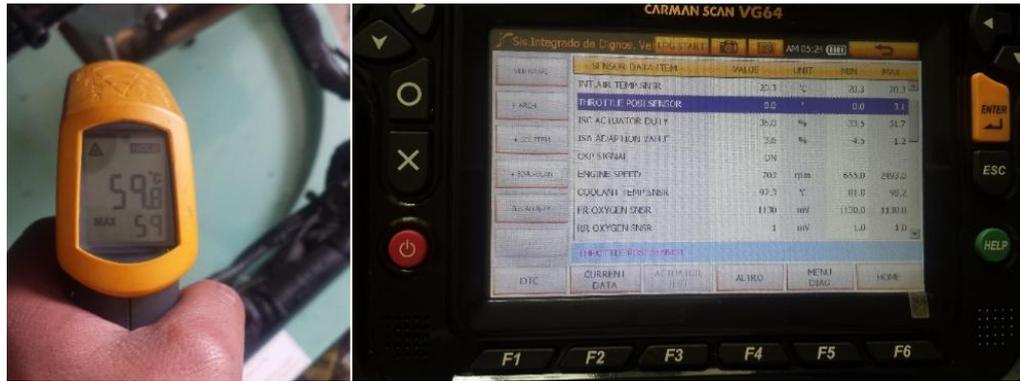


Figura 7. Pirómetro y Escáner Carman Scan VG64.

Fuente: Los Autores

5.2 Procesamiento de las señales adquiridas

Las señales adquiridas se encuentran en el dominio del tiempo como se puede apreciar en la Figura 8 por lo que es necesario el tratamiento de las mismas, para extraer sus principales características, con el fin de efectuar el posterior análisis.

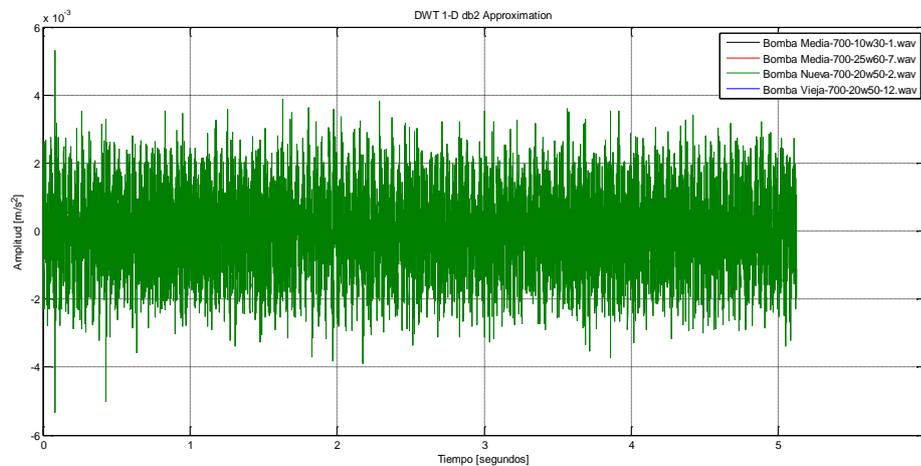


Figura 8. Señal adquirida en el dominio del tiempo

Fuente: Los Autores

En la actualidad existen diversas técnicas que procesan las señales vibratorias adquiridas, una de ellas es la Transformada Rápida de Fourier (FTT), herramienta que convierte la señal al dominio de la frecuencia, dando la ventaja que muestra los distintos armónicos y subarmónicos presentes en el espectro, pudiéndose visualizar fallos característicos y su comportamiento en el tiempo. [17]

La transformada rápida de Fourier es capaz de pasar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia Ecuación 2 y viceversa, para esto se puede aplicar la transformada inversa de Fourier Ecuación 3. [18]

$$\hat{f}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(w) e^{-i\omega x} dw \quad (4)$$

Para aplicar la FFT a cada señal adquirida se usó el software Matlab®, el cual a más de entregarnos el espectro correspondiente nos otorgará las características de cada señal transformada, mismas que serán tabuladas para su posterior estudio. Figura 9

De la misma manera el software nos ofrecerá las bandas frecuenciales en las que se encuentran los principales armónicos y subarmónicos de cada espectro.

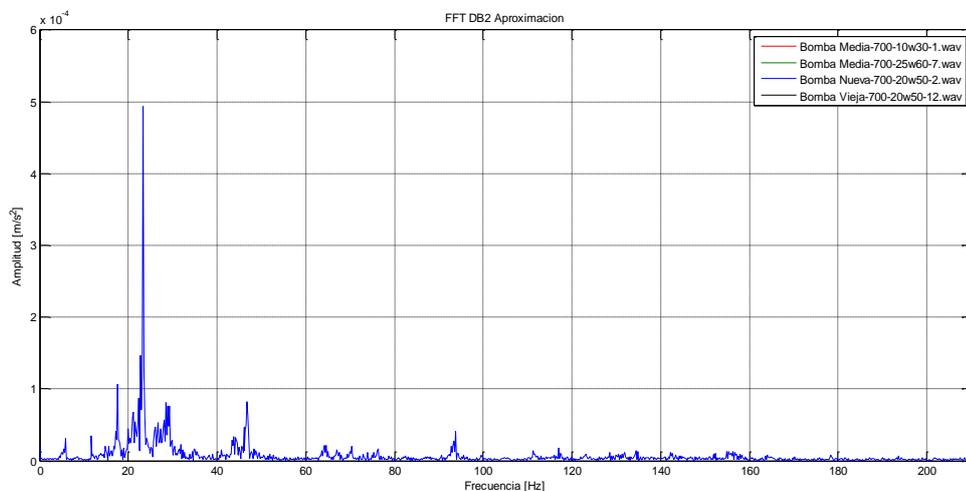


Figura 9. Señal transformada al dominio de la frecuencia mediante FFT

Fuente: Los Autores

Se usa una escala de 0 a 200 [HZ], ya que en este rango acurren la mayoría de armónicos y subarmónicos presentes en cada señal.

Las características obtenidas para cada señal se detallan a continuación: [9]

- Media
- Varianza
- Desviación STD.
- Mediana
- Máximo
- Mínimo
- Potencia
- Energía
- Curtosis
- Asimetría
- RMS
- Factor de Cresta

De la misma manera las bandas obtenidas son: Figura 10

- 1X: frecuencia fundamental
- 0,5 X
- 2 X
- 3 X
- 4 X
- 6 X
- 8 X
- 16 X

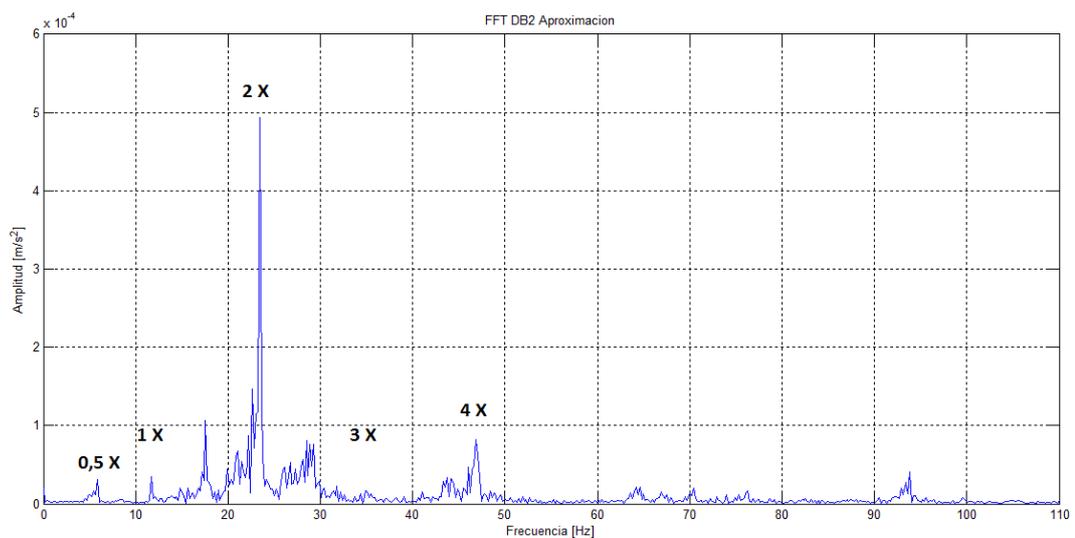


Figura 10. Bandas frecuenciales

Fuente: Los Autores

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados verificamos primeramente que la adquisición de las muestras esté correcta mediante un análisis ANOVA de las características más representativas del espectro de una determinada muestra, ANEXO 1, perteneciente a un mismo régimen de giro del motor.

Luego realizamos una comparación visual entre los espectros de un mismo rango de RPM, efectuando un estudio de los armónicos presentes en las distintas bandas frecuenciales, con las cuales podremos determinar posibles fallos en el sistema de lubricación del motor al alterar los parámetros normales de funcionamiento del mismo.

Se finalizará con un Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir la dimensionalidad de las características de los espectros de un mismo rango de RPM, con el fin de verificar si éstas son agrupables y facilitar el análisis de resultados.

6.1 Análisis ANOVA

El análisis de varianza ANOVA examina los efectos de múltiples factores en una respuesta continua, para esto se basa en el estudio de varianza para cada variable de respuesta. Esta técnica estadística es útil para determinar si un modelo cumple con los supuestos del análisis. [19]

Mediante el análisis estadístico ANOVA comprobaremos que la adquisición de las muestras sea correcta para los distintos regímenes de giro del motor dados en la experimentación.

6.1.1 Análisis de residuos a 700 RPM

En la Figura 11 se puede apreciar que existe una distribución normal entre las muestras pertenecientes al régimen de 700 RPM de la característica de Kurtosis, el histograma muestra simetría con respecto al cero, y en la gráfica de residuos se deduce que el margen de error es independiente entre cada muestra.

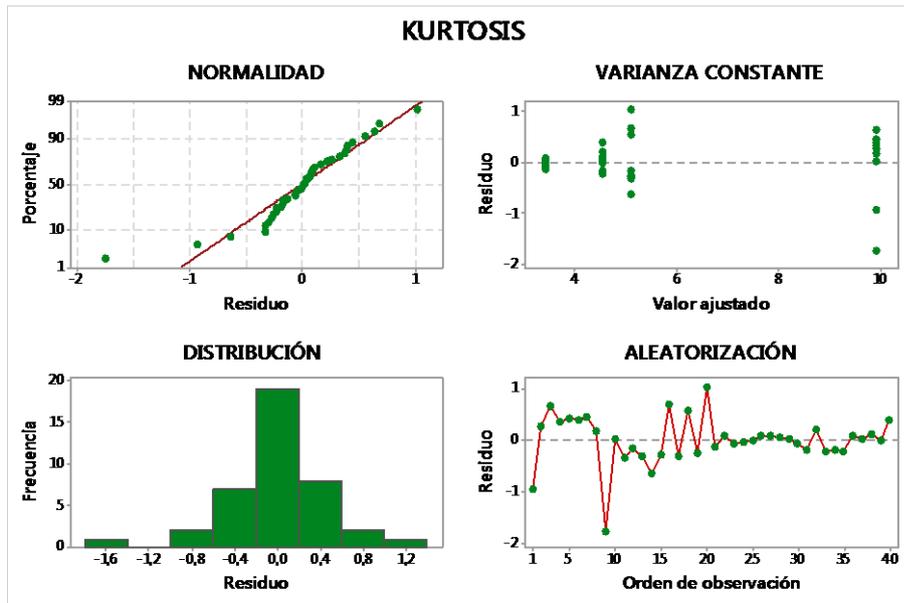


Figura 11. ANOVA para régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

En la Figura 12 se aprecia que la Curtosis es la característica espectral que más diferencia tiene entre los distintos eventos para un régimen de 700 RPM, la diferencia entre las muestras BV-700-20W50 y BM-700-25W60 es pequeña por lo que se puede establecer que no es altamente significativa.

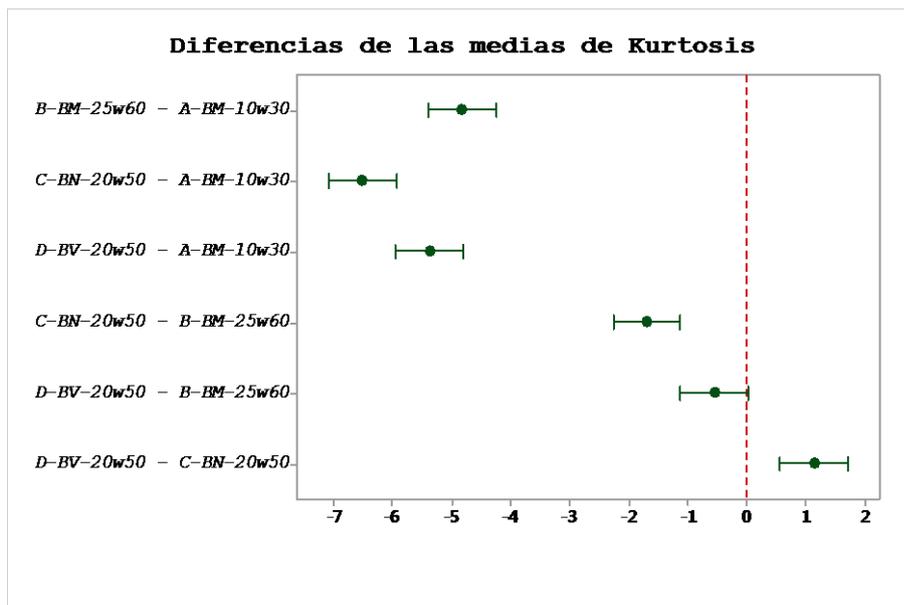


Figura 12. Diferencia de medias para kurtosis 700 RPM

Fuente: Los Autores

6.1.2 Análisis de residuos a 1600 RPM

En la Figura 13 se puede apreciar que existe una distribución normal entre las muestras pertenecientes al régimen de 1600 RPM de la característica de Kurtosis, el histograma muestra simetría con respecto al cero, y en la gráfica de residuos se deduce que el margen de error es independiente entre cada muestra.

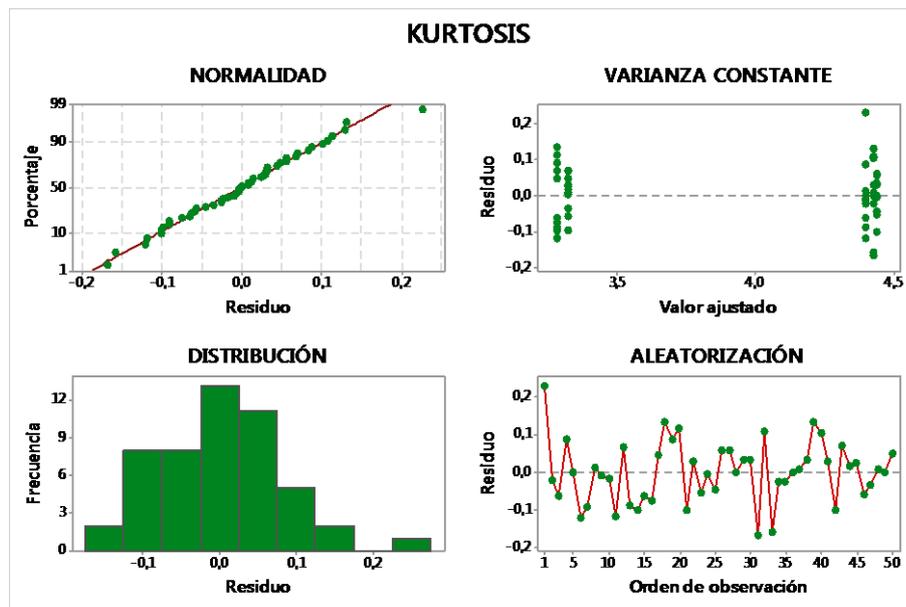


Figura 13. ANOVA para régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

En la Figura 14 se aprecia que la Kurtosis es la característica espectral que más diferencia tiene entre los distintos eventos para un régimen de 1600 RPM, también se puede observar que las diferencias de las medias para las muestras BV-700-10W30, BM-700-20W50, BV-700-25W60, BN-700-25W60 y BN-700-10W30 no son altamente significantes.

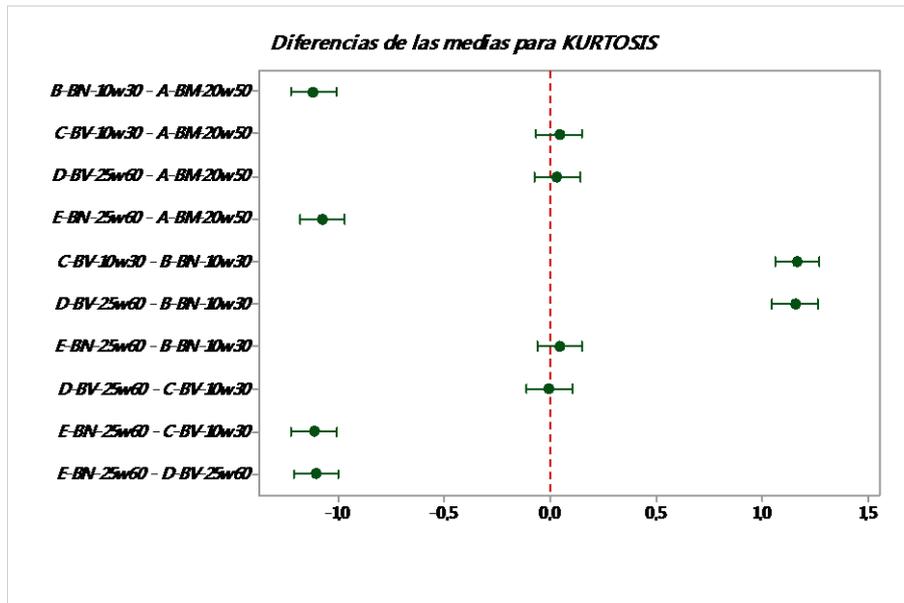


Figura 14. Diferencia de medias para kurtosis 1600 RPM

Fuente: Los Autores

6.1.3 Análisis de residuos a 2500

En la Figura 15 se puede apreciar que existe una distribución normal entre las muestras pertenecientes al régimen de 2500 RPM de la característica de Energía, el histograma muestra simetría con respecto al cero, y en la gráfica de residuos se deduce que el margen de error es independiente entre cada muestra.

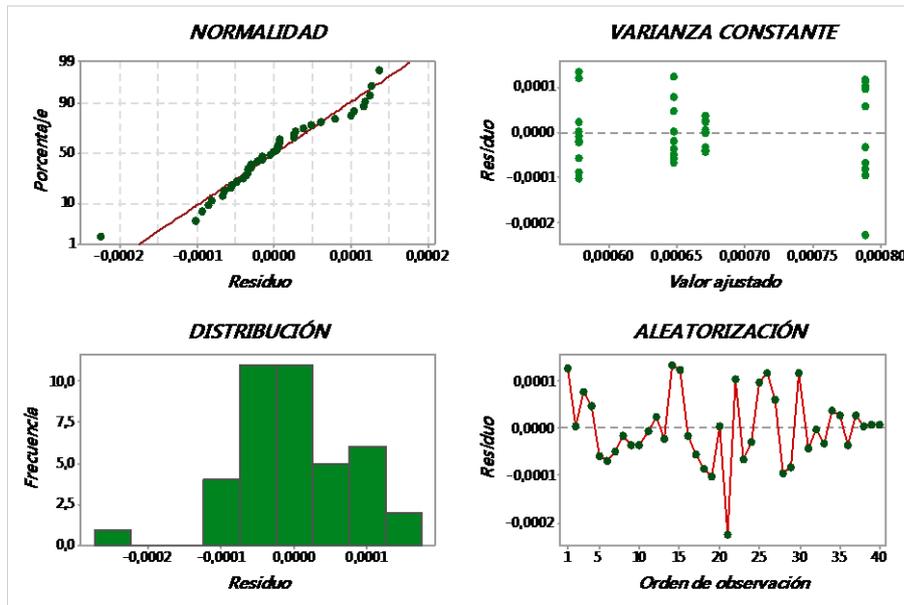


Figura 15. ANOVA para régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

En la Figura 16 se aprecia que la Energía es la característica espectral que más diferencia tiene entre los distintos eventos para un régimen de 2500 RPM, entre las muestras BM-700-25W60, BM-700-10W30, BV-700-20W50 y BN-700-20W50 se observa que la diferencia entre las medias es altamente significativa.

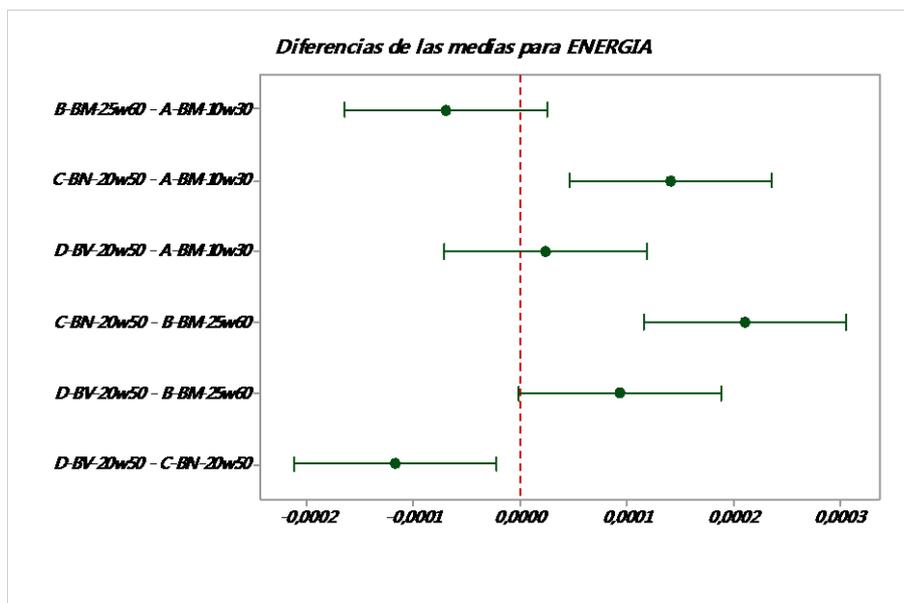


Figura 16. Diferencia de medias para kurtosis 2500 RPM

Fuente: Los Autores

6.2 Análisis de espectros característicos

6.2.1 Espectro patrón para un régimen de 700, 1600 y 2500 RPM

Para facilitar el estudio se realizó una nomenclatura para cada tratamiento perteneciente a un mismo rango de RPM. Tabla 5

Tabla 5. Nomenclatura para régimen de 700, 1600 y 2500 RPM

Fuente: Los Autores

| Nomenclatura para régimen de 700 RPM | |
|--|-------------------|
| Descripción | Simbología |
| Bomba sin desgaste/aceite motor 20w50 | BN-700-20W50 |
| Bomba desgaste medio/aceite motor 10w30 | BM-700-10W30 |
| Bomba desgaste medio/aceite motor 25w60 | BM-700-25W60 |
| Bomba desgaste alto/aceite motor 20w50 | BV-700-20W50 |
| Nomenclatura para régimen de 1600 RPM | |
| Descripción | Simbología |
| Bomba sin desgaste/aceite motor 10w30 | BN-1600-10W30 |
| Bomba sin desgaste/aceite motor 25w60 | BN-1600-25W60 |
| Bomba desgaste medio/aceite motor 20w50 | BM-1600-20W50 |
| Bomba desgaste alto/aceite motor 10w30 | BM-1600-10W30 |
| Bomba desgaste alto/aceite motor 25w60 | BV-1600-25W60 |
| Nomenclatura para régimen de 2500 RPM | |
| Descripción | Simbología |
| Bomba sin desgaste/aceite motor 20w50 | BN-2500-20W50 |
| Bomba desgaste medio/aceite motor 10w30 | BM-2500-10W30 |
| Bomba desgaste medio/aceite motor 25w60 | BM-2500-25W60 |
| Bomba desgaste alto/aceite motor 20w50 | BV-2500-20W50 |

El espectro patrón se calcula obteniendo la media aritmética de las características de las señales pertenecientes a un mismo rango de RPM, eligiéndose la muestra que más se acerque al valor de media calculado. [9]

Con los parámetros antes indicados el espectro patrón elegido para el régimen de 700 RPM fue la muestra BN-700-20w50 que pertenece de la bomba en condiciones normales de funcionamiento. Cada tratamiento cuenta con tres repeticiones por lo que

también se tomó como parámetro para elegir la señal que mejores características posea.

