

I

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

*Trabajo de titulación previo  
a la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico Automotriz*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA BASE DEL MOTOR DE UN  
AUTOMÓVIL USANDO MEZCLAS DE CAUCHO RECICLADO CON AZUFRE”**

**AUTORES:**

CARPIO ORELLANA MANUEL WILSON  
VILLAMAR ESCALANTE ERICK GERMAN

**TUTOR:**

ING. LUIS MARCELO LÓPEZ LÓPEZ, MSc

CUENCA - ECUADOR

2021

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Manuel Wilson Carpio Orellana con documento de identificación N° 0103370979 y Erick German Villamar Escalante con documento de identificación N° 0705321305, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA BASE DEL MOTOR DE UN AUTOMÓVIL USANDO MEZCLAS DE CAUCHO RECICLADO CON AZUFRE”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, mayo del 2021.

Manuel Wilson Carpio Orellana

C.I. 0103370979

Erick German Villamar Escalante

C.I. 0705321305

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA BASE DEL MOTOR DE UN AUTOMÓVIL USANDO MEZCLAS DE CAUCHO RECICLADO CON AZUFRE”**, realizado por Manuel Wilson Carpio Orellana y Erick German Villamar Escalante, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2021.



Ing. Luis Marcelo López López, MSc.

C.I. 0102906971

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Manuel Wilson Carpio Orellana con documento de identificación N° 0103370979 y Erick German Villamar Escalante con documento de identificación N° 0705321305, autores del trabajo de titulación: **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA BASE DEL MOTOR DE UN AUTOMÓVIL USANDO MEZCLAS DE CAUCHO RECICLADO CON AZUFRE”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2021.



Manuel Wilson Carpio Orellana

C.I. 0103370979



Erick German Villamar Escalante

C.I. 0705321305

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al ser supremo a Dios y a la Virgen Santísima por permitirme alcanzar un logro más en mi vida; y al ser humano que son mi Papá Manuel Carpio, mi Mamá Zoila Orellana por apoyarme en todo especialmente con sus consejos y ser personas ejemplares, también agradezco a mi hermano Mario Carpio por influenciarme en ser una persona centrada; a todas mis hermanas por apoyarme en todo momento.

Por último, agradezco a mi tutor Ingeniero Marcelo López por apoyarnos en todo momento en la realización de esta tesis.

**Wilson.**

## **AGRADECIMIENTOS.**

En primer lugar, agradezco a Dios, por guiarme en el camino y acompañarme en momentos difíciles en donde siempre me brindo salud, paciencia y sabiduría.

A mi madre Eugenia, por haberme aconsejado y apoyado económicamente en este sendero de mi vida que es la universidad para así seguir alcanzando mis metas.

A mis tías Leonor, Germania, Pilar por estar ahí para brindarme su sabiduría en cada paso de mi vida como parte de mi familia.

A mi hermana Mayra por aconsejarme cada vez que tenía la oportunidad brindándome su conocimiento como profesional y excelente persona en mi vida.

A nuestro director de Tesis Ing. Luis Marcelo López López quién nos acompañó hasta el final del proyecto, brindándonos sus conocimientos en todo momento.

A los docentes y compañeros de taller gracias por todos los conocimientos y momentos compartidos.

**Erick.**

**DEDICATORIA.**

Este trabajo de titulación dedico a mis queridos padres por apoyarme en todo momento, moral, espiritual y económicamente gracias a ellos puedo culminar esta etapa más de mi vida y ellos son mi inspiración para poder obtener este título.

También dedico este título a mi pequeño y adorado hijo Jerson Carpio por ser una persona con una sonrisa muy brillante que desde el primer día que le tuve en mis brazos me regalo esa sonrisa y espero que ese resplandor y ese brillo que me sirvió para superar los obstáculos que tuve en el transcurso de este camino como estudiante y profesional poder conseguir un título más en mi vida también él lo haga cuando ya sea un joven.

**Wilson.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi querida madre Eugenia, que sola supo hacer muy bien el papel de padre y madre ante cualquier obstáculo de la vida, de esta manera me supo inculcar buenos valores y a mi hermana Mayra por ayudarme a forjar para ser una mejor persona honesta y humilde desde el principio de mis días hasta el resto de mi vida.

A mí amada esposa Lorena y a mí adorado hijo Dominick quienes con sus presencias, sus palabras y confianza me ayudan a seguir adelante sin rendirme ante los momentos difíciles para así seguir cumpliendo mis metas y hacer lo mejor para ellos.

**Erick.**



## INDICE

|                    |   |           |
|--------------------|---|-----------|
| <b>1.</b>          | <b>Introducción .....</b>                     | <b>3</b>  |
| <b>2.</b>          | <b>Problema .....</b>                         | <b>4</b>  |
| <b>2.1</b>         | <b>Antecedentes .....</b>                     | <b>4</b>  |
| <b>2.2</b>         | <b>Importancia y alcances .....</b>           | <b>5</b>  |
| <b>2.3</b>         | <b>Delimitaciones .....</b>                   | <b>5</b>  |
| <b>2.4</b>         | <b>Problema general .....</b>                 | <b>5</b>  |
| <b>2.5</b>         | <b>Problemas específicos .....</b>            | <b>5</b>  |
| <b>3.</b>          | <b>Objetivos .....</b>                        | <b>6</b>  |
| <b>3.1</b>         | <b>Objetivo general .....</b>                 | <b>6</b>  |
| <b>3.2</b>         | <b>Objetivos específicos .....</b>            | <b>6</b>  |
| <b>4.</b>          | <b>Matriz de consistencia .....</b>           | <b>7</b>  |
| <b>5.</b>          | <b>Marco teórico .....</b>                    | <b>8</b>  |
| <b>5.1.</b>        | <b>Polímero .....</b>                         | <b>8</b>  |
| <b>5.1.1.</b>      | <b>Definición .....</b>                       | <b>8</b>  |
| <b>5.1.2.</b>      | <b>Clasificación .....</b>                    | <b>8</b>  |
| <b>5.2.</b>        | <b>Elastómeros .....</b>                      | <b>9</b>  |
| <b>5.3.</b>        | <b>Caucho .....</b>                           | <b>10</b> |
| <b>5.3.1</b>       | <b>Definición .....</b>                       | <b>10</b> |
| <b>5.3.2</b>       | <b>Historia .....</b>                         | <b>10</b> |
| <b>5.3.3</b>       | <b>Origen .....</b>                           | <b>10</b> |
| <b>5.3.4</b>       | <b>Tipos .....</b>                            | <b>11</b> |
| <b>5.3.4.1</b>     | <b>Caucho natural .....</b>                   | <b>11</b> |
| <b>5.3.4.2</b>     | <b>Caucho reciclado .....</b>                 | <b>11</b> |
| <b>5.3.4.3</b>     | <b>Caucho vulcanizado .....</b>               | <b>12</b> |
| <b>5.4</b>         | <b>Azufre .....</b>                           | <b>12</b> |
| <b>5.5</b>         | <b>Negro de humo .....</b>                    | <b>12</b> |
| <b>5.6</b>         | <b>Vulcanización .....</b>                    | <b>13</b> |
| <b>5.6.1</b>       | <b>Historia .....</b>                         | <b>13</b> |
| <b>5.6.2</b>       | <b>Definición .....</b>                       | <b>13</b> |
| <b>5.6.3</b>       | <b>Caucho reciclado .....</b>                 | <b>14</b> |
| <b>5.6.4</b>       | <b>Consumo y disposición final .....</b>      | <b>14</b> |
| <b>5.7</b>         | <b>Vibración .....</b>                        | <b>15</b> |
| <b>5.7.1</b>       | <b>Clasificación de las vibraciones .....</b> | <b>15</b> |
| <b>5.7.2</b>       | <b>Amortiguamiento .....</b>                  | <b>15</b> |
| <b>5.7.2.1</b>     | <b>Generalidades .....</b>                    | <b>15</b> |
| <b>5.7.2.2</b>     | <b>Amortiguamiento viscoso .....</b>          | <b>16</b> |
| <b>5.7.2.3</b>     | <b>Vibración libre .....</b>                  | <b>16</b> |
| <b>5.7.2.4</b>     | <b>Vibración forzada .....</b>                | <b>16</b> |
| <b>5.7.2.5</b>     | <b>Vibración libre no amortiguada .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>5.7.2.5.1</b>   | <b>Definición .....</b>                       | <b>16</b> |
| <b>5.7.2.5.2</b>   | <b>Vibración libre amortiguada .....</b>      | <b>18</b> |
| <b>5.7.2.5.2.1</b> | <b>Definición .....</b>                       | <b>18</b> |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| 5.7.2.5.2.1 | Amortiguamiento crítico.....   | 19 |
| 5.7.2.5.2.2 | Amortiguamiento mayor al crítico.....                                  | 19 |
| 5.7.2.5.2.3 | Amortiguamiento menor al crítico.....                                  | 19 |
| 5.7.3       | Ecuaciones y unidades de las características de la vibración.....      | 20 |
| 5.7.3.1     | Parámetros de medición de vibraciones para describir movimiento.....   | 20 |
| 5.7.3.2     | Desplazamiento.....  | 20 |
| 5.7.3.3     | Velocidad.....   | 20 |
| 5.7.3.4     | Aceleración.....   | 20 |
| 5.7.3.5     | Espectro de vibración.....   | 21 |
| 5.8         | Banco de pruebas de vibración.....                                     | 21 |
| 5.9         | Dureza Shore.....  | 21 |
| 5.10        | Durómetro.....   | 22 |
| 5.11        | Transformada de fourier.....   | 22 |
| 5.12        | Media.....   | 23 |
| 5.13        | Varianza.....  | 23 |
| 5.14        | RMS - Root Mean Square (Media cuadrática).....                         | 23 |
| 5.15        | Función de Ventana.....  | 24 |
| 5.16        | Ventana Hanning.....   | 24 |
| 5.17        | Motor de combustión interna.....                                       | 25 |
| 5.18        | Bases de los motores.....  | 25 |
| 6           | Marco metodológico.....  | 26 |
| 6.1         | Metodología del proceso.....   | 27 |
| 6.2         | Diseño experimental.....   | 28 |
| 6.3         | Elementos experimentales (bases del motor).....                        | 28 |
| 6.4         | Equipo de pruebas (motor a gasolina).....                              | 32 |
| 6.5         | Elementos de medición.....   | 34 |
| 6.5.1       | Equipo de monitoreo Adash VA4pro®.....                                 | 34 |
| 6.5.2       | Acelerómetro.....  | 35 |
| 6.5.3       | Tacómetro.....   | 37 |
| 6.6         | Recolección de datos.....  | 38 |
| 6.6.1       | Proceso.....   | 38 |
| 6.6.2       | Protocolo de medición.....   | 39 |
| 6.6.3       | Clasificación de máquinas.....   | 40 |
| 6.6.4       | Registrar (Señal sin procesar).....                                    | 41 |
| 6.6.4.1     | Medición de vibración.....   | 42 |
| 6.6.5       | Configurar los parámetros de medición (Procesamiento de la señal)..... | 43 |
| 6.6.5.1     | Prueba 1 (Base izquierda).....   | 43 |
| 6.6.5.1.1   | Configuración de medición 1 (Aceleración Total RMS).....               | 43 |
| 6.6.5.1.2   | Configuración de medición 2 (Aceleración del Espectro FFT).....        | 44 |
| 6.6.5.1.3   | Configuración de medición 3 (Velocidad del motor).....                 | 45 |
| 6.6.5.2     | Prueba 2 (Base derecha).....   | 46 |
| 6.6.5.2.1   | Configuración de medición 1 (Aceleración Total RMS).....               | 46 |
| 6.6.5.2.2   | Configuración de medición 2 (Aceleración del Espectro FFT).....        | 47 |
| 6.6.5.2.3   | Configuración de medición 3 (Velocidad de motor).....                  | 48 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 6.6.6   | Analizar (Señal procesada).....  | 49 |
| 6.6.7   | Apagar analizador de vibraciones .....   | 49 |
| 7       | Metodología de estadística .....   | 50 |
| 7.1.1   | Base original 1.....   | 50 |
| 7.1.1.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base original 1 izquierda).....   | 50 |
| 7.1.1.2 | Registro (Señal procesada) (Base original 1 izquierda).....  | 51 |
| 7.1.1.3 | Análisis (Señal procesada) (Base original 1 izquierda).....  | 52 |
| 7.1.1.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base original 1 derecha) .....  | 53 |
| 7.1.1.5 | Registro (Señal procesada) (Base original 1 derecha) .....   | 54 |
| 7.1.1.6 | Análisis (Señal procesada) (Base original 1 derecha) .....   | 55 |
| 7.1.2   | Base original 2.....   | 56 |
| 7.1.2.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base original 2 izquierda).....   | 56 |
| 7.1.2.2 | Registro (Señal procesada) (Base original 2 izquierda).....  | 57 |
| 7.1.2.3 | Análisis (Señal procesada) (Base original 2 izquierda).....  | 58 |
| 7.1.2.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base original 2 derecha) .....  | 59 |
| 7.1.2.5 | Registro (Señal procesada) (Base original 2 derecha) .....   | 60 |
| 7.1.2.6 | Análisis (Señal procesada) (Base original 2 derecha) .....   | 61 |
| 7.2     | Estadísticas para identificar la dureza y la vibración en la base del motor realizando las pruebas en la maqueta de la Universidad modelo No. G-111701 con diferentes mezclas de caucho reciclado y azufre ..... | 62 |
| 7.2.1   | Base ensayo 1 .....  | 62 |
| 7.2.1.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 1 izquierda) .....  | 62 |
| 7.2.1.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 1 izquierda).....  | 63 |
| 7.2.1.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 1 izquierda) .....   | 64 |
| 7.2.1.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 1 derecha).....   | 65 |
| 7.2.1.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 1 derecha) .....   | 66 |
| 7.2.1.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 1 derecha).....  | 67 |
| 7.2.2   | Base ensayo 2 .....  | 68 |
| 7.2.2.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 2 izquierda) .....  | 68 |
| 7.2.2.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 2 izquierda).....  | 69 |
| 7.2.2.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 2 izquierda) .....   | 70 |
| 7.2.2.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 2 derecha).....   | 71 |
| 7.2.2.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 2 derecha) .....   | 72 |
| 7.2.2.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 2 derecha).....  | 73 |
| 7.2.3   | Base ensayo 3 .....  | 74 |
| 7.2.3.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 3 izquierda) .....  | 74 |
| 7.2.3.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 3 izquierda).....  | 75 |
| 7.2.3.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 3 izquierda) .....   | 76 |
| 7.2.3.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 3 derecha).....   | 77 |
| 7.2.3.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 3 derecha) .....   | 78 |
| 7.2.3.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 3 derecha).....  | 79 |
| 7.2.4   | Base ensayo 4 .....  | 80 |
| 7.2.4.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 4 izquierda) .....  | 80 |
| 7.2.4.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 4 izquierda).....  | 81 |
| 7.2.4.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 4 izquierda) .....   | 82 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 7.2.4.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 4 derecha) .....   | 83  |
| 7.2.4.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 4 derecha) .....      | 84  |
| 7.2.4.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 4 derecha) .....      | 85  |
| 7.2.5   | Base ensayo 5 .....   | 86  |
| 7.2.5.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 5 izquierda) ..... | 86  |
| 7.2.5.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 5 izquierda).....     | 87  |
| 7.2.5.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 5 izquierda) .....    | 88  |
| 7.2.5.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 5 derecha).....    | 89  |
| 7.2.5.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 5 derecha) .....      | 90  |
| 7.2.5.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 5 derecha).....       | 91  |
| 7.2.6   | Base ensayo 6 .....   | 92  |
| 7.2.6.1 | Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 6 izquierda) ..... | 92  |
| 7.2.6.2 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 6 izquierda).....     | 93  |
| 7.2.6.3 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 6 izquierda) .....    | 94  |
| 7.2.6.4 | Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 6 derecha).....    | 95  |
| 7.2.6.5 | Registro (Señal procesada) (Base ensayo 6 derecha) .....      | 96  |
| 7.2.6.6 | Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 6 derecha).....       | 97  |
| 7.3     | Estadísticas para pronosticar el comportamiento .....         | 98  |
| 8       | Resultados .....  | 101 |
| 8.1     | Resultados de dureza .....                                    | 101 |
| 8.2     | Resultados de vibración .....                                 | 101 |
| 9       | Conclusiones .....  | 102 |
| 9.1     | Conclusión general.....                                       | 102 |
| 9.2     | Conclusiones específicas.....                                 | 102 |
| 10      | Recomendaciones .....   | 103 |
| 11      | Bibliografía. ....  | 105 |
| 12      | Anexos.....   | 107 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1</b> Clasificación de los Polímeros .....   | 9  |
| <b>Figura 2</b> Tipos de Vibraciones.....  | 15 |
| <b>Figura 3</b> Esquema Dinámico para un Sistema Libre no Amortiguado .....                                | 17 |
| <b>Figura 4</b> Desplazamiento de un Sistema con vibración libre no amortiguada.....                       | 17 |
| <b>Figura 5</b> Esquema Dinámico para un Sistema Libre Amortiguado .....                                   | 18 |
| <b>Figura 6</b> Desplazamiento de un Sistema con vibración libre con amortiguamiento Crítica .....         | 19 |
| <b>Figura 7</b> Desplazamiento de un sistema con vibración libre con amortiguación crítica.....            | 19 |
| <b>Figura 8</b> Señales en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia .....                          | 22 |
| <b>Figura 9</b> Bases de los motores de Vehículos Livianos.....  | 25 |
| <b>Figura 10</b> Metodología a seguir para la investigación .....  | 26 |
| <b>Figura 11</b> Metodología del Proceso para el proyecto técnico.....                                     | 27 |
| <b>Figura 12</b> Base de motor experimental .....  | 28 |
| <b>Figura 13</b> Equipo de pruebas Motor a Gasolina (AVANTE) G-111701 .....                                | 33 |
| <b>Figura 14</b> Equipo de Monitoreo ADASH VA4Pro®.....  | 34 |
| <b>Figura 15</b> Posición del acelerómetro.....  | 35 |
| <b>Figura 16</b> Acelerómetro A102-1A.....   | 36 |
| <b>Figura 17</b> Ubicación de la sonda de velocidad y la cinta reflectiva.....                             | 37 |
| <b>Figura 18</b> Proceso para el uso del analizador de vibraciones ADASH V4Pro .....                       | 38 |
| <b>Figura 19</b> Ubicación del acelerómetro en los puntos para las 2 pruebas de vibración. ....            | 39 |
| <b>Figura 20</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 50 |
| <b>Figura 21</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 51 |
| <b>Figura 22</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 53 |
| <b>Figura 23</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 54 |
| <b>Figura 24</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 56 |
| <b>Figura 25</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 57 |
| <b>Figura 26</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 59 |
| <b>Figura 27</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 60 |
| <b>Figura 28</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 62 |
| <b>Figura 29</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 63 |
| <b>Figura 30</b> Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 65 |
| <b>Figura 31</b> Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 66 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Figura 32</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 68 |
| <b>Figura 33</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 69 |
| <b>Figura 34</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 71 |
| <b>Figura 35</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 72 |
| <b>Figura 36</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 74 |
| <b>Figura 37</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 75 |
| <b>Figura 38</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 77 |
| <b>Figura 39</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 78 |
| <b>Figura 40</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 80 |
| <b>Figura 41</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 81 |
| <b>Figura 42</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 83 |
| <b>Figura 43</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 84 |
| <b>Figura 44</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 86 |
| <b>Figura 45</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 87 |
| <b>Figura 46</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 89 |
| <b>Figura 47</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 90 |
| <b>Figura 48</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 92 |
| <b>Figura 49</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 93 |
| <b>Figura 50</b> | Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ ) ..... | 95 |
| <b>Figura 51</b> | Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz).....    | 96 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1</b> Matriz de Consistencia en el Desarrollo del Proyecto Técnico .....          | 7  |
| <b>Tabla 2</b> Porcentajes de los compuestos de las bases de ensayo .....                  | 29 |
| <b>Tabla 3</b> Resultados de ensayos a probetas con 100 % de F-NFU .....                   | 29 |
| <b>Tabla 4</b> Resultados de ensayos a probetas con 99.5 % de F-NFU y 0.5 % de Azufre..... | 30 |
| <b>Tabla 5</b> Resultados de ensayos a probetas con 98 % de F-NFU y 2 % de Azufre.....     | 30 |
| <b>Tabla 6</b> Resultados de ensayos a probetas con 96.5 % de F-NFU y 3.5 % de Azufre..... | 31 |
| <b>Tabla 7</b> Resultados de ensayos a probetas con 95 % de F-NFU y 5 % de Azufre.....     | 31 |
| <b>Tabla 8</b> Resultados de ensayos a probetas con 93.5 % de F-NFU y 6.5 % de Azufre..... | 32 |
| <b>Tabla 9</b> Características de la Unidad de Experimental .....                          | 33 |
| <b>Tabla 10</b> Características del Acelerómetro A102-A .....                              | 36 |
| <b>Tabla 11</b> Clasificación de las máquinas según norma ISO 10816-1 .....                | 40 |
| <b>Tabla 12</b> Encendido del acelerómetro y tacómetro.....                                | 41 |
| <b>Tabla 13</b> Configuración del acelerómetro.....  | 42 |
| <b>Tabla 14</b> Configuración de Medición 1, para la aceleración total RMS .....           | 44 |
| <b>Tabla 15</b> Configuración de Medición 2, para la aceleración del espectro FFT.....     | 45 |
| <b>Tabla 16</b> Configuración de Medición 3, para la velocidad .....                       | 46 |
| <b>Tabla 17</b> Configuración de Medición 1, para la aceleración total RMS .....           | 47 |
| <b>Tabla 18</b> Configuración de Medición 2, para la aceleración del espectro FFT.....     | 48 |
| <b>Tabla 19</b> Configuración de Medición 3, para la velocidad .....                       | 49 |
| <b>Tabla 20</b> Estadística del comportamiento de las bases motor.....                     | 98 |

## Índice de ecuaciones

|  |                                   |  |    |
|--|-----------------------------------|--|----|
| $f = 1/T = \omega/2\pi = \text{RPM}/60$            | <a href="#"><b>Ecuación 1</b></a> | <a href="#">Ecuación de la Frecuencia</a> .....                | 20 |
| $T = 1/f = 2\pi/\omega$                            | <a href="#"><b>Ecuación 2</b></a> | <a href="#">Periodo o Tiempo (seg)</a> .....                   | 20 |
| $\omega = 2\pi f$                                  | <a href="#"><b>Ecuación 3</b></a> | <a href="#">Velocidad Angular (RPM)</a> .....                  | 20 |
| $f_n = 1/2\pi \sqrt{K/m}$                          | <a href="#"><b>Ecuación 4</b></a> | <a href="#">Frecuencia Natural (Hz)</a> .....                  | 20 |
| $\bar{x} = \sum x_i/n$                             | <a href="#"><b>Ecuación 5</b></a> | <a href="#">Ecuación para Calcular la Media</a> .....          | 23 |
| $s^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)$           | <a href="#"><b>Ecuación 6</b></a> | <a href="#">Ecuación para Calcular la Varianza</a> .....       | 23 |
| $RMS = \sqrt{\sum x_i^2 / n}$                      | <a href="#"><b>Ecuación 7</b></a> | <a href="#">Ecuación de RMS</a> .....                          | 23 |
| $V_h = 0.5(1 - \cos(2\pi kn))$ , $K = 1, \dots, n$ | <a href="#"><b>Ecuación 8</b></a> | <a href="#">Ecuación para definir la Ventana Hanning</a> ..... | 25 |



## Resumen

En este presente Proyecto Técnico se pone al descubierto la gran utilidad e importancia de reciclar los Neumáticos Fuera de Uso (NFU), los cuales al volverse a tratar como materia prima mediante equipos, maquinarias y planificaciones se obtiene la Fibra de Neumáticos Fuera de Uso (F-NFU), con esta fibra mezclando con distintas cantidades porcentuales de Azufre que ayuda al re-vulcanizado así como el Negro de Humo, creamos 6 ensayos (Bases de Motor) con los cuales realizamos las pruebas de dureza y vibración para analizar sus propiedades mecánicas.

Un espectro en función de la Amplitud ( $m/s^2$ ) y la Frecuencia (Hz), todo esto con uso del equipo profesional de laboratorio Adash VA4Pro®, bajo el funcionamiento de un motor de 4 cilindros de 1468 cc, con la toma de datos y sus análisis se obtuvo que los resultados fueron muy favorables.

Conforme se incrementaba el aditivo para ayudar al re-vulcanizado en cantidades (%) dentro de los ensayos, se obtuvo mejores propiedades mecánicas y se pudo pronosticar un comportamiento decreciente de la inestabilidad en estos ensayos en las pruebas de funcionamiento en régimen normal, gracias al aditivos del Azufre que juega un papel más importante que el Negro de Humo dentro de la vulcanización de estos ensayos.

**Palabras clave:** Dureza, vibración, vulcanización, Neumáticos Fuera de Uso (NFU), Fibras de Neumáticos Fuera de Uso (F-NFU), azufre, negro de humo, amplitud, frecuencia, espectro

## Abstract

In this present Technical Project, the great utility and importance of recycling End of Life Tires (NFU) is revealed, which when retreated as a raw material by means of equipment, machinery and planning, the End of Use Tires Fiber is obtained (F-NFU), with this fiber mixing with different percentage amounts of Sulfur that helps re-vulcanization as well as Carbon Black, we created 6 tests (Motor Bases) with which we carried out hardness and vibration tests to analyze its mechanical properties.

A spectrum as a function of Amplitude ( $m/s^2$ ) and Frequency (Hz), all this with the use of the professional laboratory equipment Adash VA4Pro®, under the operation of a 4-cylinder 1468 cc engine, with data collection and his analysis was obtained that the results were very favorable.

As the additive to aid re-vulcanization was increased in amounts (%) within the tests, better mechanical propertier were obtained and a decreasing behavior of the instability could be predicted in this test in the normal operation tests, thanks to the Sulfur additives that play a more important role than Carbon Black in the vulcanization of these tests.

**Keywords:** Hardness, vibration, vulcanization, End of Life Tires (NFU), End of Life Tire Fibers (F-NFU), sulfur, carbon black, amplitude, frequency, spectrum

## 1. Introducción

En el planeta los recursos naturales son escasos y se están agotando cada vez con el transcurso del tiempo, la evolución del hombre y la tecnología son factores que ayudan para la comodidad de los seres humanos, pero es un peligro para el ecosistema si el uso no se da con conciencia y control. Los neumáticos se desechan después de cumplir su vida útil y en otros casos se desechan cuando los propietarios de los vehículos se descuidan de alinear, en la rodadura del neumático el desgaste se da solo en las partes de adentro o en la parte de afuera, y no cumple su vida útil de tiempo o de recorrido por la mala alineación del sistema de dirección.

Fomentar el reciclaje es un método para contrarrestar el uso de los recursos naturales y minimizar el impacto ambiental; por este motivo hay campañas de reciclaje de neumáticos usados, (tallerxxi, 2017) los neumáticos usados tienen en la actualidad diversas aplicaciones. Así, por ejemplo, con el caucho se fabrica el relleno para los campos de césped artificial. Con ellos también se ha conseguido modificar las propiedades de las mezclas bituminosas que se utilizan para asfaltar carreteras, consiguiendo que se agrieten menos y aportando una mayor flexibilidad al firme.

Los vehículos y sus partes que lo conforman tienen una vida útil de tiempo y recorrido poniendo confianza y seguridad de los conductores y peatones cuando está en marcha por las vías de una ciudad, por tal motivo que sus repuestos para su construcción en algunos casos son fabricados con materiales reciclados cumpliendo con las características, propiedades mecánicas que necesitan y con un costo cómodo para que sean reemplazados por las partes originales.

## **2. Problema**

Las bases del motor están sometidas a cargas dinámicas y estáticas del peso del motor por este motivo se produce el desgaste del caucho de las placas metálicas que ocurre con el transcurso del tiempo y el funcionamiento del automóvil, cuando estos están deteriorados, las anomalías se hacen presentes con golpeteos y repiques de metal contra metal, otro síntomas de falla es que el motor comience a golpear contra otras partes del automóvil como son: radiador y los elementos que están conectadas a diferentes sistemas del automóvil.

Las características mecánicas de las bases del motor no cuentan con un estudio experimental en las mezclas de caucho natural con azufre y caucho reciclado para obtener los resultados de resistencia y durabilidad para promover el reciclado de los neumáticos fuera de uso, para su potencial aplicación como materia prima.

### **2.1 Antecedentes**

El motor de un vehículo está conectado a una serie de piezas y al chasis; sin embargo, si este armazón se tratara sólo de tuercas y tornillos, se sentiría cada sacudida, ladeo y golpe que el coche tenga y el motor probablemente se rompería rápidamente la parte de la estructura sobre la cual se asienta. Este problema se resuelve con el uso de soportes de motor. Estas piezas cierran la conexión entre el motor y el chasis del automóvil y son un componente muy importante.

Los soportes del motor, como pieza del vehículo, son esencialmente un diseño muy sencillo, consiste en placas de fijación de metal con un bloque de goma en medio, que actúa como un cojín o un aislamiento para los golpes. La pieza de goma absorbe los impactos y vibraciones de las placas metálicas conectadas al perno de goma, al bastidor y al bloque del motor.

Al utilizar este diseño de aislamiento, el conductor y los pasajeros en el interior del automóvil no se ven afectados por todas las sacudidas, ruidos y la transferencia de vibraciones que tienen lugar mientras el motor funciona. Sin los soportes, la vibración del motor y el movimiento harían que conducir fuera extremadamente incómodo.

## **2.2 Importancia y alcances**

Las mezclas de caucho natural, azufre y caucho reciclado deben cumplir de igual o mejor manera con las propiedades mecánicas de dureza y vibración de las bases originales de un vehículo para implementar la fabricación de este sistema y promover el reciclaje de neumáticos desechados.

## **2.3 Delimitaciones**

El experimento de las mezclas de caucho natural, azufre y caucho reciclado se procederá a realizar varias combinaciones de porcentajes de estos elementos para ver cuál es el comportamiento y los resultados que se den de acuerdo al análisis que se presente después de las combinaciones de porcentajes para ver si las propiedades mecánicas de dureza y vibración son mejores o peores a las de las propiedades que tenga las bases originales de caucho natural.

## **2.4 Problema general**

¿Cuál es la eficiencia de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, de caucho natural en un banco de pruebas?

## **2.5 Problemas específicos**

¿Es posible establecer los parámetros de dureza y vibración de la base del motor (Avante) Modelo No. G-111701, con su construcción original?

¿Se podrá identificar la dureza y vibración de la base del motor (Avante) Modelo No. G-111701, con diferentes mezclas de caucho reciclado con azufre?

¿Se podrá pronosticar el comportamiento de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, de acuerdo al material de caucho reciclado con azufre?

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Estudiar las propiedades mecánicas en la base del motor de un automóvil usando mezclas de caucho reciclado con azufre.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Establecer los parámetros de dureza y vibración de la base del motor realizando las pruebas en la maqueta de la Universidad Modelo No. G-111701, con su construcción original.

Identificar la dureza y la vibración en la base del motor realizando las pruebas en la maqueta de la Universidad Modelo No. G-111701 con diferentes mezclas de caucho reciclado y azufre.

Pronosticar el comportamiento de la base original del motor de acuerdo a un modelo matemático en la maqueta de la Universidad Modelo No. G-111701, de acuerdo al material de caucho reciclado y azufre.