Figura 17

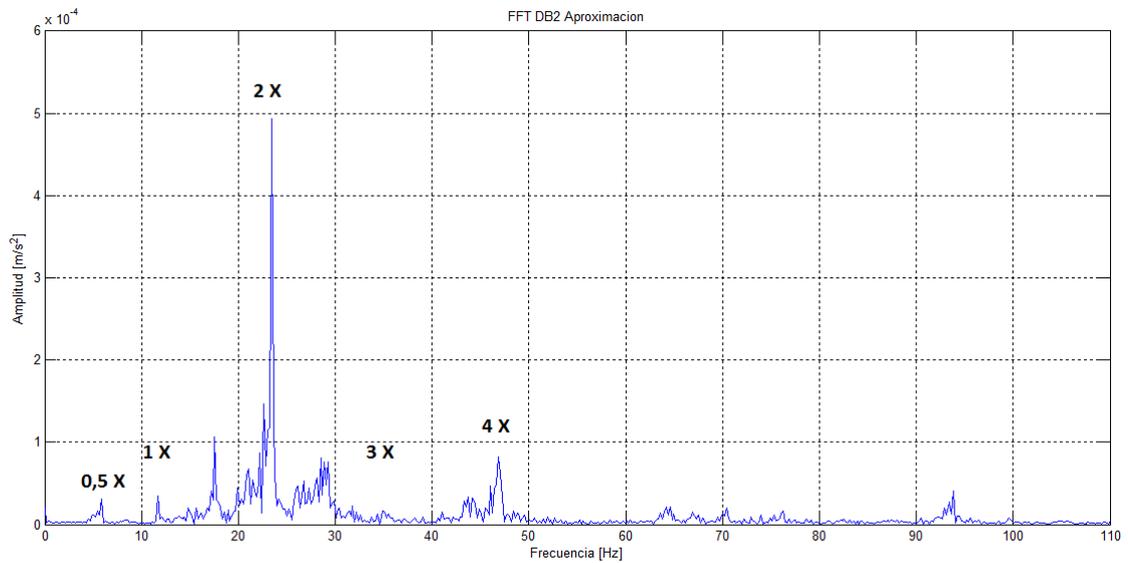


Figura 17. Espectro patrón 700 RPM

Fuente: Los Autores

El espectro patrón elegido para el régimen de 1600 RPM fue la muestra BN-1600-10w30 que pertenece de la bomba en condiciones normales de funcionamiento para dicho régimen. De la misma manera cada tratamiento cuenta con tres repeticiones por lo que también se tomó como parámetro para elegir la señal que mejores características posea. Figura 18.

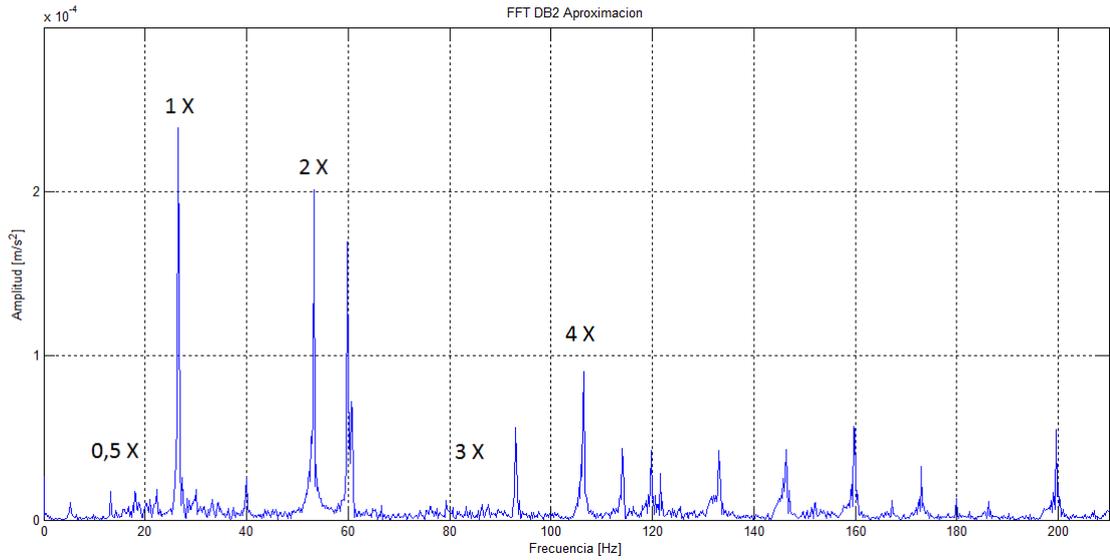


Figura 18. Espectro patrón 1600 RPM

Fuente: Los Autores

El espectro patrón elegido para el régimen de 2500 RPM fue la muestra BN-2500-20w50 que pertenece de la bomba en condiciones normales de funcionamiento para dicho régimen. Figura 19.

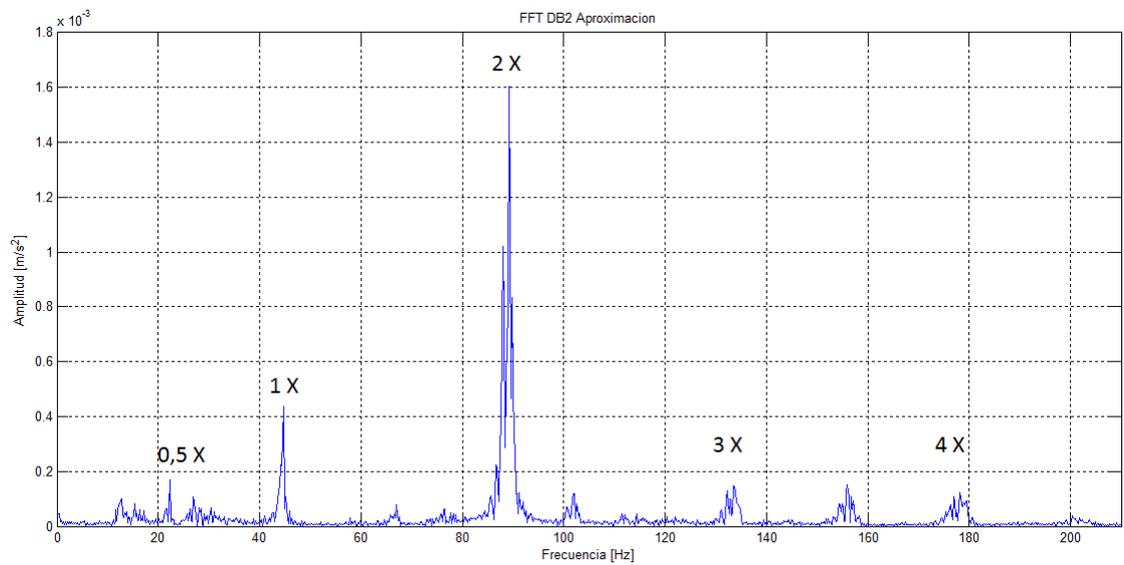


Figura 19. Espectro patrón 2500 RPM

Fuente: Los Autores

6.2.2 Comparación de los efectos críticos para los regímenes de 700, 1600 y 2500 RPM

Para nuestra investigación el comportamiento de los armónicos de las bandas frecuenciales 1X, 0,5X, 2X, 3X y 4X de los distintos tratamientos son fundamentales para determinar los efectos que se producen en el sistema de lubricación. ANEXO 2

6.2.2.1 700 RPM

A continuación, en la Figura 20 se realiza la comparación visual entre la muestra patrón para el rango de 700 RPM y la muestra BM-700-10w30, en la Tabla 6 se detallan los parámetros de funcionamiento del motor en las pruebas.

Tabla 6. Parámetros de funcionamiento del motor

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | PRUEBA | | UNIDADES |
|--------------------------|--------------|--------------|----------|
| | BN-700-20W50 | BM-700-10W30 | |
| Temperatura Cáster | 59 | 62 | ° C |
| Temperatura Refrigerante | 91 | 95 | ° C |
| Revoluciones Motor | 710 | 708 | RPM |

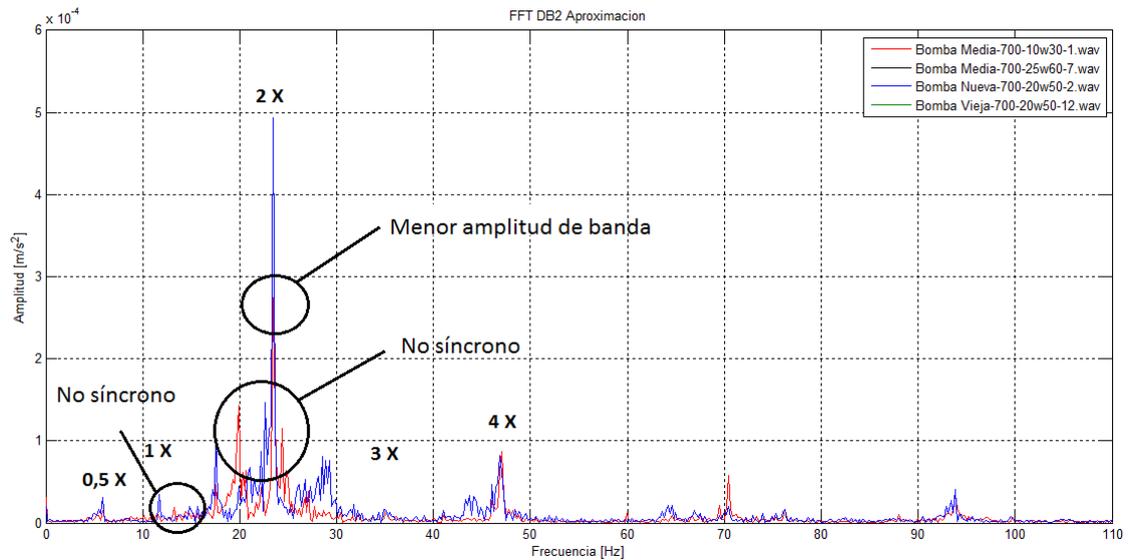


Figura 20. Comparación de espectros 700 RPM

Fuente: Los Autores

Al aplicar la Transformada Rápida de Fourier a las señales de audio adquiridas, podemos analizar las mismas en el dominio de la frecuencia, el espectro de color azul pertenece a la muestra BN-700-20W50 y el espectro de color rojo a la muestra BM-700-10W30.

Se puede evidenciar los efectos que se producen en el funcionamiento, en la banda 1X de evidencian frecuencias no síncronas, en la banda 2X se presenta una disminución de la amplitud frecuencial en el espectro de color rojo debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite, de la misma manera se presentan frecuencias no síncronas en la misma banda producidas por el uso de un aceite menos viscoso, lo que genera que el fallo en el sistema de lubricación sea aún más notable.

6.2.2.2 1600 RPM

Para el rango de 1600 RPM en la Figura 21 se realizó la comparación entre la muestra patrón para este régimen y la muestra BM-1600-10w30, en la Tabla 7 se detallan los parámetros de funcionamiento del motor de las pruebas.

Tabla 7. Parámetros de funcionamiento del motor

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | PRUEBA | | UNIDADES |
|--------------------------|---------------|---------------|----------|
| | BN-1600-10W30 | BM-1600-20W50 | |
| Temperatura Cártter | 59 | 62 | ° C |
| Temperatura Refrigerante | 89 | 92 | ° C |
| Revoluciones Motor | 698 | 706 | RPM |

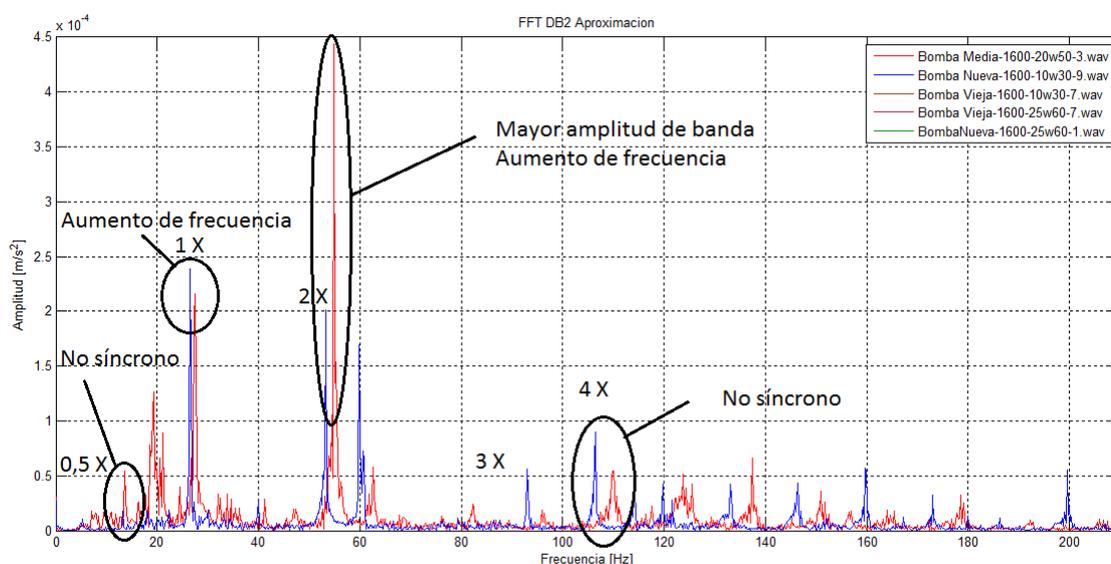


Figura 21. Comparación de espectros 1600 RPM

Fuente: Los Autores

En este análisis el espectro de color rojo pertenece a la muestra BM-1600-10W30 y el espectro de color azul a la muestra patrón.

En la banda 1X de evidencia un incremento de la frecuencia del armónico con respecto a la muestra patrón. En la banda 0,5 X se observa frecuencias no síncronas, en la banda 2X se visualiza un incremento de la amplitud frecuencial en el espectro de color rojo debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite, en la banda 4X se presentan frecuencias no síncronas producidas por el uso de un aceite más viscoso.

6.2.2.3 2500 RPM

Para el rango de 2500 RPM en la Figura 22 se realizó la comparación entre la muestra patrón para este régimen y la muestra BM-2500-25w60, en la Tabla 8 se detallan los parámetros de funcionamiento del motor de las pruebas.

Tabla 8. Parámetros de funcionamiento del motor

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | PRUEBA | | UNIDADES |
|--------------------------|---------------|---------------|----------|
| | BN-2500-20W50 | BM-2500-25W60 | |
| Temperatura Cáster | 63 | 62 | ° C |
| Temperatura Refrigerante | 91 | 94 | ° C |
| Revoluciones Motor | 712 | 704 | RPM |

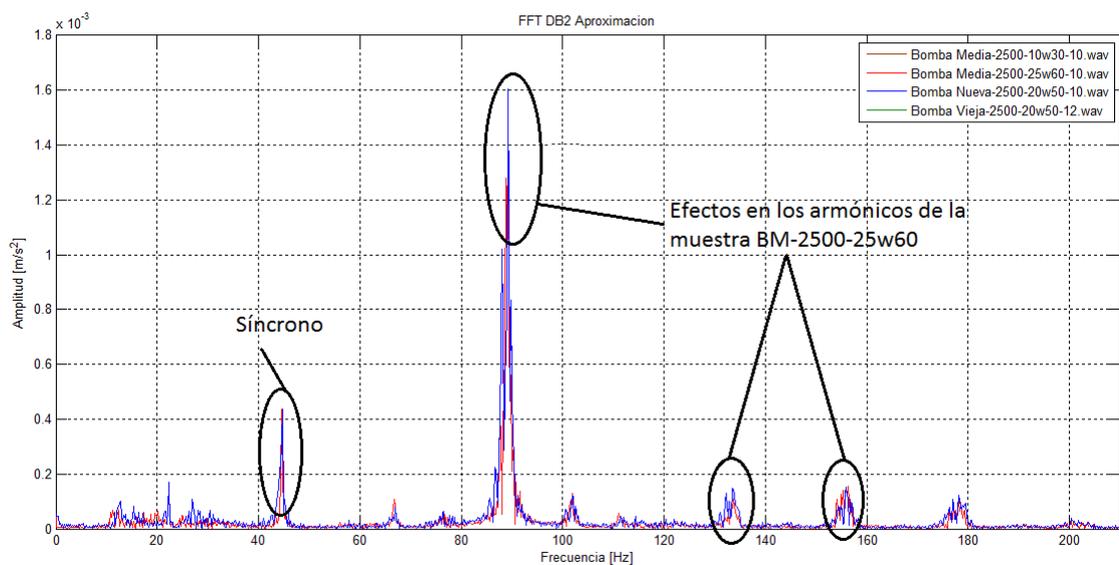


Figura 22. Comparación de espectros 2500 RPM

Fuente: Los Autores

En este análisis el espectro de color rojo pertenece a la muestra BM-2500-25W60 y el espectro de color azul a la muestra patrón.

En la banda 1X de evidencia que los armónicos de ambas bandas son sincrónicos, en la banda 2X se visualiza una disminución de la amplitud frecuencial en el espectro de color rojo debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite, en la banda 3X y

4X se presentan frecuencias sincóneas. Se observa claramente que el espectro para la muestra BM-2500-25W60 tiene un comportamiento similar al espectro patrón, esto debido a que al usar un aceite de mayor viscosidad (25w60), por lo que se puede deducir que un aceite más pesado oculta la falla generada en la bomba.

6.2.3 Comparación de las características temporales

6.2.3.1 700 RPM

Se puede apreciar en la Tabla 9 como las características del espectro perteneciente a la muestra BM-700-10W30 están alteradas respecto a la muestra patrón, en especial la característica de Curtosis, en donde se puede deducir que hay una diferencia notable debido al desgaste medio de la bomba y al aceite de menor viscosidad, lo que ocasiona una falla en el sistema de lubricación como se mencionó anteriormente.

Tabla 9. Comparación de las características temporales 700 RPM

Fuente: Los Autores

| CARACTERISTICA | MUESTRA | | |
|------------------------|--------------|--------------|-----------|
| | BN-700-20w50 | BM-700-10w30 | |
| Varianza | 6,92E-07 | 6,810E-07 | |
| Desviación STD | 8,31 E-04 | 8,252E-04 | |
| Potencia | 6,91 E-04 | 6,812E-04 | |
| Energía | 3,54E-06 | 3,491E-06 | |
| Curtosis | 3,368 | 9,018 | |
| Asimetría | -0,027 | -7,836E-01 | |
| RMS | 8,316 E-04 | 8,254E-04 | |
| Factor de cresta | 6,385 | 7,506 | |
| AMPLITUD FRECUENCIA | 1 X | 2,52743E-05 | 1,934E-05 |
| | 0,5 X | 2,88236E-05 | 1,763E-06 |
| | 2 X | 9,53516E-05 | 3,002E-05 |
| | 3 X | 4,12301E-06 | 3,781E-06 |
| | 4 X | 9,49116E-06 | 1,205E-06 |

6.2.3.2 1600 RPM

En la Tabla 10 se observa como las características del espectro perteneciente a la muestra BM-1600-20W50 están alteradas respecto a la muestra patrón, en especial la característica de

Curtosis, en donde se puede deducir que hay una diferencia notable debido al desgaste medio de la bomba y al aceite de mayor viscosidad, lo que corrobora los resultados del análisis ANOVA anterior.

Tabla 10. Comparación de las características temporales 1600 RPM

Fuente: Los Autores

| CARACTERISTICA | MUESTRA | | |
|------------------------|---------------|---------------|-------------|
| | BN-1600-10w30 | BM-1600-20w50 | |
| Varianza | 1,72E-05 | 1,18E-05 | |
| Desviación STD | 0,004143525 | 0,003431919 | |
| Potencia | 0,017168981 | 0,011778308 | |
| Energía | 8,80E-05 | 7,04E-05 | |
| Curtosis | 3,394665448 | 4,487244415 | |
| Asimetría | 0,011591965 | 0,245675019 | |
| RMS | 0,004143538 | 0,003431946 | |
| Factor de cresta | 6,360140383 | 6,322359282 | |
| AMPLITUD FRECUENCIA | 1 X | 0,000280262 | 0,000335145 |
| | 0,5 X | 1,83889E-05 | 4,29462E-05 |
| | 2 X | 0,000141227 | 0,000109564 |
| | 3 X | 2,35321E-06 | 1,68182E-05 |
| | 4 X | 3,17307E-05 | 3,99958E-05 |

6.2.3.3 2500 RPM

En la Tabla 11 se observa como las características del espectro perteneciente a la muestra BM-2500-25W60 tiene características similares a la muestra patrón, por lo que se puede deducir que no hay una diferencia notable entre ambos espectros, debido que a pesar que existe un desgaste medio en la bomba de aceite el aceite de mayor viscosidad ayuda a compensar dicho desgaste como se mencionó en el análisis espectral.

Tabla 11. Comparación de las características temporales 2500 RPM

Fuente: Los Autores

| CARACTERISTICA | MUESTRA | | |
|------------------------|---------------|---------------|-------------|
| | BN-2500-20w50 | BM-2500-25w60 | |
| Varianza | 0,000173993 | 0,0001836 | |
| Desviación STD | 1,32E-02 | 1,28E-02 | |
| Potencia | 0,173993578 | 0,117507882 | |
| Energía | 0,000891676 | 0,0006022 | |
| Curtosis | 3,281432295 | 3,522017646 | |
| Asimetría | 0,004350574 | 0,040738546 | |
| RMS | 0,013190633 | 0,010840081 | |
| Factor de cresta | 4,784482277 | 5,227925974 | |
| AMPLITUD FRECUENCIA | 1 X | 0,000412722 | 0,00039968 |
| | 0,5 X | 0,000152165 | 0,000118235 |
| | 2 X | 0,001301042 | 0,000887587 |
| | 3 X | 7,78914E-05 | 6,06518E-05 |
| | 4 X | 3,18619E-05 | 5,43216E-05 |

6.3 Análisis de Componentes Principales ACP

El método de Componentes Principales es un procedimiento que busca reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables correlacionadas para buscar nuevas variables no correlacionadas que ayuden a una mejor interpretación de los resultados.

Las nuevas variables son conocidas como componentes principales, en donde la primera componente es la que contiene la mayor variabilidad del grupo de datos. [20]

El análisis de componentes principales no requiere la suposición de normalidad multivariante de los datos, pero si esto se llegara a cumplir puede darse una interpretación más profunda de los componentes encontrados. [21]

Aplicaremos el método de ACP a las características espectrales más relevantes de los eventos para los regímenes de 700, 1600 y 2500 RPM como se indica en la Tabla 12.

Tabla 12. Componentes a analizar por ACP

Fuente: Los Autores

| RÉGIMEN DE GIRO | 700 RPM | 1600 RPM | 2500 RPM |
|------------------------|---|-----------------|--|
| MUESTRAS | BN-700-20W50 | BN-1600-10W30 | BN-2500-20W50 |
| | BM-700-10W30 | BN-1600-25W60 | BM-2500-10W30 |
| | BM-700-25W60 | BM-1600-20W50 | BM-2500-25W60 |
| | BV-700-20W50 | BM-1600-10W30 | BV-2500-20W50 |
| | | BV-1600-25W60 | |
| CARACTERÍSTICAS | <ul style="list-style-type: none"> • Varianza • Potencia • Energía • Curtosis • Asimetría • RMS | | <ul style="list-style-type: none"> • Factor de cresta • 1 X • 0,5 X • 2 X • 3 X |

El método de ACP fue utilizado en esta investigación para obtener el comportamiento de las características de las señales vibratorias (obtenidas por la transformada de Fourier). Este análisis se realizó en cada régimen de giro del motor, y con la ayuda de un software estadístico, que nos dio las gráficas necesarias para este análisis.

6.3.1 ACP para un régimen de 700 RPM

Introducimos en el software estadístico las características de los espectros de vibración a 700 revoluciones ANEXO 3, de esta manera obtuvimos valores y vectores propios de la matriz de correlación, valores que se pueden apreciar en la Tabla 13

Tabla 13. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 700 rpm.

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 | CP 8 | CP 9 | CP 10 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Valor propio | 5,2714 | 1,9172 | 1,3741 | 0,9871 | 0,7642 | 0,6376 | 0,3983 | 0,3519 | 0,2971 | 0,0012 |
| Proporción | 0,439 | 0,16 | 0,115 | 0,082 | 0,064 | 0,053 | 0,033 | 0,029 | 0,025 | 0,00 |
| Acumulada | 0,439 | 0,599 | 0,714 | 0,796 | 0,859 | 0,913 | 0,946 | 0,975 | 1 | 1 |

Estos valores, junto con la gráfica de sedimentación, Figura 23, sirven para determinar el número de componentes a utilizar, para así abarcar la mayor cantidad de información

del evento [12]. Según el criterio de Káiser, para obtener la mayor cantidad de información, se deben conservar los componentes principales con valores propios mayores a 1 [24], en la Tabla 13 se aprecia que estos valores son los tres primeros. La Figura 23 También muestra que, a partir del tercer componente, los valores no varían en gran medida, por lo que se concluye que para este análisis son necesarios tres componentes principales, los cuales nos dan el 71,4% de la información. El componente 1 nos da el 43,9%, el componente 2 el 16%, y el componente 3 el 11,5% de la información.

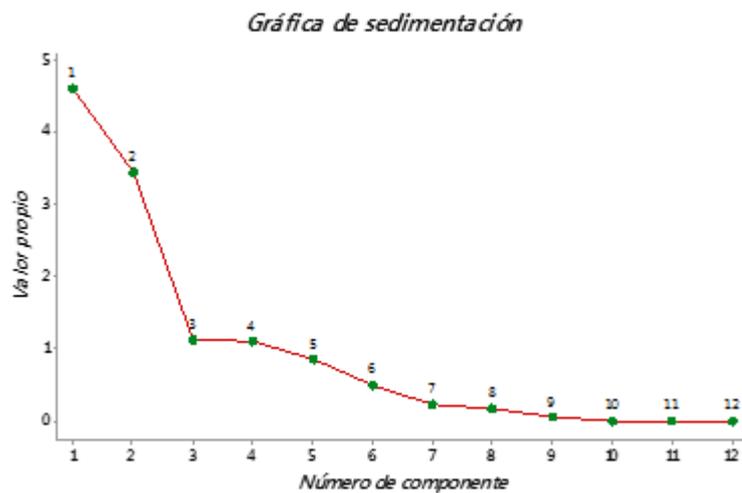


Figura 23. Gráfica de sedimentación para 700 rpm

Fuente: Los Autores

Si tomamos en cuenta el hecho de que, de las tres componentes, las dos primeras componentes principales abarcan una gran información de los eventos a 700 rpm, la gráfica de puntuaciones que se aprecia en la Figura 24 nos puede indicar cuál es la tendencia de cada uno de los tratamientos realizados (espacio tomado por cada tratamiento o individuo en el espacio de las componentes principales) [21], en las componentes 1 y 2 a 700 rpm. Así se puede apreciar que existen tres grupos. El primero un grupo con solamente tratamientos BM-700-25W60, esto indica similitud en los valores solamente de este tratamiento. El segundo grupo con tratamientos BM-700-10W30, que también indica una similitud en los valores solamente de este tratamiento. El tercer grupo que sería una mezcla entre los tratamientos BV-700-20W50 y BN-700-20W50, esto indica que estos dos tratamientos tienen valores similares. Además, existe un valor atípico del tratamiento BM-700-10W30 en la componente 1.

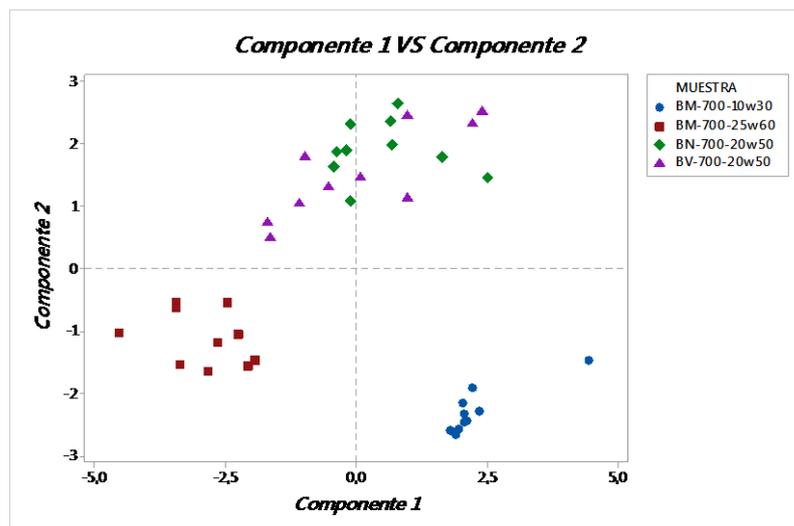


Figura 24. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 700 rpm.

Fuente: Los Autores

En la Figura 25 se puede apreciar, que no existen agrupaciones de valores para la componente 3, pero existen dos valores atípicos en el tratamiento BV-700-20W50.

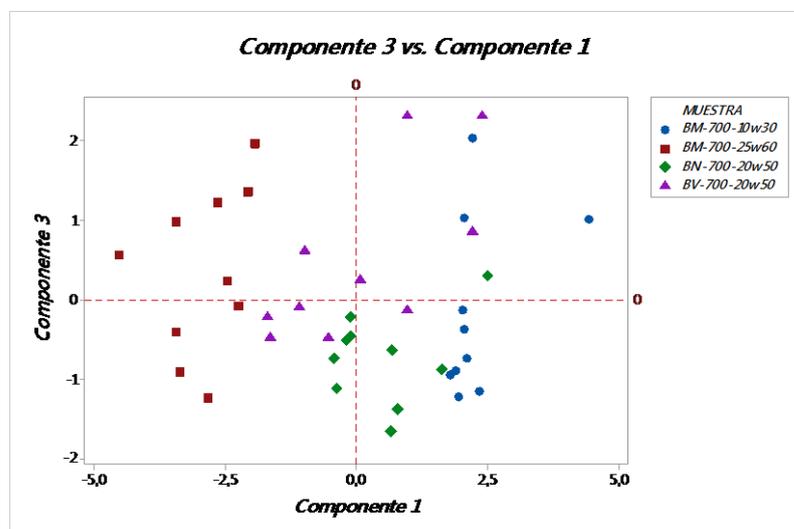


Figura 25. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 700 rpm

Fuente: Los Autores

También se obtuvieron los componentes principales Tabla 14, combinaciones lineales que servirán para explicar la variabilidad de los datos, las variables que tengan valores absolutos altos en estos coeficientes, son las que tienen mayor importancia o influencia

[20], estos datos, además, al ajustarlos, sirven para obtener las puntuaciones en la Figura 26, y la Figura 27.

Tabla 14. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 700 rpm.

Fuente: Los Autores

| Variable | PC1 | PC2 | PC3 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Varianza | 0,455017478 | 0,08874388 | 0,024843089 |
| Potencia | 0,455017668 | 0,088732351 | 0,024958681 |
| Energía | 0,455017668 | 0,088732351 | 0,024958682 |
| Curtosis | 0,219297447 | -0,446552191 | 0,052992043 |
| Asimetría | -0,202079518 | 0,45870443 | 0,056385323 |
| RMS | 0,455261342 | 0,093619329 | 0,01594188 |
| Factor de cresta | 0,093201506 | -0,432140468 | 0,331429347 |
| Amplitud 1X | -0,041577655 | 0,23587114 | 0,536568556 |
| Amplitud 0,5X | 0,074296169 | 0,435261594 | -0,215476937 |
| Amplitud 2X | 0,101822084 | 0,336890107 | 0,477941312 |
| Amplitud 3X | -0,235992046 | -0,031777297 | 0,297038034 |
| Amplitud 4X | -0,026294882 | -0,107035025 | 0,480681094 |

La Figura 26 corrobora lo observado en la Tabla 14, se puede observar que en la componente 1, los variables que más variaron en los eventos a 700 rpm son la varianza (0,45), la potencia (0,45), la energía (0,45) y la RMS (0,45). En la componente 2 lo hacen de una manera positiva la asimetría (0,45), y la amplitud 0, 5X (0,43), mientras que de una manera negativa lo hacen la Curtosis (-0,44), y el factor de cresta (-0,43). Este comportamiento en la componente 2 nos indica que mientras los valores de asimetría y amplitud 0,5 X son altos, los valores de la Curtosis y el factor de cresta van a ser bajos, y viceversa. También se observa que la Energía, Potencia, RMS, y Varianza son características que nos dan una misma información, por lo que pueden ser dependientes entre sí.

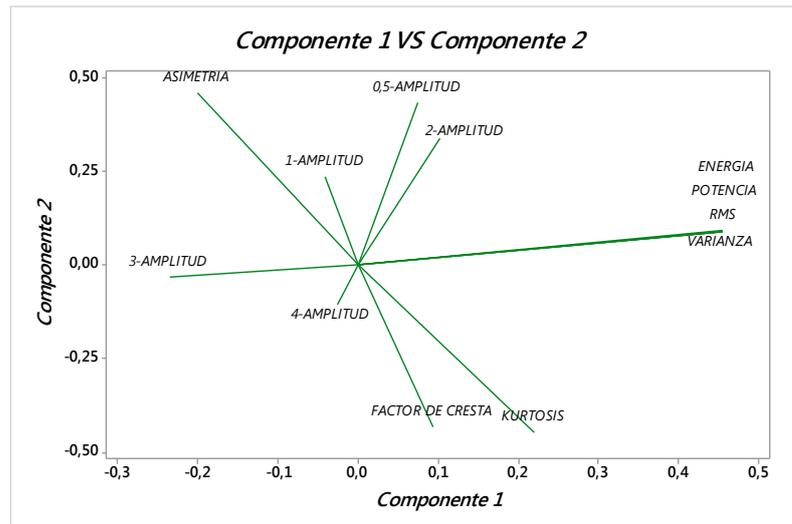


Figura 26. Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 700 rpm.

Fuente: Los Autores

En la Figura 27 podemos apreciar el comportamiento de la componente 1, ya analizada anteriormente, y la componente 3. Se observa en la componente 3 que las variables amplitud 1X (0,53), amplitud 2X (0,47) y amplitud 4X (0,48) son las que más varían.

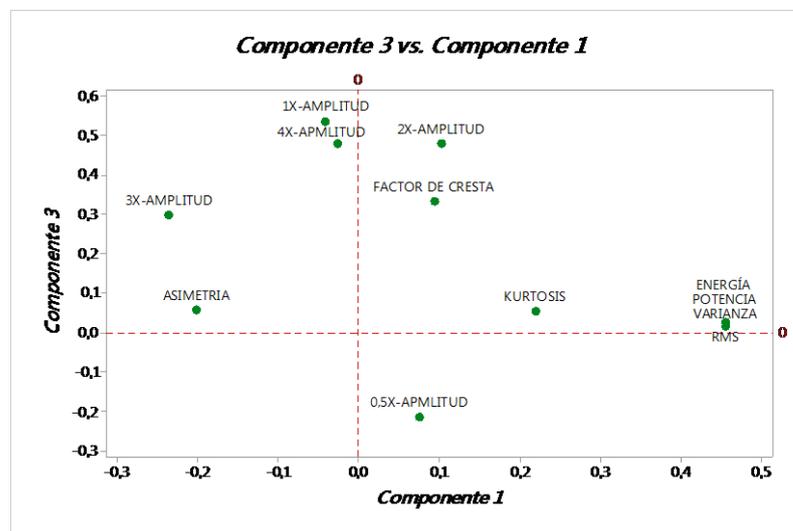


Figura 27. Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 700 rpm.

Fuente: Los Autores

6.3.2 ACP para un régimen de 1600 RPM

Ahora introducimos en el software estadístico las características de los espectros de vibración a 1600 revoluciones ANEXO 3, de esta manera obtuvimos valores y vectores propios de la matriz de correlación, valores que se pueden apreciar en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 1600 rpm

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 | CP 8 | CP 9 | CP 10 |
|--------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valor propio | 4,5429 | 3,5064 | 1,222 | 0,9515 | 0,8082 | 0,6518 | 0,1778 | 0,1013 | 0,0362 | 0,0019 |
| Proporción | 0,379 | 0,292 | 0,102 | 0,079 | 0,067 | 0,054 | 0,015 | 0,008 | 0,003 | 0,00 |
| Acumulada | 0,379 | 0,671 | 0,773 | 0,852 | 0,919 | 0,974 | 0,988 | 0,997 | 1 | 1 |

Estos valores, junto con la gráfica de sedimentación, Figura 28 nos indican que son necesarios tres componentes principales para abarcar la mayor cantidad de información. La Figura 28 muestra que, a partir del tercer componente, los valores no varían en gran medida. Estos componentes principales nos dan el 77,3% de la información. El componente 1 nos da el 37,9%, el componente 2 el 29,2%, y el componente 3 el 10,2% de la información.

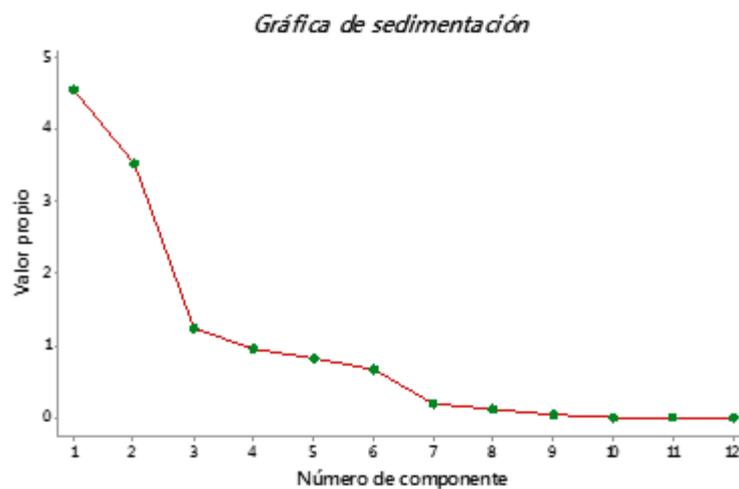


Figura 28. Gráfica de sedimentación para 1600 rpm

Fuente: Los Autores

Así mismo como en los anteriores tratamientos, la gráfica de puntuaciones que se aprecia en la Figura 29 nos indica cuál es la tendencia de cada uno de los tratamientos realizados a 1600 rpm. Así se puede apreciar que existen cuatro grupos. El primero un grupo con solamente tratamientos BM-1600-20W50, esto indica similitud en los valores solamente de este tratamiento. El segundo grupo con tratamientos BV-1600-25W60, que también indica una similitud en los valores solamente de este tratamiento. El tercer grupo con tratamientos BV-1600-10W30, que también indica una similitud en los valores solamente de este tratamiento. El cuarto grupo que sería una mezcla entre los tratamientos BN-1600-10W30 y BN-1600-25W60, esto indica que estos dos tratamientos tienen valores similares. Además, no se muestran valores atípicos en estos tratamientos.

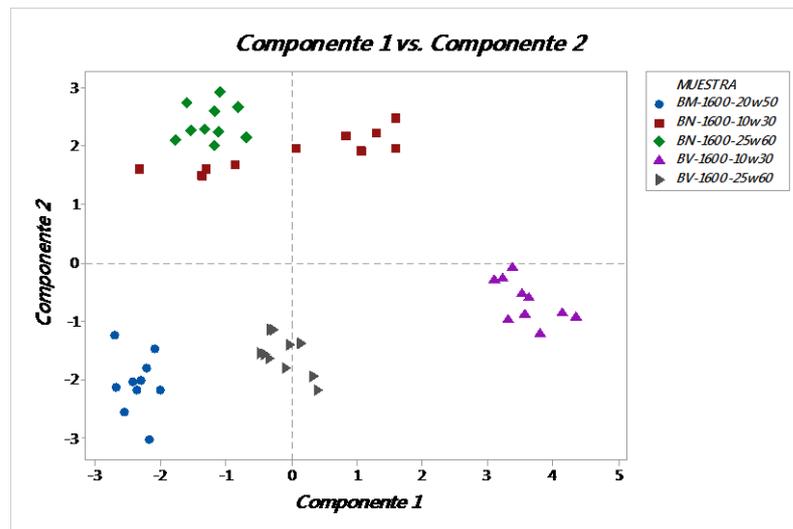


Figura 29. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 1600 rpm.

Fuente: Los Autores

En la Figura 30 se puede apreciar, que no existen agrupaciones de valores para la componente 3, así mismo no existen valores atípicos.

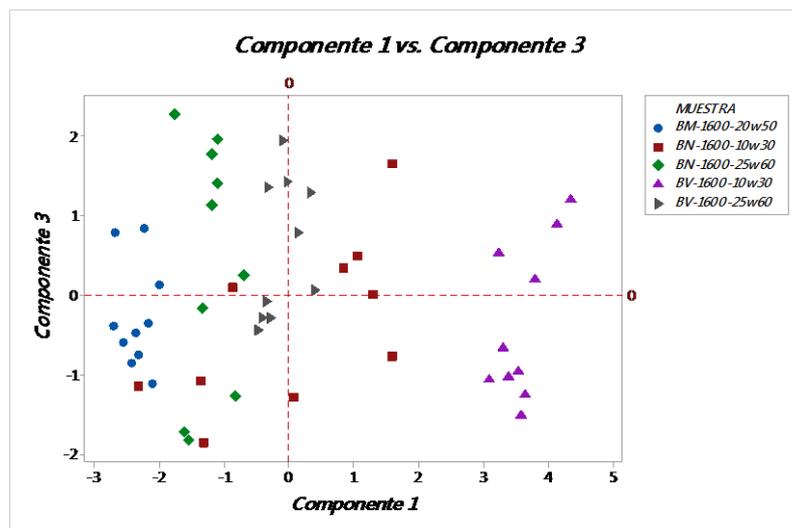


Figura 30. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 1600 rpm.

Fuente: Los Autores

También se obtuvieron los componentes principales Tabla 16, y sus puntuaciones en la Figura 31, y la Figura 32.

Tabla 16. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 1600 rpm.

Fuente: Los Autores

| Variable | PC1 | PC2 | PC3 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Varianza | 0,456636394 | 0,104340277 | -0,062377168 |
| Potencia | 0,4566364 | 0,104339946 | -0,062379626 |
| Energía | 0,4566364 | 0,104339946 | -0,062379626 |
| Curtosis | 0,102999766 | -0,504019533 | -0,046658974 |
| Asimetría | 0,118949788 | -0,484171663 | -0,036014991 |
| RMS | 0,452665181 | 0,128656009 | -0,046938821 |
| Factor de cresta | -0,073850889 | -0,497704474 | -0,122919955 |
| Amplitud 1X | 0,315932907 | -0,330393777 | -0,017937465 |
| Amplitud 0,5X | 0,08129092 | -0,242995641 | 0,379591247 |
| Amplitud 2X | -0,009096181 | 0,038682091 | 0,763428358 |
| Amplitud 3X | -0,079682302 | -0,17977937 | -0,17564601 |
| Amplitud 4X | 0,162720777 | -0,112230131 | 0,457661774 |

En la Figura 31 se puede observar que en la componente 1, los variables que más variaron en los eventos a 1600 rpm son la varianza (0,45), la potencia (0,45), la energía

(0,45) y la RMS (0,45). Se observa que estas variables nos dan una misma información, por lo que pueden ser dependientes entre sí. En la componente 2 las variables que más peso tienen son la asimetría (-0,48), la Curtosis (-0,50), y el factor de cresta (-0,49), todos estos influyen negativamente en la componente.

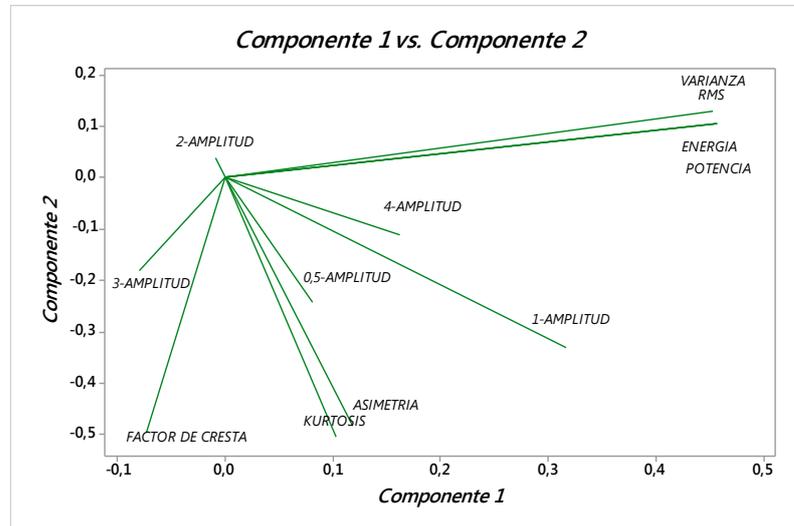


Figura 31. Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 1600 rpm

Fuente: Los Autores

En la Figura 32 podemos apreciar el comportamiento de la componente 1, ya analizada anteriormente, y la componente 3. Se observa en la componente 3 que la variable amplitud 2X (0,71) es la que más influye en esta componente.

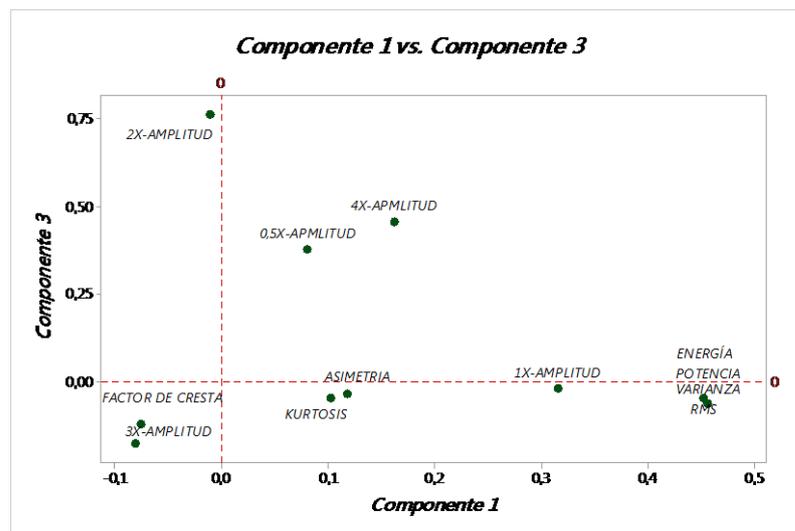


Figura 32. Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 1600 rpm.

Fuente: Los Autores

6.3.3 ACP para un régimen de 2500 RPM

Para este análisis introducimos en el software estadístico las características de los espectros de vibración a 2500 revoluciones ANEXO 3, de esta manera obtuvimos valores y vectores propios de la matriz de correlación, valores que se pueden apreciar en la Tabla 17

Tabla 17. Valores y vectores propios de la matriz de correlación para 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

| PARÁMETRO | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 | CP 8 | CP 9 | CP 10 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valor propio | 5,2714 | 1,9172 | 1,3741 | 0,9871 | 0,7642 | 0,6376 | 0,3983 | 0,3519 | 0,2971 | 0,0012 |
| Proporción | 0,439 | 0,16 | 0,115 | 0,082 | 0,064 | 0,053 | 0,033 | 0,029 | 0,025 | 0,00 |
| Acumulada | 0,439 | 0,599 | 0,714 | 0,796 | 0,859 | 0,913 | 0,946 | 0,975 | 1 | 1 |

Estos valores, junto con la gráfica de sedimentación, Figura 33 nos indican que son necesarios tres componentes principales para abarcar la mayor cantidad de información. La Figura 33 muestra que, a partir del tercer componente, los valores no varían en gran medida. Estos componentes principales nos dan el 71,4% de la información. El componente 1 nos da el 43,9%, el componente 2 el 16%, y el componente 3 el 11,5% de la información.

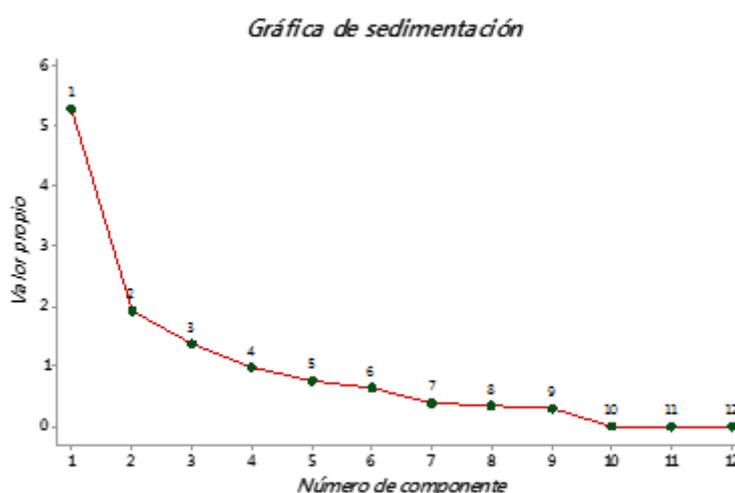


Figura 33. Gráfica de sedimentación para 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

Así mismo como en los anteriores tratamientos, la gráfica de puntuaciones que se aprecia en la Figura 34 nos indica cuál es la tendencia de cada uno de los tratamientos

realizados a 2500 rpm. Así se puede apreciar que existen grupos, pero estos no son tan notorios como en los anteriores tratamientos. El primero un grupo con tratamientos BM-1600-25W60, esto indica similitud en los valores solamente de este tratamiento, opuesto a este en la componente 1 está el segundo grupo con tratamientos BN-2500-20W50, que también indica una similitud en los valores solamente de este tratamiento, exceptuando tres, que serían valores atípicos a este tratamiento. El tercer grupo, que sería una combinación entre los tratamientos BM-2500-10W30 y BV-1600-20W50, esto indica que estos dos tratamientos tienen valores similares. En la componente 1 existe un valor atípico BN-2500-20W50, así mismo para este tratamiento existen dos valores atípicos en la componente 2.