#### 4. Matriz de consistencia

**Tabla 1**

*Matriz de Consistencia en el Desarrollo del Proyecto Técnico*

| PROBLEMAS.   | OBJETIVOS.  | VARIABLES.   | MARCO TEÓRICO.  | ANÁLISIS DATOS.  | INSTRUMENTOS MEDICIÓN.         |
|--|---|--|---|--|--------------------------------|
| <b><u>General.</u></b><br>¿Cuál es la eficiencia de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, de caucho natural en un banco de prueba?                      | <b><u>General.</u></b><br>Estudiar las propiedades mecánicas en la base del motor del automóvil usando mezclas de caucho reciclado con azufre.  |  | Caucho.<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Natural.</li> <li>• Reciclado.</li> <li>• Vulcanizado.</li> </ul> Azufre.<br><br>Negro de Humo. |  |                                |
| <b><u>Específicos.</u></b><br>¿Es posible establecer los parámetros de dureza y vibración de la base del motor (Avante) Modelo No. G-111701, con su construcción original? | <b><u>Específicos.</u></b><br>Establecer la dureza y vibración de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, con su construcción original                                     | <b>VI:</b> Mezcla de caucho Original.<br><br><b>VD:</b> Dureza y Vibración de las bases originales del motor.  | Vibraciones.<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplitud.</li> <li>• Frecuencia.</li> </ul> Banco de pruebas de vibración.                 | Vibraciones.<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplitud.</li> <li>• Frecuencia.</li> </ul> | Banco de Pruebas de Vibración. |
| <b><u>¿Se podrá identificar la dureza y vibración en la base del motor (Avante) Modelo No. G-11170, con diferentes mezclas de caucho reciclado con azufre?</u></b>         | Identificar la dureza y vibración de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, con diferentes mezclas de caucho reciclado y azufre.  | <b>VI:</b> Mezcla de caucho reciclado.<br><br><b>VD:</b> Dureza y Vibración de las bases originales del motor. | Dureza Shore.<br><br>Durómetro.   | Dureza Shore.  | Durómetro.                     |
| <b><u>¿Se podrá pronosticar el comportamiento de la base original del motor (Avante) Modelo No. G-111701, de acuerdo al material de caucho reciclado con azufre?</u></b>   | Pronosticar el comportamiento de la base original del motor de acuerdo a un modelo matemático en la maqueta de la Universidad Modelo No. G-111701, de acuerdo al caucho reciclado y azufre. | <b>VI:</b> Mezcla de caucho Original.<br><br><b>VD:</b> Dureza y Vibración de las bases originales del motor.  | Motor (Avante) Modelo No. G-111701.<br><br>Bases del motor.<br><br>Balanza digital de precisión.  | Pesos de las Bases del Motor (Avante) Modelo No. G-111701.   | Balanza digital de Precisión.  |

Fuente: Elaboración Propia

## **5. Marco teórico.**

Los componentes que constituyen las bases del motor en su fabricación, son partes esenciales para su rendimiento, con una adecuada instalación en el acoplamiento entre el motor y el chasis. La selección de materiales para su construcción, ha surgido a través de ensayos y experimentos plasmados en normas de control interno y control de calidad vigentes en el ámbito nacional e internacional, permiten alcanzar un mayor grado de confort entre los usuarios y el automóvil; de ahí la importancia de conocer el proceso que conlleva la elaboración de las bases del motor con materiales de calidad para su rendimiento y durabilidad.

### **5.1. Polímero**

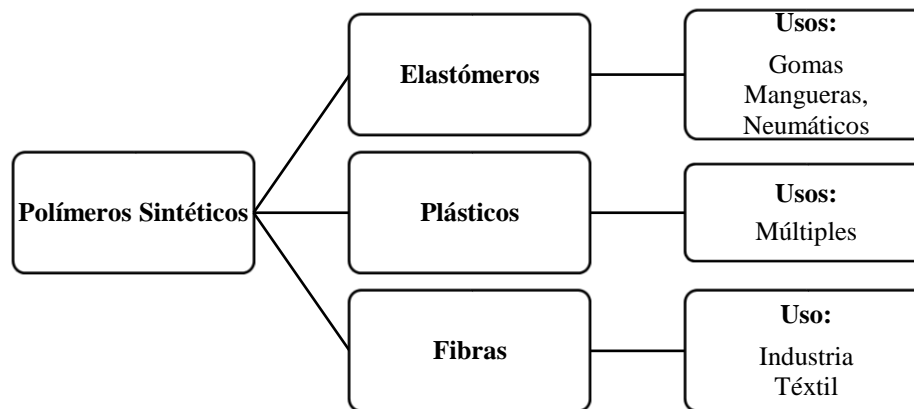
#### **5.1.1. Definición**

Los polímeros son un tipo particular de macromolécula, que se caracteriza por tener una unidad que se repite a lo largo de la molécula. Las pequeñas moléculas que se combinan entre sí mediante un proceso químico, llamado reacción de polimerización, para formar el polímero se denominan monómeros (López, 2005, p. 1).

#### **5.1.2. Clasificación**

De acuerdo a los polímeros sintéticos que son conocidos por su importancia en el sector comercial por su diversa gama de utilidades, son clasificadas al respecto a su uso y propiedades al que es necesario indicar mediante la siguiente figura:



**Figura 1***Clasificación de los Polímeros*

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2. Elastómeros

Son materiales que tienen la capacidad de extraerse una vez que se aplica una carga externa y de auto- retraerse al momento de dejar de aplicar la fuerza externa, el fenómeno molecular consiste en el estiramiento a nivel molecular en dirección de la concentración del esfuerzo, pues dichas moléculas se encuentran entrecruzadas, el cual impide el desplazamiento de las cadenas moleculares. (López, 2005, p. 54)

El caucho y elastómeros son usados en diferentes campos por los especialistas para satisfacer cualquier campo de sus ramas. “Polímero vulcanizado es capaz de recuperar su forma inicial después de haber experimentado deformaciones considerables bajo la acción de fuerzas externas y de temperaturas de trabajo elevadas” (Cruz et al., 2012, p. 2).

Sin embargo, es importante no confundir los procesos que fortalecen al aumentar la elasticidad de cada uno de los materiales que forman las cadenas entrecruzadas de macromoléculas, porque son el resultado del proceso de entrelazando de cadenas moleculares y ayudan a mejorar el desempeño de las propiedades de los materiales ante los factores dinámicos de carga, temperatura,

presión, agua y gas. Estos procesos provienen de prácticas que comenzaron en el siglo XVIII y estas practicas tienen desarrollos tecnológicos en materiales elastómeros, incluyendo el Caucho.

### **5.3. Caucho**

#### **5.3.1 Definición**

“El caucho es un polímero natural formado entre 100.000 a 1.000.000 monómeros de isopreno” (López Romero, 2014). Se extrae de diferentes tipos de plantas tropicales que provienen de diferentes partes del mundo, y se puede utilizar para fabricar neumáticos, aislantes, gomas y tuberías.

#### **5.3.2 Historia**

Algunos productos compuestos por cadenas de polímeros utilizados antiguamente por pueblos primitivos que vivían en el Continente Americano, entre ellos los Maya utilizaban el látex para hacer pelotas como actividad de recreativa. Sin embargo, una vez iniciada la Colonización, los españoles empezaron a comercializar el caucho hasta 1839, el inventor Charles Goodyear lo envió accidentalmente a Europa a través de caucho vulcanizado condujo al resultado de la invención e invento conjuntamente con John Boyd Dunlop a finales de la década de 1880 con el descubrimiento del neumático. Esto condujo a un aumento en la demanda del caucho, que es el material básico para el crecimiento y necesidades de la industria automotriz.

#### **5.3.3 Origen**

El caucho proviene del líquido del árbol denominado *Hevea Brasiliensis*, común de algunas regiones del Amazonas, en especial de algunas zonas de Brasil, Perú y Bolivia. No obstante, no es hasta durante el siglo XIX, por requerimiento de la Oficina de la India, el Gobierno Británico se enviaron semillas y plantas al sur de la India, así expandiéndose a otros países del Sureste Asiático pues también tienen las condiciones óptimas para el desarrollo del árbol (García, 1982,p258).

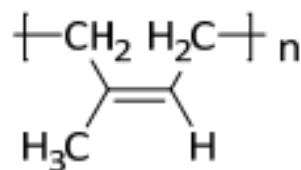
“Los productos de caucho natural pueden fabricarse a partir del material en estado sólido, luego de coagular el látex y procesar material coagulado, o empleando la suspensión coloidal de látex estabilizado; en cualquiera de los dos casos, se emplean diferentes aditivos que deben ser incorporados en la matriz de caucho natural” (Yepes, et al., 2017, p. 101)

No obstante, el caucho no únicamente se puede producir de manera natural, sino puede ser sintetizado, llegando en ciertas ocasiones a ser mejor que el caucho natural siendo utilizado en la fabricación de llantas para bicicletas, sin embargo en la fabricación de neumáticos para vehículos pesados es indiscutible la utilización de caucho natural (BBC News Mundo, 2019)

### 5.3.4 Tipos

#### 5.3.4.1 Caucho natural

“El caucho natural es un polímero formado por la repetición de monómeros de isopreno (2 metilbutadieno). Tienen enlaces regulares entre el primer carbono y el cuarto carbono (cabeza-cola), con configuración (isomería geométrica) cis. Por lo tanto su estructura química es cis 1,4 poliisopreno (Brasero Espada, 2017).



#### 5.3.4.2 Caucho reciclado

“El residuo de los neumáticos se emplea comúnmente en aditivos para asfaltos y hormigones, suelos de superficies deportivas o de parques infantiles, productos moldeados y caladrados” (Crespo et. Al, 2014, p.8). La reutilización del caucho es importante para la preservación del medio ambiente, así como también para conseguir la elaboración de productos nuevos que pueden ser útiles, entre estos abridores de frascos, columpios de llantas.

### **5.3.4.3 Caucho vulcanizado**

“Se obtiene utilizando catalizadores y puede vulcanizarse igual que el caucho natural. El proceso de vulcanización consiste en unir las cadenas de poli-(isopreno) con átomos de azufre” (López Romero, 2014). El proceso para la fabricación del caucho vulcanizado es calentar el azufre junto al caucho, con la finalidad de volverlo más duro e invulnerable al frío.

## **5.4 Azufre**

Es un elemento químico con peso atómico dieciséis, presente en grandes cantidades en la corteza terrestre, presentes en regiones volcánicas en forma de sulfuros y en sulfatos una vez oxidada. Al actuar con el Hidrógeno, produce un olor fétido similar a huevo podrido y al pasar del estado sólido al gaseoso, expide dióxido de azufre (Santana, 2020).

“El azufre es un componente del petróleo y del carbón, en una proporción que varía entre el 0,1 y el 5%” (González et. Al., 2016). Es un componente químico, derivado en el grupo de los no metales, sirve para la producción de ácido sulfúrico para baterías, vulcanizado del caucho, elaboración de pólvora; por lo tanto se usa simultáneamente para los procesos industriales.

## **5.5 Negro de humo**

El negro de humo es un producto fundamental en la industria del caucho como reforzante al aportarle diferentes cualidades que éste no posee, como resistencia a la abrasión y a la tensión. Se emplea también como pigmento en pinturas y recubrimientos, como agente conductor o como estabilizante a los rayos ultravioletas. (Graú y Muñoz, 2013)

Esto indica que es la congregación del negro de humo con los demás pigmentos negros del carbono, y se lo obtiene a través de la combustión fragmentaria de varios materiales como grasas, hulla, brea y aceites. Se destaca que el método más antiguo para preparación de este pigmento.

## **5.6 Vulcanización**

### **5.6.1 Historia**

En 1839, Charles Goodyear, por accidente vertió a una mezcla de látex con azufre en una olla caliente, el cual mejoró de manera notable las propiedades mecánicas del caucho, lo mejor de todo evitaba la adhesión a los metales e impermeabilidad ante líquidos.

### **5.6.2 Definición**

El descubrimiento del proceso de la Vulcanización, sin duda revolucionó industria y comercio (Peñalva, 2019) afirma

La vulcanización es un proceso químico para la conversión del caucho o polímeros relacionados en materiales más duraderos a través de la adición de azufre u otros equivalentes "curativos". Estos aditivos modifican el polímero mediante la formación de enlaces cruzados (puentes) entre las distintas cadenas de polímeros.

El caucho al ser un polímero mediante el proceso de vulcanizado, si bien aumenta su retracción mientras se encuentre en estado elástico también disminuye la deformación residual una vez que cesa la carga pues disminuye su plasticidad (Cruz Cal Blanca, Guerra Valdés, Álvarez García, & Blanco, 2012) no basta entonces mencionar que gracias a las propiedades de sus cadenas moleculares de estos polímeros según Sampietro y Rescia (1997) manifiestan que el caucho vulcanizado es impermeable a los gases y resistente a la abrasión, acción química, calor y electricidad, aumento del coeficiente de rozamiento en superficie seca y un bajo coeficiente de rozamiento en superficies mojadas.

### **5.6.3 Caucho reciclado**

El caucho reciclado corresponde aquel material que haya cumplido su vida útil, o caso contrario es aquel tipo de caucho sean accidentes, desgaste parcial, rotura parcial y total necesita ser reemplazado con uno de igual o mejor calidad.

El ser el caucho reciclado, producto de la reacción de vulcanización como proceso para mejorar las propiedades mecánicas del caucho, es térmicamente irreversible por lo que se requiere de procesos tales como: trituración mecánica, métodos químicos o recuperación energética (Pelález Arroyave, Velásquez Restrepo, & Giraldo Vásquez, 2017).

### **5.6.4 Consumo y disposición final**

El problema de emplear el caucho vulcanizado, es su reciclaje y disposición final considerando que se han elaborado estudios para la aplicabilidad del caucho reciclado dado que sí bien no es posible retornar a sus condiciones iniciales sin tampoco generar problemas al ambiente a pesar de que el consumo mundial ha aumentado, “ tan sólo en el 2014 se emplearon 28.9 millones de toneladas en la producción de productos derivados del caucho, proyectando un aumento de 3.1% anual del consumo al que 17 millones de toneladas son producto de llantas usadas, en el que el caucho representa así entre el 41 al 55% de su peso se generarían entre 7 y 9 millones de toneladas de caucho neto” (Pelález Arroyave, Velásquez Restrepo, & Giraldo Vásquez, 2017), lo cual genera inconvenientes en su gestión y disposición final, ya que al ser el caucho reciclado al ser un producto no biodegradable, su manejo inadecuado podría contaminar el aire, suelo y el agua, al igual que constituir ambientes favorables para la reproducción de plagas, ratas y mosquitos como su potencial amenaza de incendio.

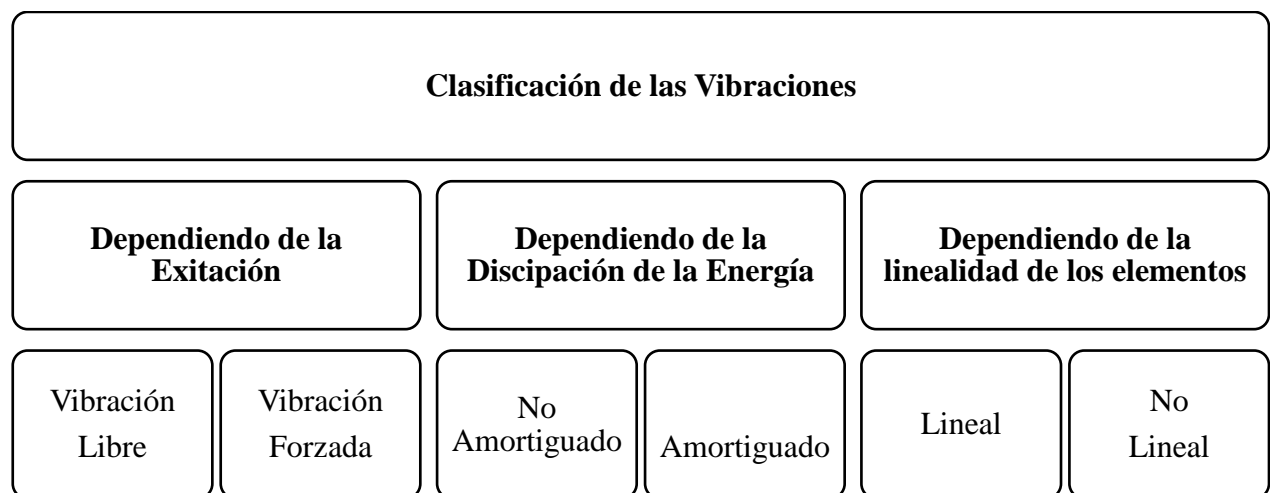
## 5.7 Vibración

Es la oscilación o el movimiento repetitivo en una sola dirección de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la que llegará cuando la fuerza o sumatoria de fuerzas actúa sobre él sea cero. La vibración de un objeto es causada por una fuerza excitación, que puede ser interna o externa al objeto. Las señales de vibración pueden ser observadas tanto en el tiempo como en la frecuencia (White, 2009, p. 16)

### 5.7.1 Clasificación de las vibraciones

**Figura 2**

*Tipos de Vibraciones*



Fuente: Elaboración Propia

### 5.7.2 Amortiguamiento

#### 5.7.2.1 Generalidades

Todo cuerpo que se encuentra ante la acción de fuerzas externas o fuerzas gravitacionales, elásticas con respecto al tiempo, su desplazamiento disminuye por la pérdida de energía tal que da lugar a la transferencia otras formas de energía como calor y sonido. (García, 1998, p. 11)

### **5.7.2.2 Amortiguamiento viscoso**

“La pérdida de energía de las partículas se debe al desplazamiento de la partícula al encontrarse en presencia de un medio viscoso al oponerse a la dirección que presenta la partícula en un instante” (García, 1998)

### **5.7.2.3 Vibración libre**

El desplazamiento de la partícula se encuentra exclusivamente restringido a fuerzas de carácter gravitacionales y fuerzas elásticas se reducen con el tiempo por la pérdida de energía.

### **5.7.2.4 Vibración forzada**

El desplazamiento de la partícula se encuentra exclusivamente restringido Fuerzas externas tales como excitaciones sísmicas, continuaciones de fuerzas aplicadas sobre la base del motor se reducen con el tiempo por la respectiva transferencia de energía.

### **5.7.2.5 Vibración libre no amortiguada**

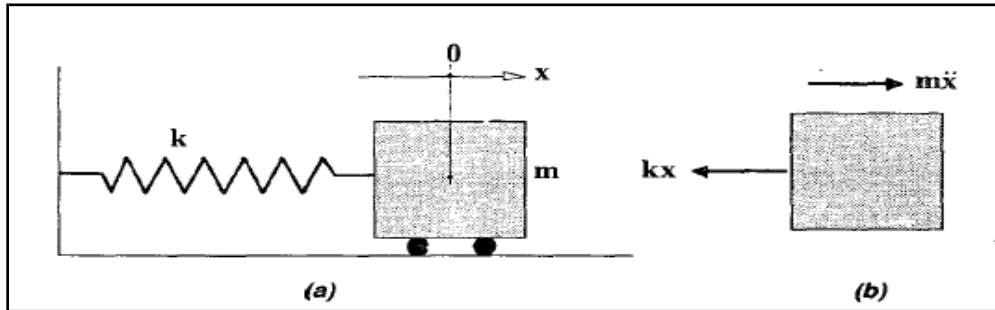
#### **5.7.2.5.1 Definición**

Sistema aislado que, ante fuerzas gravitacionales y elásticas, sin considerar la presencia de medios viscosos, el desplazamiento de la partícula disminuye con respecto al tiempo retornando así a su punto de equilibrio.



**Figura 3**

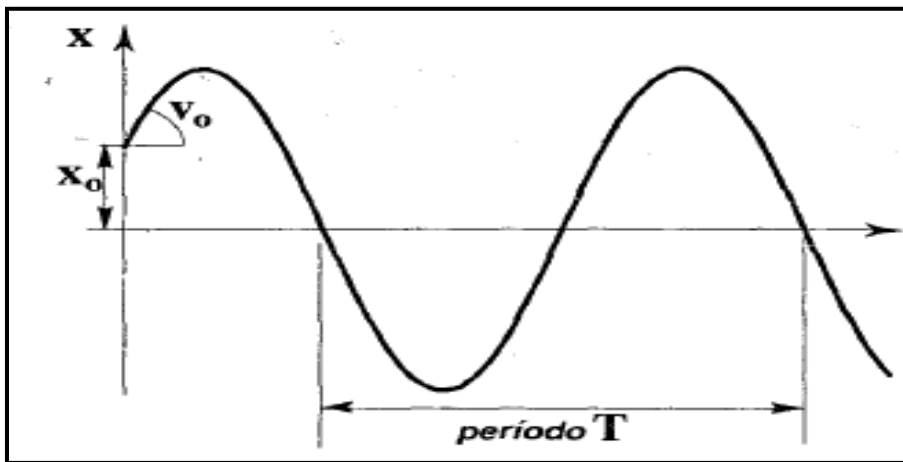
*Esquema Dinámico para un Sistema Libre no Amortiguado*



Fuente: Tomada de García, 1998

**Figura 4**

*Desplazamiento de un Sistema con vibración libre no amortiguada*



Fuente: Tomada de García, 1998

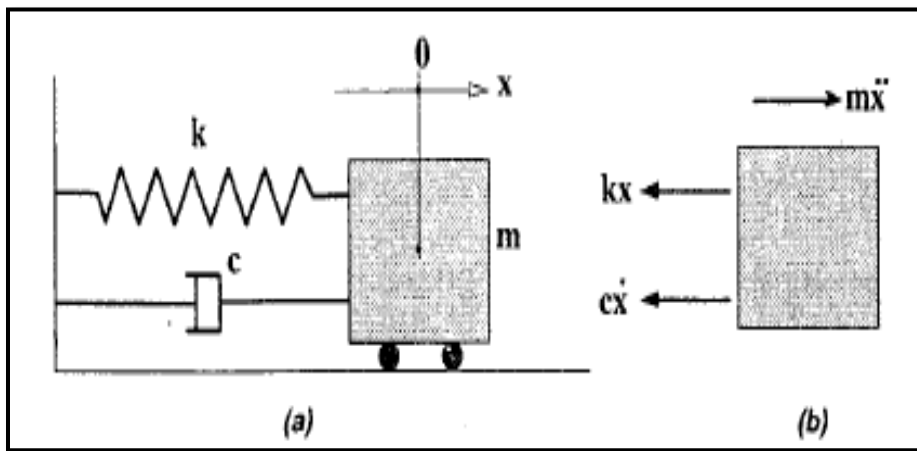
### 5.7.2.5.2 Vibración libre amortiguada

#### 5.7.2.5.2.1 Definición

Sistema aislado que, ante fuerzas gravitacionales y elásticas, al considerar la presencia de medios viscosos, se pueden representar su desplazamiento al introducir la fricción causada por ejemplo el aire, el contacto entre la partícula y la superficie, etc.

**Figura 5**

*Esquema Dinámico para un Sistema Libre Amortiguado*

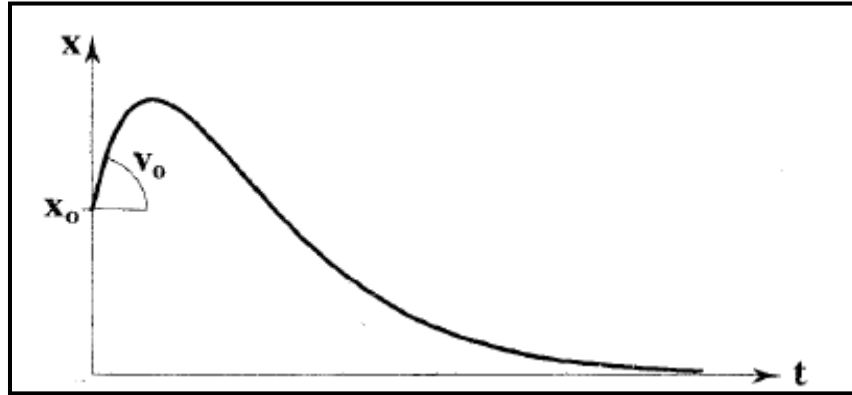


Fuente: Tomada de García Reyes, 1998

### 5.7.2.5.2.1 Amortiguamiento crítico

**Figura 6**

*Desplazamiento de un Sistema con Vibración Libre con Amortiguamiento Crítico*



Fuente: Tomada de García Reyes, 1998

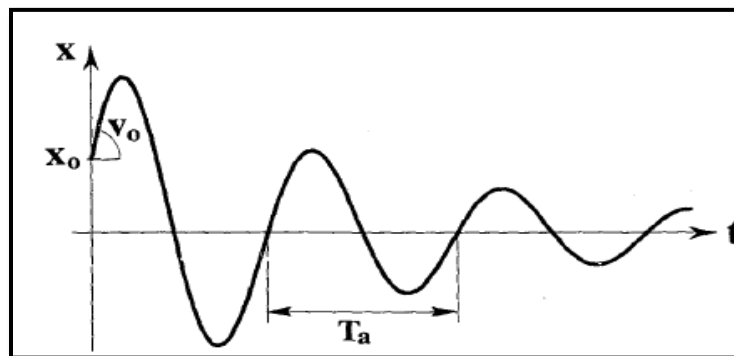
### 5.7.2.5.2.2 Amortiguamiento mayor al crítico

Las variables A y B dependen de las condiciones iniciales del sistema, la gráfica es igualmente aperiódica sin embargo el decrecimiento de la curva a diferencia del amortiguamiento crítico es más lento.

### 5.7.2.5.2.3 Amortiguamiento menor al crítico

**Figura 7**

*Desplazamiento de un sistema con vibración libre con amortiguación crítica*



Fuente: Tomada de García Reyes, 1998

### 5.7.3 Ecuaciones y unidades de las características de la vibración

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{RPM}{60} \quad \text{Ecuación 1} \quad \text{Ecuación de la Frecuencia}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{Ecuación 2} \quad \text{Periodo o Tiempo (seg)}$$

$$\omega = 2 * \pi * f \quad \text{Ecuación 3} \quad \text{Velocidad Angular (RPM)}$$

$$F_n = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{Ecuación 4} \quad \text{Frecuencia Natural (Hz)}$$

Donde:

$f$ = Frecuencia en Hz(Hertzio)

$T$ = Tiempo en s(Segundos)

$\omega$ = Velocidad angular RPM

$F_n$ = Frecuencia natural Hz(Hertzio)

$K$ = Constante del resorte o rigidez

$m$ = Masa

#### 5.7.3.1 Parámetros de medición de vibraciones para describir movimiento

Al realizar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física se desea cuantificar para describir la vibración.

#### 5.7.3.2 Desplazamiento

Es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia.

#### 5.7.3.3 Velocidad

Es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo.

#### 5.7.3.4 Aceleración

Es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo.

### **5.7.3.5 Espectro de vibración**

La señal de vibración obtenida de una máquina rotativa se muestra en el dominio del tiempo y son señales de vibración complejas, esto se convierte en un problema al momento de realizar un diagnóstico de la máquina, para ello es necesario convertir estas señales al dominio de la frecuencia mediante técnicas de procesamiento, una de las más usadas es la transformada rápida de Fourier.

## **5.8 Banco de pruebas de vibración**

Con el fin de cumplir la normativa de emisiones acústicas y mejorar el confort del vehículo se realizan pruebas de ruidos y vibraciones. En el caso de las pruebas de vibraciones también se puede estimar la duración de un componente, convirtiéndose en una prueba de fiabilidad, ya que un nivel excesivo de vibración en un elemento puede llevar a su degradación o rotura. (González Calleja, 2018, p. 36)

Con el banco de pruebas de vibración se ejecuta en los ensayos eficientes, debido al extenso rango de frecuencias que alcanzan la excitación rotacional y desbalance; por lo tanto, sirve para investigar y realizar análisis en el laboratorio sobre los orígenes que ocasionan la vibración, y de esta manera poder entender sencillamente el desarrollo de las formas de evitarlas o a su vez solucionarlas.

## **5.9 Dureza Shore**

Este procedimiento se utiliza para realizar ensayos sobre goma o plásticos blandos. El penetrador es una punta de acero de 1,25 mm de diámetro que se presiona sobre la superficie de la pieza de ensayo por la fuerza de un muelle. La longitud modificada del muelle (recorrido del muelle) al realizar esta operación es una medida de la Dureza Shore. (Dietsche, 2015, p. 396)

Es la graduación de la moderación del endurecimiento flexible de los materiales, por lo que el endurecimiento es un estado de la superficie material y no constituye ninguna posesión imprescindible de la materia; es simple y de alto rendimiento, porque no arruina la muestra y es básico para valorar las propiedades de la variedad de componentes de pequeñas estructuras del material.

### 5.10 Durómetro

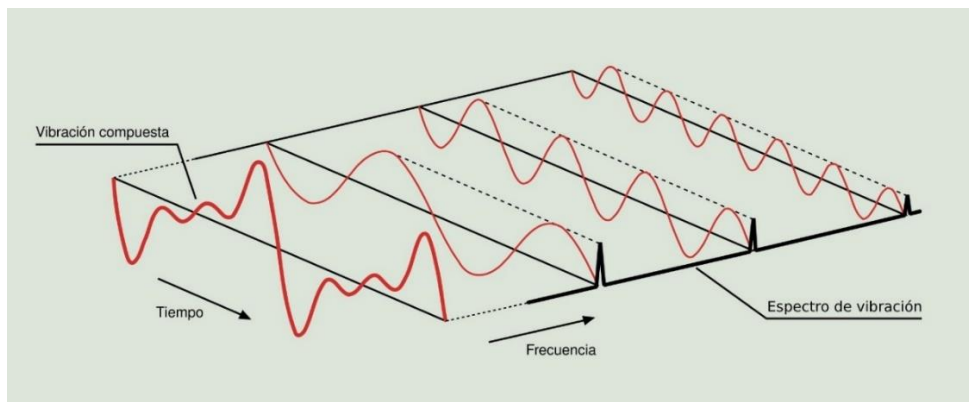
“Es la máquina capaz de medir la dureza de un determinado material, con ella se someten los materiales al ensayo de la dureza” (Millan Gómez, 2012, p. 439). En tal sentido que es un instrumento que sirve para realizar ensayos y medir el endurecimiento de diversos materiales, los mismos que pueden ser, metales, cauchos, plásticos. La dureza en metalurgia se evalúa manipulando un durómetro para la práctica de penetración de un indentador.

### 5.11 Transformada de Fourier

La señal de vibración obtenida en función del dominio del tiempo se usa la transformada rápida de Fourier para poder analizar la señal en función del dominio de la frecuencia.

#### Figura 8

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



Fuente: Tomada de (Power-MI, s.f.)

### 5.12 Media

La Media es la suma de todo un conjunto muestral de medidas o datos dividido para el numero de muestras tomadas para su análisis. “Suponga que hay n mediciones en la variable x y que las llamamos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ” (Mendenhall, Beaver, & Beaver, 2010). La Ecuación 5 usamos para encontrar la media con n mediciones.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Ecuación 5} \quad \text{Ecuación para calcular la Media}$$

### 5.13 Varianza

“La varianza de una muestra de n mediciones es la suma de las desviaciones cuadradas de las mediciones alrededor la media  $\bar{x}$  dividida entre  $(n - 1)$ . La varianza muestral se denota con  $s^2$  y está dada por la fórmula” (Mendenhall, Beaver, & Beaver, 2010, p. 62).

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{Ecuación 6} \quad \text{Ecuación para Calcular la Varianza}$$

### 5.14 RMS - Root Mean Square (Media cuadrática)

Root Mean Square sus siglas RMS significa en español; raíz de la media de los cuadrados. Este término es el resultado de la raíz de la suma matemática de los valores efectivo al cuadrado, sirve para calcular la suma de los valores de la media, generada por cualquier tipo de onda. (Rivera & Chica, 2015)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad \text{Ecuación 7} \quad \text{Ecuación de RMS}$$

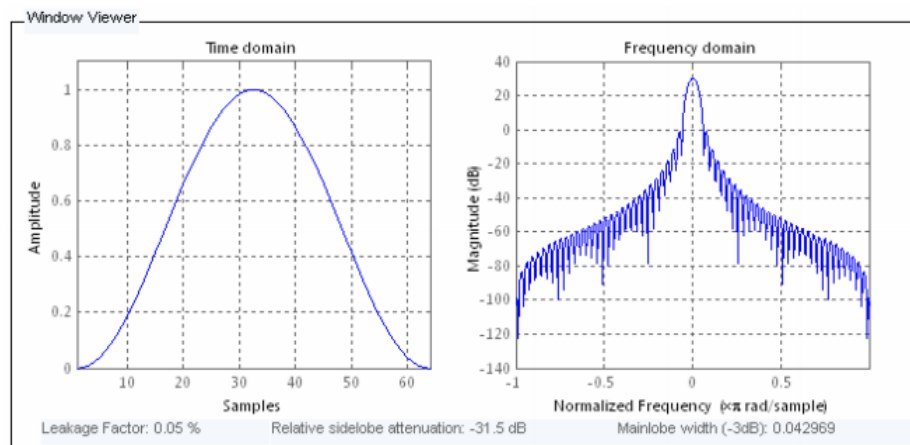
## 5.15 Función de Ventana

Las ventanas son utilizadas para el análisis de señales y procesar el contenido espectral de que sucede en su entorno. Las ventanas muestran funciones variables continuas; generalmente son usadas para el análisis espectral y para diseño de filtros FIR. Existen varias ventanas entre las más comunes tenemos: Ventana Rectangular, Hamming, Hanning, Blackman, Hann. Cuando hay un componente de interferencia fuerte en la frecuencia de interés se debe de seleccionar una ventana que disminuya los lóbulos laterales, Si la interferencia está cerca de la frecuencia de interés se selecciona una ventana con un nivel de lóbulos laterales máximo más bajo.