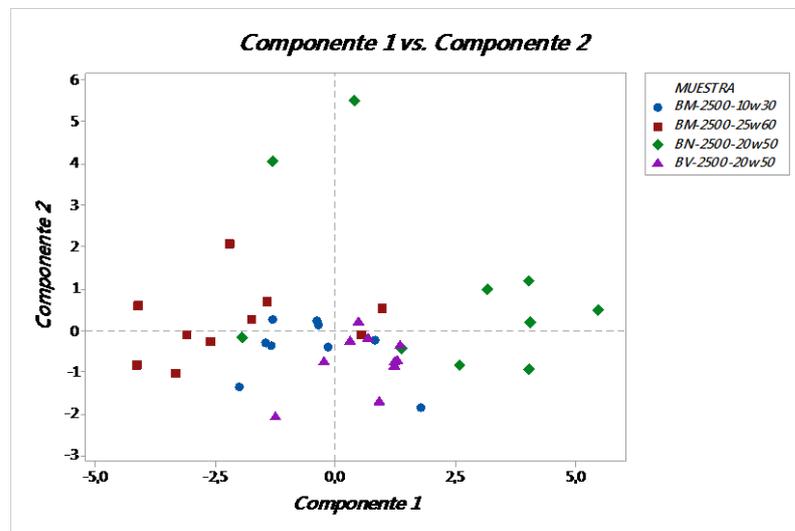


Figura 34. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP2, para 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

En la Figura 35 se puede apreciar, que no existen agrupaciones de valores para la componente 3, así mismo no existen valores atípicos.

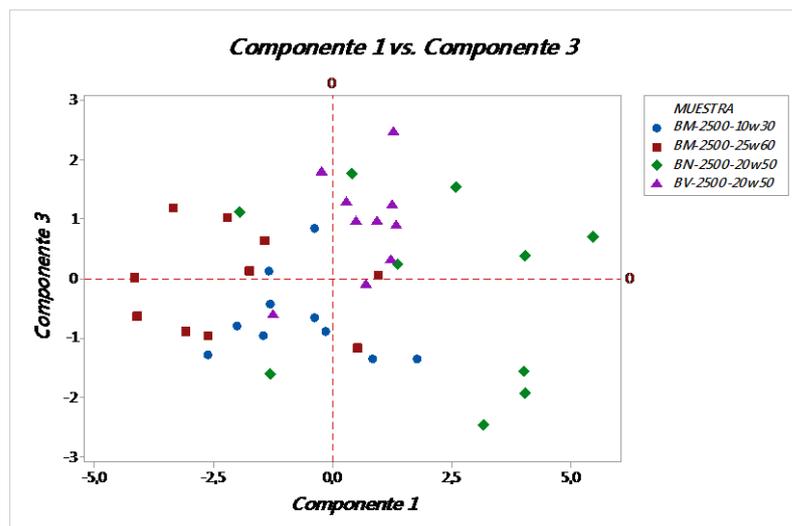


Figura 35. Gráfica de puntuaciones CP1 vs CP3, para 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

También se obtuvieron los componentes principales Tabla 18, y sus puntuaciones en la Figura 36, y la Figura 37.

Tabla 18. Valores de los coeficientes de los componentes principales para 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

| Variable | PC1 | PC2 | PC3 |
|------------------|--------------|-------------|--------------|
| Varianza | 0,414482339 | 0,08747809 | -0,215065687 |
| Potencia | 0,414484154 | 0,087478226 | -0,215053416 |
| Energía | 0,414484154 | 0,087478226 | -0,215053416 |
| Curtosis | -0,077204487 | 0,538248189 | 0,133365665 |
| Asimetría | 0,197060141 | -0,23413455 | 0,333754893 |
| RMS | 0,415370011 | 0,088572813 | -0,205910933 |
| Factor de cresta | -0,263574877 | 0,400547577 | 0,000589436 |
| Amplitud 1X | 0,314517368 | 0,025681248 | 0,342768996 |
| Amplitud 0,5X | -0,153185525 | 0,500766985 | -0,258002128 |
| Amplitud 2X | 0,180943643 | 0,284161388 | 0,038687576 |
| Amplitud 3X | 0,134187589 | 0,065280545 | 0,56597489 |
| Amplitud 4X | 0,15709576 | 0,357481126 | 0,428710195 |

En la Figura 36 se puede observar que en la componente 1, los variables que más variaron en los eventos a 2500 rpm son la varianza (0,41), la potencia (0,41), la energía

(0,41) y la RMS (0,41). Se observa que estas variables nos dan una misma información, por lo que pueden ser dependientes entre sí. En la componente 2 las variables que más peso tienen son el factor de cresta (0,40), la Curtosis (0,53), y la amplitud 0,5 X (0,50).

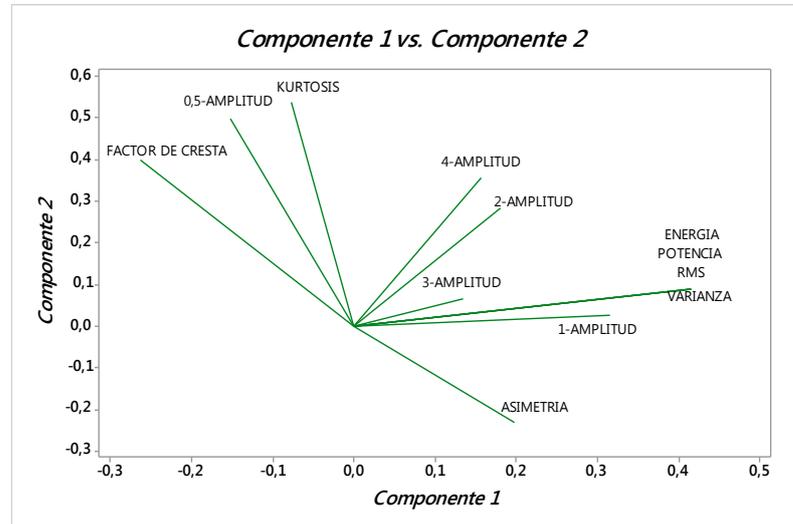


Figura 36. Gráfica de cargas CP1 vs CP2, comportamiento de las variables en 2500 rpm

Fuente: Los Autores

En la Figura 37 podemos apreciar el comportamiento de la componente 1, ya analizada anteriormente, y la componente 3. Se observa en la componente 3 que la variable amplitud 4X (0,42) y la amplitud 3X (0,42) son las de mayor peso en esta componente.

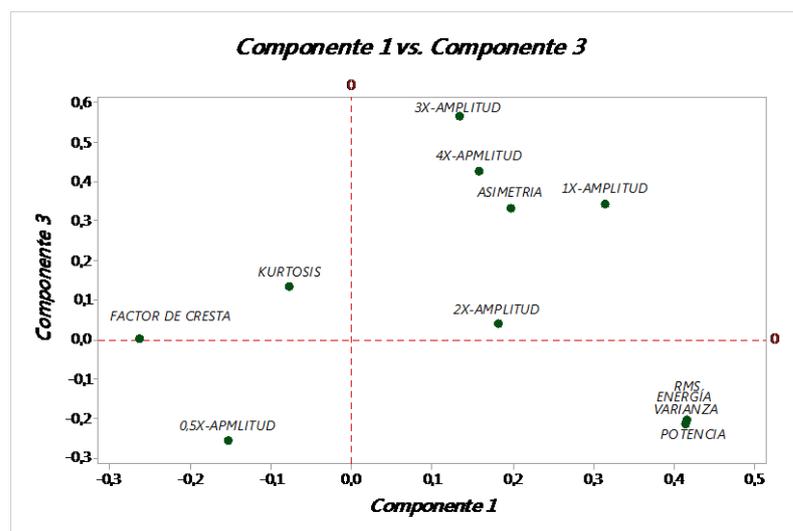


Figura 37. Gráfica de cargas CP1 vs CP3, comportamiento de las variables en 2500 rpm

Fuente: Los Autores

6.4 Discusión de los resultados obtenidos por el ACP

6.4.1 Discusión de Resultados del ACP A 700 RPM

Resumiendo, la Tabla 19 muestra las variables con más influencia en los tratamientos del motor, como y como estas influyen en cada tratamiento a 700 RPM.

Tabla 19. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 700 rpm.

Fuente: Los Autores

| GRÁFICA | PC1 | PC2 | PC3 |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Cargas | Varianza (+) | Asimetría (+) | Amplitud 1X (+) |
| | Potencia (+) | Amplitud 0,5 X (+) | Amplitud 2X (+) |
| | Energía (+) | Curtosis (-) | Amplitud 4X (+) |
| | RMS (+) | Factor de cresta (-) | |
| Puntuaciones | BM-700-10w30 (+) | BN-700-20W50 y BV-700-20W50 (+) | No existen grupos |
| | BM-700-25w60 (-) | | |
| | Valor atípico en BM- 700-10W30 | BM-700-10w30 (-) | 2 Valores atípicos en BV-700-20W50 |
| | | No existen valores atípicos | |

Según lo observado en la Tabla 19, los tratamientos con una bomba a medio desgaste, y funcionando a 700 rpm, varía sus valores en varianza, potencia, energía, y RMS al utilizar un aceite 10W30 o 25W60. Utilizando un aceite 10W30 los valores de las variables antes descritas son altos, por el contrario, al utilizar un aceite 25W60, estos valores bajan.

Así mismo, en la Tabla 19 se puede apreciar, que los tratamientos con una bomba sin desgaste, y una bomba con un desgaste excesivo, funcionando a 700 rpm, y con un aceite 20W50, tiene valores muy diferentes en Asimetría, Amplitud 0,5 X, Curtosis y factor de cresta, con respecto a una bomba con medio desgaste, funcionando a 700 rpm, y con un aceite 10W30. Utilizando el aceite 20W50 en una bomba ya sea nueva o con un desgaste excesivo, provoca valores altos en asimetría y amplitud 0,5 X, y valores bajos en Curtosis y factor de cresta. Por el contrario, utilizando una bomba de

desgaste medio, con un aceite 10W30, provoca una disminución en los valores de asimetría y amplitud 0,5 X, pero un aumento en los valores de Curtosis y factor de cresta. Además, sea cualquier el tratamiento a 700 rpm, tiene valores altos en amplitud 1 X, amplitud 2 X, y amplitud 4X.

Además, existen valores atípicos, uno en BM-700-10W30 y dos en BV-700-20W50, lo que indica que, en estos tratamientos, las características son muy diferentes a los demás tratamientos. No se deberían considerar estos tratamientos para futuras investigaciones.

6.4.2 Discusión de Resultados del ACP A 1600 RPM

La Tabla 20 muestra las variables con más influencia en los tratamientos del motor, como y como estas influyen en cada tratamiento a 1600 RPM.

Tabla 20. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 1600 rpm

Fuente: Los Autores

| GRÁFICA | PC1 | PC2 | PC3 |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Cargas | Varianza (+) | Asimetría (-) | Amplitud 2 X (+) |
| | Potencia (+) | Curtosis (-) | |
| | Energía (+) | Factor de cresta (-) | |
| | RMS (+) | | |
| Puntuaciones | BV-1600-10w30 (+) | BN-1600-25W60 | No existen grupos ni valores atípicos |
| | BM-1600-20w50 (-) | BM-1600-20w50 (-) | |
| | No existen valores atípicos | No existen valores atípicos | |

En la Tabla 20 se puede apreciar que los tratamientos con una bomba con alto desgaste, funcionando a 1600 rpm, y con un aceite 10W30, tiene valores altos en varianza, potencia, energía, y RMS. Utilizando una bomba con desgaste medio y con un aceite 20W50 los valores de las variables antes descritas bajan.

Así mismo, en la Tabla 20 se puede apreciar, que los tratamientos con una bomba sin desgaste, con un aceite 25W60, tiene valores bajos en Asimetría, Curtosis y factor de

cresta. Caso contrario es el de una bomba con desgaste medio, y que utiliza un aceite 20W50, que tiene valores altos en las variables antes descritas. Además, sea cualquier el tratamiento a 1600 rpm, tiene valores altos en amplitud 2 X. No existen valores atípicos en cada tratamiento

6.4.3 Discusión de Resultados del ACP A 2500 RPM

La Tabla 21 muestra las variables con más influencia en los tratamientos del motor, como y como estas influyen en cada tratamiento a 2500 RPM.

Tabla 21. Influencia de las variables y tratamientos en los CP, a 2500 rpm.

Fuente: Los Autores

| GRÁFICA | PC1 | PC2 | PC3 |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Cargas | Varianza (+) | Curtosis (+) | Amplitud 3X (+) |
| | Potencia (+) | Factor de cresta (+) | |
| | Energía (+) | Amplitud X0,5 (+) | Amplitud 4X (+) |
| | RMS (+) | | |
| Puntuaciones | BN-2500-20w50 (+) | No existen grupos | No existen grupos ni valores atípicos |
| | BM-2500-25w60 (-) | | |
| | Valor atípico en BN-2500-20W50 | 2 Valores atípicos en BN-2500-20W50 | |

En la Tabla 21 se puede apreciar que los tratamientos con una bomba sin desgaste, funcionando a 2500 rpm, y con un aceite 20W50, tiene valores altos en varianza, potencia, energía, y RMS. Utilizando una bomba con desgaste medio y con un aceite 25W60 los valores de las variables antes descritas bajan.

Así mismo, en la Tabla 21 se puede apreciar que, para cualquier tratamiento, hay valores altos en Curtosis, factor de cresta, amplitud 0,5X, amplitud 3X, y amplitud 4X. Además, existen tres valores atípicos en BN-2500-20W50, por lo que no se deberían considerar estos tratamientos para futuras investigaciones.

6.5 Análisis de superficie de respuesta

Para complementar el estudio se realizará un análisis de validación del diseño experimental, se realizó un diseño de superficie de respuesta de Box Behnken, ya que se tienen tres factores a estudiar. ANEXO 4 [13].

6.5.1 Análisis de Componente principal 1 (CP1)

Ya al contar con los valores de las componentes principales en cada régimen de giro, se pudieron introducir estos datos en el software estadístico, y así interpretar el comportamiento de estas componentes en el experimento.

Primero analizamos la Tabla 22 de análisis de varianza, para saber qué efectos son significativos. Este análisis lo realizamos mediante el valor p. Si este valor p es menor o igual a 0,05 indica que el efecto es significativo en el experimento [13]. Se puede observar que los efectos lineales RPM y aceite son significativos, con lo que se concluye que el CP1 varía dependiendo de las RPM o el aceite. Todos los efectos cuadráticos son significativos, con lo que se concluye que la relación RPM-CP1, bomba-CP1, y aceite-CP1 siguen una línea curva. Finalmente, la interacción RPM-aceite es significativa, concluyendo que el efecto de la RPM en el CP1 depende del aceite.

Tabla 22. Análisis de varianza

Fuente: Los Autores

| Efecto | Valor p |
|--------------------|----------------|
| Lineal | |
| RPM | 0,000 |
| Bomba | 0,219 |
| Aceite | 0,000 |
| Cuadrático | |
| RPM*RPM | 0,017 |
| Bomba*bomba | 0,005 |
| Aceite*aceite | 0,003 |
| Interacción | |
| RPM-bomba | 0,543 |
| Rpm-aceite | 0,000 |
| Bomba-aceite | 0,941 |

A continuación, en la Figura 38 se puede apreciar cuales variables influyen más en la componente 1. Se puede apreciar que RPM es la variable que influye más, y se corrobora esto con su valor p de 0, a menores RPM están relacionados con mayores valores de la CP1, y de modo contrario mayores valores en las RPM se asocian a menores valores en la CP1. En lo que se refiere al aceite, en la Figura 38 se aprecia que esta variable no tiene mayor influencia en la CP1, pero su valor de p es de 0, por lo que se concluye que esta variable si es de importancia. En lo que se refiere al aceite, tanto en la gráfica como en su valor p de 0,219, no existe una correspondencia significativa con la CP1.

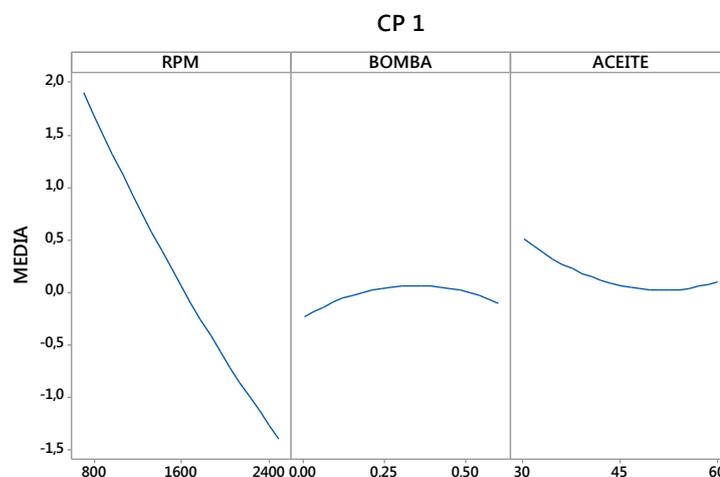


Figura 38. Gráfica de efectos principales en CP1.

Fuente: Los Autores

En la Figura 39 se puede apreciar las interacciones de las variables de entrada. Se puede observar que existe una interacción entre RPM-aceite, corroborándose lo observado en la Tabla 22 con su valor de p de 0. Esta interacción influiría en la respuesta de CP1. Las demás interacciones no influyen en el valor de CP1.

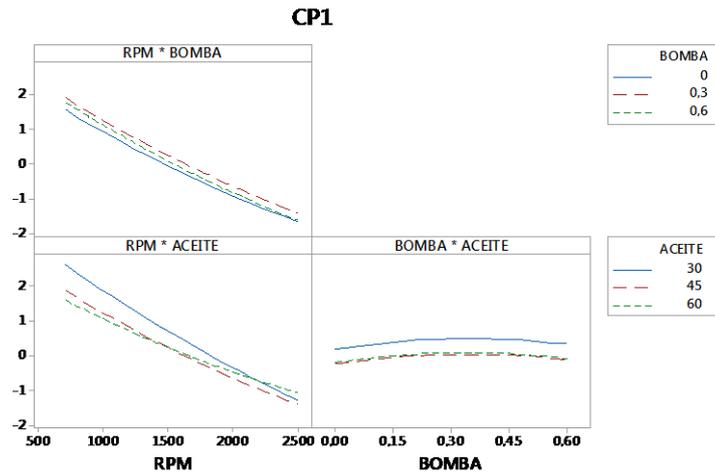


Figura 39. Gráfica de interacciones en CP1.

Fuente: Los Autores

En la gráfica de superficie, Figura 40, se puede apreciar que, con el valor fijo de la bomba a 0,3 de desgaste, CP1 toma su valor más alto a 800 RPM y utilizando un aceite 10W30, mientras que su valor más bajo se da con el mismo aceite, pero a 2500.

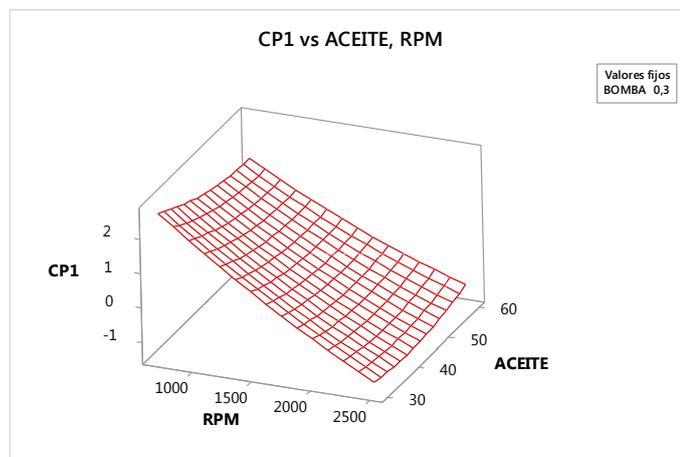


Figura 40. Gráfica de superficie CP1, valor fijo de la bomba 0,3

Fuente: Los Autores

En cambio, en la Figura 41 se puede apreciar que, con el valor fijo de 1600 RPM, CP1 toma su valor más alto con un aceite 10W30, y con una bomba con 0,3 de desgaste. Mientras tanto su valor más bajo se da con un aceite 20W50, y con una bomba sin desgaste.

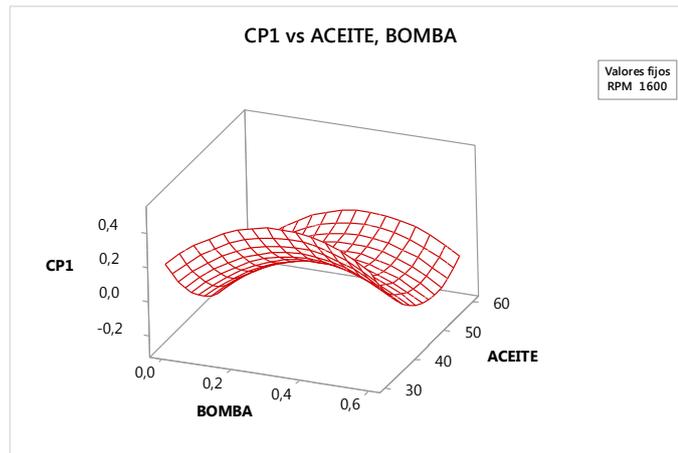


Figura 41. Gráfica de superficie CP1, valor fijo de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

Ahora en la Figura 42 se puede apreciar que, con el valor fijo de aceite 20W50, CP1 toma su valor más alto a 800 RPM, y con una bomba con 0,6 de desgaste. Mientras tanto su valor más bajo se da a 2500 RPM, y con una bomba sin desgaste.

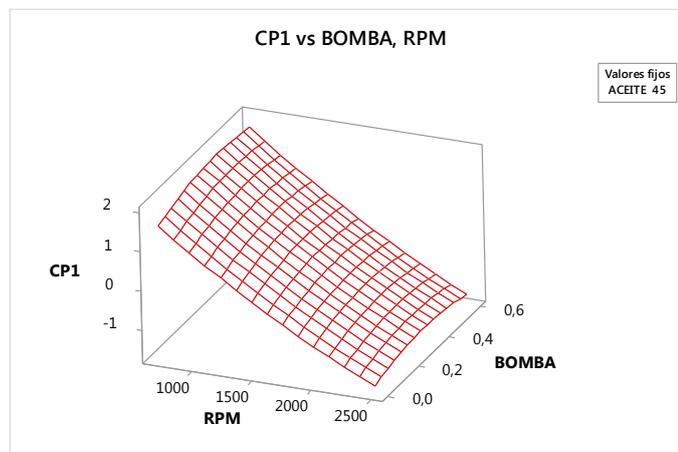


Figura 42. Gráfica de superficie CP1, valor fijo aceite 20W50

Fuente: Los Autores

6.5.2 Análisis de Componente principal 2 (CP2)

Analizamos que efectos son significativos en la Tabla 23 de análisis de varianza. Se puede observar que los efectos lineales RPM, bomba, y aceite son significativos, con lo que se concluye que el CP2 varía dependiendo de estas tres variables. Los efectos cuadráticos RPM*RPM y bomba*bomba son significativos, con lo que se concluye

que la relación RPM-CP2, y bomba-CP2 siguen una línea curva. Finalmente, la interacción RPM-aceite es significativa, concluyendo que el efecto de la RPM en el CP2 depende del aceite.

Tabla 23. Análisis de varianza

Fuente: Los Autores

| Efecto | Valor p |
|--------------------|---------|
| Lineal | |
| RPM | 0,000 |
| BOMBA | 0,007 |
| ACEITE | 0,002 |
| Cuadrado | |
| RPM*RPM | 0,000 |
| BOMBA*BOMBA | 0,000 |
| ACEITE*ACEITE | 0,577 |
| Interacción | |
| RPM*BOMBA | 0,458 |
| RPM*ACEITE | 0,000 |
| BOMBA*ACEITE | 0,882 |

En la Figura 43 se puede apreciar cuales variables influyen más en la componente 2. Se puede apreciar que RPM es la variable que influye más, y su valor p de 0, corroborando este hecho; menores RPM están relacionados con menores valores de la CP2, y de modo contrario mayores valores en las RPM se asocian a mayores valores en la CP2. En lo que se refiere a bomba y al aceite, en la Figura 43 se aprecia que estas variables no tienen mayor influencia en la CP2, pero su valor de p es de 0,007 y 0,002 respectivamente, por lo que se concluye que estas variables si son de importancia.

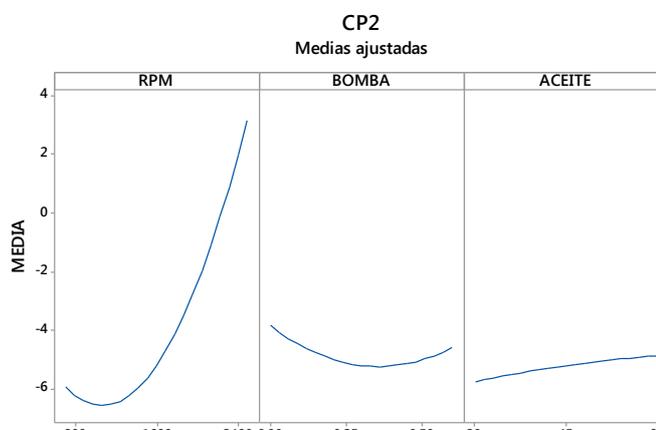


Figura 43. Gráfica de efectos principales en CP2

Fuente: Los Autores

A continuación, en la Figura 44 se puede apreciar las interacciones de las variables de entrada. Se puede observar que existe una interacción entre RPM-aceite, al existir intersección, corroborándose lo observado en la Tabla 23 con su valor de p de 0. Esta interacción influiría en la respuesta de CP2. Las demás interacciones no influyen en el valor de CP2.

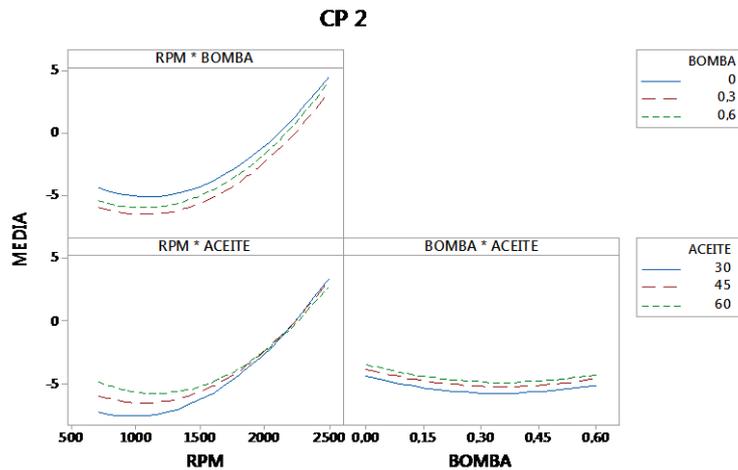


Figura 44. Gráfica de interacciones en CP2

Fuente: Los Autores

En la gráfica de superficie, Figura 45, se puede apreciar que, con el valor fijo de la bomba a 0,3 de desgaste, CP2 toma su valor más alto a 2500 RPM y utilizando un aceite 25W60, mientras que su valor más bajo se da a 800 RPM y con un aceite 10W30.

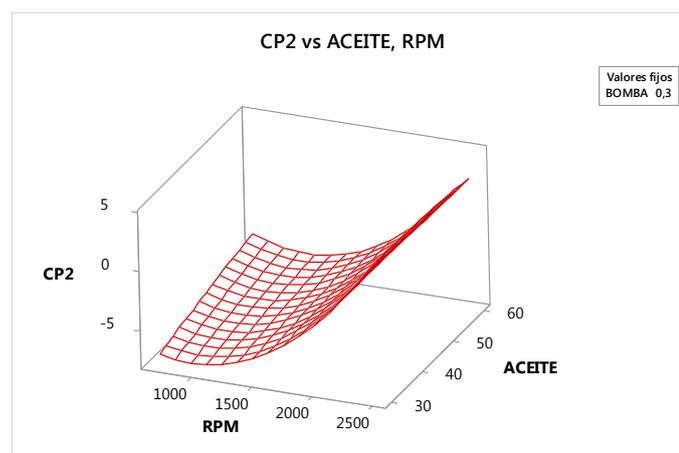


Figura 45. Gráfica de superficie CP2, valor fijo de la bomba 0,3

Fuente: Los Autores

En cambio, en la Figura 46 se puede apreciar que, con el valor fijo de 1600 RPM, CP2 toma su valor más alto con un aceite 25W60, y con una bomba sin desgaste. Mientras tanto su valor más bajo se da con un aceite 10W30, y con una bomba con 0,3 de desgaste.

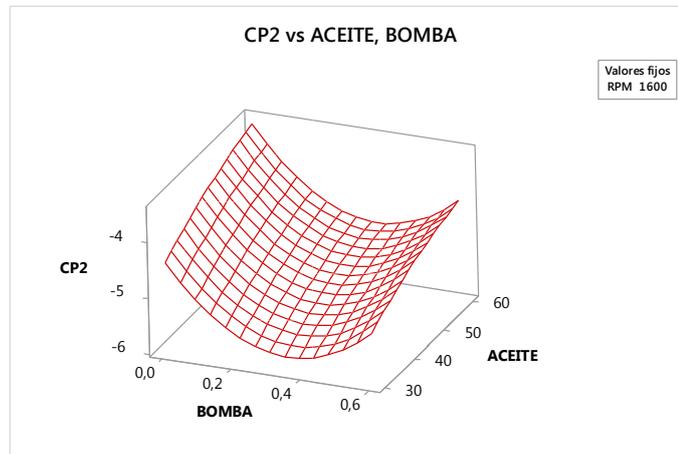


Figura 46. Gráfica de superficie CP2, valor fijo de 1600 RPM.

Fuente: Los Autores

Ahora en la Figura 47 se puede apreciar que, con el valor fijo de aceite 20W50, CP2 toma su valor más alto a 2500 RPM, y con una bomba con 0,6 de desgaste. Mientras tanto su valor más bajo se da aproximadamente a 1000 RPM, y con una bomba con 0,3 de desgaste.

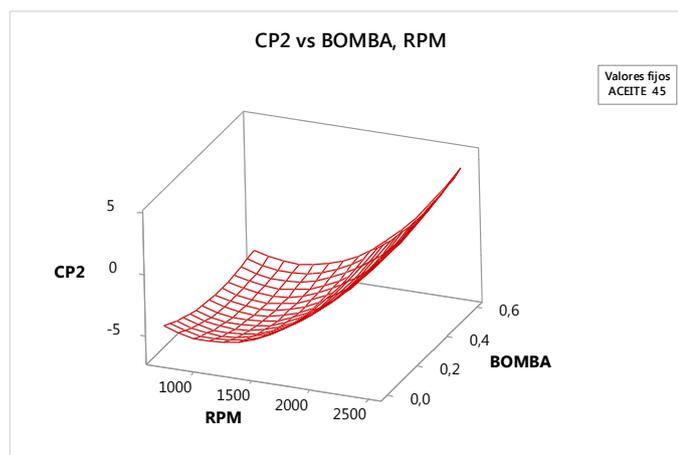


Figura 47. Gráfica de superficie CP2, valor fijo aceite 20W50

Fuente: Los Autores

6.5.3 Análisis de Componente principal 3 (CP3)

Analizamos que efectos son significativos en la Tabla 24 de análisis de varianza. Se puede observar que los efectos lineales RPM y aceite son significativos, con lo que se concluye que el CP3 varía dependiendo de estas dos variables. Los efectos cuadráticos RPM*RPM y aceite*aceite son significativos, con lo que se concluye que la relación RPM-CP3, y aceite-CP3 siguen una línea curva. Finalmente, la interacción RPM-aceite es significativa, concluyendo que el efecto de la RPM en el CP3 depende del aceite.

Tabla 24. Análisis de varianza

Fuente: Los Autores

| Efecto | Valor p |
|--------------------|----------------|
| Lineal | |
| RPM | 0,000 |
| BOMBA | 0,690 |
| ACEITE | 0,002 |
| Cuadrado | |
| RPM*RPM | 0,000 |
| BOMBA*BOMBA | 0,633 |
| ACEITE*ACEITE | 0,001 |
| Interacción | |
| RPM*BOMBA | 0,388 |
| RPM*ACEITE | 0,000 |
| BOMBA*ACEITE | 0,896 |

En la Figura 48 se puede apreciar cuales variables influyen más en la componente 3. Se puede apreciar que RPM es la variable que influye más, y su valor p de 0 corrobora este hecho; menores RPM están relacionados con mayores valores de la CP3, el menor valor de CP3 se da en aproximadamente 1800 RPM. En lo que se refiere a bomba y al aceite, en la Figura 48 se aprecia que estas variables no tienen mayor influencia en la CP3, pero el valor de p en el aceite es de 0,002, por lo que se concluye que esta variable si es de importancia.

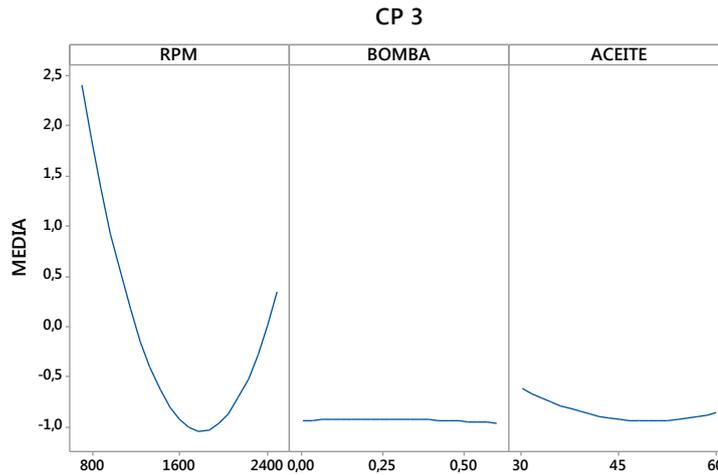


Figura 48. Gráfica de efectos principales en CP3

Fuente: Los Autores

A continuación, en la Figura 49 se puede apreciar las interacciones de las variables de entrada. Se puede observar que existe una interacción entre RPM-aceite, al existir intersección, corroborándose lo observado en la Tabla 24 con su valor de p de 0. Esta interacción influiría en la respuesta de CP3. Las demás interacciones no influyen en el valor de CP3.

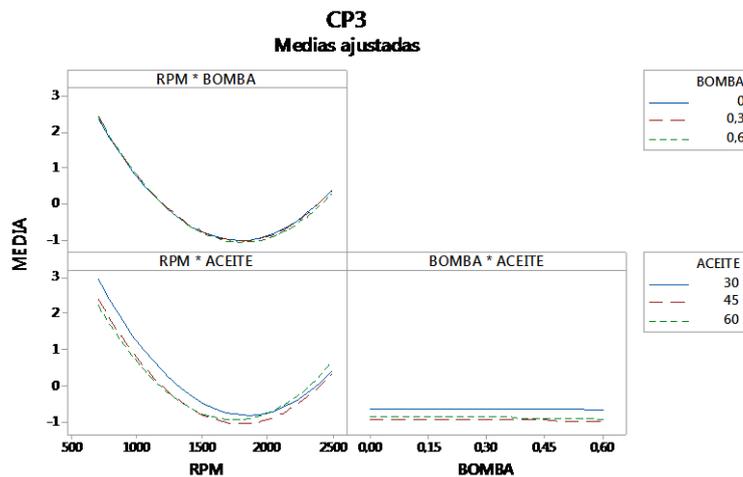


Figura 49. Gráfica de interacciones en CP3

Fuente: Los Autores

En la gráfica de superficie, Figura 50, se puede apreciar que, con el valor fijo de la bomba a 0,3 de desgaste, CP3 toma su valor más alto a 800 RPM y utilizando un

aceite 10W30, mientras que su valor más bajo se da aproximadamente a 1800 RPM y con un aceite 20W50.

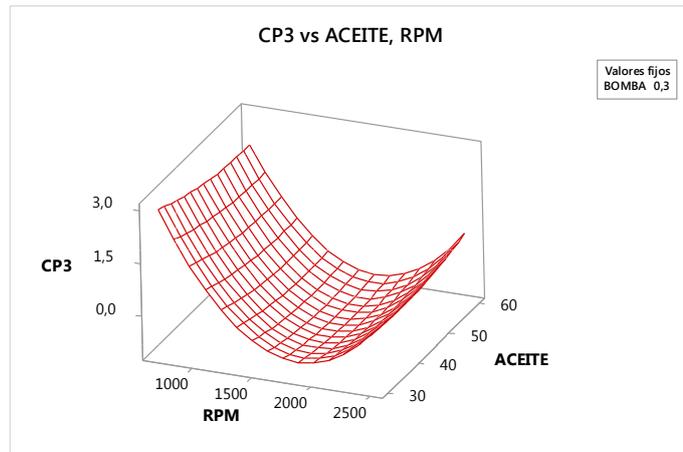


Figura 50. Gráfica de superficie CP3, valor fijo de la bomba 0,3

Fuente: Los Autores

En cambio, en la Figura 51 se puede apreciar que, con el valor fijo de 1600 RPM, CP3 toma su valor más alto con un aceite 10W30, y prácticamente con cualquier bomba. Mientras tanto su valor más bajo se da con un aceite 20W50, y prácticamente con cualquier bomba.

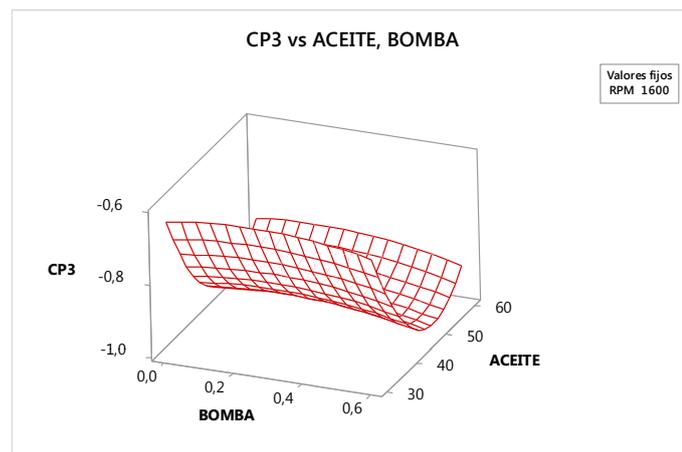


Figura 51. Gráfica de superficie CP3, valor fijo de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

Ahora en la Figura 52 se puede apreciar que, con el valor fijo de aceite 20W50, CP3 toma su valor más alto a 800 RPM, y con cualquier bomba. Mientras tanto su valor más bajo se da aproximadamente a 1800 RPM, y con cualquier bomba.

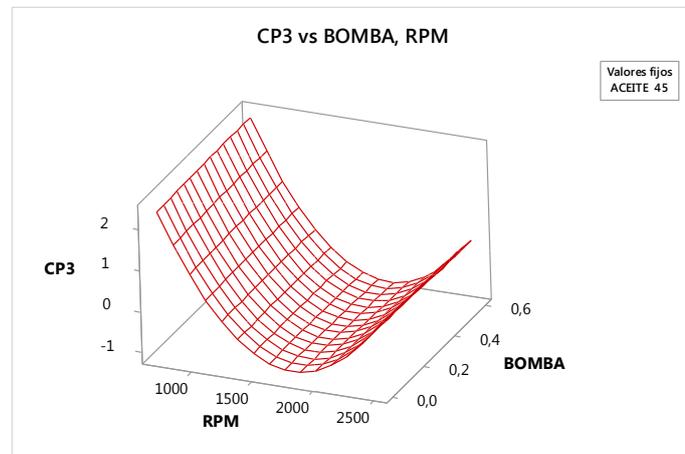


Figura 52. Gráfica de superficie CP3, valor fijo aceite 20W50

Fuente: Los Autores

6.5.4 Análisis de la Asimetría

Procedemos a analizar la asimetría, esta variable de salida en este análisis de superficie de Box Behnken es una de las que más variación tuvo. Analizamos que efectos son significativos en la Tabla 25 de análisis de varianza. Se puede observar que los efectos lineales RPM y bomba son significativos, con lo que se concluye que la varianza en el experimento varía dependiendo de estas dos variables. Los efectos cuadráticos RPM*RPM y aceite*aceite son significativos, con lo que se concluye que la relación RPM-asimetría, y aceite-asimetría siguen una línea curva. Finalmente, la interacción RPM-aceite es significativa, concluyendo que el efecto de la RPM en la varianza depende del aceite.

Tabla 25. Análisis de varianza.

Fuente: Los Autores

| Efecto | Valor p |
|--------------------|---------|
| Lineal | |
| RPM | 0,000 |
| BOMBA | 0,030 |
| ACEITE | 0,115 |
| Cuadrado | |
| RPM*RPM | 0,000 |
| BOMBA*BOMBA | 0,171 |
| ACEITE*ACEITE | 0,000 |
| Interacción | |
| RPM*BOMBA | 0,968 |
| RPM*ACEITE | 0,002 |
| BOMBA*ACEITE | 0,405 |

En la Figura 53 se puede apreciar cuales variables influyen más en la asimetría. Se puede apreciar que RPM es la variable que influye más, y su valor p de 0 corrobora este hecho; menores RPM están relacionados con menores valores de la asimetría, el mayor valor de asimetría se da en aproximadamente 1800 RPM. En lo que se refiere a bomba, se aprecia que, si tiene una influencia en la asimetría, siendo su valor p de 0,030, por lo que se concluye que esta variable si influye en la asimetría. Para el aceite se observa que también varía en la asimetría, pero su valor p de 0,115 desmiente esto, concluyendo que esta variable no es de gran influencia en la asimetría.

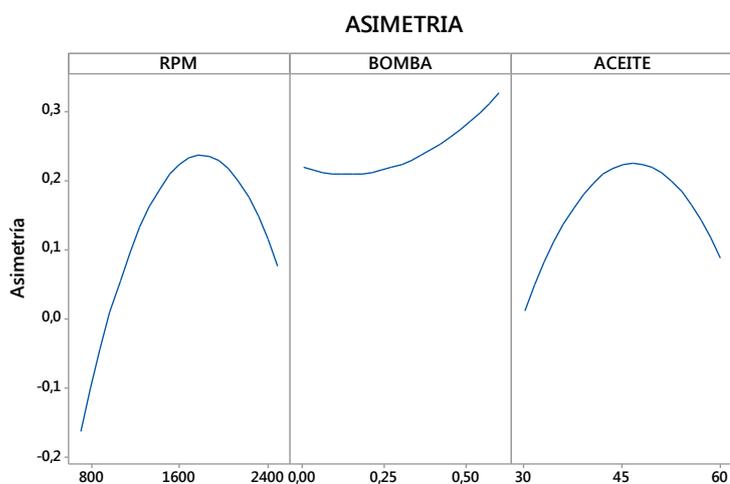


Figura 53. Gráfica de efectos principales en la Asimetría

Fuente: Los Autores

A continuación, en la Figura 54 se puede apreciar las interacciones de las variables de entrada. Se puede observar que existe una interacción entre RPM-aceite, al existir intersección, corroborándose lo observado en la Tabla 25 con su valor de p de 0,002. Esta interacción influiría en la respuesta de la asimetría. Las demás interacciones no influyen en el valor de la asimetría.

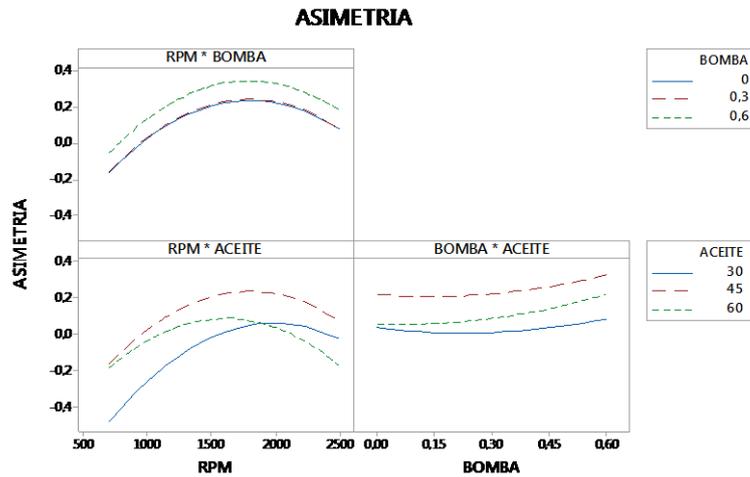


Figura 54. Gráfica de interacciones en la Asimetría.

Fuente: Los Autores

En la gráfica de superficie, Figura 55, se puede apreciar que, con el valor fijo de la bomba a 0,3 de desgaste, la asimetría toma su valor más alto aproximadamente a 1800 RPM y utilizando un aceite 20W50, mientras que su valor más bajo se da a 800 RPM y con un aceite 10W30.

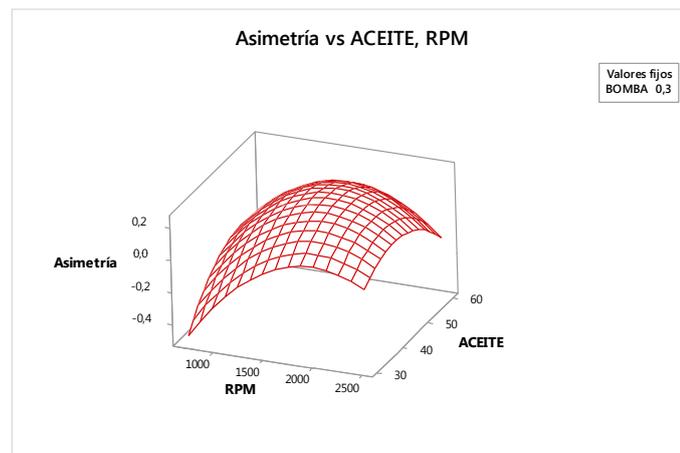


Figura 55. Gráfica de superficie de la asimetría, valor fijo de la bomba 0,3.

Fuente: Los Autores

En cambio, en la Figura 56 se puede apreciar que, con el valor fijo de 1600 RPM, la asimetría toma su valor más alto con un aceite 20W50, y con una bomba con desgaste de 0,6. Mientras tanto su valor más bajo se da con un aceite 10W30, y con una bomba con 0,3 de desgaste.

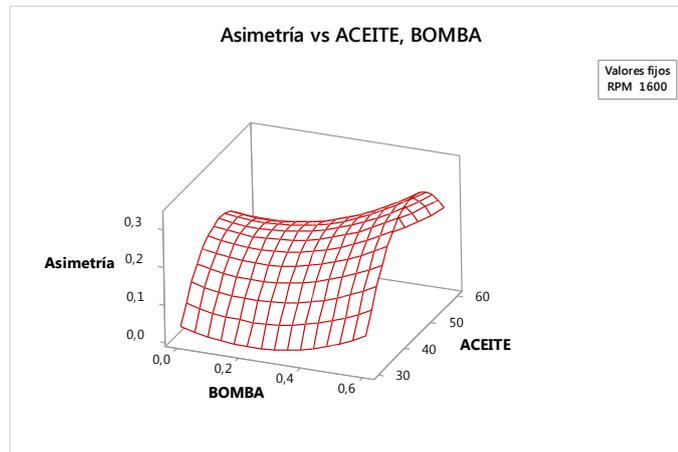


Figura 56. Gráfica de superficie de la asimetría, valor fijo de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

Ahora en la Figura 57 se puede apreciar que, con el valor fijo de aceite 20W50, la asimetría toma su valor más alto a aproximadamente 1800 RPM, y con una bomba con 0,6 de desgaste. Mientras tanto su valor más bajo se da a 800 RPM, y con una bomba sin desgaste.

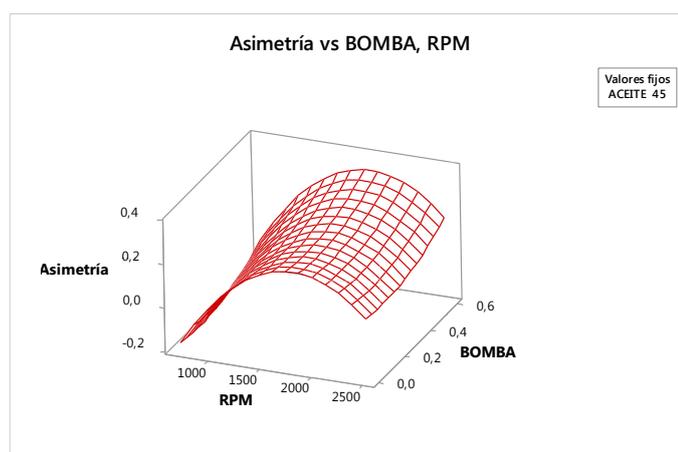


Figura 57. Gráfica de superficie la asimetría, valor fijo aceite 20W50

Fuente: Los Autores

7. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE ESPECTROS DE VIBRACIÓN MEDIANTE FFT Y ACP

Las ondas vibratorias captadas mediante un equipo de adquisición de datos generalmente son señales temporales por lo que es necesario para su análisis utilizar herramientas matemáticas que ayuden a su interpretación.