## 5.16 Ventana Hanning

La ventana de Hanning tiene un buen pico en el lóbulo principal, que se puede observar buena resolución, también se puede reducir bien espectro. La ventana Hanning se basa en una combinación de dos ventanas más simples; la suma de una rectangular y un coseno. Mejora el decaimiento de altas frecuencias, aunque posee un nivel máximo de lóbulo lateral grande. (Gonzalez, 2007)

**Figura 1 1**  
*Ventana Hanning*



Fuente: Tomada de (Gonzalez, 2007)



$$Vh(k) = 0.5 \left( 1 - \cos \left( 2\pi \frac{k}{n-1} \right) \right), K = 1, \dots, n$$

**Ecuación 8**

*Ecuación para definir la Ventana Hanning*

### 5.17 Motor de combustión interna

Los vehículos utilizan los motores de combustión interna para transformar la energía del combustible (gasolina, diésel) a energía mecánica y poder movilizar los vehículos. Los motores están constituidos por diferentes piezas como: son las válvulas, cabezote, bielas, bloque, pistón, culata, sensores etc. Todas sus partes mencionadas anteriormente están sincronizadas entre sí; los motores de los vehículos pueden ser de encendido provocado MEP (Gasolina) y motores de encendido por compresión MEC (Diesel)

### 5.18 Bases de los motores

Generalmente las bases de los motores de los vehículos están construidas por una parte metálica y otra parte que es de caucho para contrarrestar el movimiento y vibraciones que generen los motores cuando estén en funcionamiento.

**Figura 9** *Bases de los motores de vehículos livianos*

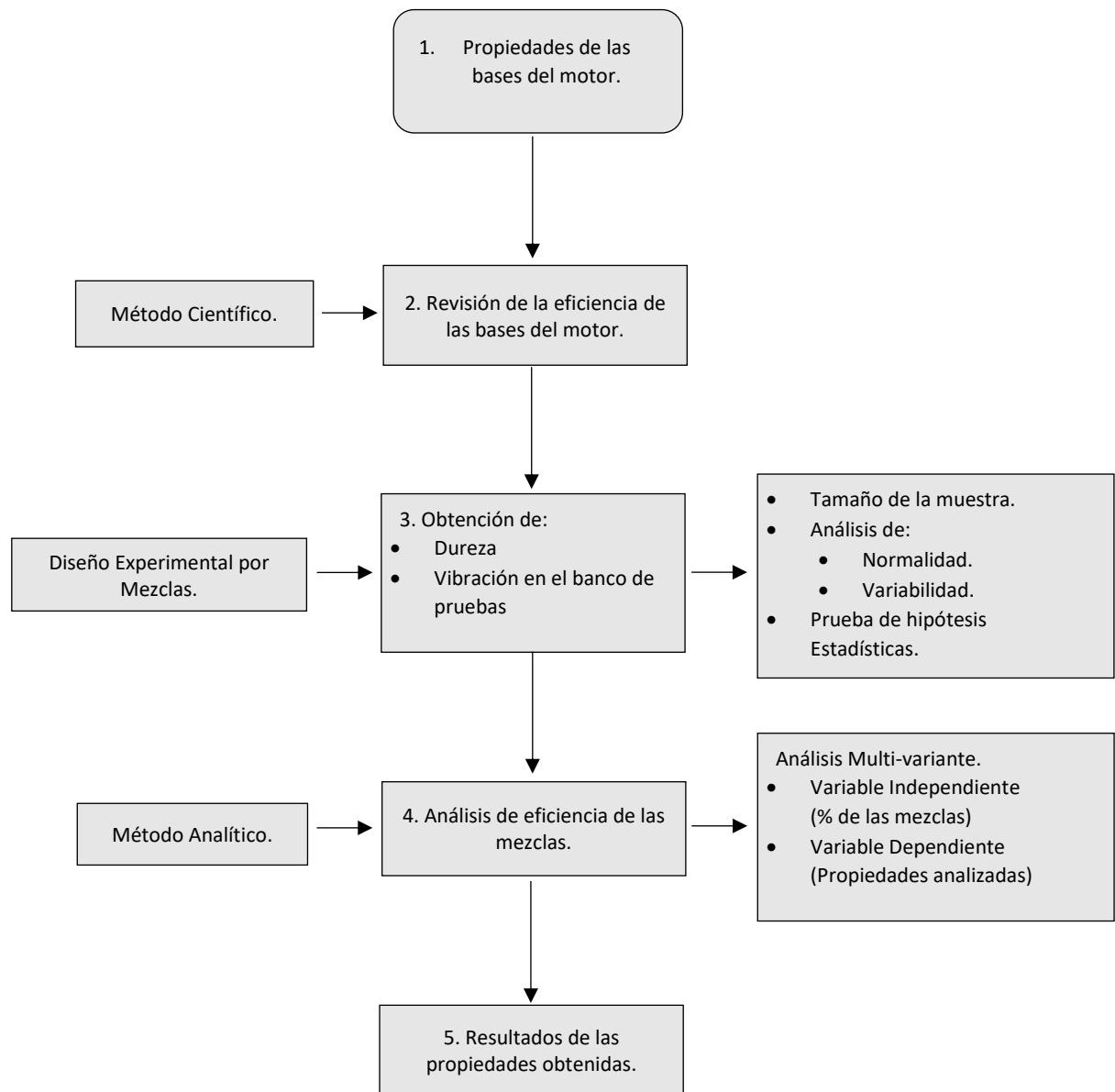


Fuente: Elaboración Propia

## 6 Marco metodológico

**Figura 10**

*Metodología a seguir para la investigación*

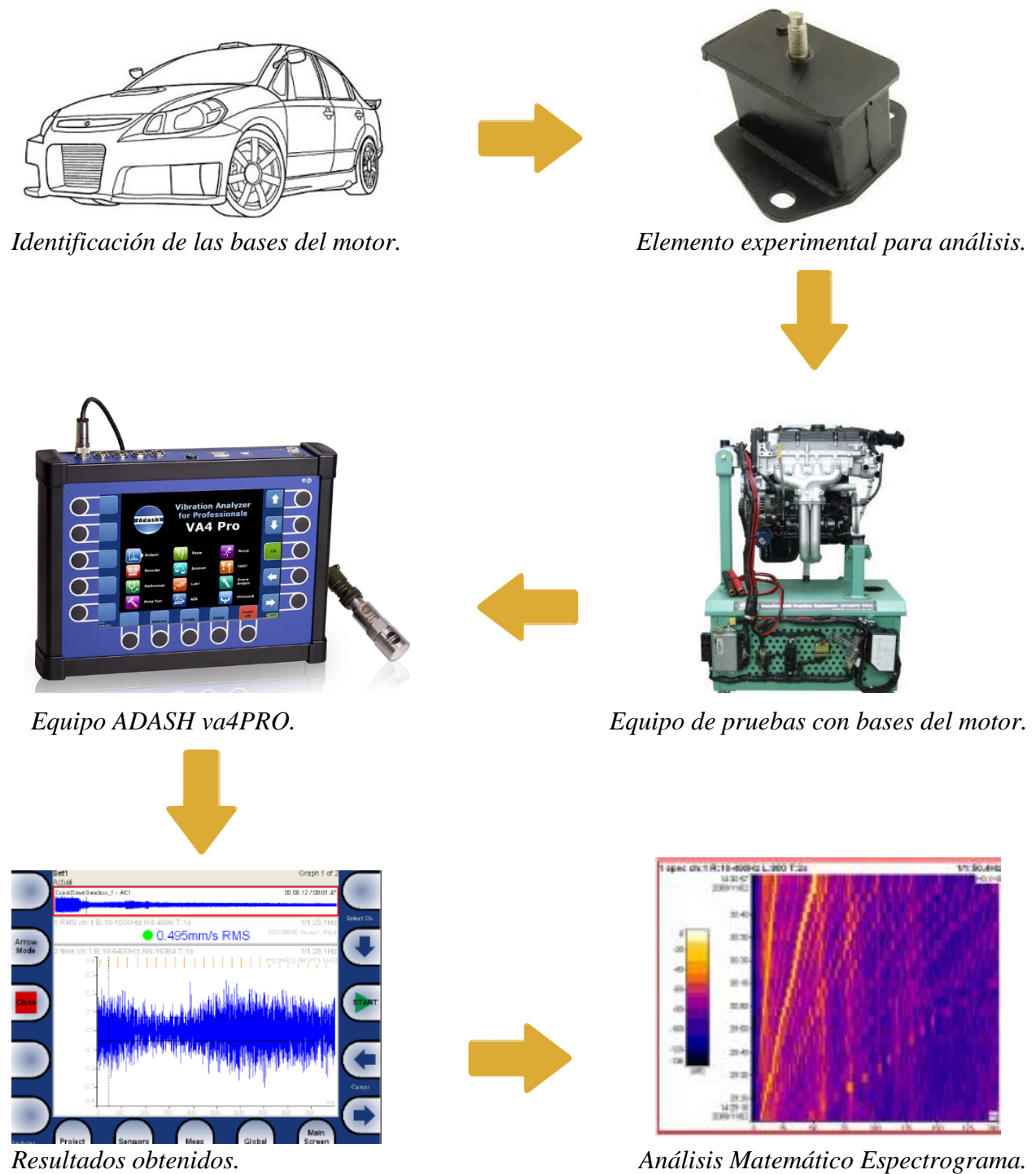


Fuente: Elaboración Propia

## 6.1 Metodología del proceso.

**Figura 11**

*Metodología del Proceso para el proyecto técnico.*



Fuente: Elaboración Propia

## 6.2 Diseño experimental.

Esta experimentación es primordial para descubrir el comportamiento de una variable de salida a partir de varias variables de entrada, las mismas que se pueden manipular después de la toma de datos, para obtener la variable de salida deseada.

## 6.3 Elementos experimentales (bases del motor)

Las bases de motor absorben la vibración del motor y reduce la tensión en los elementos internos, estas bases de motor experimentales son probetas de diferentes porcentajes del material reciclado (NFU) con azufre y serán utilizadas para comprobar sus propiedades mecánicas.

**Figura 12**

*Base de motor experimental*



Fuente: Elaboración Propia

Los valores porcentuales son detallados en la tabla a continuación con los que se realizó las pruebas las bases del motor experimentales.

**Tabla 2**

*Porcentajes de los compuestos de las bases de ensayo*

| <b>ENSAYOS</b>   | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>MATERIAL</b>  | 100 %    | 99,5 %   | 98 %     | 96,5 %   | 95 %     | 93,5 %   |
| <b>RECICLADO</b> | 30 g     | 29,9 g   | 29,4 g   | 29 g     | 28,5 g   | 28 g     |
| <b>AZUFRE</b>    | 0 %      | 0,5 %    | 2 %      | 3,5 %    | 5 %      | 6,5 %    |
|                  | 0 g      | 0,1 g    | 0,6 g    | 1 g      | 1,5 g    | 2 g      |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 1.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 100 % de F-NFU y 0 % de Azufre.

**Tabla 3**

*Resultados de ensayos a probetas con 100 % de F-NFU*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.055             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 45.0              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 1.3               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 156               |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 0.7               |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | 1.2               |
| <b>Rebound (%)</b>     | 34.2              |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 2.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 99.5 % de F-NFU y 0.5 % de Azufre.

**Tabla 4**

*Resultados de ensayos a probetas con 99.5 % de F-NFU y 0.5 % de Azufre.*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.085             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 50.0              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 2.1               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 185               |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 0.7               |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | 1.2               |
| <b>Rebound (%)</b>     | 37.0              |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 3.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 98 % de F-NFU y 2 % de Azufre.

**Tabla 5**

*Resultados de ensayos a probetas con 98 % de F-NFU y 2 % de Azufre*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.125             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 57.0              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 4.3               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 205               |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 1                 |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | 1.9               |
| <b>Rebound (%)</b>     | 36.4              |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 4.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 96.5 % de F-NFU y 3.5 % de Azufre.

**Tabla 6**

*Resultados de ensayos a probetas con 96.5 % de F-NFU y 3.5 % de Azufre.*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.151             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 62.7              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 4.1               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 130               |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 1.5               |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | 3.3               |
| <b>Rebound (%)</b>     | 25.6              |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 5.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 95 % de F-NFU y 5 % de Azufre.

**Tabla 7**

*Resultados de ensayos a probetas con 95 % de F-NFU y 5 % de Azufre*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.149             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 67.4              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 4.2               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 122               |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 1.7               |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | --                |
| <b>Rebound (%)</b>     | 22                |

Fuente: Elaboración Propia

➤ **ENSAYO 6.**

Se presentan los datos tabulados de las pruebas realizadas a la probeta con:

- 93.5 % de F-NFU y 6.5 % de Azufre.

**Tabla 8**

*Resultados de ensayos a probetas con 93.5 % de F-NFU y 6.5 % de Azufre*

| <b>PROPIEDAD</b>       | <b>PROBETA 1.</b> |
|------------------------|-------------------|
| <b>Densidad (kg/l)</b> | 1.159             |
| <b>Dureza (SH-A)</b>   | 75.6              |
| <b>Tensión (MPa)</b>   | 4.5               |
| <b>Elongación (%)</b>  | 64                |
| <b>MD 050 (MPa)</b>    | 3.5               |
| <b>MD 100 (MPa)</b>    | --                |
| <b>Rebound (%)</b>     | 15.5              |

Fuente: Elaboración Propia

#### **6.4 Equipo de pruebas (motor a gasolina)**

La unidad experimental es un motor que se le modificara de forma puntual (Bases del Motor), para obtener una respuesta.

Para este proyecto se utilizó como unidad experimental un motor de combustión interna Nombre (AVANTE) Modelo No. G-111701 mostrado en la figura.



**Figura 13**

*Equipo de pruebas Motor a Gasolina (AVANTE) G-111701*



Fuente: Elaboración Propia

Las características del motor de combustión interna:

**Tabla 9**

*Características de la Unidad de Experimental*

| <b>DESCRIPCIÓN</b>          | <b>CARACTERÍSTICAS</b> |
|-----------------------------|------------------------|
| <b>Número de Cilindros</b>  | 4                      |
| <b>Cilindrada</b>           | 1468 cc                |
| <b>Índice de Compresión</b> | 9,4:1                  |
| <b>Potencia</b>             | 80,85 HP- 5500rpm.     |
| <b>Par</b>                  | 124 Nm - 4000rpm.      |
| <b>Combustible</b>          | Gasolina               |

Fuente: Elaboración Propia

## 6.5 Elementos de medición

### 6.5.1 Equipo de monitoreo Adash VA4pro®

El equipo ADASH VA4Pro® este instrumento de mediciones usado para medir y diagnosticar las vibraciones para sistemas mecánicos rotativos.

La información general del analizador de vibraciones, consta de:

- Con 4 canales (IN1, IN2, IN3, IN4) basados en circuitos integrados piezoeléctricos de Corriente Alterna (AC) y 4 canales de Corriente Directa (DC) para mediciones de proceso.
- 1 canal para señales de disparo o tacómetro (TRIGGER).
- El instrumento está programado para apagarse después de 5 minutos de inactividad.

**Figura 14**

*Equipo de Monitoreo ADASH VA4Pro®*



Fuente: Elaboración Propia

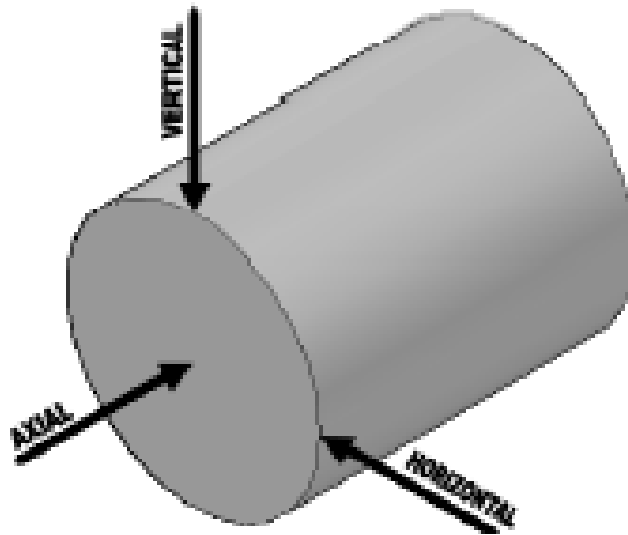
### 6.5.2 Acelerómetro

Son transductores que convierten el movimiento mecánico en una señal eléctrica a escala, posee una sensibilidad característica que es medida en mV/g (milivoltios/gravedad).

Los acelerómetros se colocan lo más cercano al elemento que se desea analizar, ya sea en posición horizontal, vertical o axial, como se muestra a continuación. (White, 2009)

**Figura 15**

*Posición del acelerómetro*



Fuente: Tomada de Smith B. J., Peters R. J. y Owen S. 1996

Las técnicas de montaje más usadas son:

- Con tornillo: su respuesta típica en frecuencia alcanza los 10 KHz
- Con pegamento adhesivo: su respuesta típica en frecuencia alcanza los 5 KHz.
- Con base magnética: su respuesta en frecuencia alcanza los 5 KHz.
- Con sonda de mano: su respuesta en frecuencia alcanza los 500 Hz

El montaje realizado del acelerómetro es con base magnética, el acelerómetro utilizado para la toma de datos es del modelo A102-1A el cual se muestra a continuación.

### Figura 16

*Acelerómetro A102-1A*



Fuente: Elaboración Propia

La tabla continuación muestra las características del acelerómetro.

### Tabla 10

*Características del Acelerómetro A102-A*

| Sensor                   | A102-1 <sup>a</sup> |
|--------------------------|---------------------|
| Método De Calibración    | ISO 16063-21:2003   |
| Sensibilidad Nominal     | 100 mV/g            |
| Constante (K)+/-3%       | 1,02                |
| Resultado de Calibración | K=80Hz              |
| Bias (V) +/-2%           | 11,9                |
| Sensibilidad (Mv/G)+/-3% | 102                 |

Fuente: Elaboración Propia

### 6.5.3 Tacómetro

La sonda de velocidad (tacómetro) manejada para este proyecto es óptico, dando uso de una cinta reflectiva en un punto móvil, esta se encontrará en la polea de cigüeñal para así conocer el régimen de giro al cual se encuentra el motor.

El tacómetro genera un haz de luz para poder obtener una medida precisa de la velocidad de giro, en la siguiente figura se observa la ubicación de la cinta reflectiva y el tacómetro.

**Figura 17**

*Ubicación de la sonda de velocidad y la cinta reflectiva*



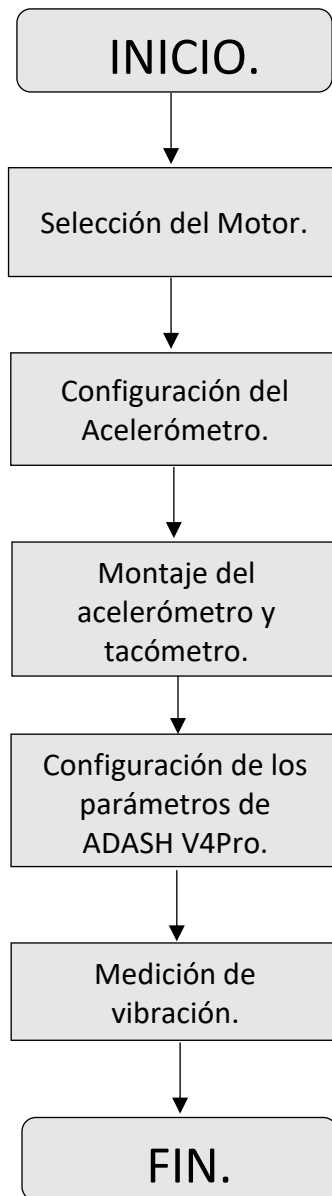
Fuente: Elaboración Propia

## 6.6 Recolección de datos

### 6.6.1 Proceso

**Figura 18**

*Proceso para el uso del analizador de vibraciones ADASH V4Pro*



Fuente: Elaboración Propia

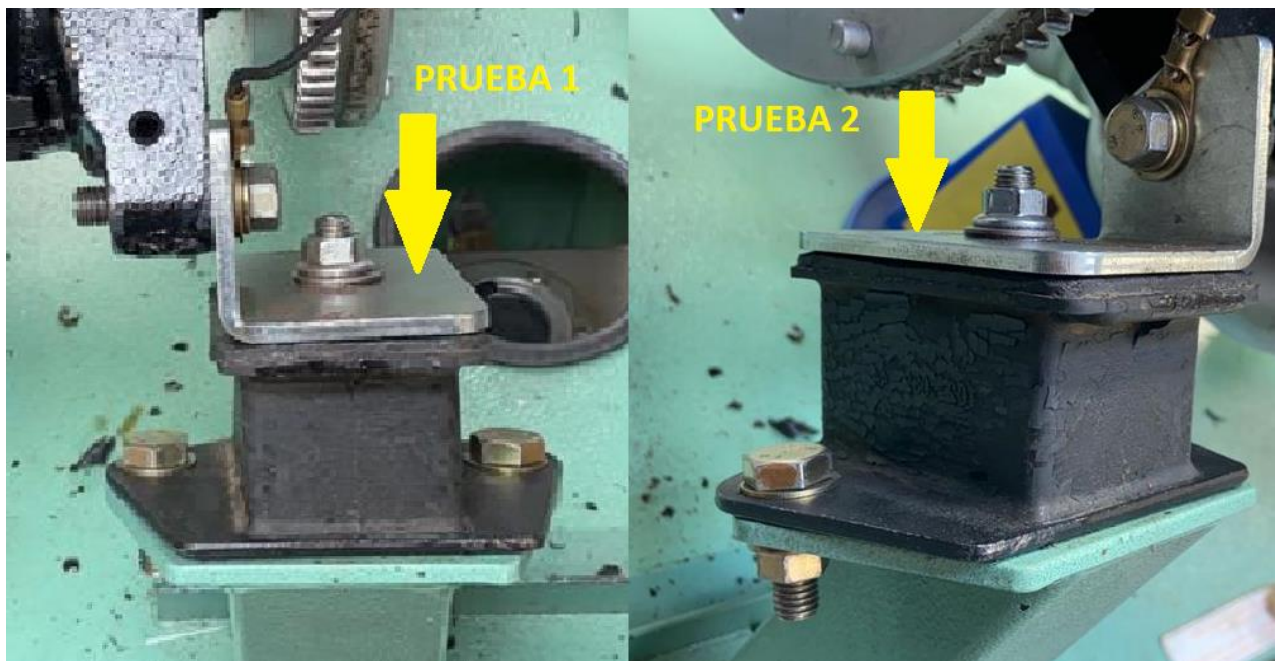
### 6.6.2 Protocolo de medición

En la toma de datos, para que sus repeticiones sean confiables se tomaran en las mismas condiciones a continuación:

- Seleccionar el motor que se va a realizar las pruebas con el analizador de vibraciones.
- Configurar las medidas dentro del equipo de monitoreo de la Aceleración Total ( $m/s^2$ ), Espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y la Velocidad (Hz).
- Tomar una prueba, en cada base de motor ubicados en ambos lados, como se indica en la figura a continuación.

**Figura 19**

*Ubicación del acelerómetro en los puntos para las 2 pruebas de vibración.*



Fuente: Elaboración Propia

Los valores porcentuales son detallados en la tabla a continuación con los que se realizó las pruebas de vibración de las bases del motor experimentales.

**Tabla 11**

*Porcentajes de los compuestos de las bases de ensayo*

| <b>ENSAYOS</b>   | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>MATERIAL</b>  | 100 %    | 99,5 %   | 98 %     | 96,5 %   | 95 %     | 93,5 %   |
| <b>RECICLADO</b> | 200 g    | 199 g    | 196 g    | 193 g    | 190 g    | 187 g    |
| <b>AZUFRE</b>    | 0 %      | 0,5 %    | 2 %      | 3,5 %    | 5 %      | 6,5 %    |
|                  | 0 g      | 1 g      | 4 g      | 7 g      | 10 g     | 13 g     |

Fuente: Elaboración Propia

### 6.6.3 Clasificación de máquinas

Las máquinas están clasificadas por clases, descritas en la siguiente tabla.

**Tabla 12**

*Clasificación de las máquinas según norma ISO 10816-1*

| <b>CLASE.</b> | <b>DESCRIPCIÓN.</b>  |
|---------------|--|
| Clase I       | Máquinas y motores de hasta 15 KW (20 HP).   |
| Clase II      | Máquinas de tamaño medio de hasta los 300 KW (400 HP).   |
| Clase III     | Máquinas grandes en soportes rígidos. La frecuencia natural de la máquina y la estructura está por encima de la frecuencia de excitación del equipo. |
| Clase IV      | Máquinas grandes de 10 MW (13404 HP) con soporte flexible en la dirección de la medida de vibración  |

Fuente: Elaboración Propia



#### 6.6.4 Registrar (Señal sin procesar)

- Conectar el cable del acelerómetro al canal IN-1 del analizador de vibraciones.
- Conectar el cable del tacómetro al canal TRIGGER.
- Encender el analizador de vibraciones ADASH V4Pro.
- En el MENU PRINCIPAL seleccionar el icono GRABADORA y pulsamos OK.
- Pulsar el botón PROYECTO seleccionamos NUEVO CONJUNTO y pulsamos OK.
- Establecer un nombre a la prueba y pulsamos OK.
- Seleccionar la prueba creada y pulsamos el botón OK.
- Automáticamente se abre el menú CONFIGURACION DE GRABADORA.
- Encender el AC1 (acelerómetro) y el Trigger Channel (Tacómetro) y pulsar GUARDAR.

**Tabla 13**

*Encendido del acelerómetro y tacómetro*

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| <b>Sampling Frequency (Hz)</b> | 65536            |
| <b>AC-1</b>                    | ON               |
| <b>AC-2</b>                    | OFF              |
| <b>AC-3</b>                    | OFF              |
| <b>AC-4</b>                    | OFF              |
| <b>DC-1</b>                    | OFF              |
| <b>DC-2</b>                    | OFF              |
| <b>DC-3</b>                    | OFF              |
| <b>DC-4</b>                    | OFF              |
| <b>Trigger Channel</b>         | ON               |
| <b>Time (minutes)</b>          | Manually stopped |
| <b>Start to Rec</b>            | Free run         |

Fuente: Elaboración Propia

- Pulsar el botón SENSORES seleccionamos AC1 y pulsamos OK.
- Establecer los parámetros de configuración del acelerómetro de la tabla a continuación y pulsamos GUARDAR.

**Tabla 14***Configuración del acelerómetro*

| <b>MEDICIÓN ACELEROMETRO.</b>      |             |
|------------------------------------|-------------|
| <b>ICP</b>                         | ON          |
| <b>Sensibilidad (mV/g)</b>         | 100         |
| <b>Unidad</b>                      | g           |
| <b>Posición (°)</b>                | 0           |
| <b>Grupo de maquina ISO</b>        | 2           |
| <b>Fundación de la maquina ISO</b> | Rígido      |
| <b>Tipo de rodamiento</b>          | No definido |

Fuente: Elaboración Propia

#### 6.6.4.1 Medición de vibración

Una vez montado y configurado el acelerómetro con las mediciones de vibración, se procede a medir la vibración den el motor.

- ENCENDER el motor.
- Al mismo tiempo ENCEDER el analizador de vibraciones y pulsar MEDIR.
- La medición se tomará desde el inicio del encendido del motor, hasta que este se estabilice en el régimen de ralentí de giro 850 RPM.
- Esperar que se estabilice el motor para finalizar la prueba (tiempo de 40 seg.).
- Detener la medición con el botón PARAR.
- APAGAR el motor.
- Presionar el botón CERRAR PROYECTO.

- Presionar el botón MENU PRINCIPAL
- Retirar el ACELERÓMETRO.

### **6.6.5 Configurar los parámetros de medición (Procesamiento de la señal)**

Obtenidas las señales sin procesar de las bases de motor, se realiza las siguientes configuraciones de los parámetros de medición de la señal para controlar los datos.

- En el MENÚ PRINCIPAL, pulsar icono EJECUCION
- Presionar el botón PROYECTO y seleccionamos NUEVO.
- Colocar un nombre y pulsamos OK
- Seleccionar el nuevo proyecto creado y pulsamos OK

#### **6.6.5.1 Prueba 1 (Base izquierda)**

En la prueba 1, creamos las medidas que deseamos registrar, el nivel de aceleración total RMS, la aceleración del espectro FFT y la velocidad.

##### **6.6.5.1.1 Configuración de medición 1 (Aceleración Total RMS)**

Las medidas a registrar son, la aceleración total en ( $m/s^2$ ) en el RMS, para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos NUEVO AVANZADO y pulsamos OK.
- Establecer los parámetros según la siguiente tabla y pulsamos GUARDAR.

**Tabla 15**

*Configuración de Medición 1, para la aceleración total RMS*

| <b>MEDICIÓN 1</b>          |                    |
|----------------------------|--------------------|
| <b>Tipo</b>                | <b>Banda Ancha</b> |
| <b>Todos los canales</b>   | no                 |
| <b>Canal</b>               | 1                  |
| <b>Unidades</b>            | m/s <sup>2</sup>   |
| <b>Tipo por defecto</b>    | RMS                |
| <b>Banda: Fmin (Hz)</b>    | 10                 |
| <b>Banda: Fmax (Hz)</b>    | 1000               |
| <b>Control del Trigger</b> | off                |
| <b>Muestras</b>            | 4096               |
| <b>Promediados</b>         | Lineal             |
| <b>Promedios</b>           | Off                |

Fuente: Elaboración Propia

#### **6.6.5.1.2 Configuración de medición 2 (Aceleración del Espectro FFT)**

Las medidas a registrar son, la aceleración del espectro (m/s<sup>2</sup> - Hz) en el FFT, para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos NUEVO AVANZADO y pulsamos OK
- Establecer los parámetros según la siguiente tabla y pulsamos GUARDAR

**Tabla 16**

*Configuración de Medición 2, para la aceleración del espectro FFT*

| <b>MEDICIÓN 2</b>       |                  |
|-------------------------|------------------|
| <b>Tipo</b>             | Espectro         |
| <b>Canal</b>            | 1                |
| <b>Ventana</b>          | Hanning          |
| <b>Unidades</b>         | m/s <sup>2</sup> |
| <b>Zoom de Espectro</b> | No               |
| <b>Banda: Fmin (Hz)</b> | 10               |
| <b>Rango (Hz)</b>       | 1600             |
| <b>Líneas</b>           | 1600             |
| <b>Promediados</b>      | Lineal           |
| <b>Promedios</b>        | Off              |
| <b>Solapamiento</b>     | 0%               |

Fuente: Elaboración Propia

#### **6.6.5.1.3 Configuración de medición 3 (Velocidad del motor)**

Las medidas a registrar son, la velocidad total en (Hz), para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos NUEVO AVANZADO y pulsamos OK.
- Establecer los parámetros según indica la siguiente tabla y luego pulsamos GUARDAR.

**Tabla 17***Configuración de Medición 3, para la velocidad*

| <b>MEDICIÓN 3</b>  |           |
|--------------------|-----------|
| <b>Tipo</b>        | Velocidad |
| <b>Unidades</b>    | Hz        |
| <b>Promediados</b> | Lineal    |
| <b>Promedios</b>   | Off       |

Fuente: Elaboración Propia

**6.6.5.2 Prueba 2 (Base derecha)**

En la prueba 2, creamos las medidas que deseamos registrar, el nivel de aceleración total RMS, la aceleración del espectro FFT y la velocidad.

**6.6.5.2.1 Configuración de medición 1 (Aceleración Total RMS)**

Las medidas a registrar son, la aceleración total en ( $m/s^2$ ) en el RMS, para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos NUEVO AVANZADO y pulsamos OK.
- Establecer los parámetros según la siguiente tabla y pulsamos GUARGAR.

**Tabla 18***Configuración de Medición 1, para la aceleración total RMS*

| <b>MEDICIÓN 1</b>          |                    |
|----------------------------|--------------------|
| <b>Tipo</b>                | <b>Banda Ancha</b> |
| <b>Todos los canales</b>   | no                 |
| <b>Canal</b>               | 1                  |
| <b>Unidades</b>            | m/s <sup>2</sup>   |
| <b>Tipo por defecto</b>    | RMS                |
| <b>Banda: Fmin (Hz)</b>    | 10                 |
| <b>Banda: Fmax (Hz)</b>    | 1000               |
| <b>Control del Trigger</b> | off                |
| <b>Muestras</b>            | 4096               |
| <b>Promediados</b>         | Lineal             |
| <b>Promedios</b>           | Off                |

Fuente: Elaboración Propia

**6.6.5.2.2 Configuración de medición 2 (Aceleración del Espectro FFT)**

Las medidas a registrar son, la aceleración del espectro (m/s<sup>2</sup> - Hz) en el FFT, para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos AVANZADO y pulsamos OK
- Establecer los parámetros según la siguiente tabla y luego pulsamos GUARDAR.

**Tabla 19**

*Configuración de Medición 2, para la aceleración del espectro FFT*

| <b>MEDICIÓN 2</b>       |                  |
|-------------------------|------------------|
| <b>Tipo</b>             | Espectro         |
| <b>Canal</b>            | 1                |
| <b>Ventana</b>          | Hanning          |
| <b>Unidades</b>         | m/s <sup>2</sup> |
| <b>Zoom de Espectro</b> | No               |
| <b>Banda: Fmin (Hz)</b> | 2                |
| <b>Rango</b>            | 1600             |
| <b>Líneas</b>           | 1600             |
| <b>Promediados</b>      | Lineal           |
| <b>Promedios</b>        | off              |
| <b>Solapamiento</b>     | 0%               |

Fuente: Elaboración Propia

#### **6.6.5.2.3 Configuración de medición 3 (Velocidad de motor)**

Las medidas a registrar son, la velocidad total en (Hz), para obtener los puntos más importantes en esta:

- Pulsar el botón MEDIDA, seleccionamos AVANZADO y pulsamos OK.
- Establecer los parámetros según indica la siguiente tabla y luego pulsamos GUARDAR.