Una de las herramientas matemáticas para lograr este fin es la Transformada Rápida de Fourier FFT, la misma que transforma una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Esta nueva señal obtenida es conocida como espectro, en la cual podemos analizar cómo se comportan en el tiempo las distintas frecuencias que producen los elementos a estudiar. [22]

Se debe elegir un espectro patrón que tenga condiciones normales de funcionamiento para compararla visualmente con otras señales obtenidas en las mismas condiciones, con el fin de determinar si está ocurriendo algún tipo de fallo en el elemento o sistema analizado.

Es necesario también conocer las características principales del espectro, y las bandas de los principales armónicos, para estudiar los comportamientos de dichos parámetros con los de un espectro patrón, siendo las más relevantes las que se detallan a continuación:

CARACTERÍSTICAS

- Varianza
- Potencia
- Energía
- Curtosis
- Asimetría
- RMS
- Factor de cresta

BANDAS

- 0,5 X
- 1 X
- 2 X

- 3 X
- 4 X

EL análisis ANOVA de las características espectrales de distintos eventos nos ayudará a comprobar que la adquisición de datos haya sido correcta, determinando que la distribución de los datos sea el adecuado.

Cuando un análisis contiene una gran cantidad de señales a estudiar, y a su vez éstas contienen una gran cantidad de variables, es necesario el uso de alguna herramienta que facilite dicho estudio, el Análisis de Componentes Principales ACP nos ayuda con este fin. Esta técnica reduce la dimensionalidad de las variables correlacionadas agrupándolas en nuevas variables conocidas como componentes principales. [23]

Al tener un número menor de variables el análisis de resultados se facilita, por lo que es necesario escoger el número de componentes necesarios que nos den resultados fiables, ya que se pierde un porcentaje de la información al aplicar este método; pudiendo así llegar a concluir si las variables son agrupables y si tienen información redundante entre los distintos eventos.

Se deberá validar el diseño experimental para concluir como influyen las variables de entrada en las variables de salida.

CONCLUSIONES

Para el régimen de 700 RPM se observa que la muestra BM-700-10W30 en la banda 1X presenta armónicos síncronos, en la banda 2X se visualiza una disminución de la amplitud frecuencial con respecto a la muestra patrón debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite y al uso de un aceite de menor viscosidad.

Para el régimen de 1600 RPM se observa que la muestra BM-1600-10W30 en la banda 1X existe un incremento de la frecuencia del armónico, en la banda 0,5 X se observa frecuencias no síncronas, en la banda 2X se visualiza un incremento de la amplitud frecuencial con respecto a la muestra patrón para dicho régimen, esto debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite por el uso de un aceite más viscoso.

Para el régimen de 2500 RPM se observa que la muestra BM-2500-25W60 en la banda 1X presenta armónicos síncronos, en la banda 2X se visualiza una disminución de la amplitud frecuencial, en la banda 3X y 4X se presentan frecuencias síncronas debido al desgaste medio generado en la bomba de aceite y al uso de un aceite pesado. Se observa que el espectro para la muestra BM-2500-25W60 tiene un comportamiento similar al espectro patrón, por lo que se puede deducir que un aceite más pesado oculta la falla generada en la bomba para este régimen de giro, pudiéndose concluir que el análisis espectral no nos proporciona mucha información para diferenciar los efectos producidos para este estado (BM-2500-25W60).

Con lo antes descrito, con el ACP se pudo deducir que efectos varían en la muestra BM-2500-25W60 con respecto a la muestra patrón BN-2500-20W50. Mientras la muestra patrón tiene valores altos en varianza, potencia, energía, y RMS, la muestra BM-2500-25W60 tiene valores bajos en estas variables.

De acuerdo al análisis ANOVA para el régimen de 700 RPM la Curtosis es la característica espectral con más variación entre las distintas muestras, dicha característica del espectro BM-700-10W30 que pertenece a una bomba con desgaste medio aumentó en un 267% con respecto a la muestra patrón, esto debido al uso de un aceite de menor viscosidad.

De acuerdo al análisis ANOVA para el régimen de 1600 RPM la Curtosis es la característica espectral con más variación entre las distintas muestras, dicha característica del espectro BM-1600-10W30 que pertenece a una bomba con desgaste

medio aumentó en un 41 % con respecto a la muestra patrón, esto debido al uso de un aceite de menor viscosidad.

Con el ACP se estableció de manera general, con un 75% de información, el comportamiento de las variables de salida, en los regímenes de giro del motor a 700, 1600 y 2500 rpm. Indistintamente de el régimen de giro los valores de Varianza, Potencia, Energía, RMS, Factor de cresta y Curtosis tienen más variación; estos valores pueden ser altos o bajos al implementar una bomba con o sin desgaste, y utilizando cualquier tipo de aceite.

El ACP proporcionó datos que en el análisis espectral no se pudo observar. Se pudo apreciar con mayor detalle el comportamiento de las variables de salida del experimento, ya que en algunos casos no fue posible el estudio con el análisis espectral al ser un método visual.

El análisis de superficie de respuesta mostro que variables de entrada son las que más influyen en el resultado de las componentes principales, siendo estas las RPM; dependiendo del régimen de giro, los valores en estas componentes pueden ser altos o bajos.

También con el análisis de superficie de respuesta se pudo establecer que la asimetría, el factor de cresta, y la Curtosis varían mucho más sus valores que el resto de variables, al utilizar una bomba o un aceite diferentes. También existe variación en todas las variables debido a una interacción entre las RPM y el aceite utilizado.

RECOMENDACIONES

Emplear nuevas técnicas de análisis de vibraciones para analizar los fallos en el sistema de lubricación, ya que la Transformada Rápida de Fourier no nos proporciona toda la información necesaria.

Generar nuevas fallas en el sistema de lubricación del motor con el fin de estudiar su comportamiento y generar una base de datos que facilite el mantenimiento predictivo de este sistema del motor.

Al realizarse esta investigación en una maqueta didáctica, el motor no contaba con carga, por lo que futuros estudios se deberían realizar en motores sometidos a carga para así obtener señales más confiables, y la simulación de las fallas en el sistema de lubricación sea más realista.

Los datos obtenidos en esta investigación pueden implementarse en redes neuronales, así de este modo se podría predecir el comportamiento de este tipo de motor.

El ACP debería aplicarse en futuras investigaciones que utilicen una gran cantidad de datos y que requiera un comportamiento detallado de la salida de un experimento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Moreo V, «Motores de combustion interna Vol II,» Madrid, 1980.
- [2] A. Cárdenas Bautista y J. F. Morales Salazar , Diseño de un equipo experimental para motores de gasolina de cuatro tiempos, Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, 2004.
- [3] J. M. Alonso, Motores, Paraninfo, 1998.
- [4] W. Billiet E, Entretenimiento y reparacion de motores de automovil, Barcelona: Reverte, 1979.
- [5] «Clasificación y elección de los lubricantes de motor,» Petroquímica, pp. 58-60, 1998.
- [6] E. Pale Bacilio, «Evaluacion tribologica de aceites lubricantes para motores de combustion interna,» 2010.
- [7] E. A. Estupiñan y P. N. Saavedra, Analisis de vibraciones aplicado a las maquinas rotatorias de baja velocidad, 2010.
- [8] O. R. Criollo Jadan y H. M. Matute Bravo, Diagnóstico de fallos en la combustión para motores de combustión interna alternativos diesel por analisis de vibraciones, Cuenca, 2014.
- [9] Á. R. Albarracín Méndez y J. B. Huiñisaca Quizhpe, Estudio mediante la técnica de vibraciones de los efectos de la variacion de presion en el riel de combustible sobre la combustión de un motor modelo Huyndai Santa Fé 2.0, Cuenca, 2015.
- [10] J. R. Demey, M. Adams y H. Freitas, Uso del Método de Componentes Principales para la caracterización de fincas agropecuarias, Maracay, 1992.
- [11] B. Acosta , O. Márquez, E. Mora, V. García y R. Hernández, Uso del método de análisis de componentes principales para la evaluación de la relación suelo productividad en Eucalyptus app. Estado Portuguesa-Venezuela, 2005.
- [12] C. Guisande González, A. Barreiro Felpeto, I. Maneiro Estraviz, I. Riveiro Alarcón, A. R. Vergara Castaño y A. Vaamonde Liste, Tratamiento de datos, Diaz de Santos, S.A., 2006.
- [13] H. Gutiérrez Pulido y R. De la Vara Salazar, Análisis y diseño de experimentos, Mexico DF: McGraw-Hill, 2004.
- [14] M. Libreors Romero, «Sistemas auxiliares automotrices en los motores de combustión interna,» 2014.
- [15] J. Parra Franco, «Aceites lubricantes para motores a gasolina,» Xalapa, 2015.

- [16] International Standard, ISO 10816-6 - Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non rotating parts-Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW, 1995.
- [17] H. Yang, J. Mathew, and L. Ma, "Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery: a literature survey," 2003.
- [18] S. W. Smith, The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 1st ed. California Technical Pub, 1997.
- [19] G. Box, S. Hunter y W. Hunter, Estadística para Investigadores, Diseño, innovación y descubrimiento, Barcelona: Reverté.
- [20] S. d. I. F. Fernández, Componentes Principales ACP, Madrid, 2011
- [21] J. A. S. Rivera, Análisis de Componentes Principales., Granada, 2012.
- [22] Saavedra, P. Análisis de vibraciones nivel II. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Chile.
- [23] F. Tusell, Análisis Multivariante, 2012.

ANEXOS 1

FIGURAS ANALISIS DE RESIDUOS

ANOVA RÉGIMEN 700 RPM

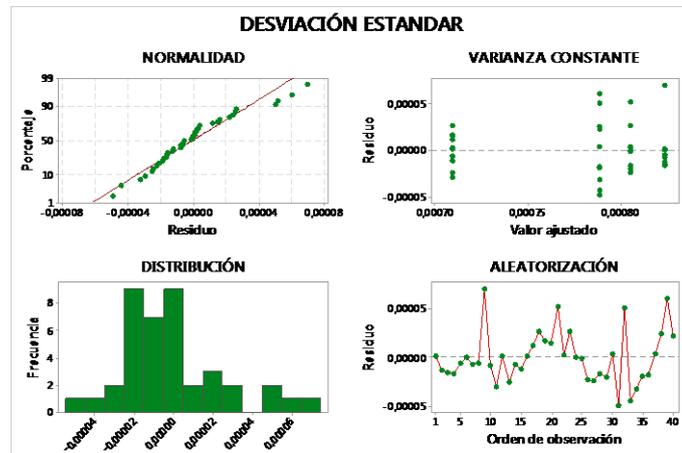


Figura 1-1. ANOVA para Desviación estándar, régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

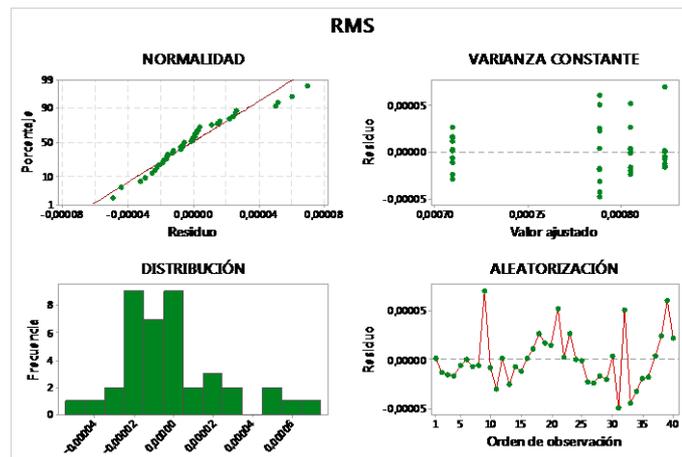


Figura 1-2. ANOVA para RMS, régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

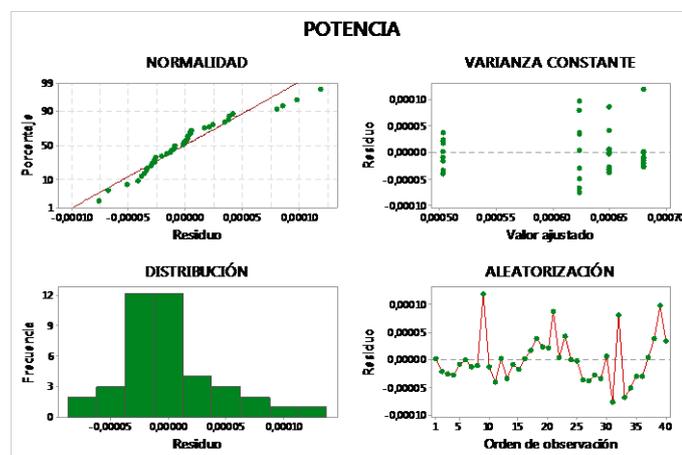


Figura 1-3. ANOVA para Potencia, régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

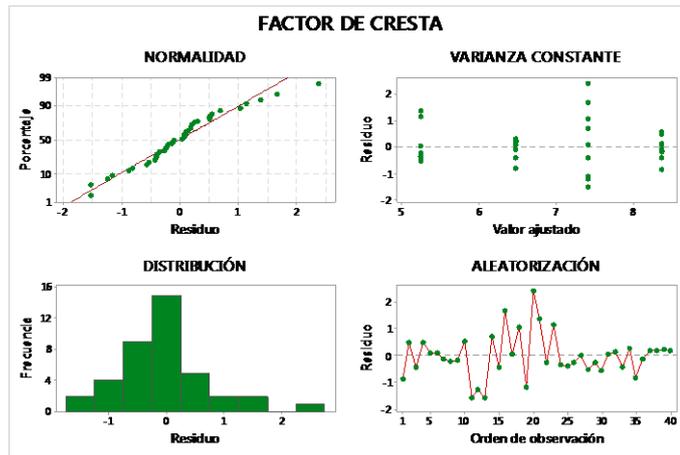


Figura 1-4. ANOVA para Factor de Cresta, régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

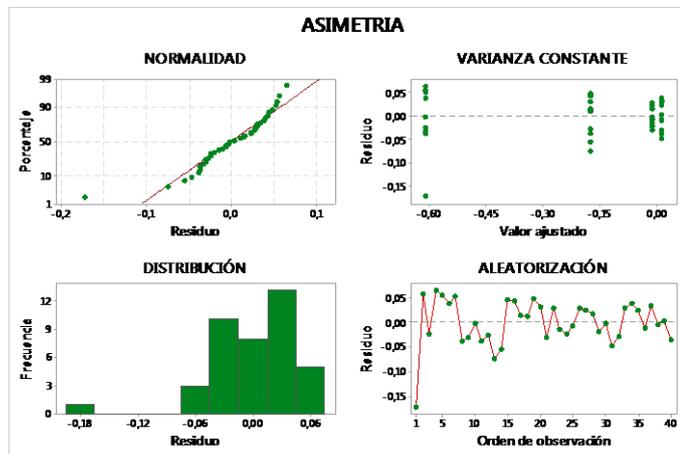


Figura 1-5. ANOVA para Asimetría, régimen de 700 RPM

Fuente: Los Autores

ANOVA RÉGIMEN 1600 RPM

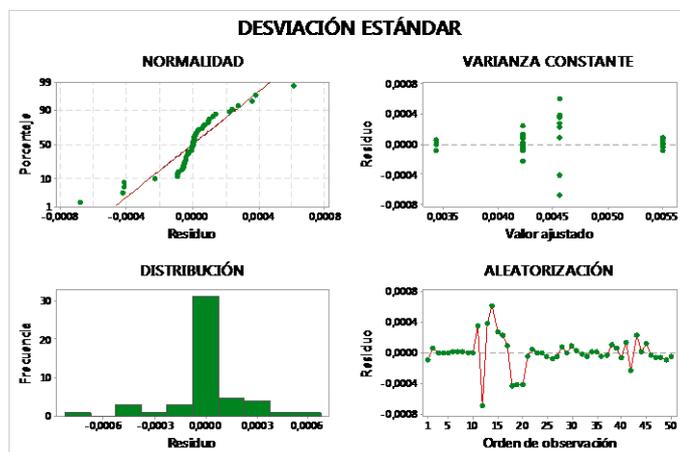


Figura 1-6. ANOVA para Desviación Estándar, régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

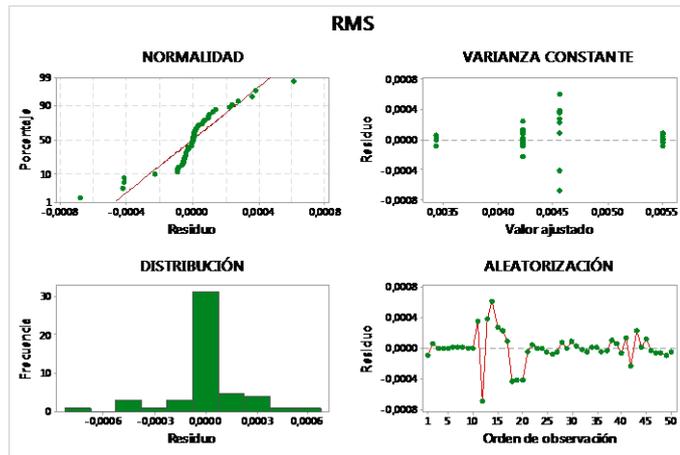


Figura 1-7. ANOVA para RMS, régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

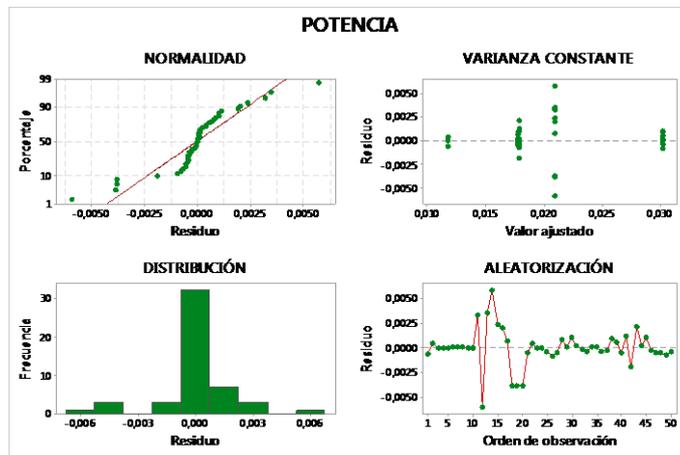


Figura 1-8. ANOVA para Potencia, régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

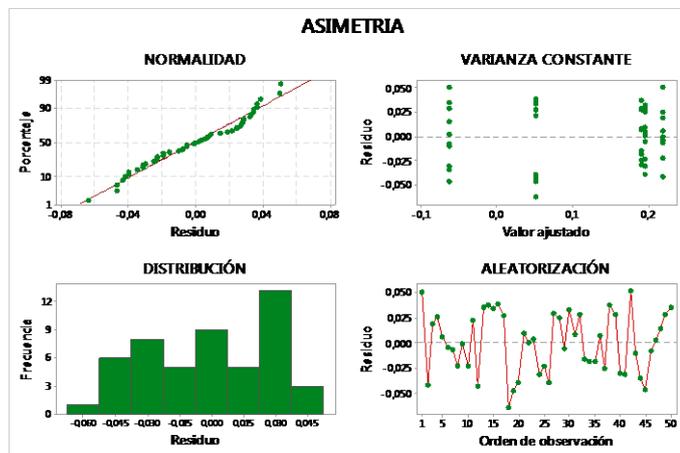


Figura 1-9. ANOVA para Asimetría, régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

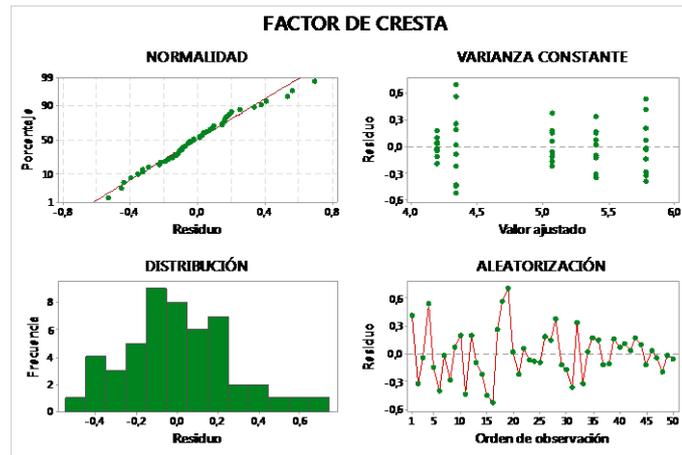


Figura 1-10. ANOVA para Asimetría, régimen de 1600 RPM

Fuente: Los Autores

ANOVA RÉGIMEN 2500 RPM

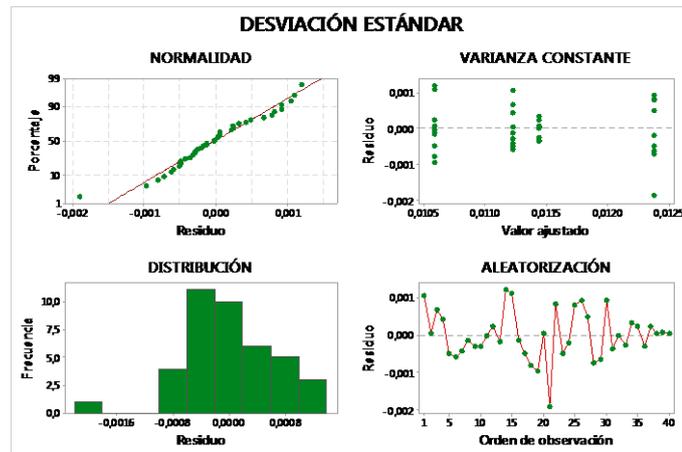


Figura 1-11. ANOVA para Desviación Estándar, régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

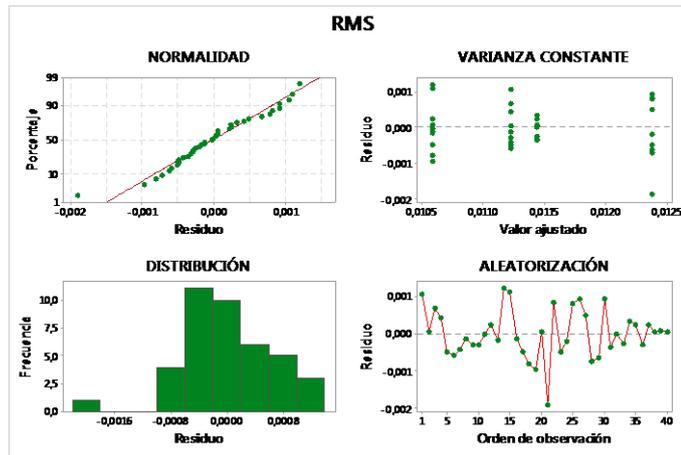


Figura 1-12. ANOVA para RMS, régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

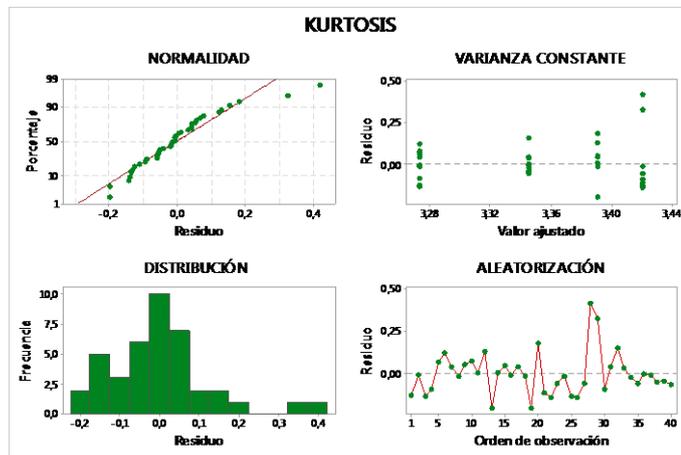


Figura 1-13. ANOVA para Curtosis, régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

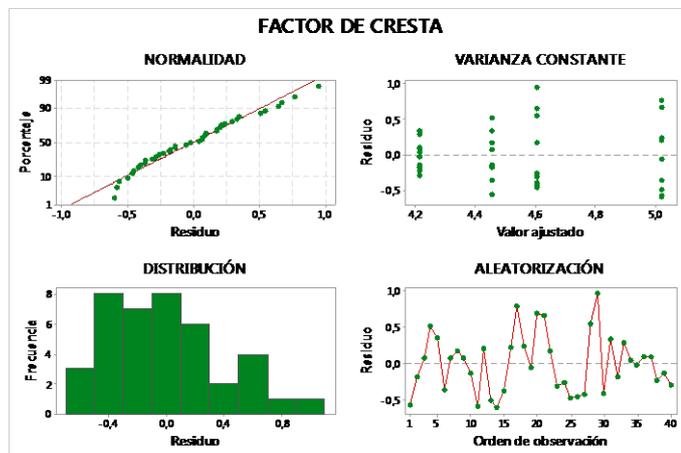


Figura 1-14. ANOVA para Factor de Cresta, régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

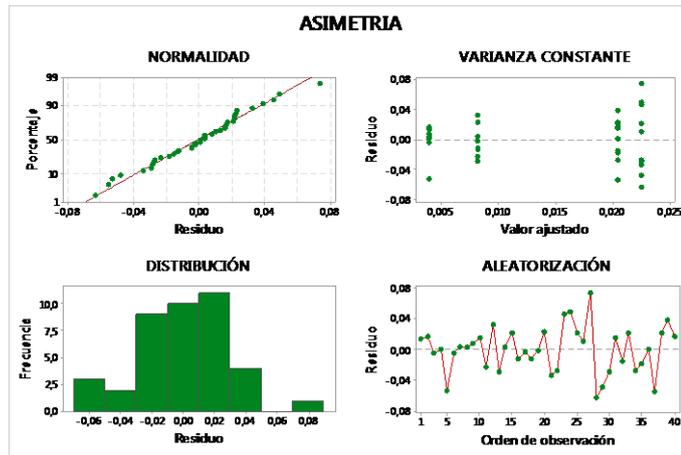


Figura 1-15. ANOVA para Asimetría, régimen de 2500 RPM

Fuente: Los Autores

ANEXOS 2

FIGURAS ANÁLISIS ESPECTRAL

ANALISIS ESPECTRAL A 700 RPM

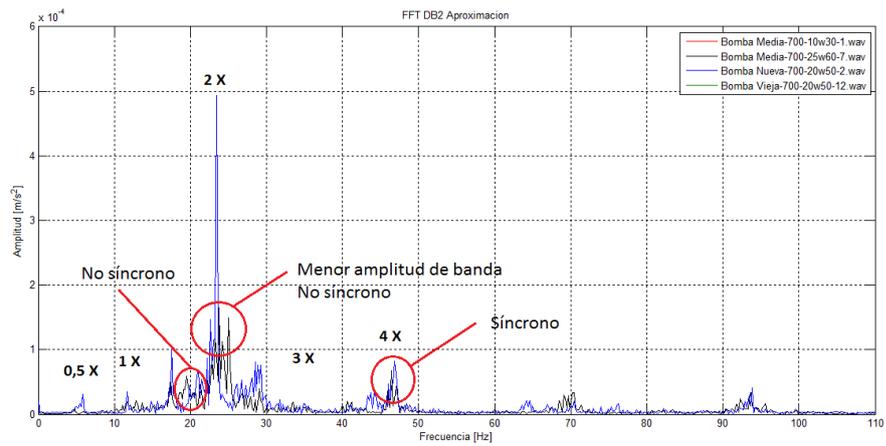


Figura 2-1.- Comparación de espectros 700 RPM

Fuente: Los Autores

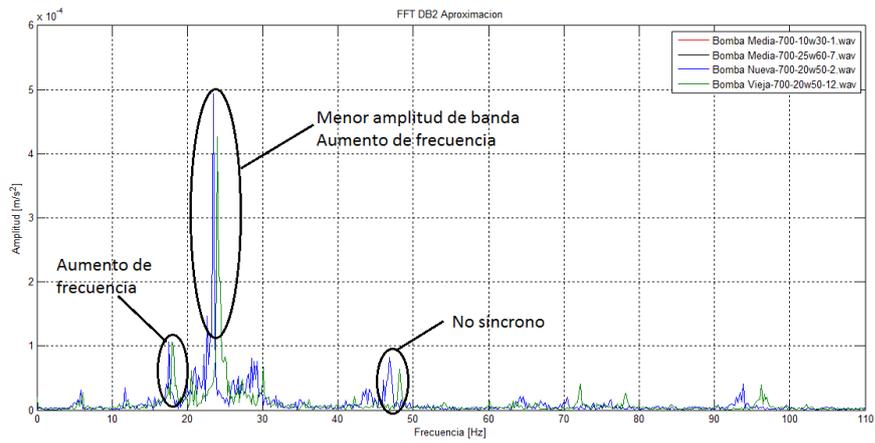


Figura 2-2.- Comparación de espectros 700 RPM

Fuente: Los Autores

ANALISIS ESPECTRAL A 1600 RPM

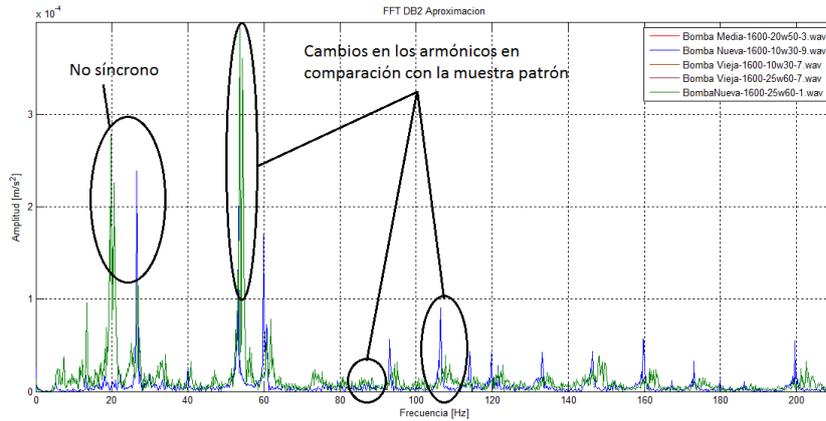


Figura 2-3-. Comparación de espectros 1600 RPM

Fuente: Los Autores

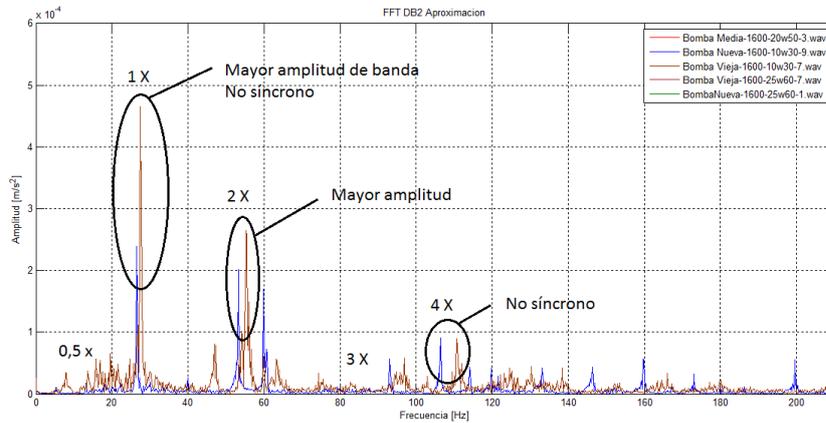


Figura 2-4-. Comparación de espectros 1600 RPM

Fuente: Los Autores

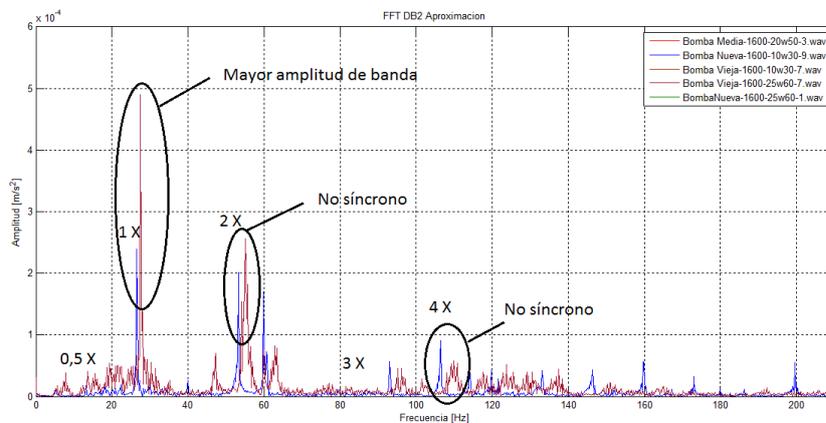


Figura 2-5-. Comparación de espectros 1600 RPM

Fuente: Los Autores

ANALISIS ESPECTRAL A 2500 RPM

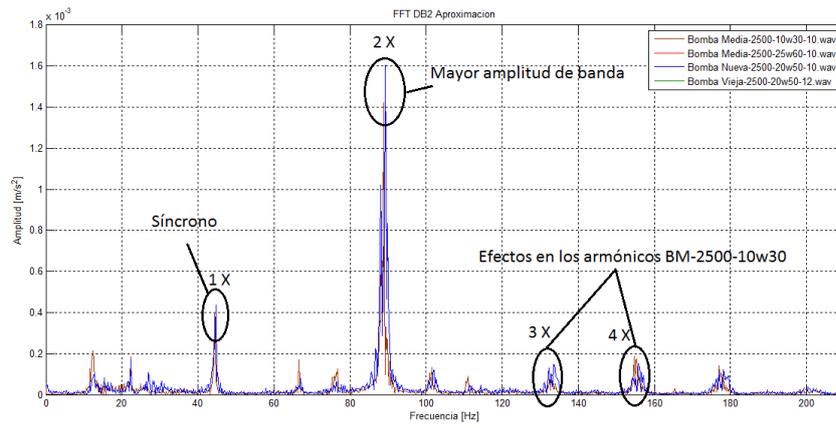


Figura 2-6-. Comparación de espectros 2500 RPM

Fuente: Los Autores

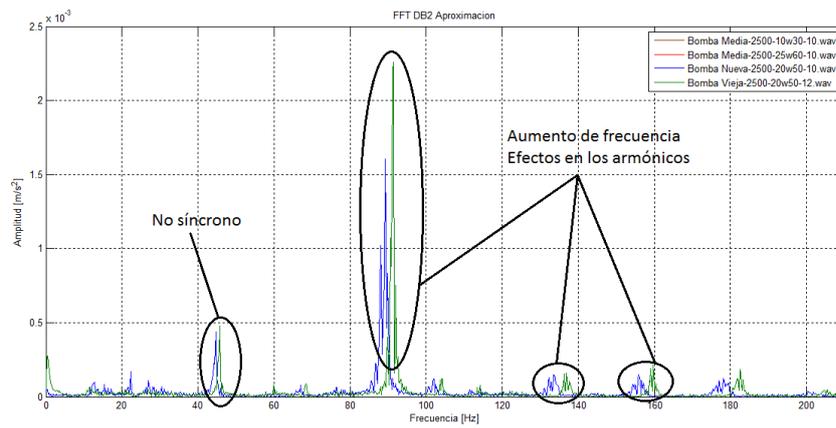


Figura 2-7-. Comparación de espectros 2500 RPM

Fuente: Los Autores

ANEXOS 3

TABLAS DE CARECTERISTICAS TEMPORALES

Tabla 3-1.- CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES 700 RPM

| MUESTRA | VARIANZA | D. ESTÁNDAR | POTENCIA | ENERGÍA | KURTOSIS | ASIMETRÍA | RMS | F. DE GRESTA | 1 | 0.5 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A-Bomba Media-700-10w30-1 | 6.810E-07 | 8.252E-04 | 6.812E-04 | 3.491E-06 | 9.018E+00 | -7.836E-01 | 8.254E-04 | 7.506E+00 | 1.934E-05 | 1.763E-06 | 3.002E-05 | 3.781E-06 | 1.205E-06 |
| A-Bomba Media-700-10w30-2 | 6.530E-07 | 8.081E-04 | 6.531E-04 | 3.347E-06 | 1.059E+01 | -6.346E-01 | 8.072E-04 | 7.968E+00 | 1.830E-05 | 2.664E-06 | 2.638E-05 | 7.870E-07 | 4.584E-06 |
| A-Bomba Media-700-10w30-3 | 6.522E-07 | 8.076E-04 | 6.524E-04 | 3.343E-06 | 1.029E+01 | -5.460E-01 | 8.077E-04 | 8.879E+00 | 1.972E-05 | 3.033E-06 | 1.971E-05 | 2.570E-06 | 1.281E-06 |
| A-Bomba Media-700-10w30-4 | 6.70E-07 | 0.000818461 | 0.000670055 | 3.43E-06 | 10.34570033 | -0.556851698 | 0.000818567 | 8.462949768 | 2.400E-05 | 1.374E-05 | 2.260E-05 | 3.521E-06 | 5.711E-05 |
| A-Bomba Media-700-10w30-5 | 6.79E-07 | 0.000824071 | 0.000679223 | 3.48E-06 | 10.32781338 | -0.572068779 | 0.000824148 | 8.479695339 | 2.507E-05 | 7.231E-07 | 7.803E-06 | 6.982E-06 | 1.662E-05 |
| A-Bomba Media-700-10w30-6 | 6.67E-07 | 0.000816433 | 0.000666846 | 3.42E-06 | 10.39240835 | -0.588513785 | 0.000816605 | 8.259058555 | 2.243E-05 | 7.592E-06 | 5.502E-05 | 4.278E-06 | 1.728E-05 |
| A-Bomba Media-700-10w30-7 | 6.69E-07 | 0.000817869 | 0.00066913 | 3.43E-06 | 10.10609055 | -0.648115621 | 0.000818002 | 8.170333389 | 2.504E-05 | 1.501E-06 | 1.079E-05 | 2.926E-06 | 3.203E-06 |
| A-Bomba Media-700-10w30-8 | 7.99E-07 | 0.000893784 | 0.000799215 | 4.10E-06 | 8.195778804 | -0.64271116 | 0.000893987 | 8.226888356 | 2.618E-05 | 7.255E-06 | 3.897E-05 | 9.691E-06 | 3.249E-05 |
| A-Bomba Media-700-10w30-9 | 6.66E-07 | 0.000816141 | 0.000666389 | 3.42E-06 | 9.972285575 | -0.613172434 | 0.000816324 | 8.934806672 | 2.773E-05 | 1.092E-05 | 1.816E-04 | 3.109E-06 | 5.228E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-1 | 4.62E-07 | 0.000679534 | 0.000461975 | 2.37E-06 | 4.796099562 | -0.21296963 | 0.000679686 | 5.881836636 | 3.02021E-05 | 2.80995E-06 | 2.0128E-05 | 1.75142E-05 | 2.1575E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-2 | 4.68E-07 | 0.000684258 | 0.000468354 | 2.40E-06 | 4.799116919 | -0.249386084 | 0.000684363 | 5.886235391 | 3.19721E-05 | 2.07052E-06 | 7.88652E-05 | 4.14057E-06 | 1.09609E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-3 | 4.94E-07 | 0.000702523 | 0.000493943 | 2.53E-06 | 4.490074195 | -0.229333981 | 0.000702809 | 8.119964348 | 1.78934E-05 | 2.29628E-06 | 1.34885E-05 | 5.78655E-06 | 7.43044E-07 |
| A-Bomba Media-700-25w60-4 | 4.86E-07 | 0.000697098 | 0.000486239 | 2.49E-06 | 4.849365398 | -0.13013929 | 0.000697307 | 7.002387971 | 1.31478E-05 | 1.36538E-06 | 1.07593E-05 | 9.06345E-06 | 1.76177E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-5 | 5.05E-07 | 0.000710972 | 0.000505652 | 2.59E-06 | 5.803356134 | -0.131564565 | 0.000711091 | 9.098315274 | 4.45276E-05 | 3.72162E-06 | 5.02574E-05 | 7.31205E-06 | 1.23737E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-6 | 5.19E-07 | 0.000720746 | 0.00051959 | 2.66E-06 | 4.821113711 | -0.159360874 | 0.000720824 | 7.493659467 | 2.23033E-05 | 2.42622E-06 | 7.84177E-05 | 5.09767E-06 | 2.14288E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-7 | 5.40616E-07 | 0.000735266 | 0.000540818 | 2.7156E-06 | 5.682130836 | -0.163433453 | 0.000735402 | 8.46555749 | 2.26743E-05 | 4.70656E-06 | 7.18001E-05 | 1.20545E-05 | 4.1634E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-8 | 5.27E-07 | 0.000725723 | 0.000525723 | 2.70E-06 | 4.872292978 | -0.127001602 | 0.00072599 | 6.263849992 | 2.32195E-05 | 4.63196E-06 | 8.25365E-05 | 9.74553E-05 | 2.69344E-05 |
| A-Bomba Media-700-25w60-9 | 5.24E-07 | 0.000723846 | 0.000524182 | 2.69E-06 | 6.151804958 | -0.144763072 | 0.000724003 | 9.821227931 | 3.25636E-05 | 5.8693E-06 | 0.000136337 | 5.97614E-06 | 3.81026E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-1 | 7.35E-07 | 0.000857405 | 0.00073526 | 3.77E-06 | 3.288829272 | -0.043580459 | 0.000857471 | 6.619777739 | 3.46861E-05 | 1.08782E-05 | 0.000107383 | 3.42276E-06 | 1.51578E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-2 | 6.92E-07 | 0.000831574 | 0.000691622 | 3.54E-06 | 3.368894008 | -0.027818284 | 0.000831637 | 6.385071437 | 2.52743E-05 | 2.88236E-05 | 9.53516E-05 | 4.12301E-06 | 9.49116E-06 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-3 | 6.49E-07 | 0.000805309 | 0.000648817 | 3.33E-06 | 3.360228635 | -0.036697867 | 0.00080549 | 4.887420044 | 2.64541E-05 | 2.90299E-05 | 0.000106786 | 2.06242E-06 | 2.90727E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-4 | 6.47E-07 | 0.000804132 | 0.000646839 | 3.31E-06 | 3.41345103 | -0.019704353 | 0.000804261 | 4.856941276 | 2.44318E-05 | 3.61638E-05 | 9.46885E-05 | 2.70648E-06 | 6.93676E-06 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-5 | 6.13E-07 | 0.000782851 | 0.000613128 | 3.14E-06 | 3.510573243 | 0.015879409 | 0.000783023 | 4.988679039 | 2.44065E-05 | 2.37293E-05 | 9.95552E-05 | 6.08351E-06 | 1.87124E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-6 | 6.10E-07 | 0.000781317 | 0.000610794 | 3.13E-06 | 3.49420819 | 0.009714674 | 0.000781531 | 5.271559157 | 3.07825E-05 | 2.50544E-05 | 0.000130772 | 2.1872E-06 | 1.76144E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-7 | 6.23E-07 | 0.000789025 | 0.00062655 | 3.19E-06 | 3.461324034 | 0.002453629 | 0.000789083 | 4.718316571 | 2.2849E-05 | 3.28539E-05 | 5.41239E-05 | 9.04116E-06 | 1.70959E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-8 | 6.16E-07 | 0.000784871 | 0.000616198 | 3.16E-06 | 3.440851665 | -0.032767278 | 0.000784981 | 5.015110887 | 2.15871E-05 | 2.87418E-05 | 0.00024504 | 6.35035E-06 | 1.03877E-05 |
| A-Bomba Nueva-700-20w50-9 | 6.55E-07 | 0.000809278 | 0.000655044 | 3.36E-06 | 3.359488506 | -0.015905934 | 0.000809346 | 4.675600403 | 2.66171E-05 | 3.91008E-05 | 0.000106623 | 3.65005E-06 | 9.9465E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-1 | 5.47E-07 | 0.000739459 | 0.000547004 | 2.80E-06 | 4.371743014 | -0.034102556 | 0.000739596 | 6.560739805 | 1.59037E-05 | 2.68209E-05 | 0.000111405 | 5.7312E-06 | 3.17677E-05 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-2 | 5.55E-07 | 0.000744774 | 5.55E-04 | 2.84E-06 | 4.333292814 | 0.042498037 | 0.000744938 | 6.063053265 | 4.03207E-05 | 1.43075E-05 | 1.67891E-05 | 3.61707E-06 | 1.4979E-05 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-3 | 5.72E-07 | 7.56E-04 | 0.000572214 | 2.93E-06 | 4.39E+00 | 0.052240611 | 0.000756447 | 6.777677883 | 4.49846E-05 | 1.57242E-05 | 6.49038E-05 | 2.19599E-06 | 2.11149E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-4 | 5.93E-07 | 0.000769746 | 5.93E-04 | 3.04E-06 | 4.338701796 | 0.035680779 | 0.000769816 | 5.66800512 | 4.51735E-05 | 1.89576E-05 | 0.000137963 | 8.28331E-06 | 5.84351E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-5 | 5.94E-07 | 0.000770393 | 5.94E-04 | 3.04E-06 | 4.646266705 | 0.001937172 | 0.000770701 | 6.375144378 | 3.71418E-05 | 2.57609E-05 | 7.43772E-05 | 3.1163E-06 | 7.93757E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-6 | 6.27E-07 | 0.000792056 | 6.28E-04 | 3.22E-06 | 4.597633513 | 0.046783267 | 0.000792234 | 6.664114088 | 3.3947E-05 | 1.72195E-05 | 0.000175035 | 6.86451E-06 | 1.73637E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-7 | 6.61E-07 | 8.13E-04 | 6.62E-04 | 3.39E-06 | 4.67E+00 | 0.006828321 | 0.00081333 | 6.678873396 | 6.04395E-05 | 1.69817E-05 | 0.000161881 | 4.89144E-06 | 8.7973E-06 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-8 | 7.21E-07 | 8.49E-04 | 0.000721393 | 3.70E-06 | 4.56E+00 | 1.40E-02 | 0.000849347 | 6.719039127 | 4.07466E-05 | 1.32079E-05 | 0.000382883 | 6.1544E-06 | 1.43286E-05 |
| A-Bomba Vieja-700-20w50-9 | 6.57E-07 | 8.11E-04 | 0.000657455 | 3.37E-06 | 4.95E+00 | -2.41E-02 | 0.000810834 | 6.661794788 | 3.16708E-05 | 1.49464E-05 | 0.000140502 | 3.99823E-06 | 4.42628E-06 |