**Tabla 20***Configuración de Medición 3, para la velocidad*

| <b>MEDICIÓN 3</b>  |           |
|--------------------|-----------|
| <b>Tipo</b>        | Velocidad |
| <b>Unidades</b>    | Hz        |
| <b>Promediados</b> | Lineal    |
| <b>Promedios</b>   | off       |

Fuente: Elaboración Propia

**6.6.6 Analizar (Señal procesada)**

Una vez configurado los parámetros de medición, se procede a realizar el análisis de la señal (procesada) e implementar una observación de lo que sucede con los espectros.

- Presionar el botón GLOBAL y seleccionamos FUENTE DE SEÑAL.
- BUSCAR la señal (sin procesar) con el nombre que lo guardamos y pulsamos OK
- Presionar el botón COMENZAR
- Una vez terminado el análisis de la señal.
- Presionar el botón ESTABLECER, seleccionamos VER TENDENCIA y pulsamos OK

**6.6.7 Apagar analizador de vibraciones**

Una vez finalizadas todas las pruebas es necesario apagar el equipo de analizador de vibraciones, a continuación, realizamos:

- Pulsar botón, CERRAR PROYECTO.
- La pantalla indicara ¿GUARDAR DATOS? pulsamos SI.
- Presionar el botón PANTALLA PRINCIPAL y pulsamos el botón ‘APAGAR’.
- Desconectar el cable del acelerómetro y el tacómetro.

## 7 Metodología de estadística

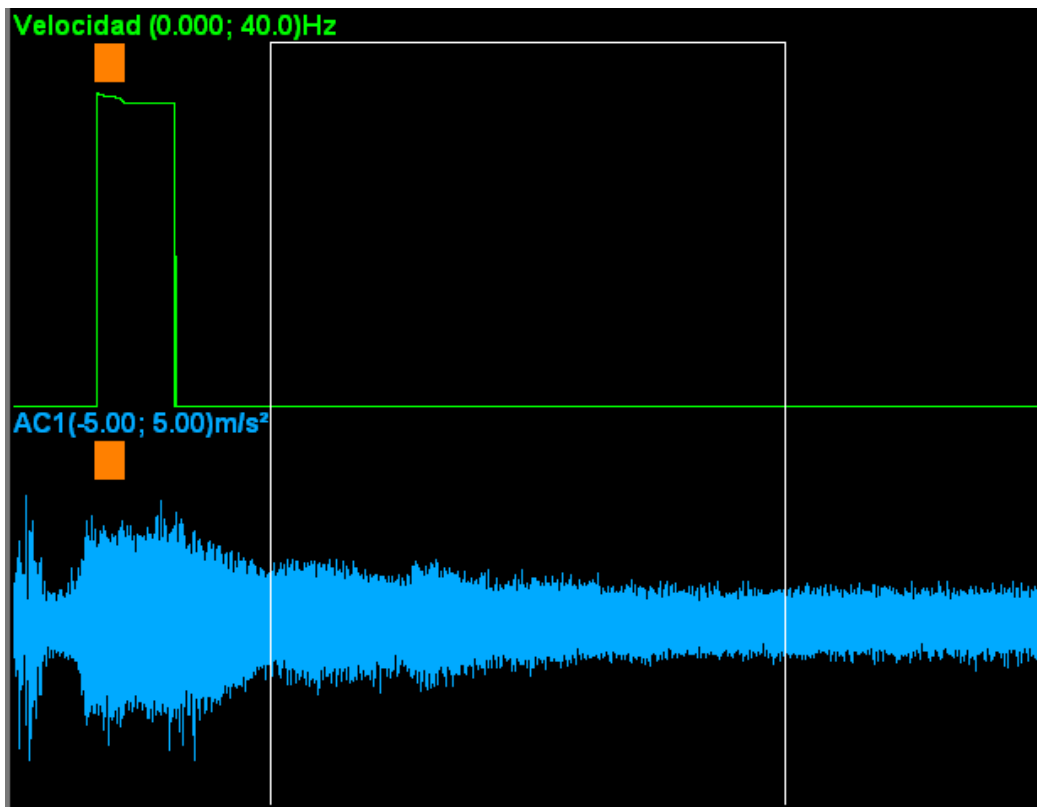
Estadísticas para establecer los parámetros de dureza y vibración de la base del motor realizando las pruebas en la maqueta de la Universidad modelo no. G-111701, con su construcción original

### 7.1.1 Base original 1

#### 7.1.1.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base original 1 izquierda)

**Figura 20**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

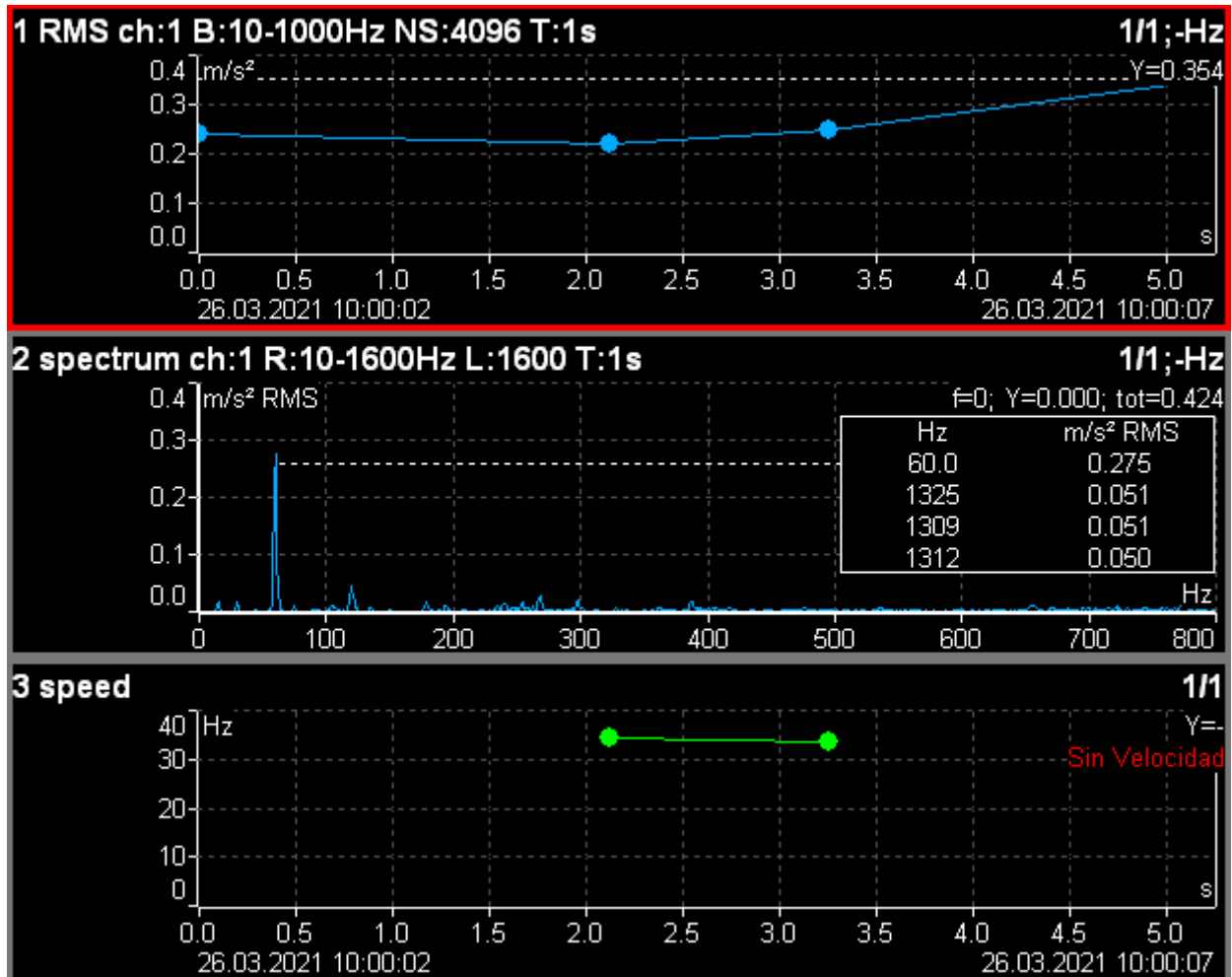


Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.1.2 Registro (Señal procesada) (Base original 1 izquierda)

**Figura 21**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.1.3 Análisis (Señal procesada) (Base original 1 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí (850 RPM), tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 21 se observa la medida 1, de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.354 m/s^2$ , a los 55 segundos, este es su aceleración más alta en estado de ralentí.

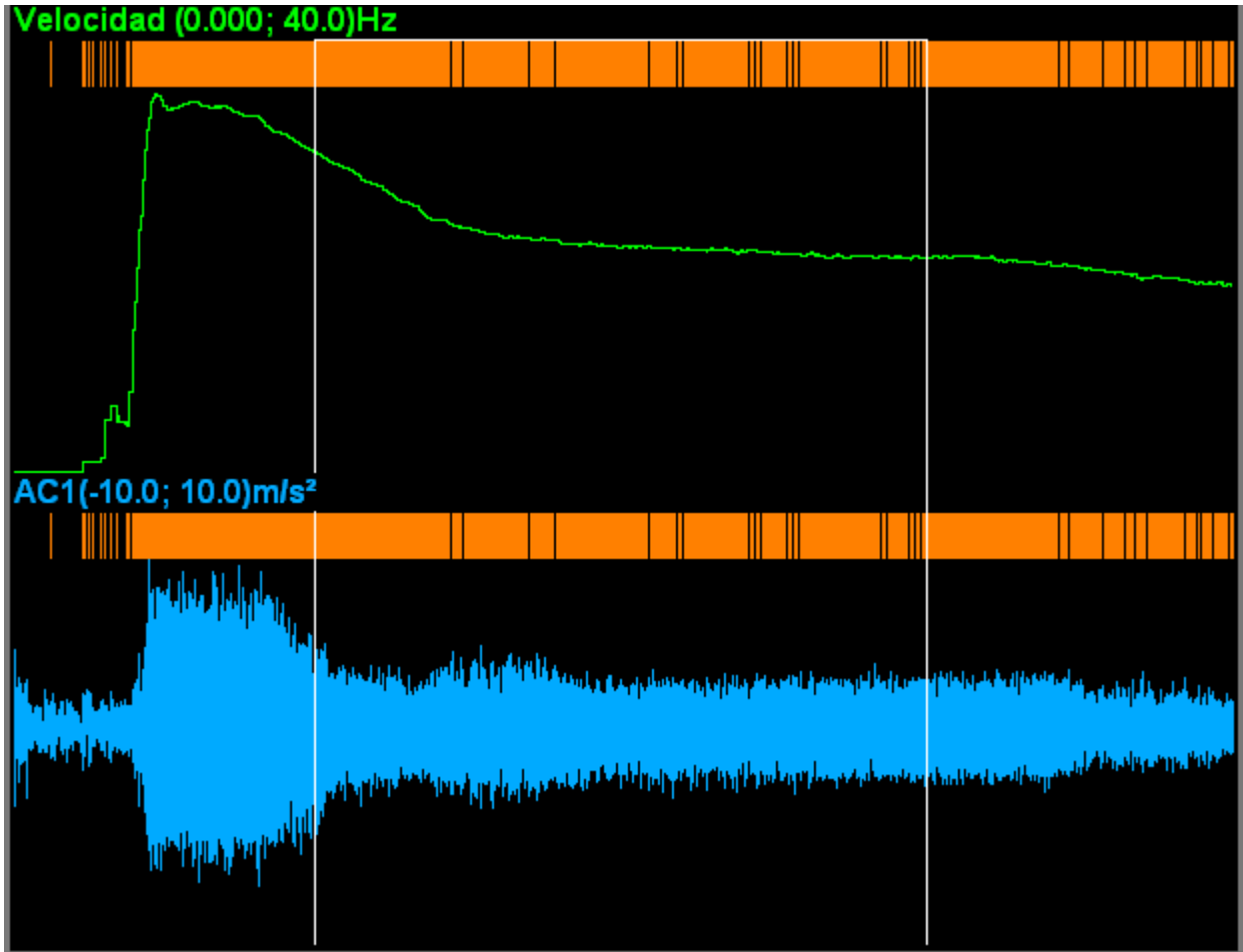
En la figura 21 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 60 Hz con una aceleración de  $0.275 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 21 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con un régimen del motor se observa que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 37 Hz; al inicio indica el arranque con una velocidad baja de 32 Hz, donde indica el punto de inicio del ralentí.

#### 7.1.1.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base original 1 derecha)

Figura 22

Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )

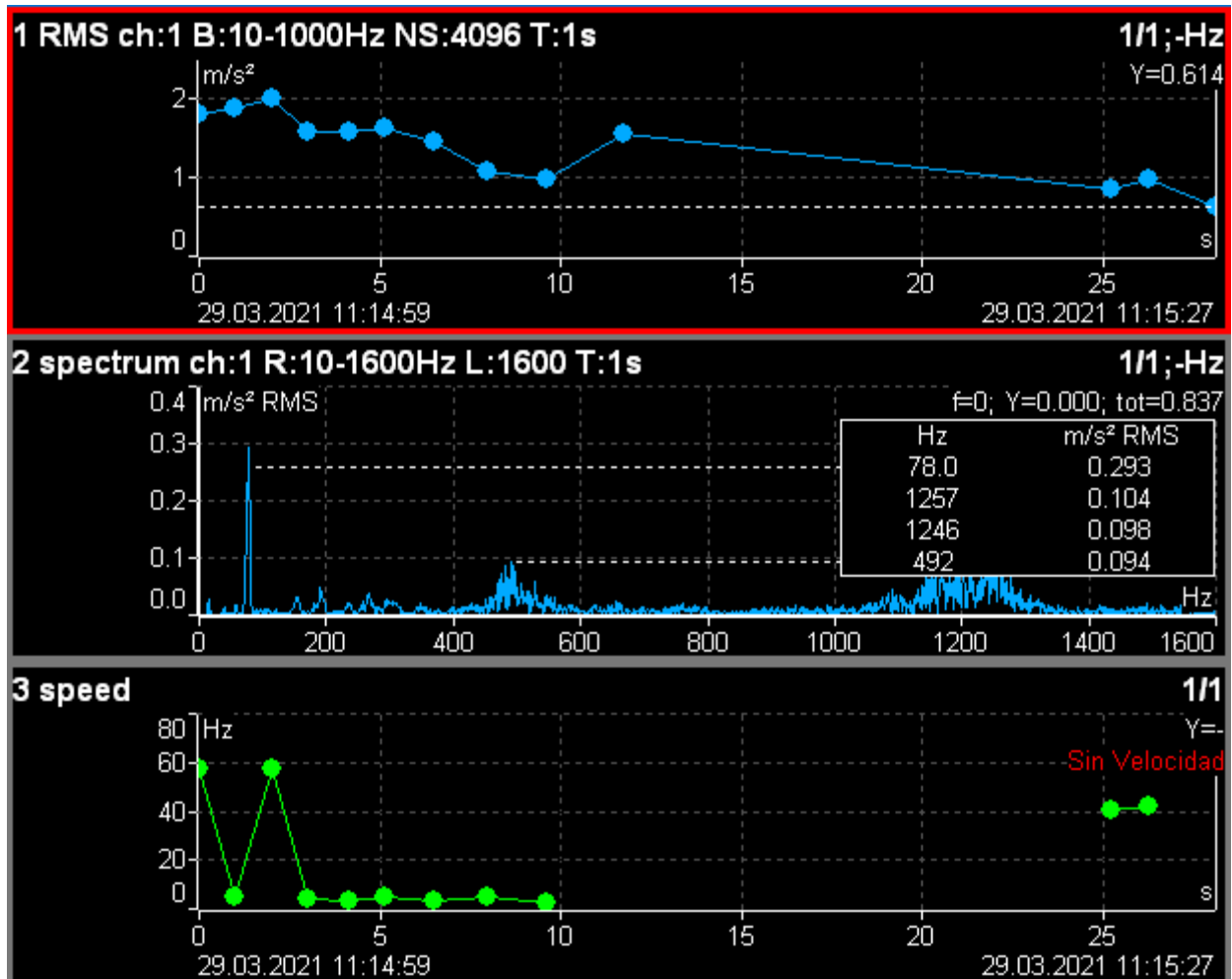


Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.1.5 Registro (Señal procesada) (Base original 1 derecha)

**Figura 23**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

#### **7.1.1.6 Análisis (Señal procesada) (Base original 1 derecha)**

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 23 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud con relación al tiempo en  $m/s^2$ ; esta aceleración se encuentra un punto alto de  $2.0 m/s^2$ ; al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 23 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con respecto a la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 78 HZ con una aceleración de  $0.293 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

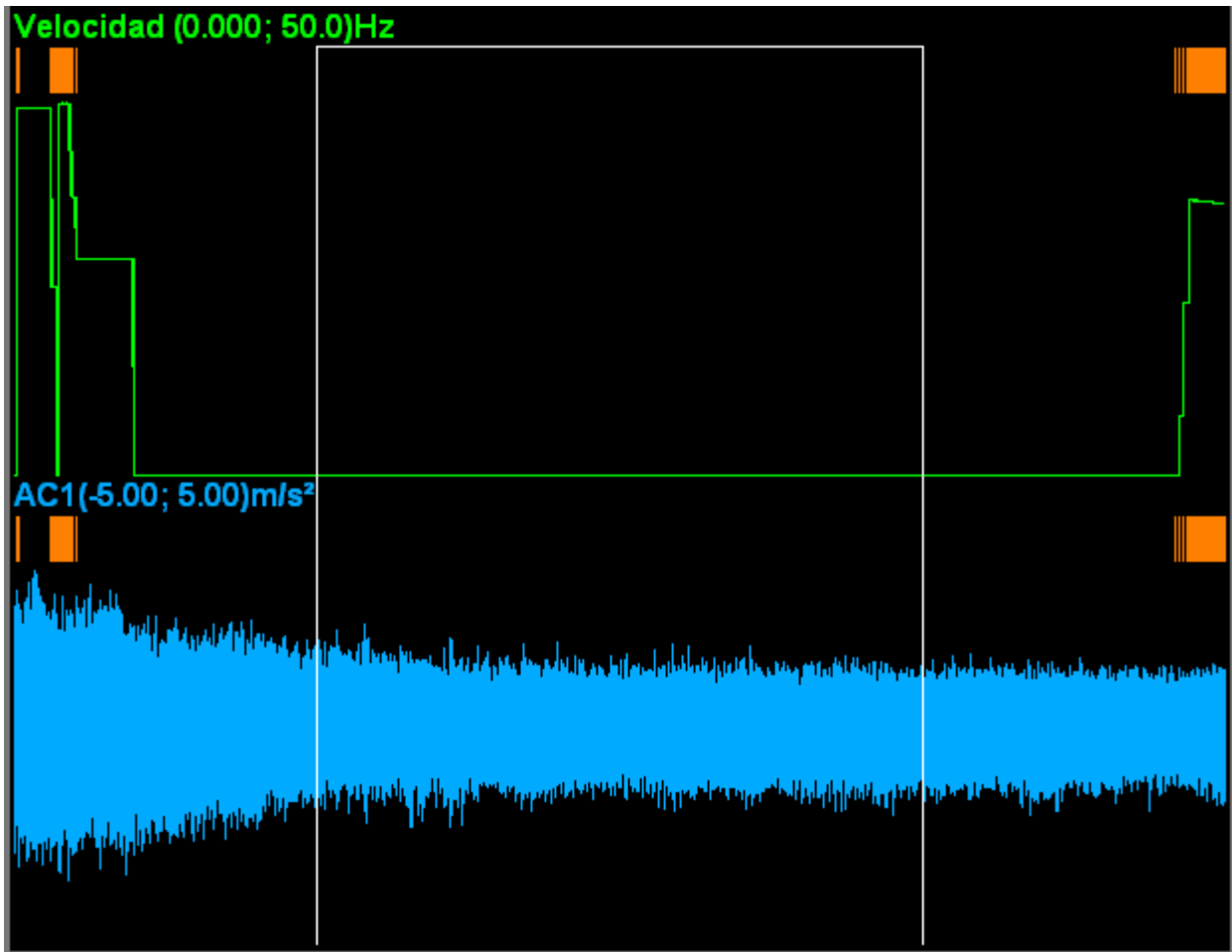
En la figura 23 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz; y con el régimen del motor se observa que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 60 Hz; al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 40 Hz donde se establece el ralentí.

## 7.1.2 Base original 2

### 7.1.2.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base original 2 izquierda)

Figura 24

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*



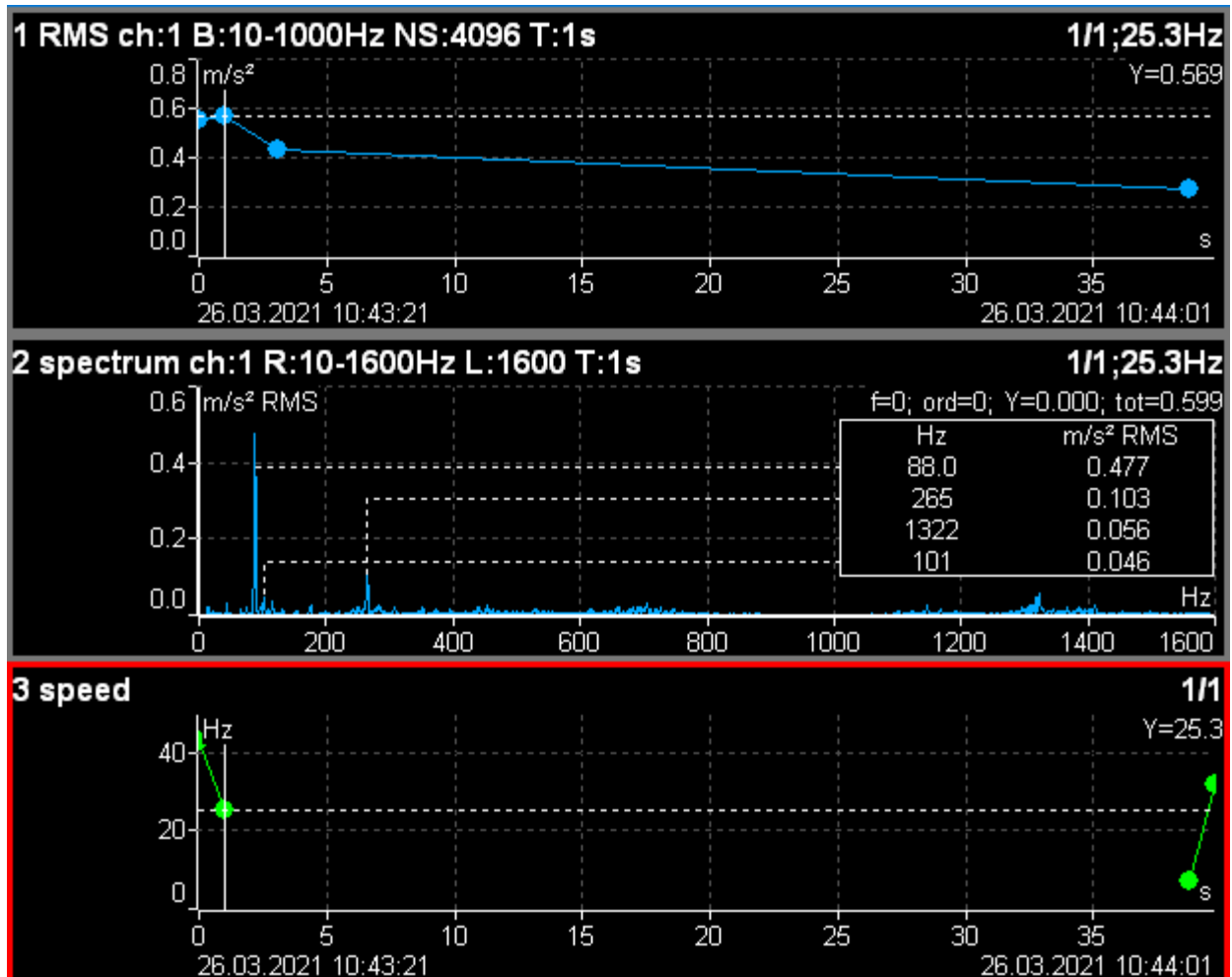
Fuente: Elaboración Propia



### 7.1.2.2 Registro (Señal procesada) (Base original 2 izquierda)

**Figura 25**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.2.3 Análisis (Señal procesada) (Base original 2 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 25 se observa la medida 1, la gráfica a una amplitud y con relación al tiempo  $m/s^2$ , la aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.569 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta es su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

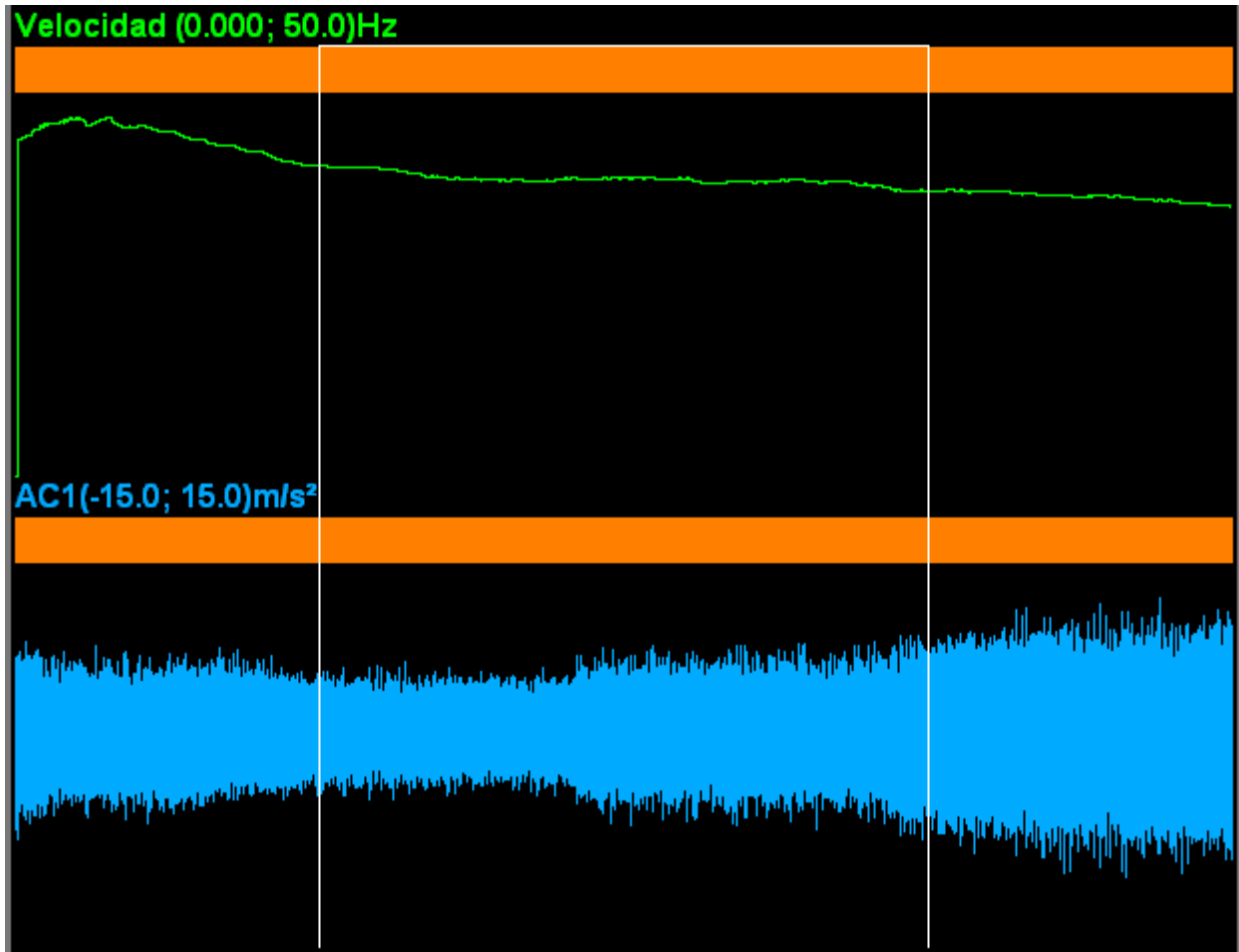
En la figura 25 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con relación a la frecuencia en Hz; presentando los valores armónicos a los que la frecuencia resulta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 88 Hz con una aceleración de  $0.477 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 25 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor se observa que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 40 Hz; al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 25 Hz donde se establece el ralentí.

#### 7.1.2.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base original 2 derecha)

**Figura 26**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )*

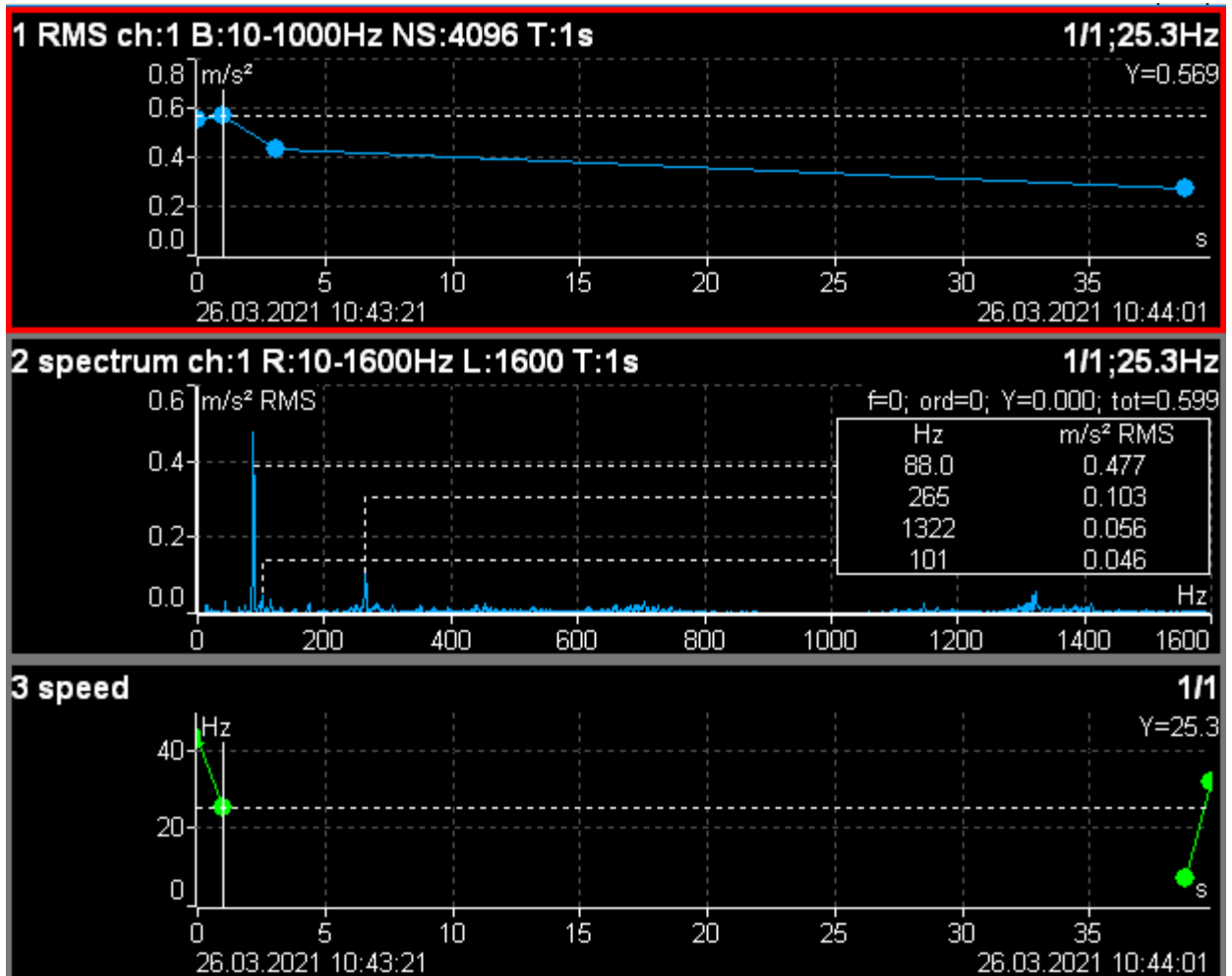


Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.2.5 Registro (Señal procesada) (Base original 2 derecha)

**Figura 27**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.1.2.6 Análisis (Señal procesada) (Base original 2 derecha)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 27 se observa la medida 1, la gráfica que la amplitud en relación al tiempo en  $m/s^2$ , la aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.569 m/s^2$ ; al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 27 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  en relación con la frecuencia en Hz, presentando los valores armónicos a los de la frecuencia con aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 88 Hz con una aceleración de  $0.477 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 27 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con un régimen del motor observamos que se encuentra en ralentí, presentando una gráfica corta; indicando que su velocidad alta es de 40 Hz; al inicio indica en el tiempo de arranque una velocidad baja de 25 Hz donde se establece el ralentí.

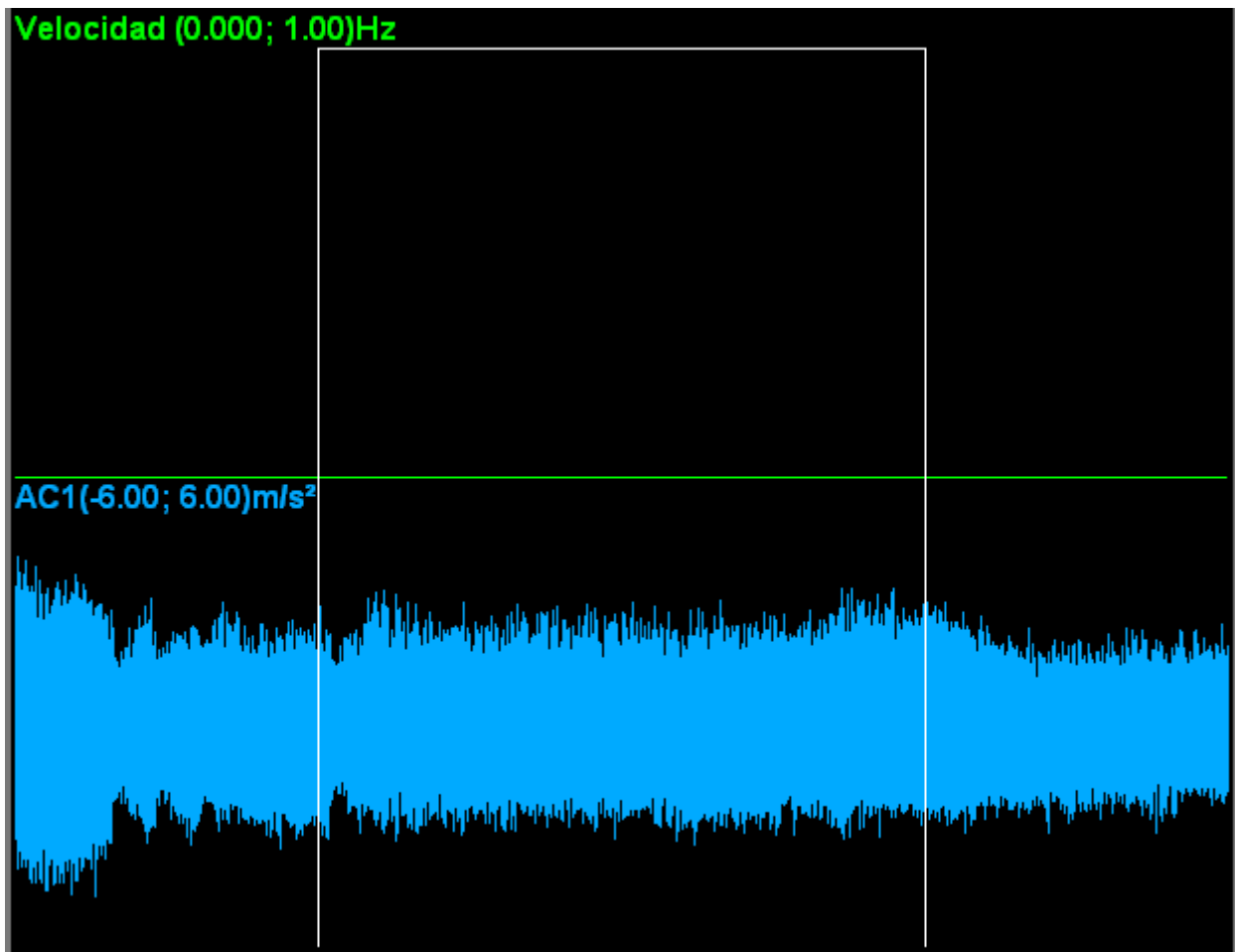
**7.2 Estadísticas para identificar la dureza y la vibración en la base del motor realizando las pruebas en la maqueta de la Universidad modelo No. G-111701 con diferentes mezclas de caucho reciclado y azufre**

**7.2.1 Base ensayo 1**

**7.2.1.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 1 izquierda)**

**Figura 28**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )*

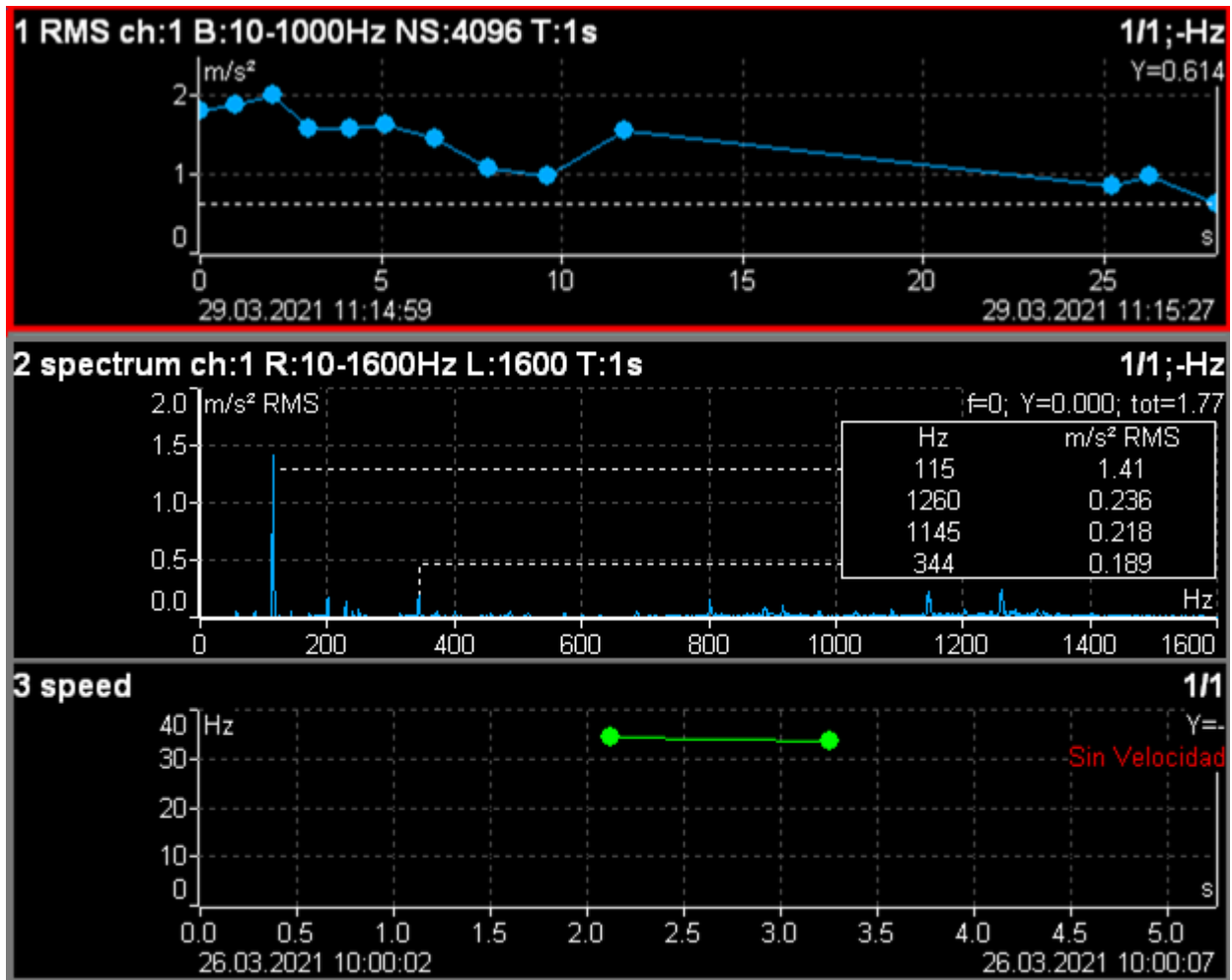


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.1.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 1 izquierda)

**Figura 29**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.1.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 1 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 29 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $2 m/s^2$ , al inicio del arranque; esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 29 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 115 Hz con una aceleración de  $1.41 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

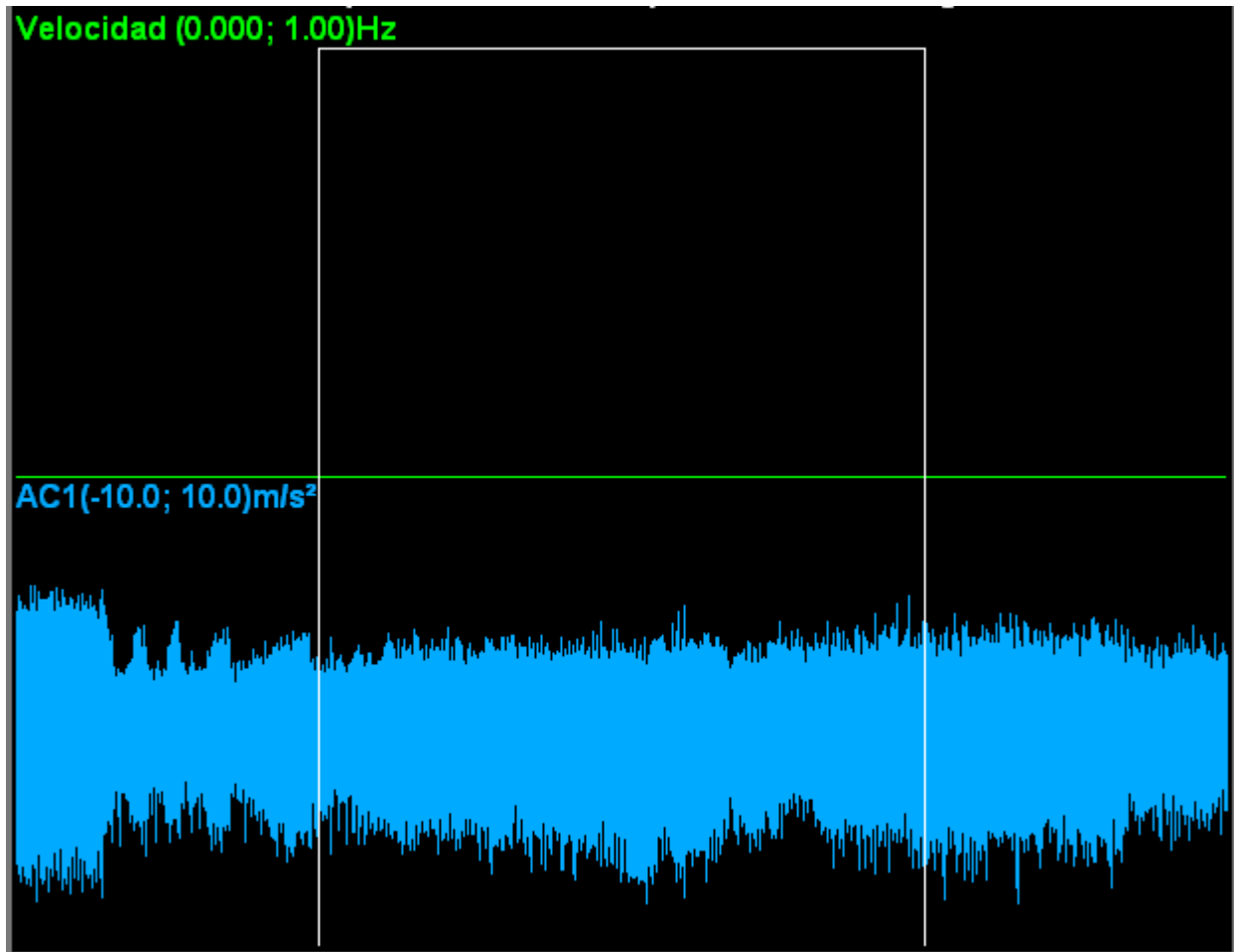
En la figura 29 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 43.5 Hz, al inicio indica el arranque y una velocidad baja de 41.5 Hz, donde se establece el ralentí.



#### 7.2.1.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 1 derecha)

**Figura 30**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

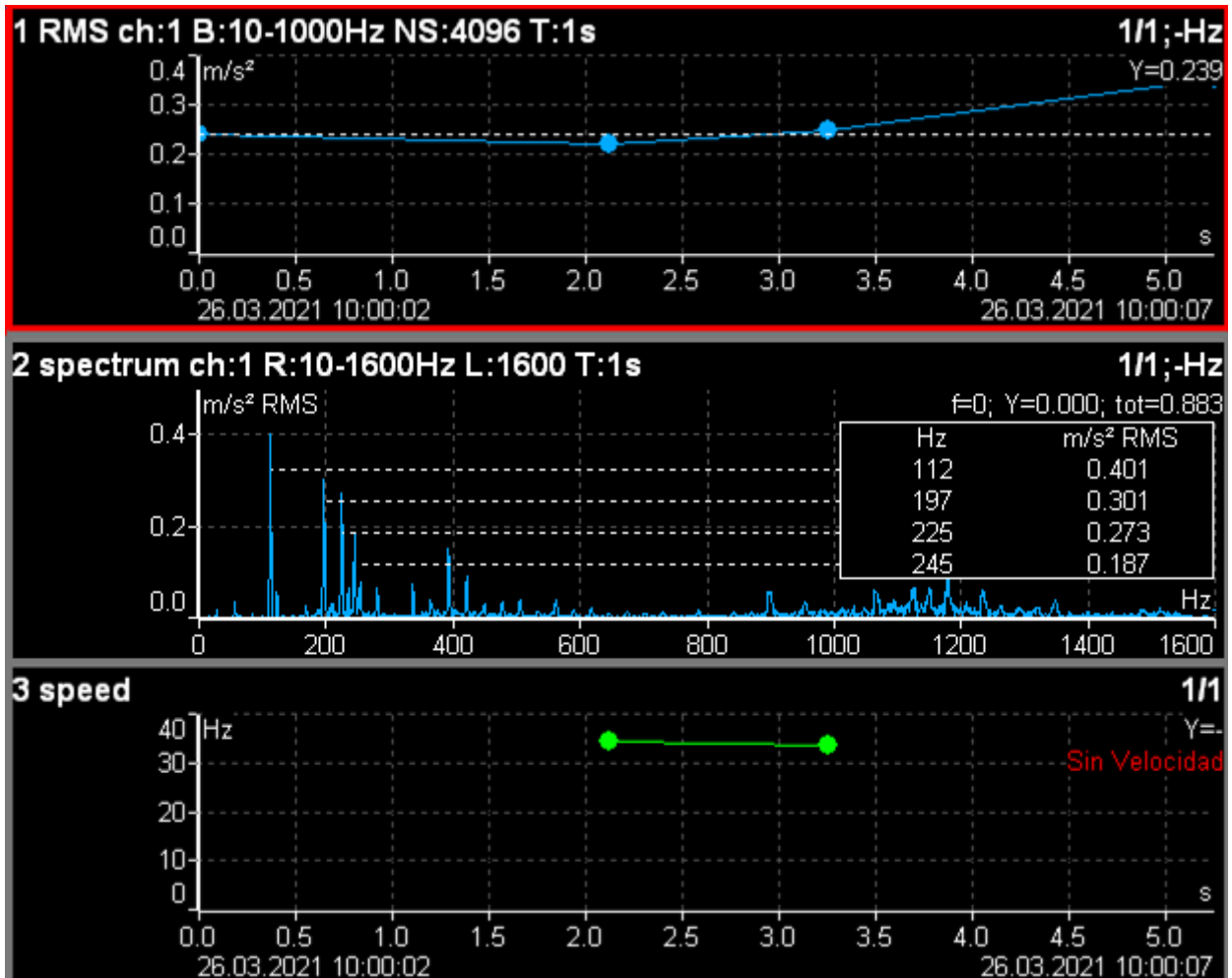


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.1.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 1 derecha)

**Figura 31**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.1.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 1 derecha)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 31 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.239 m/s^2$  al inicio del arranque, esta es su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 31 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$ , con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 112 Hz con una aceleración de  $0.401 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

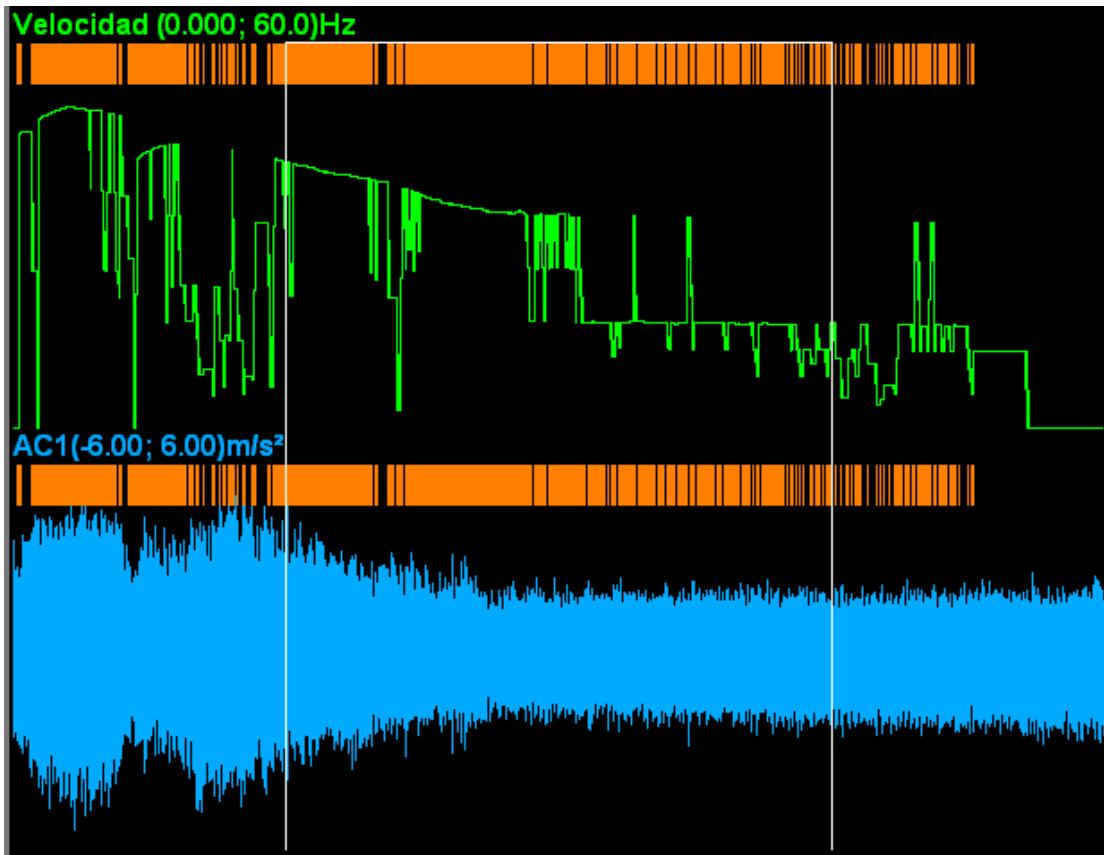
En la figura 31 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 43.5 Hz, al inicio indica el arranque y una velocidad baja de 41.5 Hz, donde se establece el ralentí.

## 7.2.2 Base ensayo 2

### 7.2.2.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 2 izquierda)

Figura 32

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

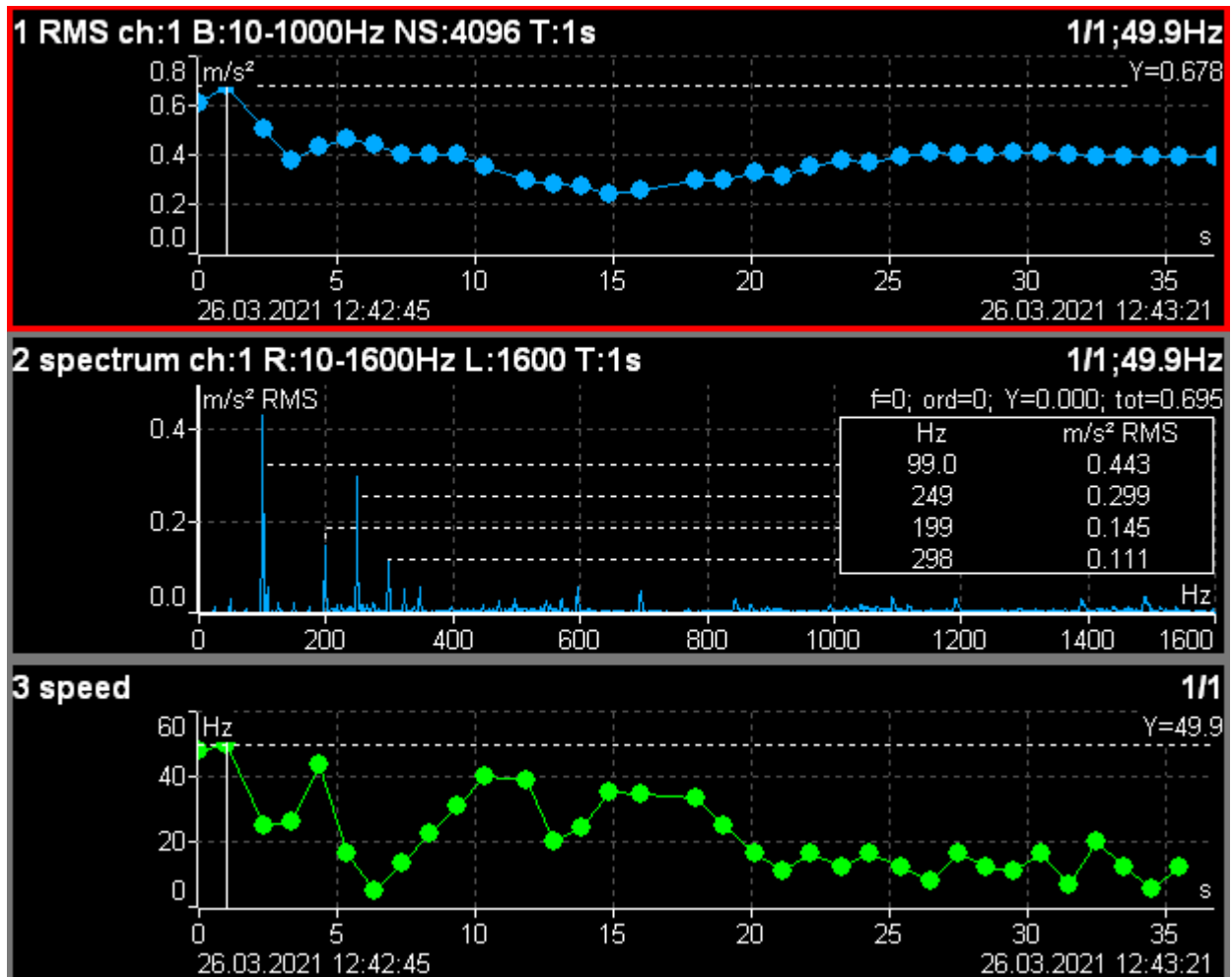


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.2.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 2 izquierda)

**Figura 33**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.2.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 2 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 33 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.678 m/s^2$ ; al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

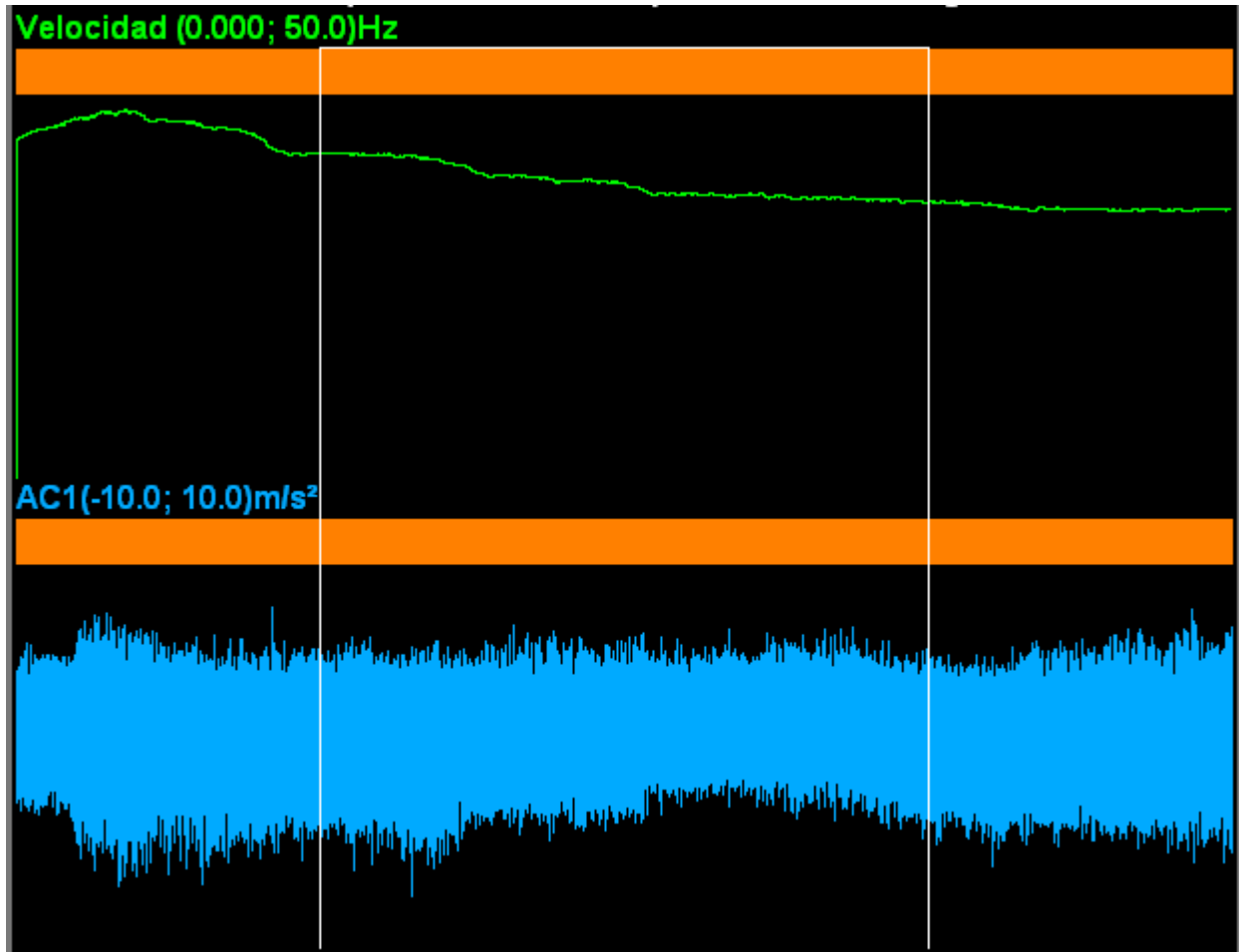
En la figura 33 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 99 HZ con una aceleración de  $0.443 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 33 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 49.9 Hz; al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 20 Hz donde se establece el ralentí.

#### 7.2.2.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 2 derecha)

Figura 34

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

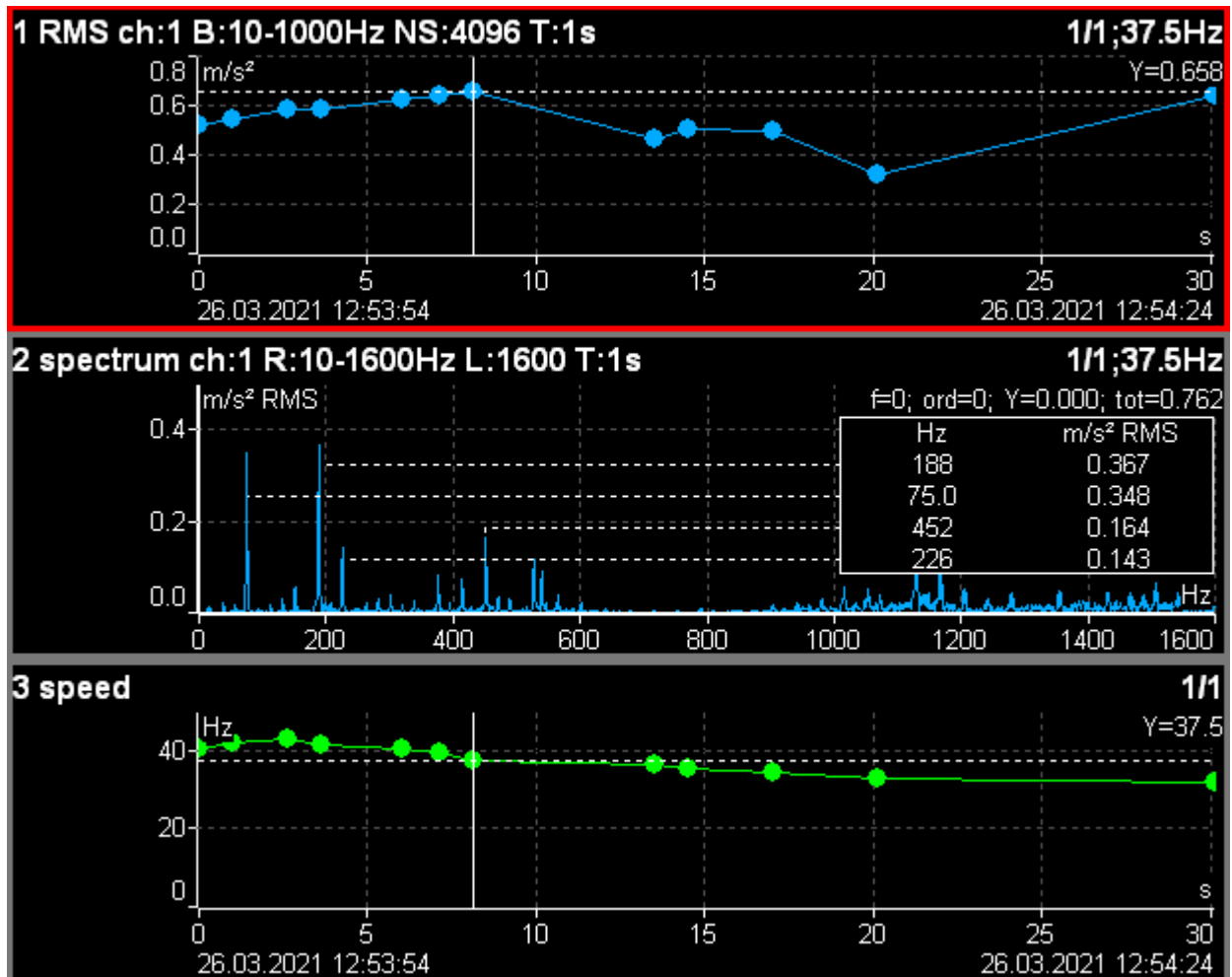


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.2.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 2 derecha)

Figura 35

Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)



Fuente: Elaboración Propia



### 7.2.2.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 2 derecha)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 35 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.658 m/s^2$ , al inicio del arranque; esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 35 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 188 Hz con una aceleración de  $0.367 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

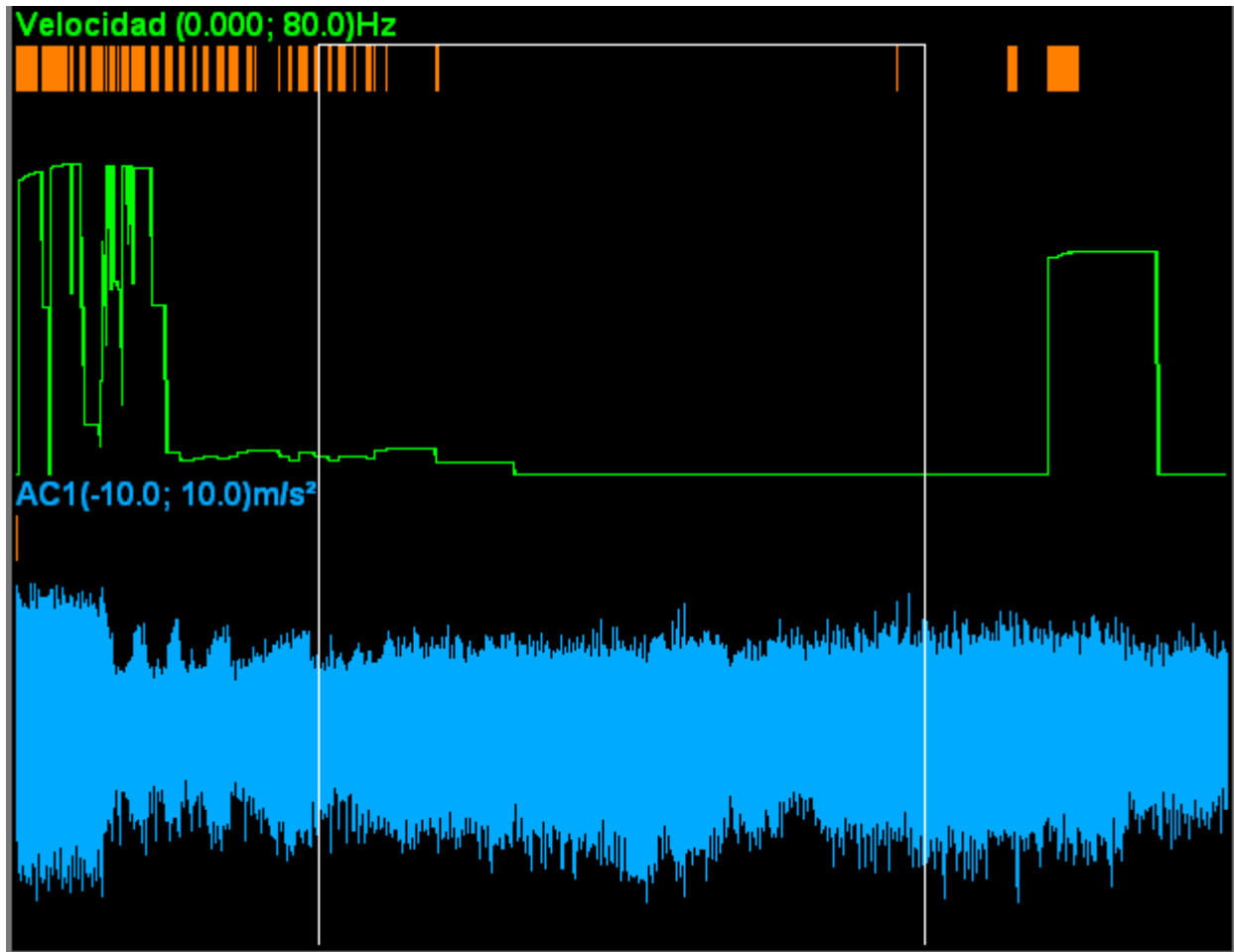
En la figura 35 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 42.9 Hz; al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 34.5 Hz, donde se establece el ralentí.