Tabla 3-2.- CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES 1600 RPM

| MUESTRA | D. ESTÁNDAR | POTENCIA | ENERGÍA | KURTOSIS | ASIMETRÍA | RMS | F. DE CRESTA | 1 | 0.5 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|-------------|
| B-Bomba Media-1600-20w50-1 | 0.003344176 | 0.011183688 | 5.73E-05 | 4.630487663 | 0.270522005 | 0.003344195 | 6.196240786 | 0.000209192 | 5.91933E-05 | 6.38335E-05 | 4.72564E-06 | 2.09892E-05 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-2 | 0.003434761 | 0.011797872 | 6.05E-05 | 4.337560971 | 0.239626295 | 0.003434795 | 5.739601033 | 0.000208037 | 5.03136E-05 | 0.000317493 | 2.20347E-05 | 2.0836E-05 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-3 | 0.003431919 | 0.011783308 | 6.04E-05 | 4.245674415 | 0.245675019 | 0.003431946 | 6.322325982 | 0.000335145 | 4.29462E-05 | 0.000109564 | 1.68182E-05 | 3.9958E-05 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-4 | 0.003439915 | 0.011833323 | 6.06E-05 | 4.401667871 | 0.226588946 | 0.003439952 | 5.633410505 | 0.000362093 | 3.66518E-05 | 0.000149018 | 1.16208E-05 | 3.898E-05 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-5 | 0.00344445 | 0.011864826 | 6.08E-05 | 4.282612169 | 0.215719661 | 0.003444528 | 5.386713936 | 0.000218938 | 3.64596E-05 | 0.000202616 | 1.21978E-05 | 3.16725E-06 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-6 | 0.003454145 | 0.011931493 | 6.11E-05 | 4.310739945 | 0.213735269 | 0.003454192 | 5.760381185 | 0.000295999 | 5.15266E-05 | 0.000102929 | 1.5100E-05 | 1.29419E-05 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-7 | 0.003454733 | 0.011935569 | 6.12E-05 | 4.41491789 | 0.197851876 | 0.003454782 | 5.494394539 | 0.000398448 | 2.4651E-05 | 7.84994E-05 | 2.38795E-06 | 9.21636E-06 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-8 | 0.003437763 | 0.011818377 | 6.06E-05 | 4.392282992 | 0.22062876 | 0.003437779 | 5.838899325 | 0.000314214 | 5.49479E-05 | 8.87492E-05 | 6.1854E-06 | 9.95148E-06 |
| B-Bomba Media-1600-20w50-9 | 0.003431649 | 0.01176418 | 6.04E-05 | 4.385060771 | 0.19762824 | 0.003431671 | 5.984935745 | 0.00027723 | 4.74128E-05 | 0.000222778 | 1.89336E-05 | 2.96956E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-1 | 0.004916434 | 0.024171594 | 0.000123874 | 3.162410577 | 0.072669174 | 0.004916451 | 3.904352543 | 0.000300345 | 2.7888E-05 | 0.000135084 | 4.88847E-06 | 3.70245E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-2 | 0.004916773 | 0.024420355 | 0.000125149 | 3.191145912 | 0.085993478 | 0.004916885 | 4.248772528 | 0.000314275 | 8.25726E-06 | 0.000286424 | 2.85248E-06 | 6.24957E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-3 | 0.005168565 | 0.026714296 | 0.000136904 | 3.180801093 | 0.088196118 | 0.005168576 | 4.121310331 | 0.000215501 | 3.97197E-05 | 0.000117248 | 2.70289E-06 | 7.9364E-06 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-4 | 0.004828392 | 0.023313529 | 0.000119476 | 3.218487736 | 0.084671165 | 0.004828398 | 3.893388376 | 0.000333168 | 1.68621E-05 | 0.00022418 | 1.01244E-05 | 3.83231E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-5 | 0.004784953 | 0.022895975 | 0.000117336 | 3.205239151 | 0.0897022 | 0.004784963 | 3.813929302 | 0.000330495 | 3.65202E-05 | 0.00023161 | 3.49317E-06 | 1.84508E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-6 | 0.004651157 | 0.021633504 | 0.00010867 | 3.326012327 | 0.077956706 | 0.004651173 | 4.599446901 | 0.000170381 | 1.44703E-05 | 3.8691E-05 | 1.33309E-06 | 1.67784E-06 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-7 | 0.004134976 | 0.017098242 | 8.76E-05 | 3.413132311 | -0.01229357 | 0.004134993 | 4.907913913 | 0.000245151 | 1.26868E-05 | 4.52111E-06 | 2.01169E-06 | 4.67784E-06 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-8 | 0.004143284 | 0.017167029 | 8.80E-05 | 3.3693033 | 0.004143221 | 0.004143302 | 5.045381675 | 0.000196444 | 1.46521E-05 | 8.3524E-05 | 4.58411E-06 | 1.34744E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-10w30-9 | 0.004143525 | 0.017168981 | 8.80E-05 | 3.394665448 | 0.011591965 | 0.004143538 | 4.360140383 | 0.000280262 | 1.83889E-05 | 0.000141227 | 2.35321E-06 | 3.17307E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-1 | 0.005462947 | 0.029844143 | 0.000152944 | 4.340037727 | 0.205864152 | 0.005462967 | 4.843291057 | 0.000531957 | 6.03557E-05 | 9.92711E-05 | 6.74295E-06 | 1.58777E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-2 | 0.005497226 | 0.030219583 | 0.000154868 | 4.384870825 | 0.200226464 | 0.005497242 | 5.001860595 | 0.000592553 | 6.19561E-05 | 0.000210276 | 3.1851E-06 | 4.8919E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-3 | 0.005504358 | 0.030298316 | 0.000155272 | 4.436454574 | 0.165207543 | 0.005504378 | 4.984268973 | 0.000404012 | 6.13331E-05 | 7.38206E-05 | 2.72994E-06 | 1.63539E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-4 | 0.005466166 | 0.029669166 | 0.000153072 | 4.395756444 | 0.179007197 | 0.005465257 | 4.980859951 | 0.000464401 | 7.0008E-05 | 0.000127147 | 2.12362E-05 | 3.02265E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-5 | 0.005420394 | 0.029380749 | 0.000150569 | 4.498148626 | 0.156818359 | 0.005420389 | 5.247295324 | 0.000384601 | 4.08897E-05 | 6.8157E-05 | 5.00342E-06 | 2.22265E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-6 | 0.005463178 | 0.02984657 | 0.000152957 | 4.498405338 | 0.225169906 | 0.005463189 | 5.217358594 | 0.000493548 | 6.18517E-05 | 0.00013169 | 7.58484E-06 | 5.19138E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-7 | 0.005578971 | 0.031125071 | 0.000159509 | 4.438988872 | 0.2221375903 | 0.005578972 | 5.448226925 | 0.000495456 | 2.97415E-05 | 0.00014902 | 5.72906E-06 | 1.12768E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-8 | 0.005511862 | 0.030380974 | 0.000155695 | 4.47407714 | 0.191216678 | 0.005511882 | 4.949800495 | 0.000328518 | 6.55857E-05 | 0.000268106 | 9.99058E-06 | 2.41765E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-10w30-9 | 0.005596898 | 0.031323391 | 0.000160535 | 4.473637182 | 0.229111701 | 0.005596897 | 4.901877625 | 0.000558557 | 7.26125E-05 | 0.000269898 | 5.31981E-06 | 4.24772E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-1 | 0.004249568 | 0.018058962 | 9.25E-05 | 4.264913585 | 0.200416893 | 0.004249574 | 5.055653377 | 0.000296663 | 0.000126024 | 0.000183879 | 5.14099E-06 | 2.9472E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-2 | 0.004174848 | 0.017429529 | 8.93E-05 | 4.274196474 | 0.176094751 | 0.004174859 | 5.087652511 | 0.000290015 | 0.000118531 | 0.000202376 | 2.61918E-06 | 2.17484E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-3 | 0.004231934 | 0.017909433 | 9.18E-05 | 4.406600191 | 0.172942174 | 0.004231944 | 5.422854485 | 0.000288671 | 0.000104257 | 8.43269E-05 | 1.07201E-05 | 8.24146E-06 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-4 | 0.004231934 | 0.017909433 | 9.18E-05 | 4.406600191 | 0.172942174 | 0.004231944 | 5.575138675 | 0.000398086 | 6.6797E-05 | 0.000146093 | 1.1351E-05 | 8.41631E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-5 | 4.19E-03 | 1.76E-02 | 9.01E-05 | 4.400635514 | 0.16660285 | 0.004193607 | 5.283900265 | 0.000384112 | 3.40044E-05 | 0.000137413 | 8.08788E-06 | 2.99798E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-6 | 4.33E-03 | 1.87E-02 | 9.59E-05 | 4.462915521 | 0.228583348 | 0.004325462 | 5.305654547 | 0.000412533 | 3.34164E-05 | 0.000293286 | 8.54781E-06 | 2.90969E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-7 | 4.29E-03 | 1.84E-02 | 9.43E-05 | 4.462915521 | 0.21956202 | 0.004289915 | 5.570101486 | 0.000483440 | 3.34164E-05 | 0.000115989 | 7.89489E-06 | 3.90547E-05 |
| B-Bomba Vieja-1600-25w60-8 | 4.16E-03 | 1.73E-02 | 8.86E-05 | 4.534306734 | 0.161993711 | 0.004157891 | 5.482738386 | 0.000329616 | 9.88691E-05 | 0.0002908 | 4.54508E-06 | 5.03148E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-1 | 0.004366697 | 0.019068085 | 9.77E-05 | 3.350998136 | -0.09487707 | 0.004366692 | 4.29806128 | 0.000108631 | 2.50148E-05 | 0.000397009 | 3.95618E-06 | 6.82636E-06 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-2 | 0.004466219 | 0.0199E-02 | 0.000102226 | 3.392097448 | -0.073068593 | 0.00446624 | 4.366252733 | 9.63908E-05 | 1.07433E-05 | 6.18594E-05 | 7.72955E-06 | 1.57407E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-3 | 4.25E-03 | 0.018055471 | 9.25E-05 | 3.337244593 | -0.091924199 | 0.004249164 | 4.287665947 | 9.15667E-05 | 6.22838E-05 | 0.000125799 | 9.22198E-06 | 1.17799E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-4 | 4.35E-03 | 0.018929489 | 9.70E-05 | 3.347020824 | -0.10967424 | 0.004350794 | 4.682395647 | 0.000130691 | 6.93542E-05 | 0.00012693E-05 | 1.02693E-05 | 3.9489E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-5 | 4.20E-03 | 0.017633439 | 9.04E-05 | 3.263137421 | -0.071209155 | 0.00419921 | 4.222392974 | 0.000120759 | 4.03231E-05 | 0.000327579 | 1.5189E-06 | 2.7008E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-6 | 4.17E-03 | 0.017383129 | 8.91E-05 | 3.287464241 | -0.060907853 | 0.00416931 | 4.157519124 | 0.000108772 | 1.16491E-05 | 1.92947E-05 | 6.50728E-06 | 4.40065E-06 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-7 | 4.17E-03 | 0.017389593 | 8.91E-05 | 3.330673714 | -0.048608395 | 0.004170074 | 4.0307427 | 0.00011373 | 8.118E-05 | 0.000279929 | 1.91983E-06 | 2.6187E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-8 | 4.14E-03 | 0.017122132 | 8.77E-05 | 3.32300857 | -0.038990814 | 0.004137881 | 4.174346931 | 0.000108808 | 6.70278E-05 | 0.000179926 | 4.36801E-06 | 3.42758E-05 |
| B-Bomba Nueva-1600-25w60-9 | 4.18E-03 | 0.017513972 | 8.98E-05 | 3.370696969 | -0.02822636 | 0.004184961 | 4.141970789 | 0.00010759 | 1.59775E-05 | 7.10233E-06 | 1.2555E-05 | 9.28886E-06 |

Tabla 3-3.- CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES 2500 RPM

| MUESTRA | D. ESTÁNDAR | POTENCIA | ENERGIA | KURTOSIS | ASIMETRÍA | RMS | F. DE CRESTA | 1 | 0,5 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| C-Bomba Media-2500-10w30-1 | 0,01228433 | 0,150905198 | 0,000773353 | 3,1478677 | 0,017148824 | 0,01228432 | 3,890368 | 0,000328974 | 7,14544E-05 | 0,000789695 | 9,86241E-05 | 2,15448E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-2 | 0,011903232 | 0,141687028 | 0,000726112 | 3,139061909 | -0,000691307 | 0,01190321 | 4,532817577 | 0,000404991 | 0,000148507 | 0,001115297 | 4,76545E-05 | 5,90897E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-3 | 0,011652375 | 0,135777855 | 0,000695829 | 3,184930452 | 0,004595371 | 0,01165235 | 4,970874079 | 0,000295972 | 0,000102468 | 0,000864534 | 8,28988E-05 | 5,09040E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-4 | 0,010734044 | 0,11521974 | 0,000590474 | 3,341523433 | -0,049030006 | 0,010734022 | 4,801945545 | 0,000328269 | 0,000142905 | 0,000172974 | 4,92123E-05 | 3,42619E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-5 | 0,010634176 | 0,11308611 | 0,000579539 | 3,39768703 | -0,000485259 | 0,010634172 | 4,09515521 | 0,000305016 | 8,68099E-05 | 0,000587135 | 3,54668E-05 | 2,08297E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-6 | 0,010808629 | 0,116826603 | 0,000598709 | 3,316737694 | 0,007425355 | 0,010808612 | 4,528814321 | 0,000386569 | 0,000145545 | 0,000750992 | 8,15078E-05 | 4,75919E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-7 | 0,011095321 | 0,12310641 | 0,000630891 | 3,261444098 | 0,007656487 | 0,011095308 | 4,631831805 | 0,000286824 | 0,000190685 | 0,00051601 | 6,78455E-05 | 4,53953E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-8 | 0,010935207 | 0,119579152 | 0,000612815 | 3,330242645 | 0,011696455 | 0,010935201 | 4,529411841 | 0,000291113 | 0,000162374 | 0,0001091451 | 4,91776E-05 | 7,24614E-05 |
| C-Bomba Media-2500-10w30-9 | 0,010941514 | 0,119714059 | 0,000613521 | 3,350218072 | 0,019992501 | 0,010941505 | 4,320404643 | 0,000412417 | 0,000131292 | 0,001365885 | 8,27872E-05 | 8,00485E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-1 | 0,010565526 | 0,111630365 | 0,000572079 | 3,400720744 | -0,014858523 | 0,010565504 | 4,436608108 | 0,000370685 | 0,000203717 | 3,76699E-05 | 3,42163E-05 | 3,68326E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-2 | 1,04E-02 | 0,108448564 | 0,000555773 | 3,192348046 | -0,020666508 | 0,010413841 | 4,521734404 | 0,000435838 | 0,000177532 | 0,00124121 | 3,45924E-05 | 9,43532E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-3 | 1,18E-02 | 0,139126678 | 0,000712991 | 3,396660561 | 0,011945981 | 0,011795171 | 4,421685818 | 0,000367668 | 8,26136E-05 | 0,001091727 | 2,78476E-05 | 4,87988E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-4 | 1,17E-02 | 0,136655415 | 0,000700326 | 3,442392249 | 0,030253925 | 0,011689945 | 4,654670541 | 0,000401497 | 6,56583E-05 | 0,001945621 | 8,19341E-05 | 3,93616E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-5 | 1,05E-02 | 0,109511112 | 0,000561218 | 3,383143408 | -0,004858041 | 0,010464733 | 5,23463475 | 0,000312243 | 0,000161239 | 0,00051128 | 5,53303E-05 | 8,61285E-06 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-6 | 1,01E-02 | 0,101928963 | 0,000522362 | 3,43228533 | 0,005743856 | 0,010095965 | 5,794611666 | 0,000250221 | 0,000161518 | 0,000537627 | 2,23884E-05 | 9,93912E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-7 | 9,79E-03 | 0,095787068 | 0,000490886 | 3,373912092 | -0,004147659 | 0,009787065 | 5,257207941 | 0,000244726 | 6,92153E-05 | 0,000494656 | 4,70648E-05 | 3,22486E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-8 | 9,63E-03 | 0,092716272 | 0,000475149 | 3,193164037 | 0,005842575 | 0,009628908 | 4,963234601 | 0,000410037 | 0,000119114 | 0,000693256 | 7,20537E-05 | 5,86566E-05 |
| C-Bomba Media-2500-25w60-9 | 1,07E-02 | 0,113502085 | 0,000581671 | 3,572404821 | 0,031407044 | 0,010653712 | 5,694629659 | 0,000297914 | 0,000166394 | 0,00112518 | 9,79673E-05 | 7,69208E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-1 | 0,010479234 | 0,109814478 | 0,000562773 | 3,309826958 | -0,011762739 | 0,010479217 | 5,250696941 | 0,000411311 | 4,65346E-05 | 0,000714406 | 8,26533E-05 | 8,00735E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-2 | 0,011886877 | 0,141298063 | 0,000724119 | 3,366188028 | 0,068309882 | 0,01188686 | 4,297722557 | 0,000351885 | 6,4817E-05 | 0,000963708 | 5,49103E-05 | 8,9612E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-3 | 0,012166899 | 0,148033848 | 0,000758638 | 3,404940319 | 0,072006432 | 0,012166889 | 4,346794151 | 0,000638475 | 8,08769E-05 | 0,000405785 | 0,000148652 | 3,42968E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-4 | 0,013158713 | 0,173151964 | 0,000887363 | 3,284940497 | 0,043856067 | 0,013158693 | 4,139763539 | 0,000468248 | 1,52845E-05 | 0,000872851 | 2,34224E-05 | 6,11583E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-5 | 0,013286347 | 0,176527108 | 0,000904659 | 3,279439402 | 0,032609464 | 0,013286321 | 4,148232295 | 0,000650163 | 3,50844E-05 | 0,001093646 | 8,85429E-05 | 0,000138016 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-6 | 0,012863828 | 0,165478611 | 0,000848038 | 3,364477876 | 0,096752939 | 0,012863821 | 4,184838212 | 0,000471286 | 8,33269E-05 | 0,0011094 | 6,1358E-05 | 0,000113016 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-7 | 0,011646581 | 0,135642928 | 0,000695138 | 3,839522289 | -0,040593581 | 0,011646559 | 5,151526783 | 0,000358725 | 0,000296826 | 0,000587752 | 4,16009E-05 | 6,93292E-05 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-8 | 0,011744349 | 0,137929819 | 0,000706857 | 3,747226827 | -0,025778855 | 0,011744327 | 5,563337853 | 0,000421521 | 0,000242677 | 0,001520595 | 0,000153648 | 0,000169074 |
| C-Bomba Nueva-2500-20w50-9 | 0,013297527 | 0,176824475 | 0,000906183 | 3,328456569 | -0,006096645 | 0,013297507 | 4,206707366 | 0,00050598 | 0,00017141 | 0,001282556 | 8,1071E-05 | 5,48787E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-1 | 0,011082513 | 0,122822172 | 0,000629434 | 3,398874764 | 0,036144497 | 0,011082492 | 4,549070657 | 0,000407847 | 3,86394E-05 | 0,000470462 | 0,000129222 | 7,76378E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-2 | 0,011117575 | 0,124897894 | 0,000640072 | 3,379190736 | 0,042617628 | 0,011175748 | 4,505649586 | 0,000462141 | 6,19018E-05 | 0,001212938 | 8,50454E-05 | 7,45004E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-3 | 0,011758913 | 0,138273429 | 0,000708618 | 3,327435861 | -0,00740138 | 0,011758946 | 4,261424633 | 0,000510141 | 5,5094E-05 | 0,000841035 | 0,000134563 | 6,64843E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-4 | 0,011678647 | 0,136390947 | 0,000698971 | 3,291886791 | 0,002369771 | 0,011678628 | 4,191433866 | 0,000469858 | 3,87888E-05 | 0,000781532 | 0,000163219 | 5,84275E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-5 | 0,011123605 | 0,123734603 | 0,000634111 | 3,342934431 | 0,020901811 | 0,011123581 | 4,307299734 | 0,000249552 | 2,10846E-05 | 4,15818E-05 | 5,61035E-05 | 3,27566E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-6 | 0,011661668 | 0,135994935 | 0,000696942 | 3,339133386 | -0,034714697 | 0,011661661 | 4,3126767342 | 0,000499892 | 5,85887E-05 | 0,000743904 | 7,78968E-05 | 6,80432E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-7 | 0,011471327 | 0,131591443 | 0,000674375 | 3,294564712 | 0,042556712 | 0,011471306 | 3,987850189 | 0,000431866 | 1,31085E-05 | 0,000702892 | 9,61985E-05 | 6,32239E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-8 | 0,011501283 | 0,132280446 | 0,000677906 | 3,305265041 | 0,059348545 | 0,011501299 | 4,075626649 | 0,000516392 | 0,000118536 | 0,000269813 | 0,00017063 | 9,59001E-05 |
| C-Bomba Vieja-2500-20w50-9 | 0,011494799 | 0,132130472 | 0,000677137 | 3,286024615 | 0,037586498 | 0,011494777 | 3,929264356 | 0,000441334 | 3,80226E-05 | 0,001569037 | 2,4438E-05 | 9,29011E-05 |

ANEXOS 4

GRÁFICAS DE EFECTOS PRINCIPALES DE LAS CARACTERÍSTICAS TEMPORALES

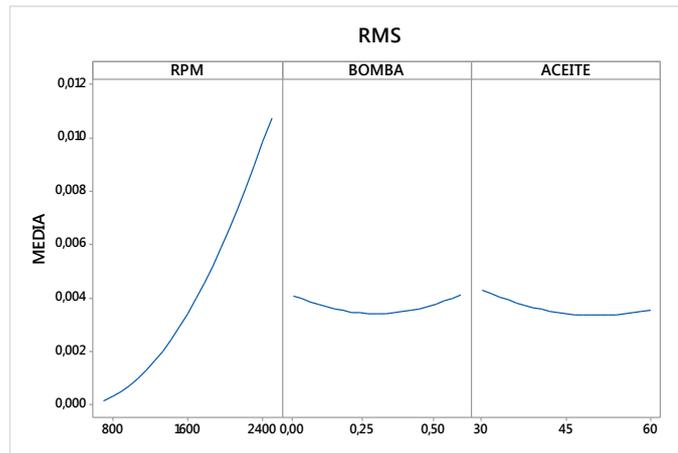


Figura 4-1- Efectos principales para RMS

Fuente: Los Autores

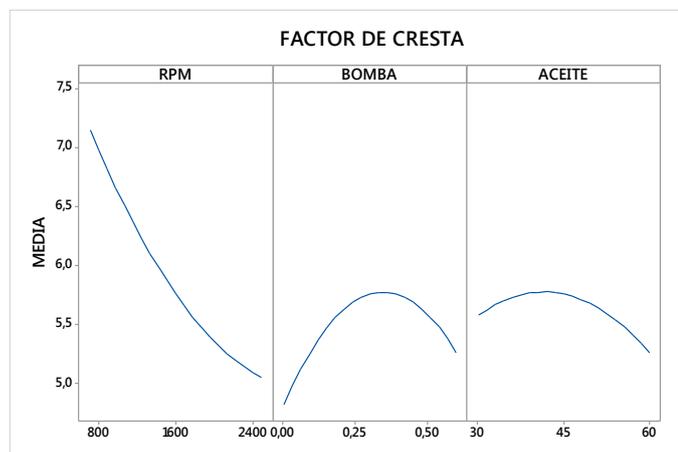


Figura 4-2- Efectos principales para FACTOR DE CRESTA

Fuente: Los Autores

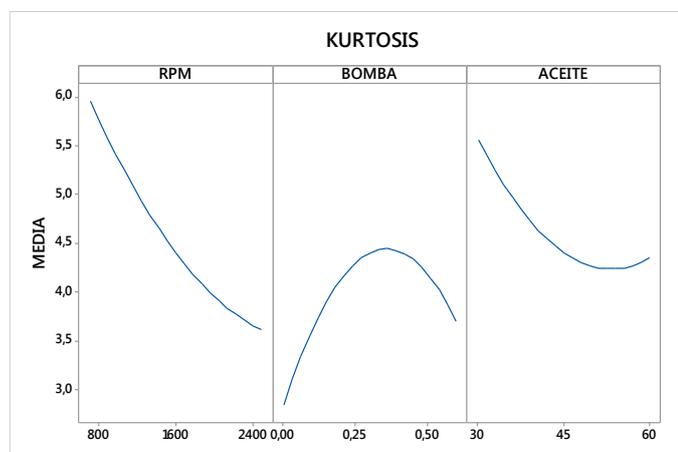


Figura 4-3- Efectos principales para RMS

Fuente: Los Autores

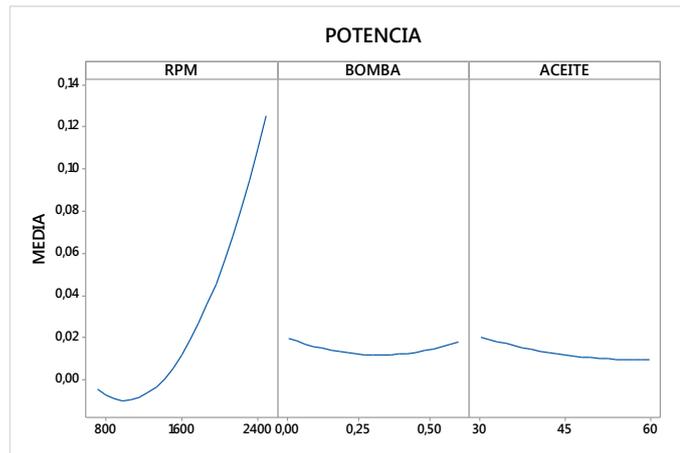


Figura 4.4.- Efectos principales para POTENCIA

Fuente: Los Autores

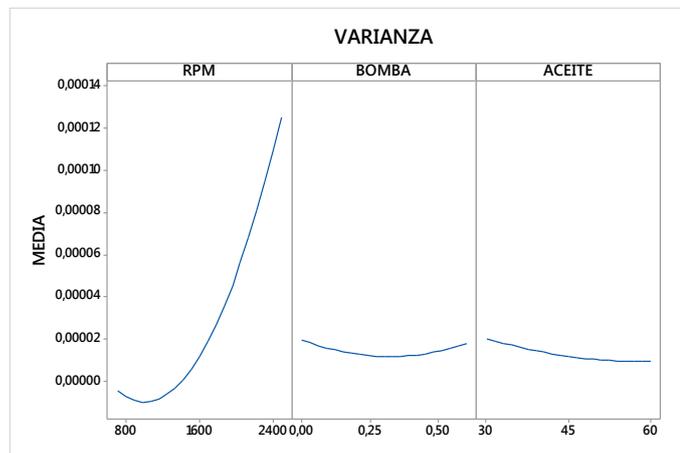


Figura 4-5.- Efectos principales para Varianza

Fuente: Los Autores