### 7.2.3 Base ensayo 3

#### 7.2.3.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 3 izquierda)

**Figura 36**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )*

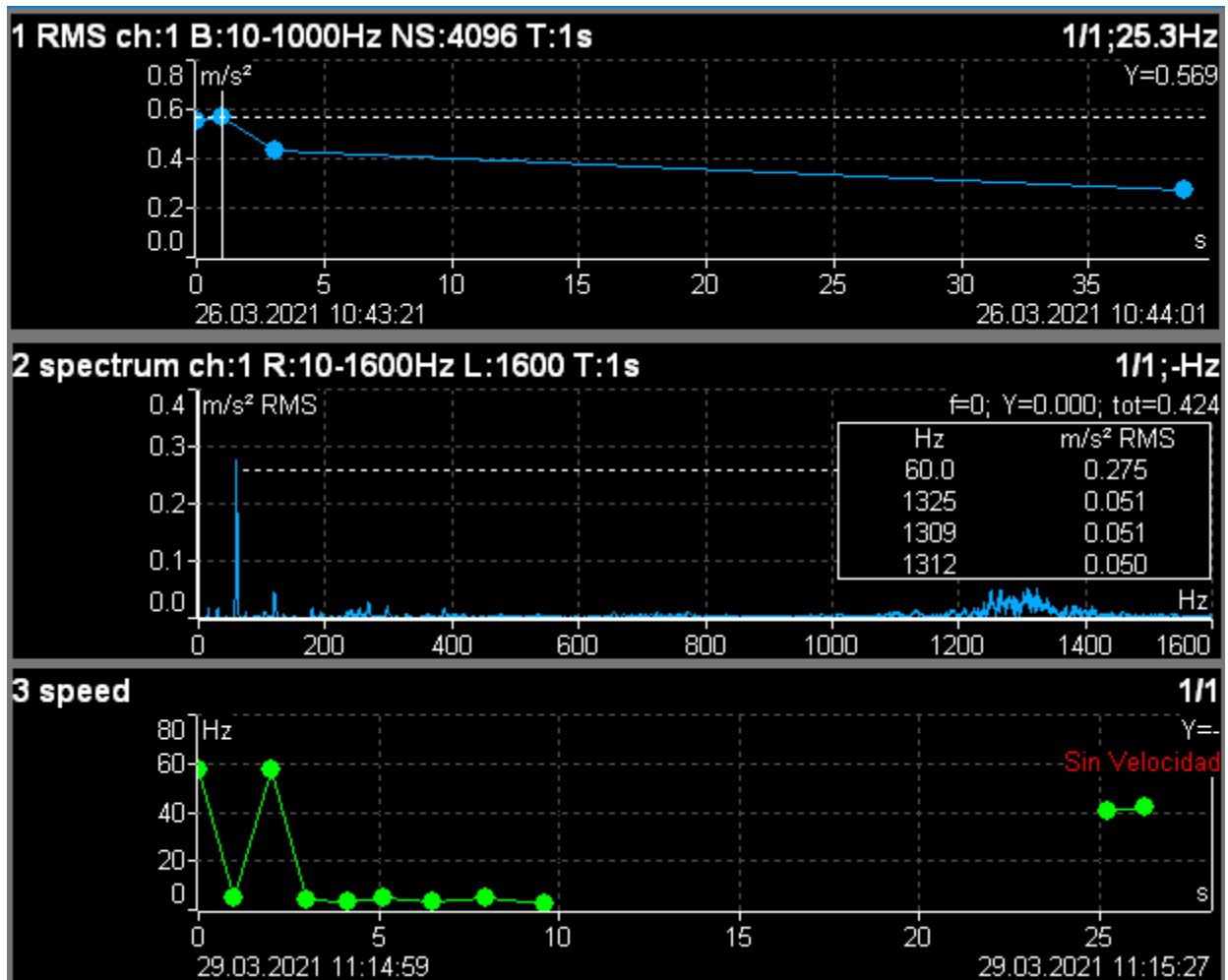


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.3.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 3 izquierda)

**Figura 37**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.3.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 3 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 37 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de 0.569 ( $m/s^2$ ), al inicio del arranque; esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

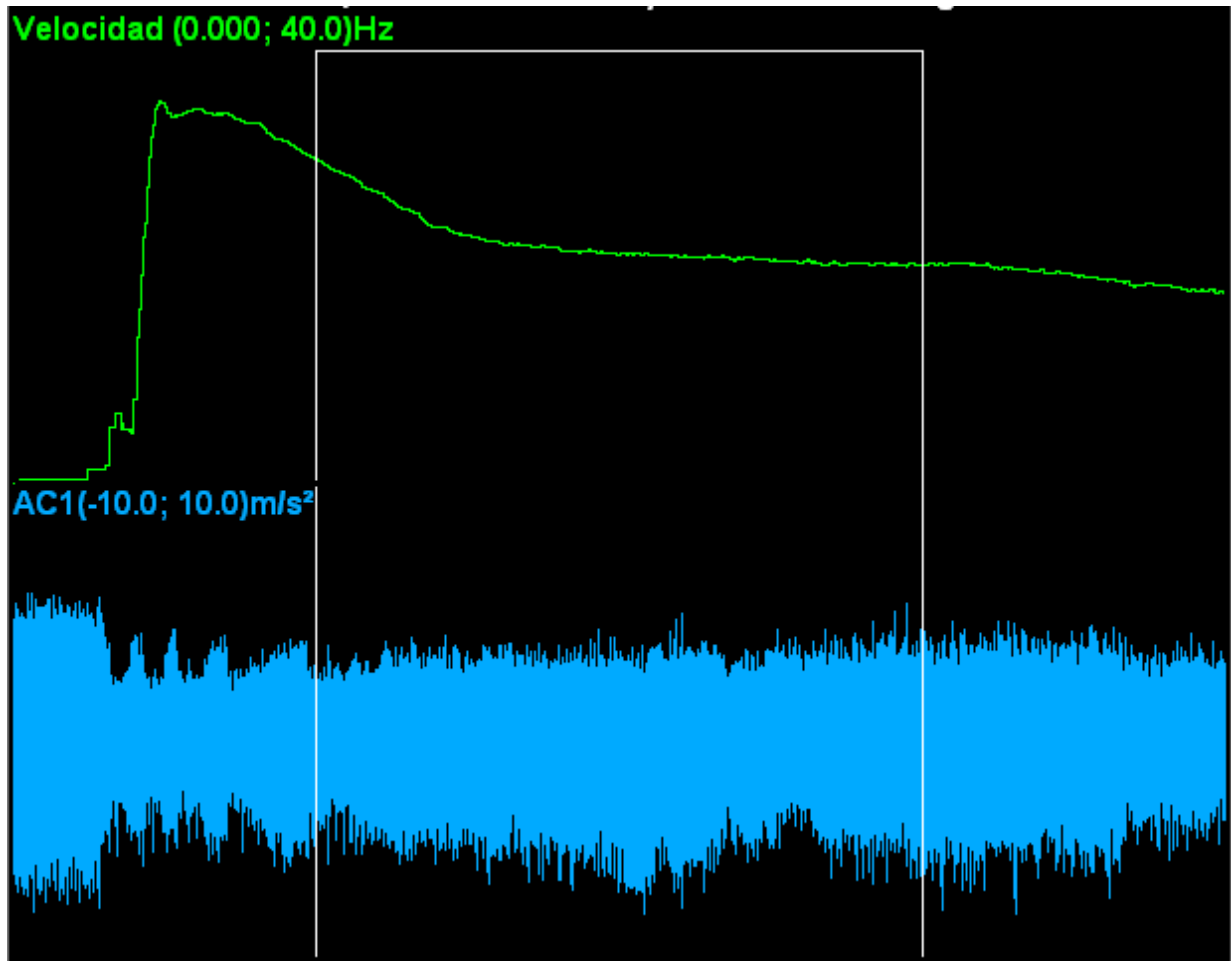
En la figura 37 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 60 HZ con una aceleración de 0.275  $m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 37 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 60 Hz, al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 40.5 Hz donde se establece el ralentí.

### 7.2.3.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 3 derecha)

Figura 38

Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )

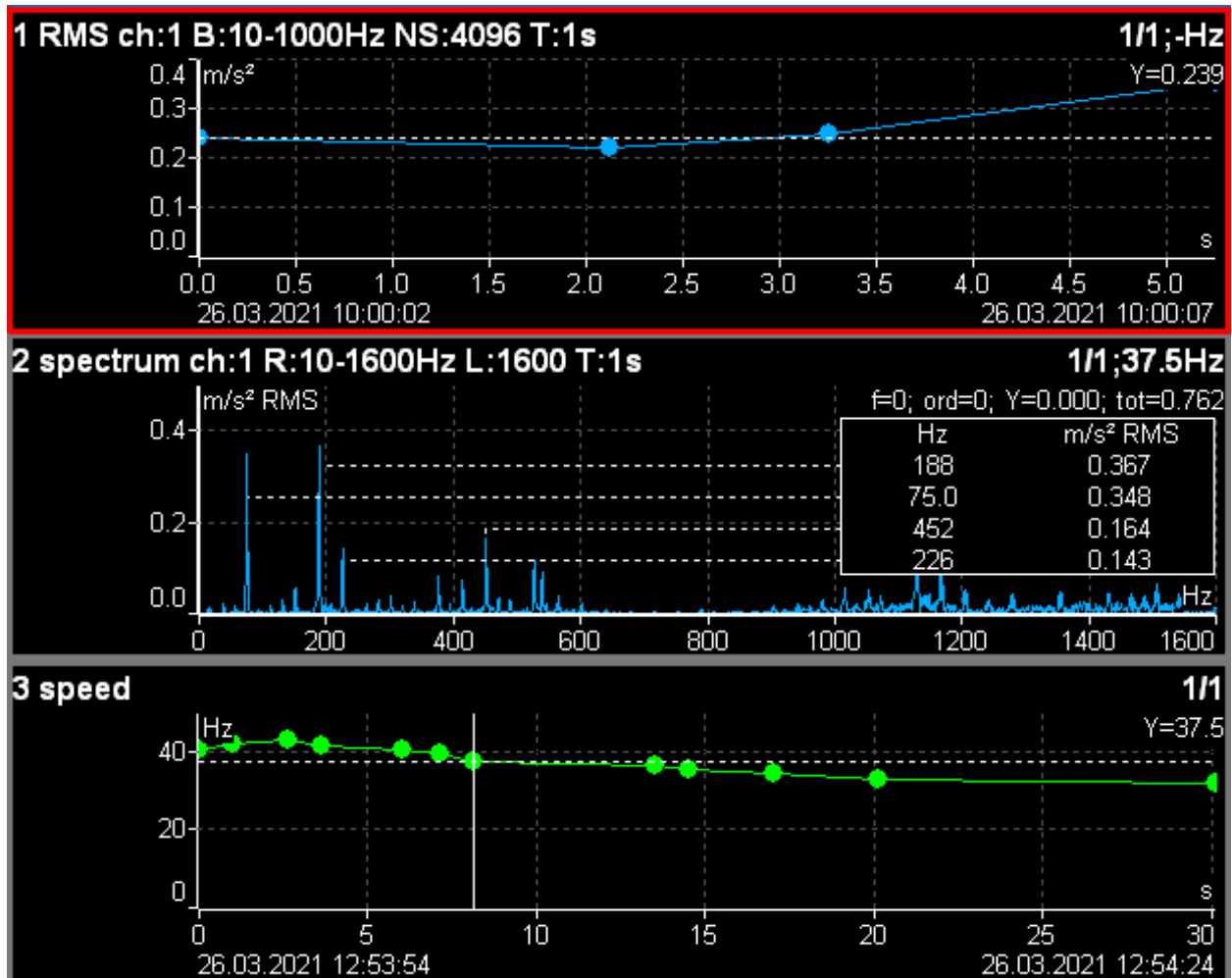


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.3.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 3 derecha)

**Figura 39**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.3.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 3 derecha)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 39 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.239 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta es su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 39 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 75 Hz con una aceleración de  $0.348 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

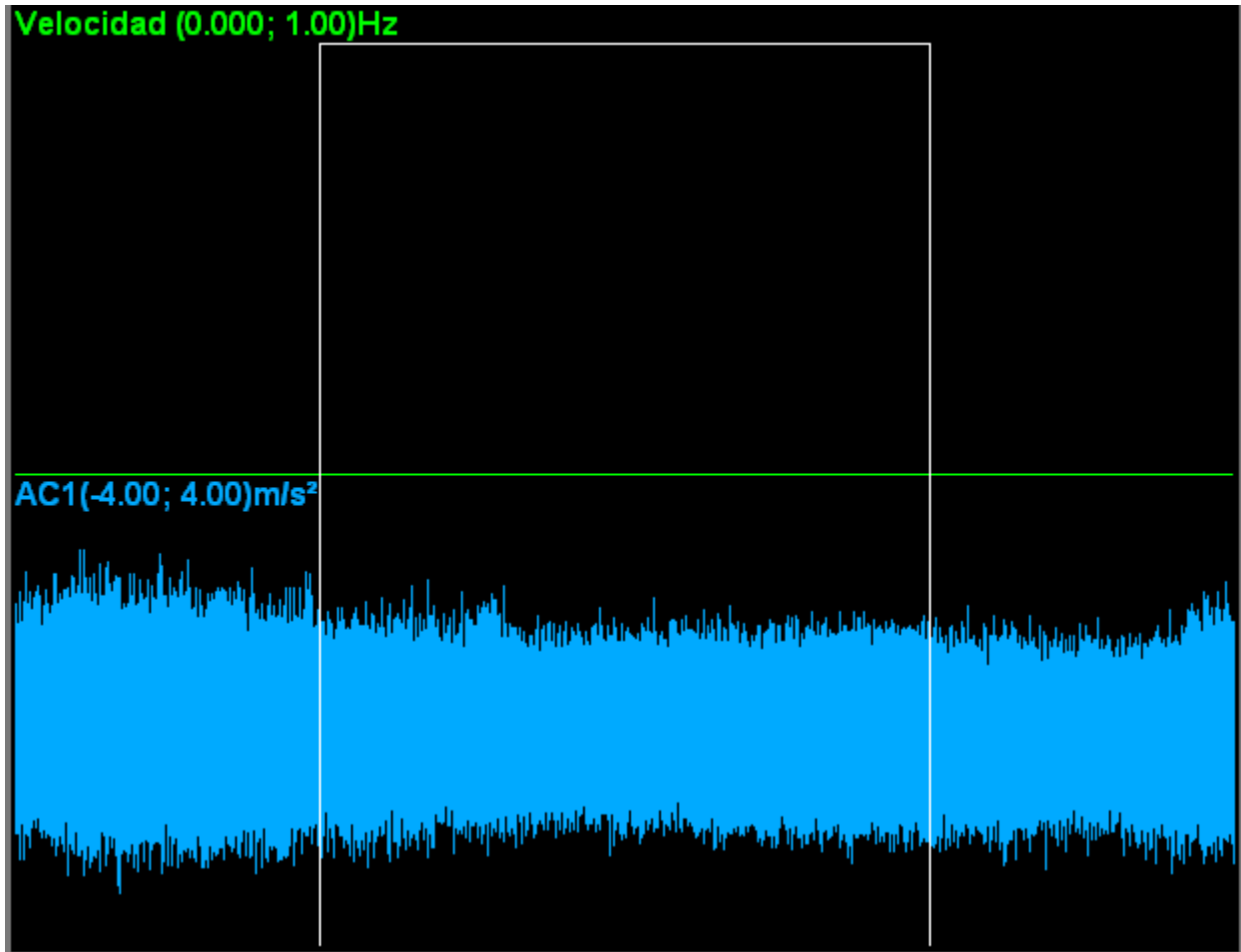
En la figura 39 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 41.5 Hz, al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 37.5 Hz, donde se establece el ralentí.

## 7.2.4 Base ensayo 4

### 7.2.4.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 4 izquierda)

**Figura 40**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*



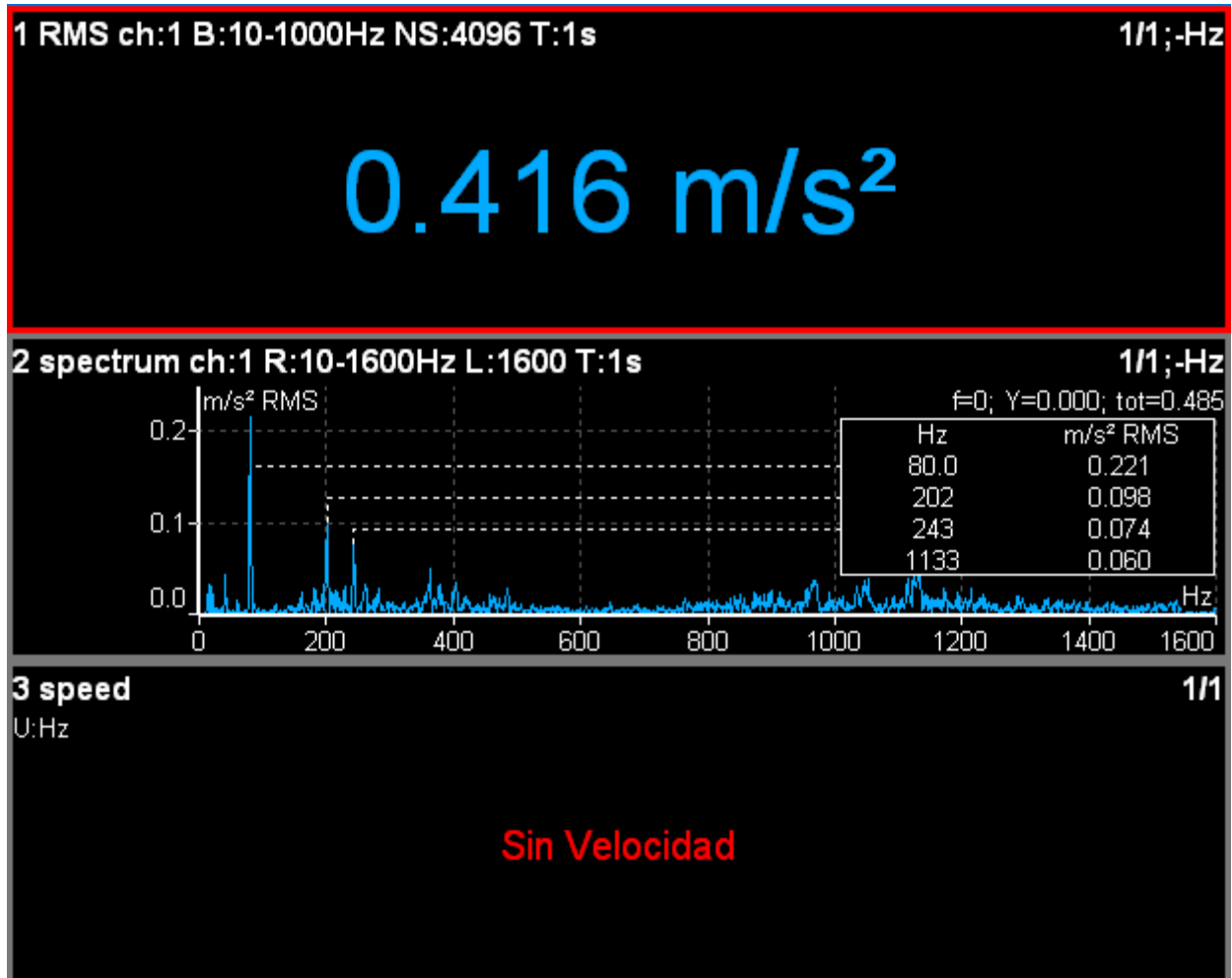
Fuente: Elaboración Propia



### 7.2.4.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 4 izquierda)

**Figura 41**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.4.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 4 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 41 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $0.416 m/s^2$  promedio, esta sería su aceleración más alta.

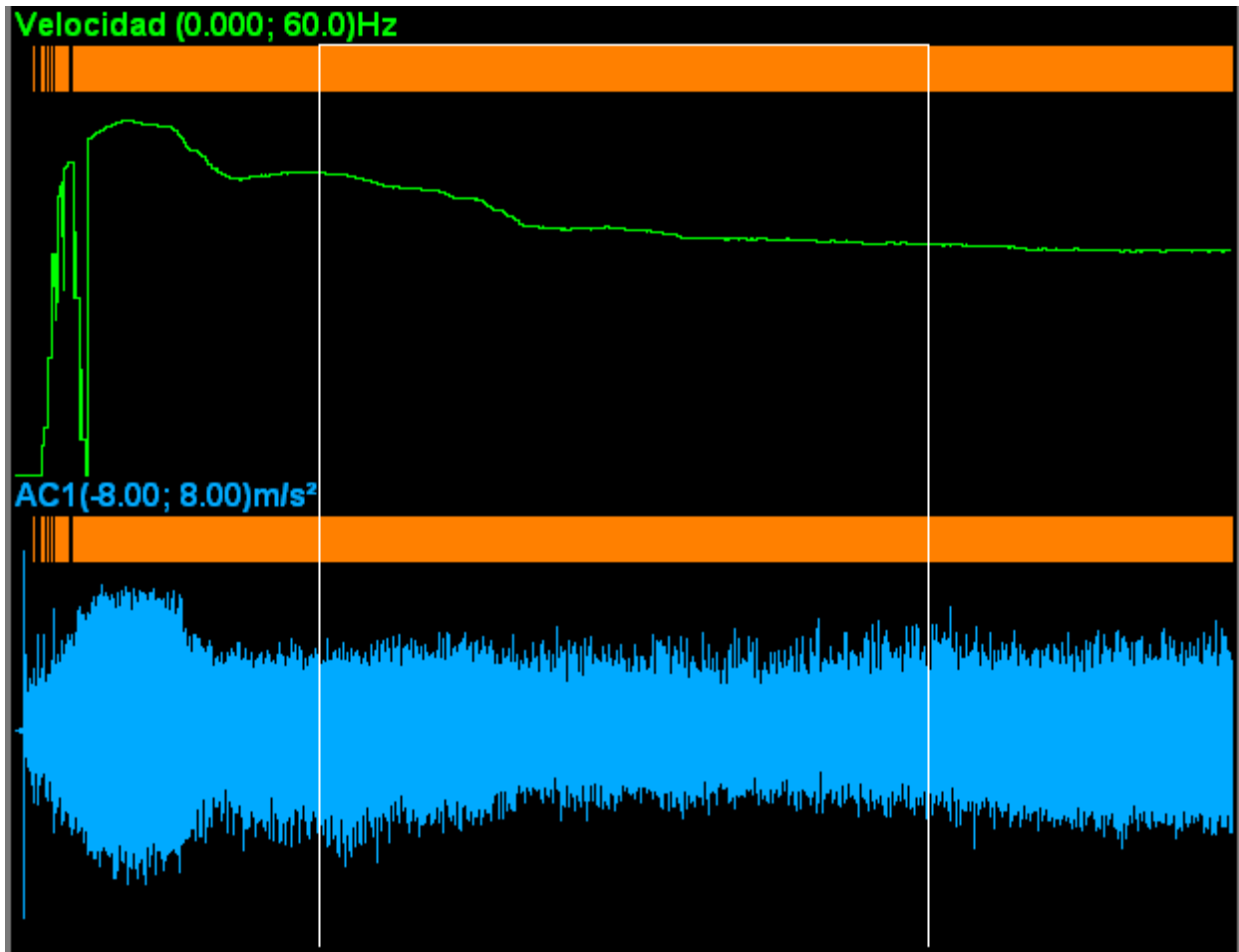
En la figura 41 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 80 Hz con una aceleración de  $0.221 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 41 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una falta de gráfica indicando que su velocidad no fue estimada.

#### 7.2.4.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 4 derecha)

Figura 42

Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )

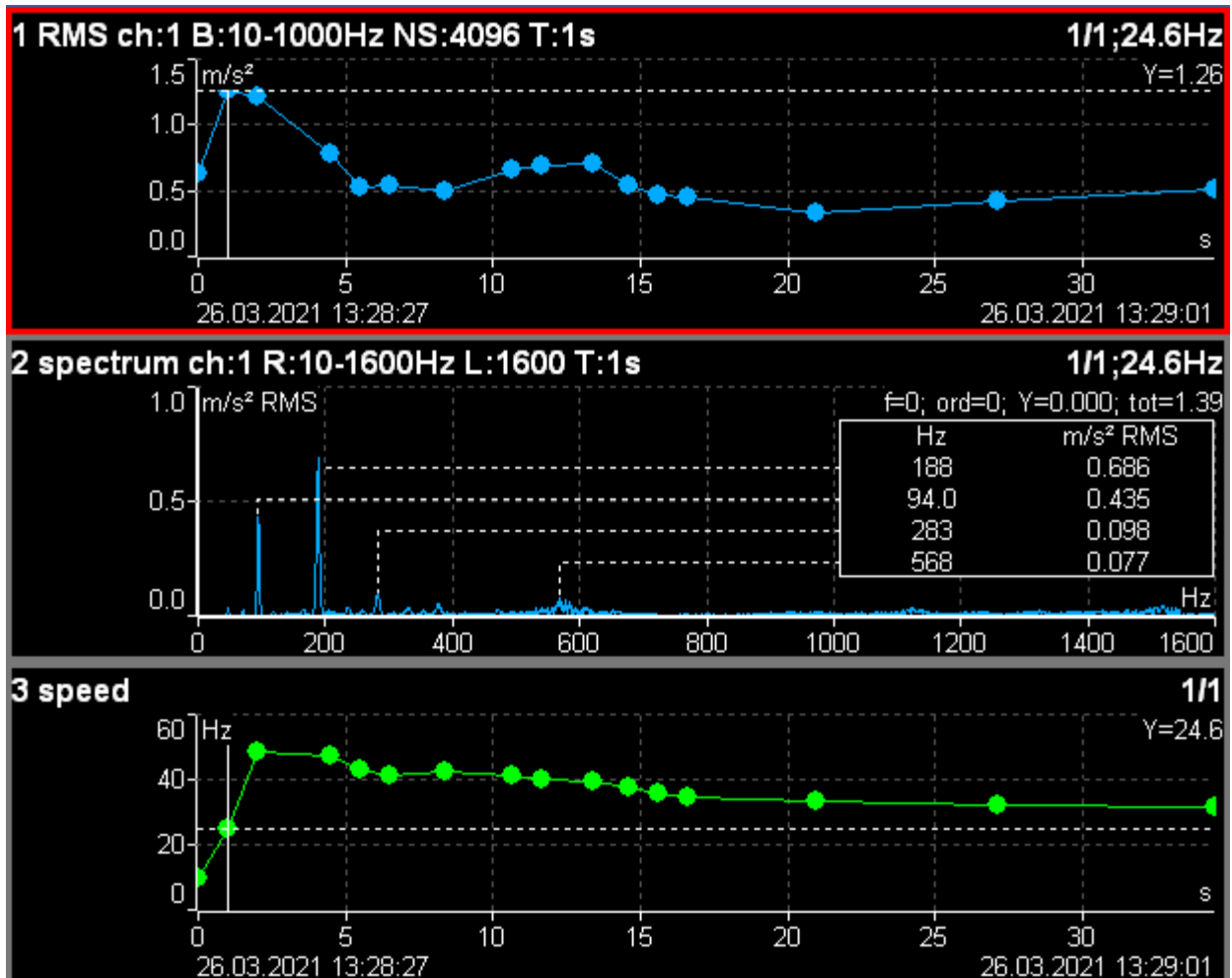


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.4.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 4 derecha)

**Figura 43**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

#### **7.2.4.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 4 derecha)**

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 43 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra a un punto alto de  $1.26 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 43 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$ , con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 94 HZ con una aceleración de  $0.435 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

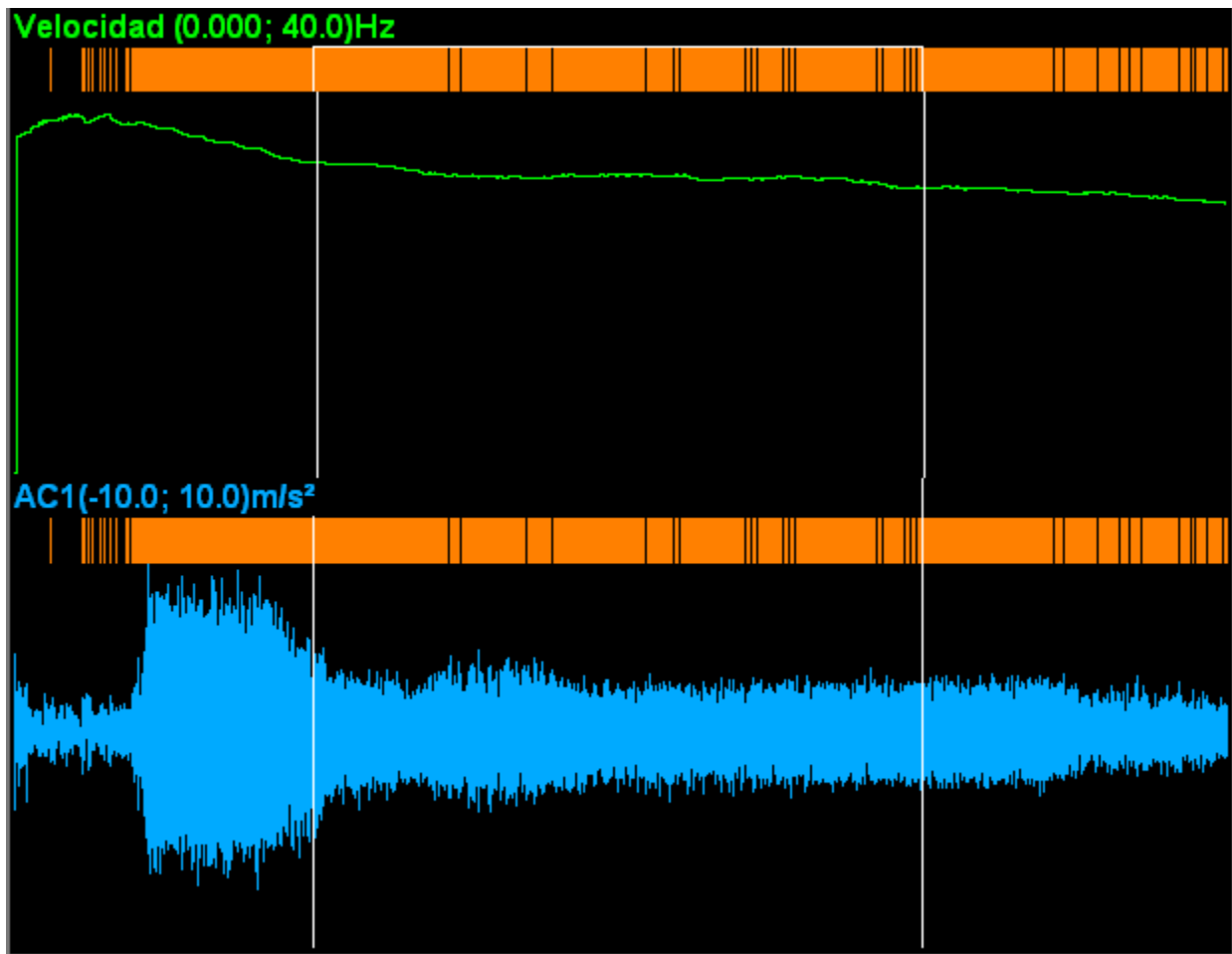
En la figura 43 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 51 Hz, al inicio que indica el arranque y una velocidad baja de 47.5 Hz donde se establece el ralentí.

## 7.2.5 Base ensayo 5

### 7.2.5.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 5 izquierda)

**Figura 44**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración ( $m/s^2$ )*

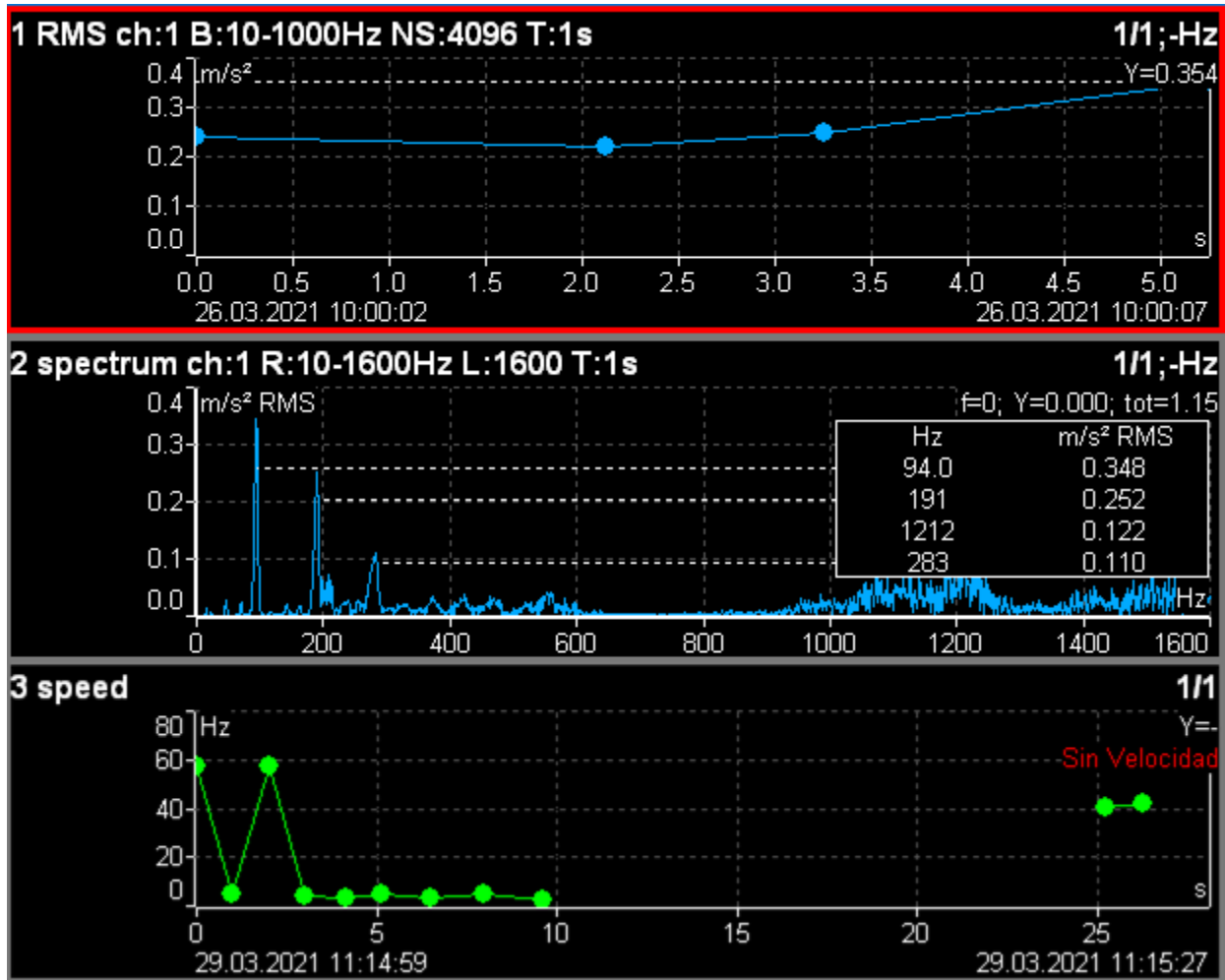


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.5.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 5 izquierda)

Figura 45

Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.5.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 5 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 45 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.239 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 45 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 94 Hz con una aceleración de  $0.348 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

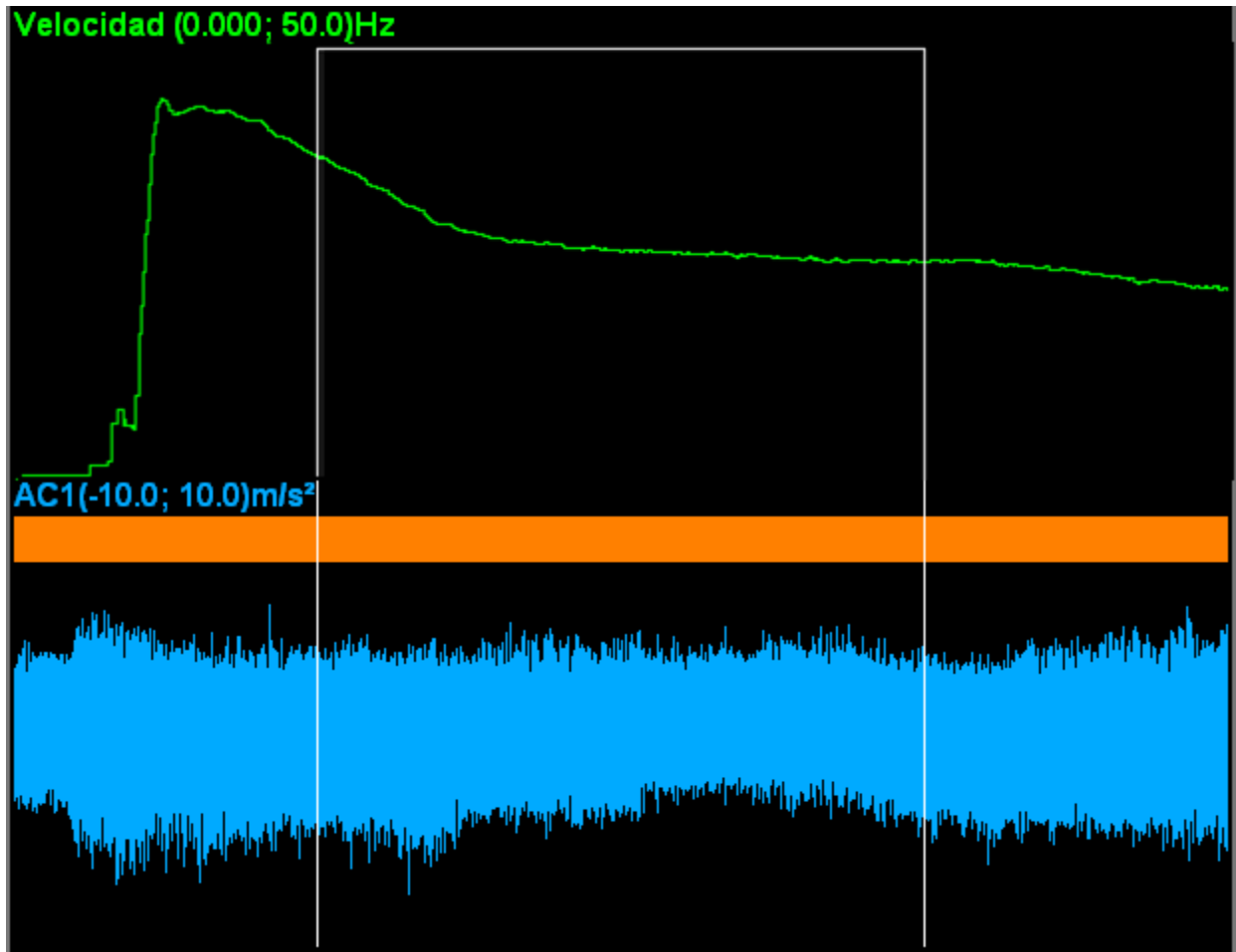
En la figura 45 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta 60 Hz, al inicio que indica el arranque y una velocidad baja a 40.5 Hz, donde se establece el ralentí.



#### 7.2.5.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 5 derecha)

**Figura 46**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

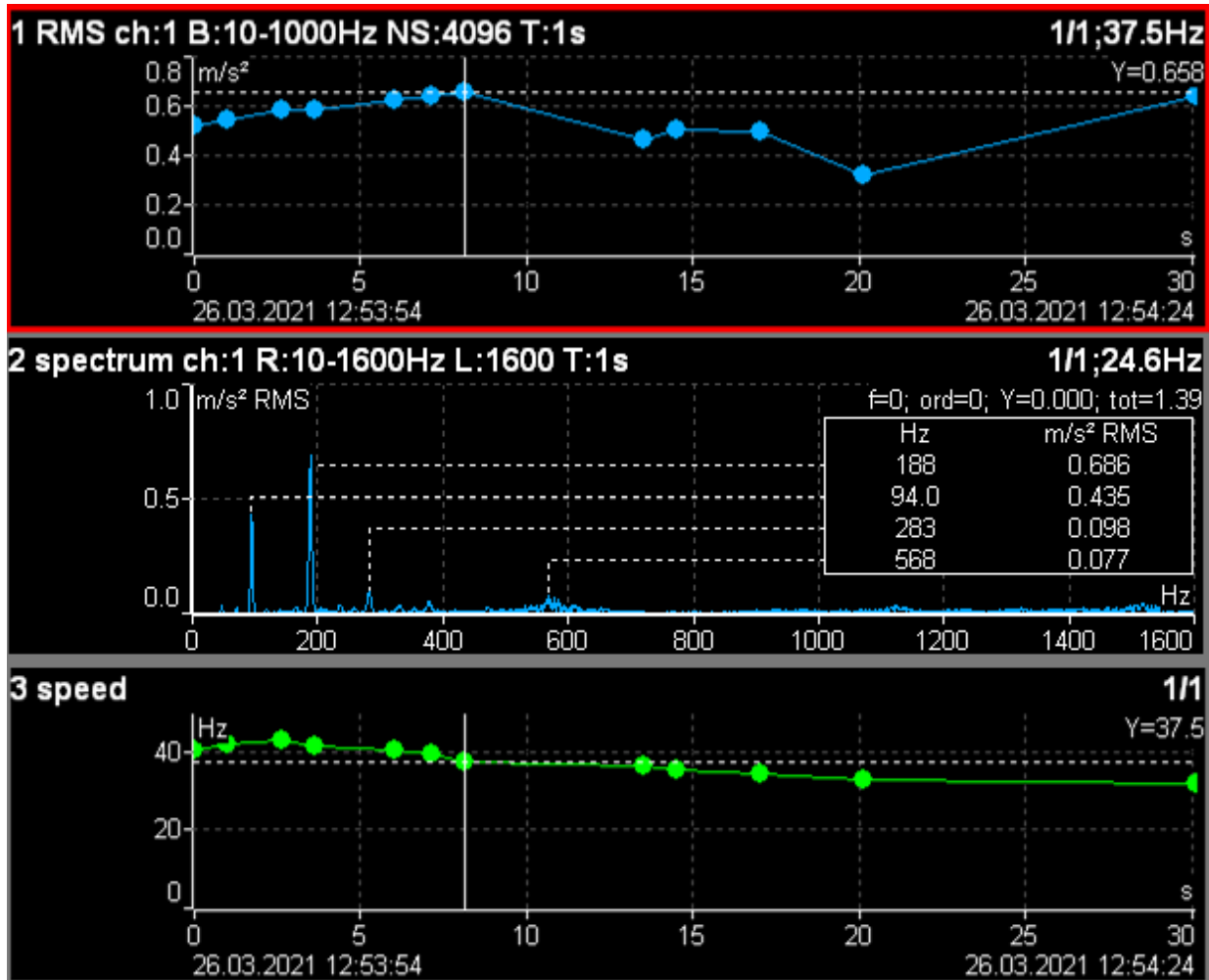


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.5.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 5 derecha)

**Figura 47**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.5.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 5 derecha)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (el encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 47 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.658 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 47 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 188 Hz con una aceleración de  $0.686 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

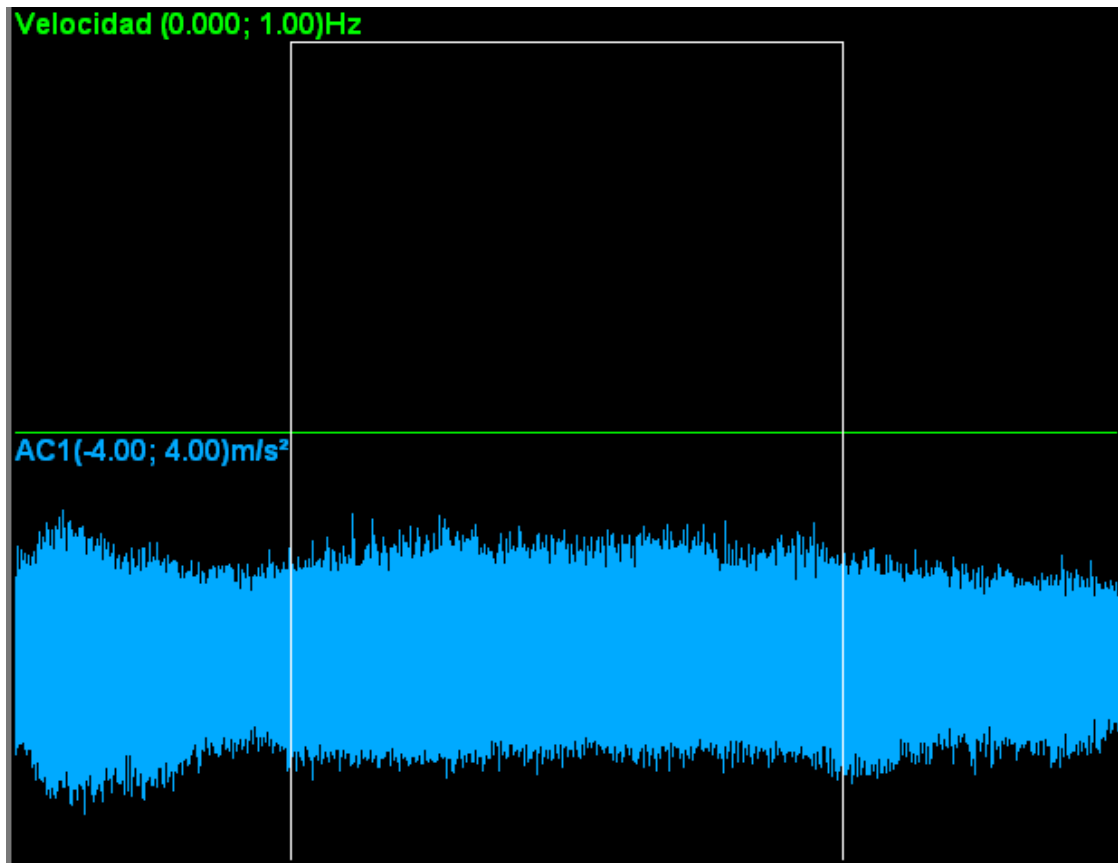
En la figura 47 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta es de 41.5 Hz, al inicio que indica el arranque y una velocidad baja de 35.5 Hz, donde se establece el ralentí.

## 7.2.6 Base ensayo 6

### 7.2.6.1 Prueba 1 (Señal sin procesar) (Base ensayo 6 izquierda)

**Figura 48**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

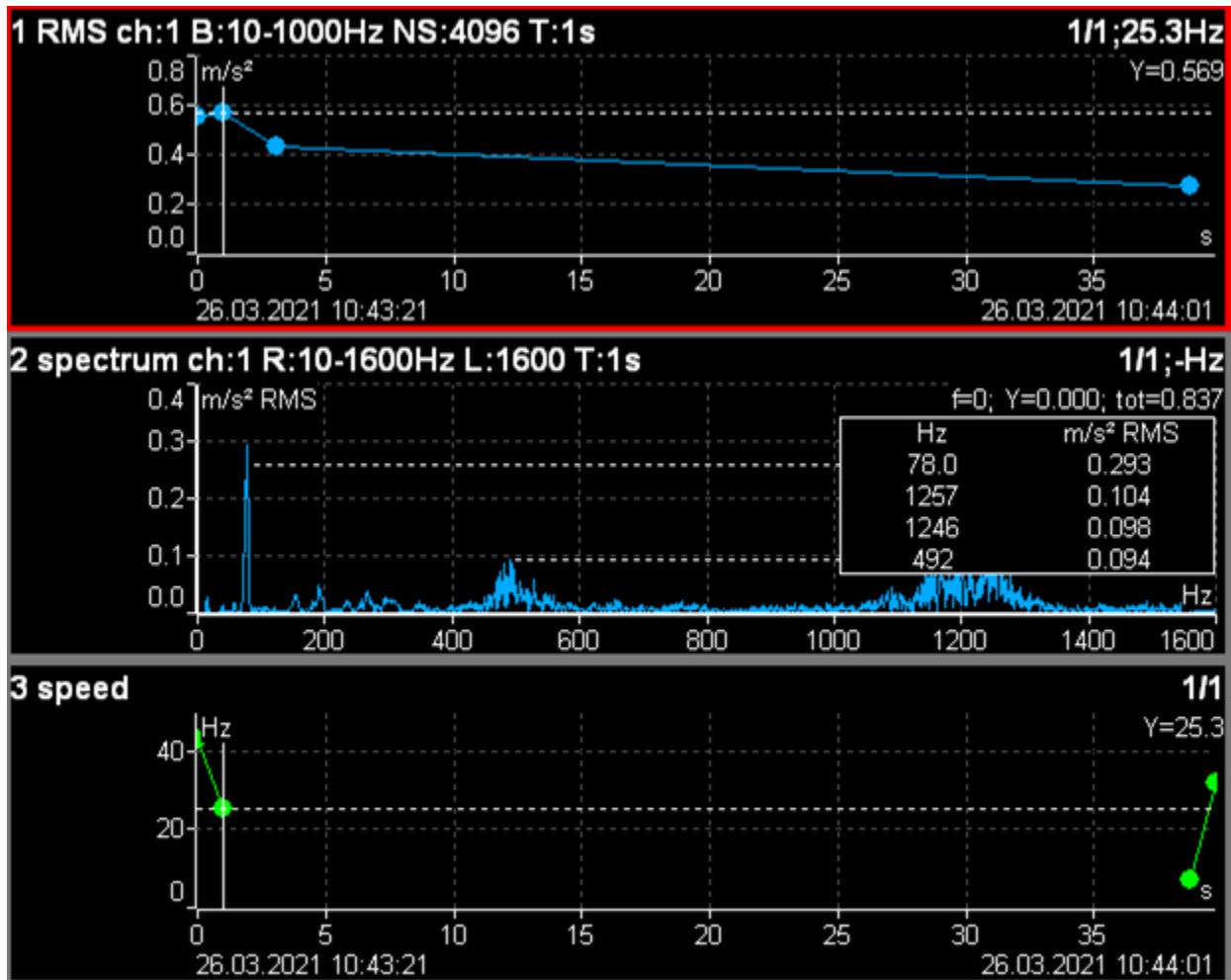


Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.6.2 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 6 izquierda)

**Figura 49**

*Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)*



Fuente: Elaboración Propia

### 7.2.6.3 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 6 izquierda)

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 49 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.569 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta sería su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

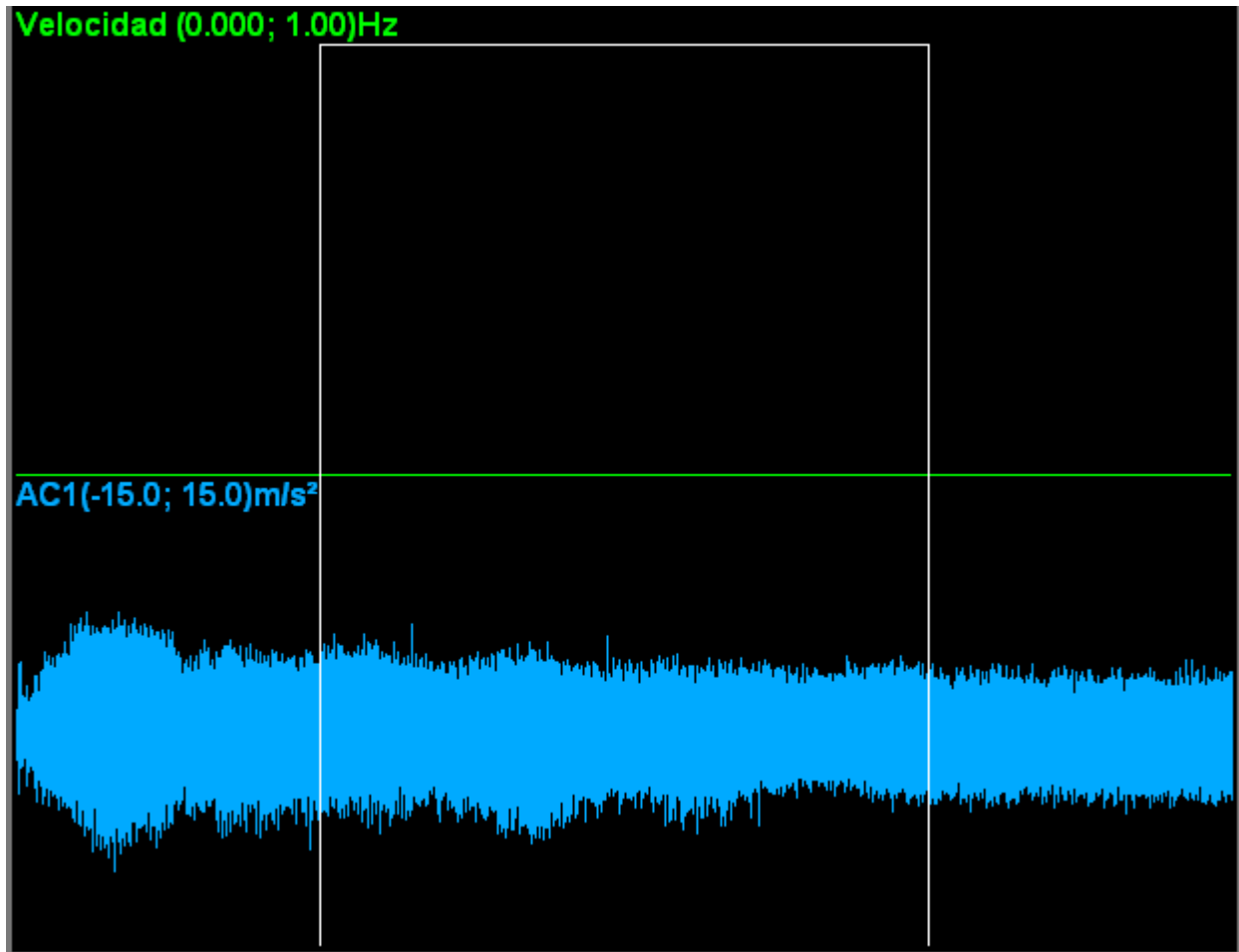
En la figura 49 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$ , con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 78 Hz con una aceleración de  $0.293 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 49 se observa la medida 3, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta 41.5 Hz al inicio indica el arranque y una velocidad baja a 27.5 Hz donde se establece el ralentí.

#### 7.2.6.4 Prueba 2 (Señal sin procesar) (Base ensayo 6 derecha)

**Figura 50**

*Registro de la señal (sin procesar), de la velocidad (Hz) y aceleración (m/s<sup>2</sup>)*

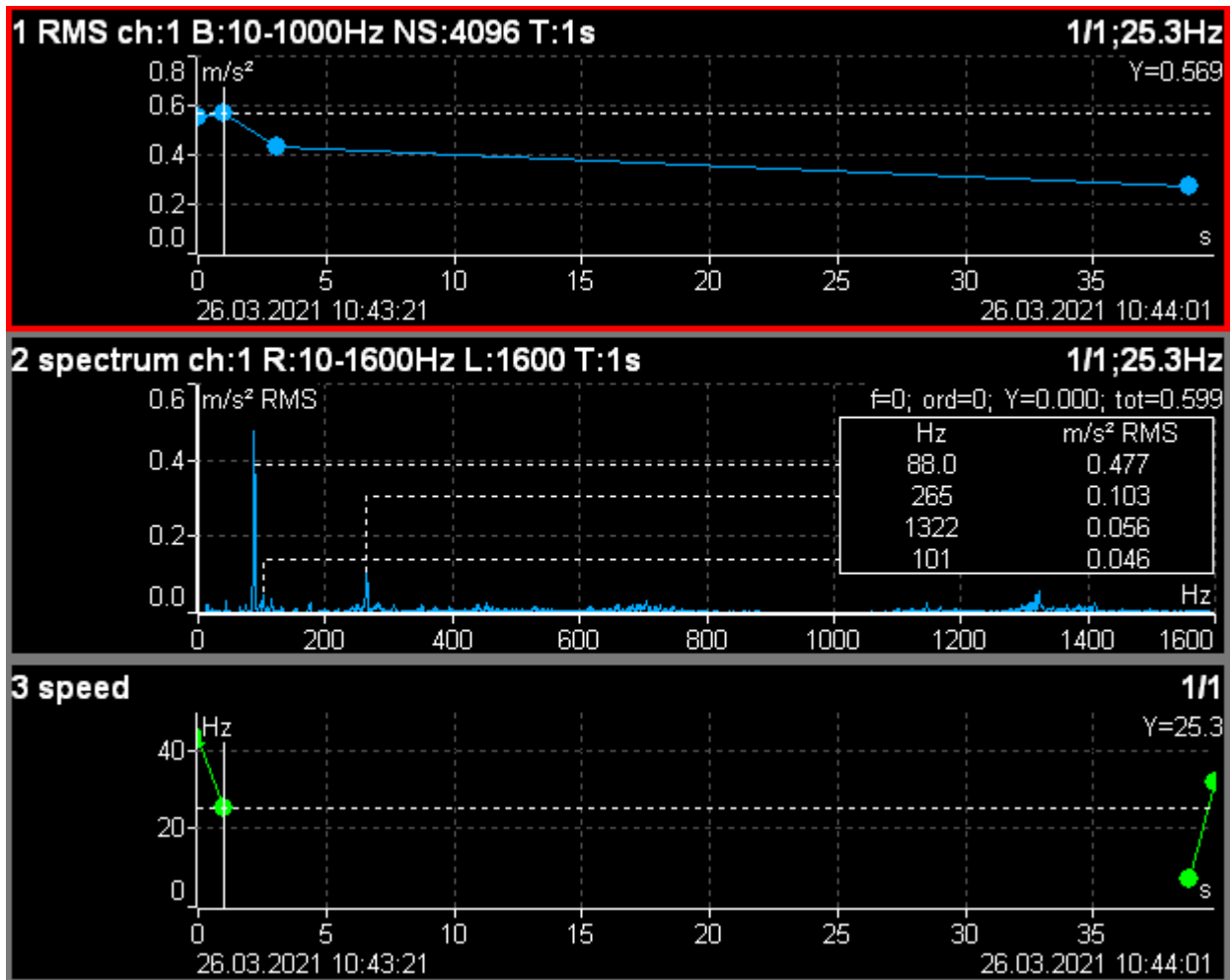


Fuente: Elaboración Propia

7.2.6.5 Registro (Señal procesada) (Base ensayo 6 derecha)

Figura 51

Gráficos amplitud RMS ( $m/s^2$ ), espectro FFT ( $m/s^2 - Hz$ ) y velocidad (Hz)



Fuente: Elaboración Propia



#### **7.2.6.6 Análisis (Señal procesada) (Base ensayo 6 derecha)**

El análisis comienza al inicio del momento dinámico del motor (del encendido), desde que se da el arranque hasta que se estabiliza el motor en ralentí a 850 RPM, tomando pruebas de 55 segundos cada una.

En la figura 51 se observa la medida 1, la gráfica de la amplitud en relación con el tiempo en  $m/s^2$ , esta aceleración se encuentra un punto alto de  $0.569 m/s^2$ , al inicio del arranque, esta es su aceleración más alta antes del estado de ralentí.

En la figura 51 se observa la medida 2, la gráfica del espectro FFT de la amplitud en  $m/s^2$  con la frecuencia en Hz, esta presenta los valores armónicos a los que la frecuencia presenta aceleraciones altas (fuera de lo normal), la más alta se encuentra a 88 Hz con una aceleración de  $0.477 m/s^2$ , esta aceleración alta se da al inicio del arranque.

En la figura 51 se observa la medida 2, la gráfica de la velocidad del motor en Hz, con el régimen del motor observamos que esta se encuentra en ralentí, presenta una gráfica corta indicando que su velocidad alta de 41.5 Hz, al inicio que indica el arranque y una velocidad baja a 27.5 Hz, donde se establece el ralentí.

### 7.3 Estadísticas para pronosticar el comportamiento

Estadísticas para pronosticar el comportamiento de la base original del motor de un modelo matemático en la maqueta de la Universidad modelo no. G-111701, de acuerdo al material de caucho reciclado y azufre.

**Tabla 21**

*Estadística del comportamiento de las bases motor*

| BASES MOTOR    | DATOS            | AMPLITUD Y FRECUENCIA DE VIBRACIÓN<br>MOMENTO DINÁMICO |                             |          |          |          |          |          |          |
|----------------|------------------|--|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                |                  | BASE ORIGINAL ORIGINAL<br>1                            | BASE ORIGINAL ORIGINAL<br>2 | ENSAYO 1 | ENSAYO 2 | ENSAYO 3 | ENSAYO 4 | ENSAYO 5 | ENSAYO 6 |
| BASE IZQUIERDA | m/s <sup>2</sup> | 0.275  | 0.477                       | 1.41     | 0.433    | 0.275    | 0.221    | 0.348    | 0.293    |
|                | Hz               | 60   | 88                          | 115      | 99       | 60       | 80       | 94       | 78       |
| BASE DERECHA   | m/s <sup>2</sup> | 0.293  | 0.477                       | 0.401    | 0.348    | 0.355    | 0.435    | 0.686    | 0.477    |
|                | Hz               | 78   | 88                          | 112      | 75       | 80       | 94       | 188      | 88       |

Fuente: Elaboración Propia

### 7.3.1 Análisis del comportamiento de las bases de motor

Las Bases Originales 1, tanto del lado izquierdo como derecho, con composición química CONFIDENCIAL (de fabrica), cuentan con aceleraciones de vibración de 0.275 y 0.293 m/s<sup>2</sup> para una máquina de clase 2, entre estas bases originales se encuentra una diferencia de 0.018 m/s<sup>2</sup> y con frecuencias de vibraciones de 60 y 78 Hz, contando con una diferencia de 18 Hz.

Las Bases Originales 2, tanto del lado izquierdo como derecho, con composición química CONFIDENCIAL (de fabrica), cuentan con aceleraciones de vibración de 0.477 y 0.477 m/s<sup>2</sup> para una máquina de clase 2, entre estas bases originales se encuentra una diferencia de 0 m/s<sup>2</sup>; sin embargo entre las Originales 1 y esta es de 0.202 m/s<sup>2</sup>, resultando así un rango muy amplio para las aceleraciones de los ensayos y las frecuencias de vibraciones de 88 Hz, contando con una diferencia de 0 Hz, también entre las bases originales 1 tiene una diferencia de 10 Hz, con estas pruebas se parte para hacer la comparación entre las diferentes bases de motor Originales y de Ensayos.

Las Bases de Ensayo 1, del lado izquierdo como el derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 100% y Azufre de 0%, aun genera aceleraciones de vibración altos, pero cada vez con menos rango de diferencia con las bases originales, contando con valores de 1.41 y 0.401 m/s<sup>2</sup>, con una diferencia de 1.13 (m/s<sup>2</sup>) comparada con la base original generando aceleraciones en el motor por el exceso de vibración en el motor, pero visualmente existía desgaste prematuro del vulcanizado.

Las Bases de Ensayo 2, del lado izquierdo como derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 99.5% y Azufre de 0.5%, cuenta con aceleraciones de vibración de 0.433 y 0.348

m/s<sup>2</sup>, comparadas con las Bases Originales hay una diferencia de 0.158 m/s<sup>2</sup>, por lo que está dentro del rango, esto puede generar fallos por dependencia de fabricación y por consiguiente fallos secundarios en la maquinaria, debido a que no cuenta con el compuesto del Azufre para mejorar las propiedades de vulcanizado (enlaces moleculares) de las bases.

Las Bases de Ensayo 3, del lado izquierdo como el derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 98% y Azufre de 2%, cuenta con aceleraciones de vibración de 0.275 y 0.355 m/s<sup>2</sup>, presenta una disminución en la aceleración de vibración, con diferencias entre las bases originales de 0 y 80 m/s<sup>2</sup>, donde la presencia de los fallos por dependencia de fabricación y generando fallos secundarios en la maquinaria se ve disminuida, se presenta una mejora en la caracterización del ensayo 2 contando con un 2% de Azufre ayudando a la vulcanización homogénea de las bases de ensayo, desapareciendo el descascaramiento de las F-NFU por el azufre.

La Base de Ensayo 4, del lado izquierdo como el derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 96.5% y Azufre de 3.5%, donde se observan aceleraciones de vibración de 0.221 y 0.435 m/s<sup>2</sup>, presentan un cierto grado de disminución de 0.160 m/s<sup>2</sup>, conforme aumenta el porcentaje de Azufre a los ensayos su aceleración se ve reducida.

Las bases de Ensayo 5, del lado izquierdo como derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 95% y Azufre de 5%, generan aceleraciones de amplitud de 0.348 y 0.686 m/s<sup>2</sup> con diferencias de entre 0.73 y 0.411 m/s<sup>2</sup>, comparada con las bases originales, mejorando en la aceleración de vibración y muy cerca del grado de estabilidad.

Las Bases De Ensayo 6, del lado izquierdo como el derecho, con composición química de Caucho Reciclado de 93.5% y Azufre de 6.5%, generan aceleraciones de amplitud similares a las aceleraciones de las originales, logrando estabilidad dinámica.

## **8 Resultados**

### **8.1 Resultados de dureza**

La dureza de las bases de motor de ensayo se ven afectadas por el Azufre, ya que este realiza las acciones de vulcanizador sobre el caucho, haciendo que sus moléculas formen cadenas mejor ramificadas y ordenadas, con una dureza (medible) de 75.6 (SH-A) aunque con un porcentaje de azufre mayor al 6.5% se genera una mayor dureza que imposibilita su medición mediante el durómetro.

Añadiendo azufre como el vulcanizador al material reciclado, se realiza el re vulcanizado del material reciclado (F-NFU), mientras mayor cantidad de azufre se añada en los ensayos, esto mejora las cadenas de moléculas haciendo “enlaces químicos” de mayor estabilidad, produciendo un incremento de dureza.

### **8.2 Resultados de vibración**

La aceleración de vibración de cada ensayo se ha manifestado de manera decreciente, conforme se iban realizando las pruebas en la bases de ensayo desde el ensayo1 hasta el 6, por lo cual notamos que el azufre juega un papel muy importante en el proceso de vulcanizado, donde se ramifica sus resultados directamente en la dureza y la vibración, teniendo el caso del Ensayo 1 que contaba solo con material reciclado (F-NFU) al 100%, dio una aceleración de vibración de 1.41  $m/s^2$ ; que alcanzó rangos de “inestabilidad” con base a la frecuencia de 115 Hz, presentando también signos de desprendimiento de material, conforme se realizan las pruebas en los distintos ensayos, se obtuvieron aceleraciones de vibración con tendencia decreciente llegando al rango de “estables”, esto debido al incremento en 6.5 % de azufre, con lo cual se obtuvieron ensayos con mayor dureza y estabilidad.

## **9 Conclusiones**

### **9.1 Conclusión general**

Las propiedades mecánicas de las bases del motor de caucho reciclado y azufre, fueron obtenidas por señales de amplitud en el dominio del tiempo, estableciéndose complejidad para su análisis y diagnóstico, para lo cual es necesario convertir las señales al dominio de la amplitud y la frecuencia mediante la técnica más utilizada la transformada Rápida de Fourier (FFT). Todos los datos necesarios se ingresan al equipo Adash V4pro® que están en el protocolo de medición, la Amplitud donde nos indica la severidad del fallo y la frecuencia que indica el tipo de fallo a la cual la vibración ocurre este tipo de fallo es por Dependencia de Fabricación.

### **9.2 Conclusiones específicas**

Las pruebas realizadas en las bases de motor original fueron realizadas en 2 distintas bases de la misma composición CONFIDENCIAL (de fabrica), la cual se puede realizar su respectiva comparación y análisis, encontrando que estas bases originales están dentro de un rango “estable” de la vibración de la amplitud de 0.275 a 0.477  $m/s^2$  y la frecuencia de 60 a 90 Hz, y presentan una condición de dureza DESCONOCIDA, por motivo que no se cuenta con la composición química de esta debido a la CONFIDENCIALIDAD de su fabricación que existe dentro de las fábricas.

La dureza y la vibración de las bases de motor de ensayo que cuentan con distintos porcentajes de Azufre, desde 0% hasta el 6.5%, se realizaron con sus respectivas pruebas y se concluyó que, las bases del motor de ensayo son más eficientes cuando el porcentaje de azufre es de 6.5% en el proceso de vulcanizado; ayudando al aumento de la dureza shore tipo A medible dentro de un rango de 40 a 75.6 SH-A y su cadenas moleculares, disminuyendo así la aceleración de vibración

a un rango de 0.477 a 0.275  $m/s^2$  contribuyendo a la estabilidad del motor, para su buen funcionamiento.

Para el pronóstico del comportamiento de las bases originales y de ensayos; se llegó a la conclusión que las bases originales cuentan con un grado de porcentaje de azufre mayor al utilizado en nuestros ensayos, que están en un rango del 0% al 6.5%, en donde se obtuvieron valores relativamente razonables dentro del rango de la aceleración de amplitud de 0.275 a 0.477  $m/s^2$  y la frecuencia de 60 a 90 Hz, lo cual se logró en el ensayo 6, con el 6.5% de azufre en las mezclas, lo que nos da aceleraciones de vibración 0.293  $m/s^2$  y una frecuencia de 78 Hz, aunque con las pruebas piloto se concluyó que con porcentajes mayores al 6.5% de azufre su dureza impide realizar los análisis de densidad, elasticidad y dureza shore.

## **10 Recomendaciones**

Para obtener una buena resolución de la Frecuencia y reducir la Fuga Espectral, es necesario hacer uso de la Ventana “Hanning”, con la cual ayuda a obtener resultados con el 95% de efectividad.

Los promedios espectrales ayudan a atenuar las irregularidades que no son de las bases, donde se recomienda usar un rango de 1600 Hz en máquinas rotativas, esto es en la “Medición 2” de las pruebas 1 y 2.

Para analizar el comportamiento de las bases del motor dentro del Espectro de Vibración FFT, se debe observar las series de 5 armónicos en función de la amplitud y la frecuencia con los cuales nos indicaran el fallo que tienen.

Si se pretende realizar una producción en serie de bases de motor con valores de amplitud y frecuencia estables, se debería agregar un 0.4% más de Azufre al Ensayo 6 que cuenta con un porcentaje de 6.5%.



## 11 Bibliografía.

BBC News Mundo. (27 de Julio de 2019). *La controversial (y sangrienta) historia del Caucho*. Obtenido de [www.bbc.com/mundo/noticias-49082866](http://www.bbc.com/mundo/noticias-49082866)

Brasero Espada, J. (2017). *Desarrollo de nuevas formulaciones de látex de caucho natural libres de n-nitrosaminas, hipoalergénicas y ecológicas, y su caracterización por RMN de campo bajo [Tesis Doctoral UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID]*.

Carrasquero, F. L. (2005). *Fundamentos de Polímeros*. Mérida.

Cruz Cal Blanca, R., Guerra Valdés, B. F., Álvarez García, E. A., & Blanco, A. R. (2012). *Evaluación de elastómeros*. Universidad Central de las Villas.

Cruz Cal, B. R. (2012). *Evaluación de elastómeros vulcanizados*. Carmen: Universidad Central de las Villas.

García Morcillo, J. (1982). *Del Caucho al Oro: El proceso colonizador de Madre de Dios*. Madrid: Revista Española de Antropología Americana.

García Mordillo, J. (1982). *Del Caucho de Oro: El proceso colonizador de la Madre de Dios*. Madrid: *Revista Española de Antropología Americana*, 255.

García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá: Universidad de los Andes.

García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Gonzalez, F. (25 de 2 de 2007). Obtenido de:  
[http://www.geocities.ws/fg\\_audio/Archivos/Trabajo\\_Ventanas.pdf](http://www.geocities.ws/fg_audio/Archivos/Trabajo_Ventanas.pdf)

López, C. F. (2005). *Fundamentos de Polímeros*. Mérida: Universidad de Los Andes.

LUCÍA, E. D. (2012). ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO NORMALIZADO DE OPERACIÓN. México DF, México.

Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M. (2010). Introducción a la Probabilidad y Estadística. México D.F.: Cengage Learning.

Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de Caucho Reciclado: Una Revisión de la Literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27-50.

Peñalva, I. (24 de septiembre de 2019). *FLICC Pasión Automovilística*. Obtenido de *Conoce cómo se crean las ruedas de tu vehículo*. Obtenido de <https://fli.es/conoce-como-se-crean-las-ruedas-de-tu-vehiculo/>

Power-MI. (s.f.). *Fundamentos del análisis de vibraciones*. Obtenido de <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>

Rivera Campoverde, N. D., & Chica Segovia, J. F. (2015). *Estudio del Comportamiento de Motor Ciclo Otto de Inyección Electrónica Respecto a la Estequiometría de la Mezcla y del Adelanto al Encendido para la Ciudad de Cuenca*. Cuenca: Escuela Politécnica Nacional.

Santana, A. (20 de Marzo de 2020). *Ecured*. Obtenido de [www.ecured.cu/Azufre](http://www.ecured.cu/Azufre)

*tallerxxi*. (28 de abril de 2017). Obtenido de [www.tallerxxi.com/actualidad/otras-vidas-de-los-neumaticos-usados](http://www.tallerxxi.com/actualidad/otras-vidas-de-los-neumaticos-usados)

Urrego Yepes, W., Velásquez Restrepo, S. M., Giraldo Vásquez, D. H., & Posada Correa, J. C. (2017). Revisión-Efecto del Sistema de Vulcanización en la Red entrecruzada y en la Reacción Química de Vulcanización del Caucho Natural . *Revista EIA* 16.

White, G. (2009). *Introducción al análisis de vibraciones*. Massachusetts: AZIMA DLI.

## 12 Anexos.

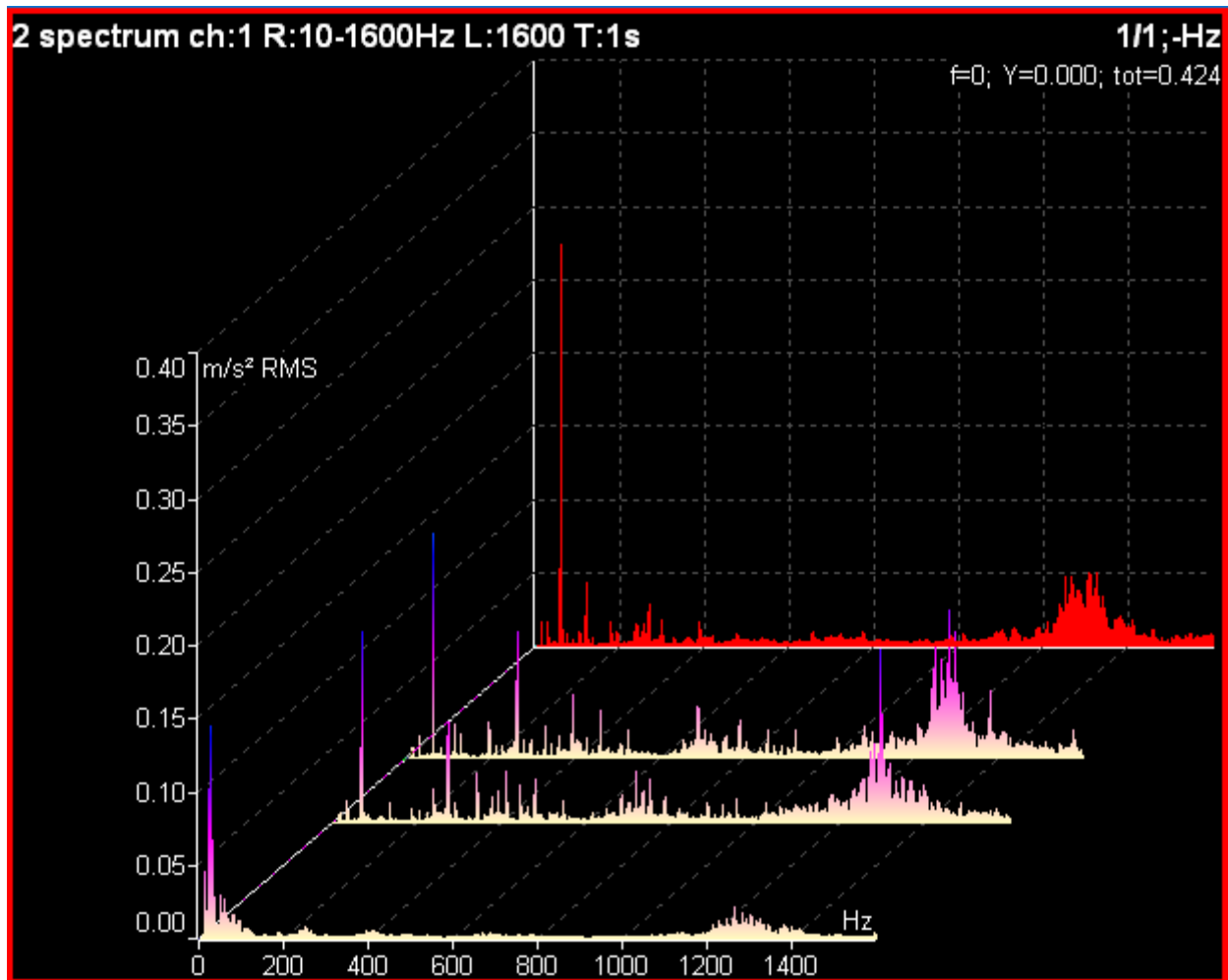
- **Equipo de Pruebas.**

En la figura se presenta el motor (Avante) Modelo No. G-111701 donde se realizaron las diferentes pruebas de la base original y de ensayo.



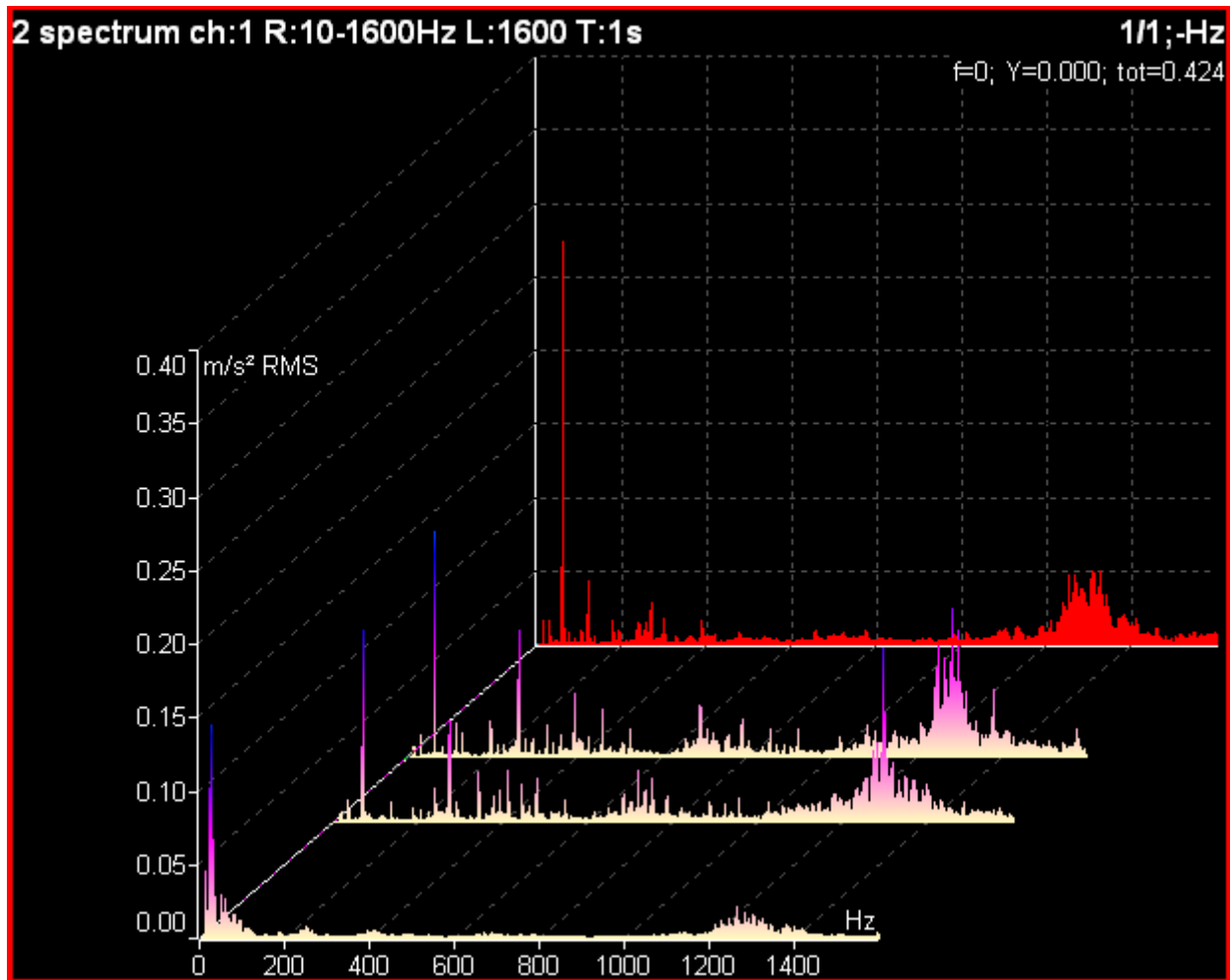
- **Espectrograma de la Base Motor Original 1 (IZQUIERDA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición CONFIDENCIAL.



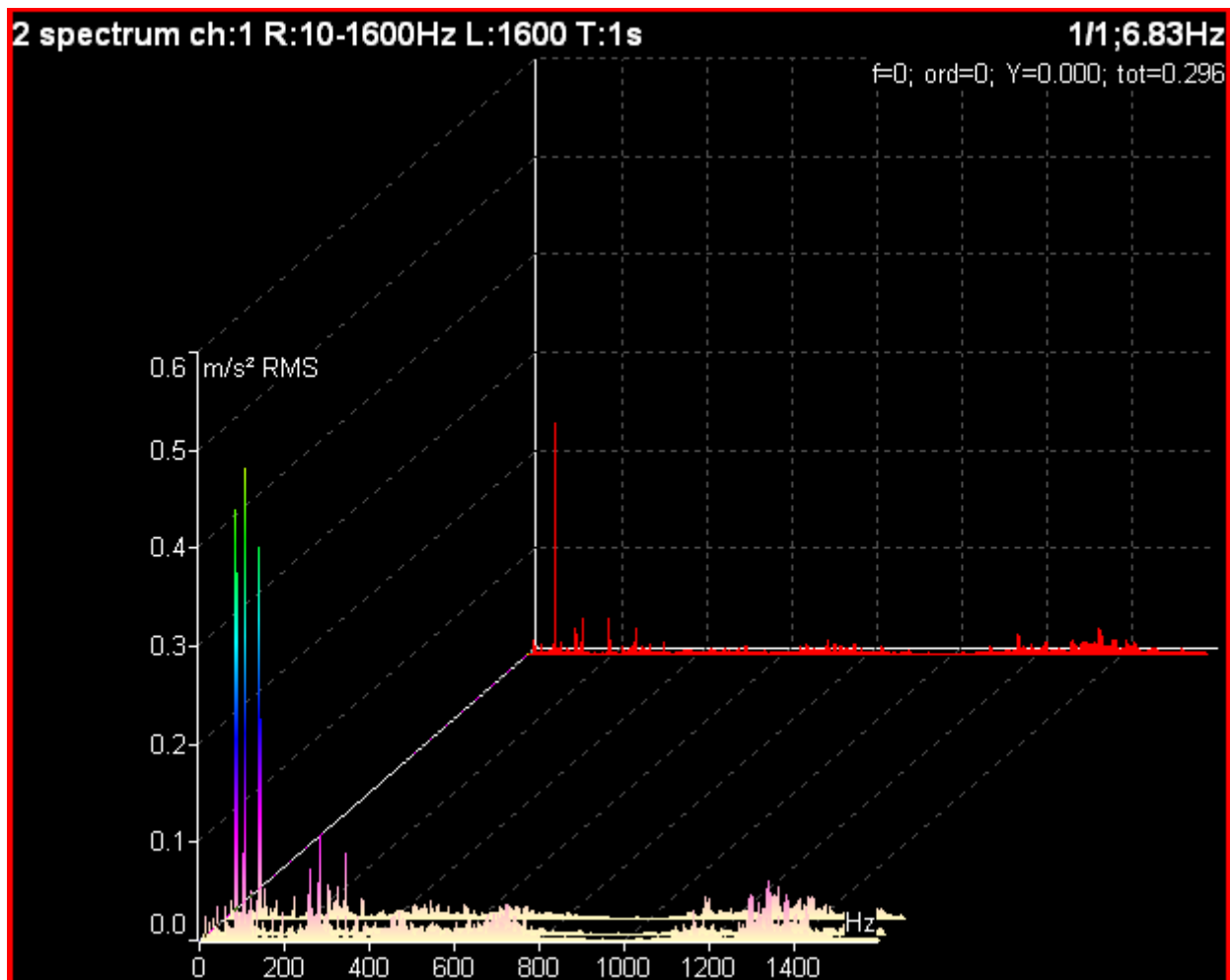
- **Espectrograma de la Base Motor Original 1 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición CONFIDENCIAL.



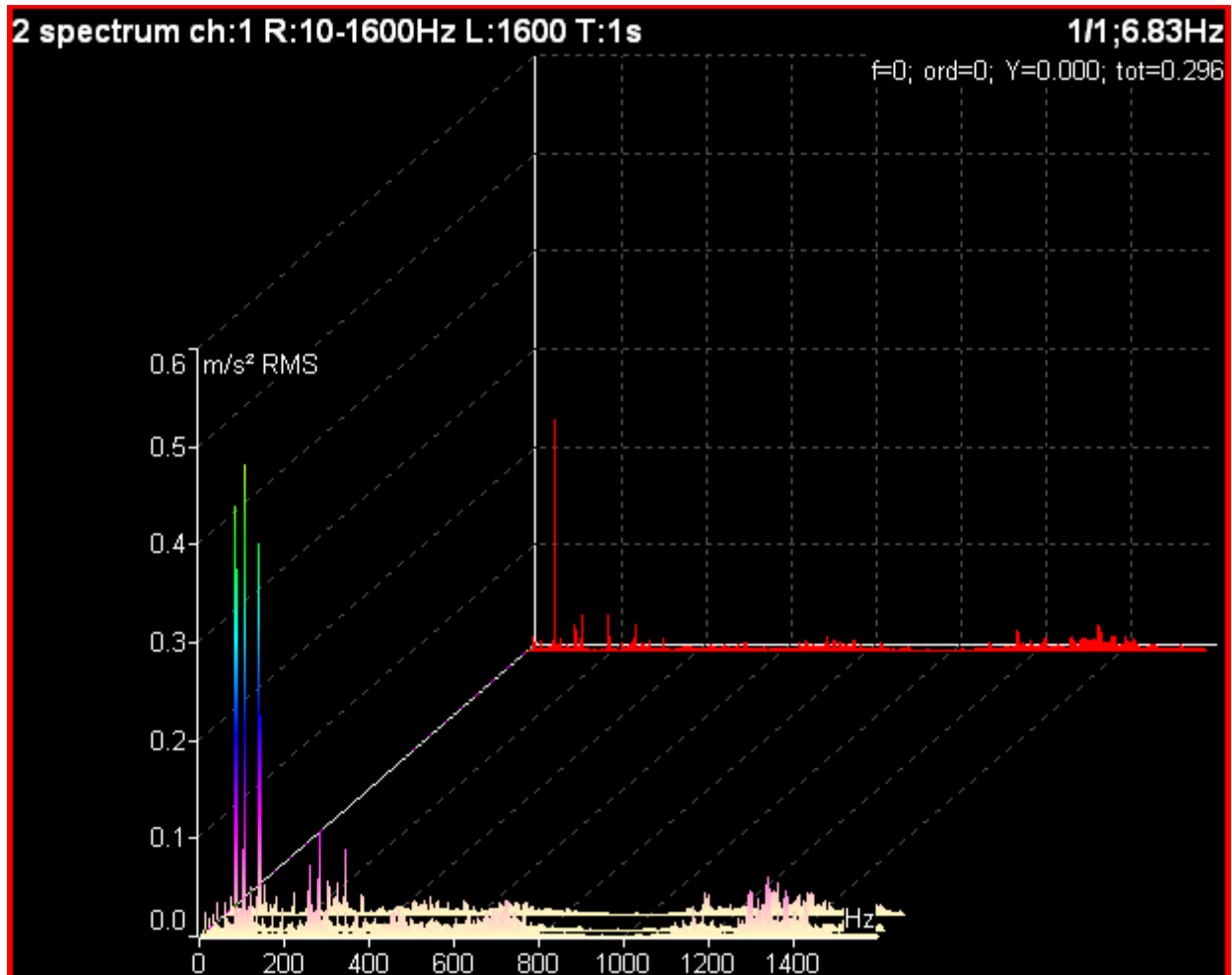
- **Espectrograma de la Base Motor Original 2 (IZQUIERDA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición CONFIDENCIAL.



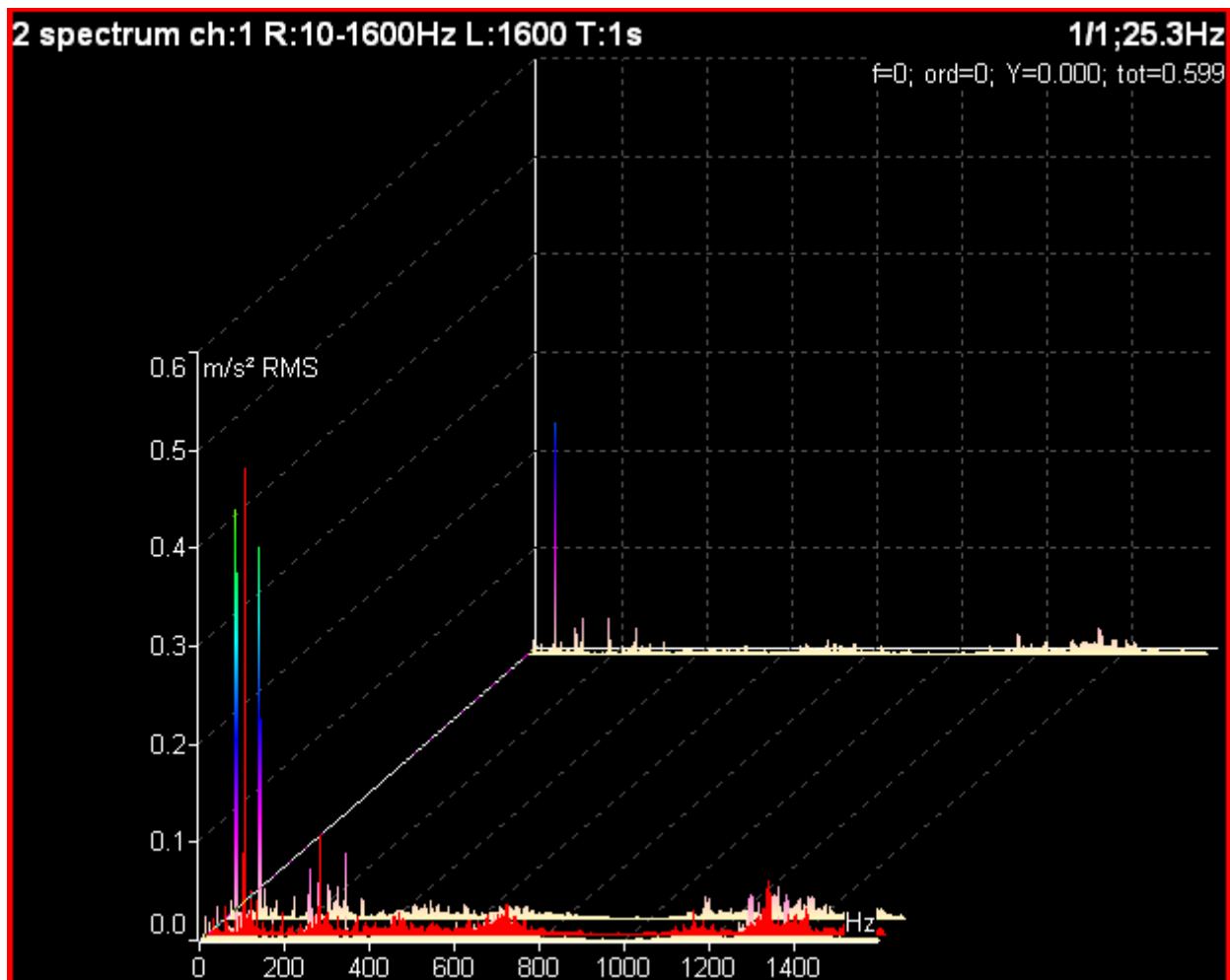
- **Espectrograma de la Base Motor Original 2 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición CONFIDENCIAL.



- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 1 (IZQUIERDA).**

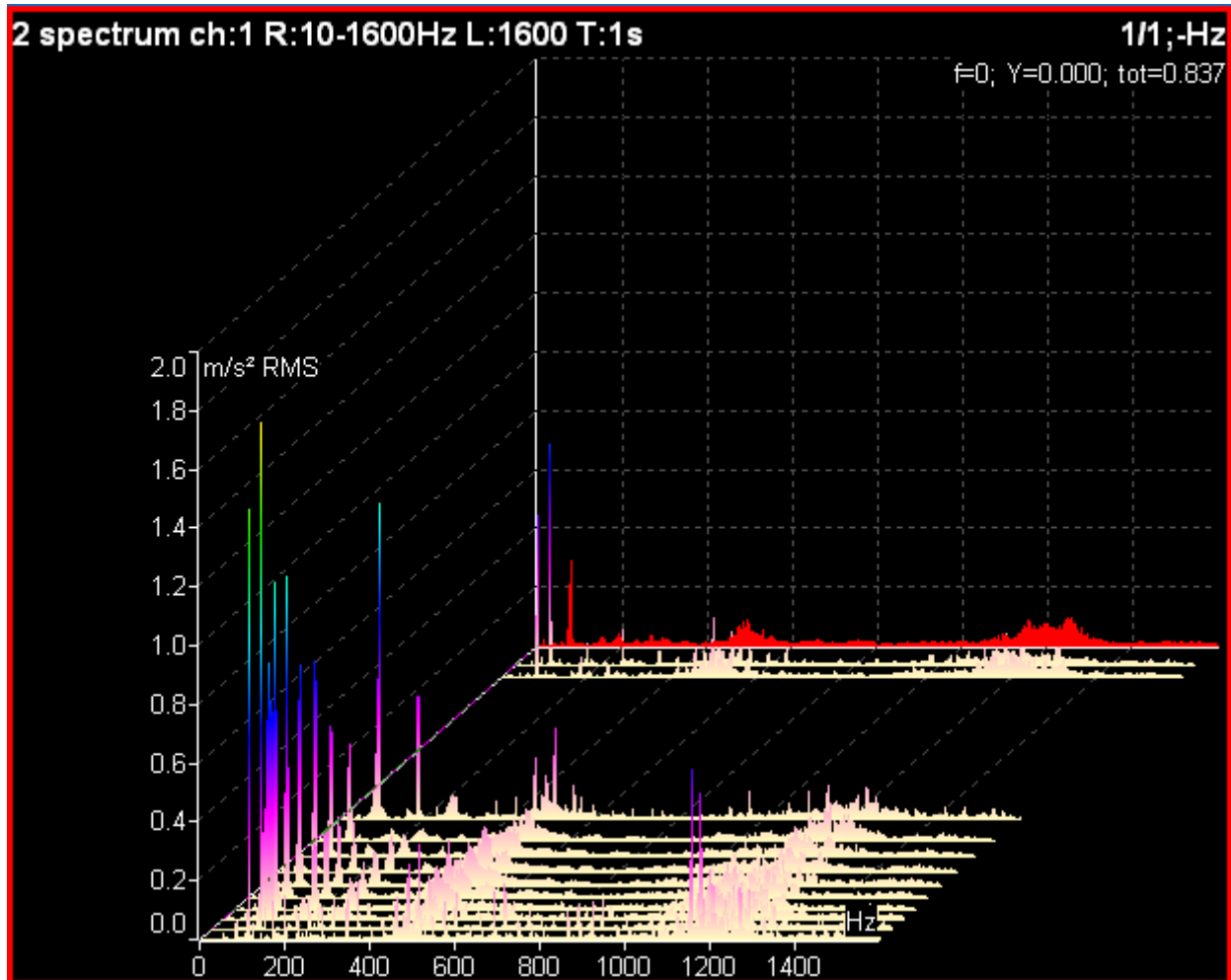
En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 100% Material Reciclado y 0% de Azufre.





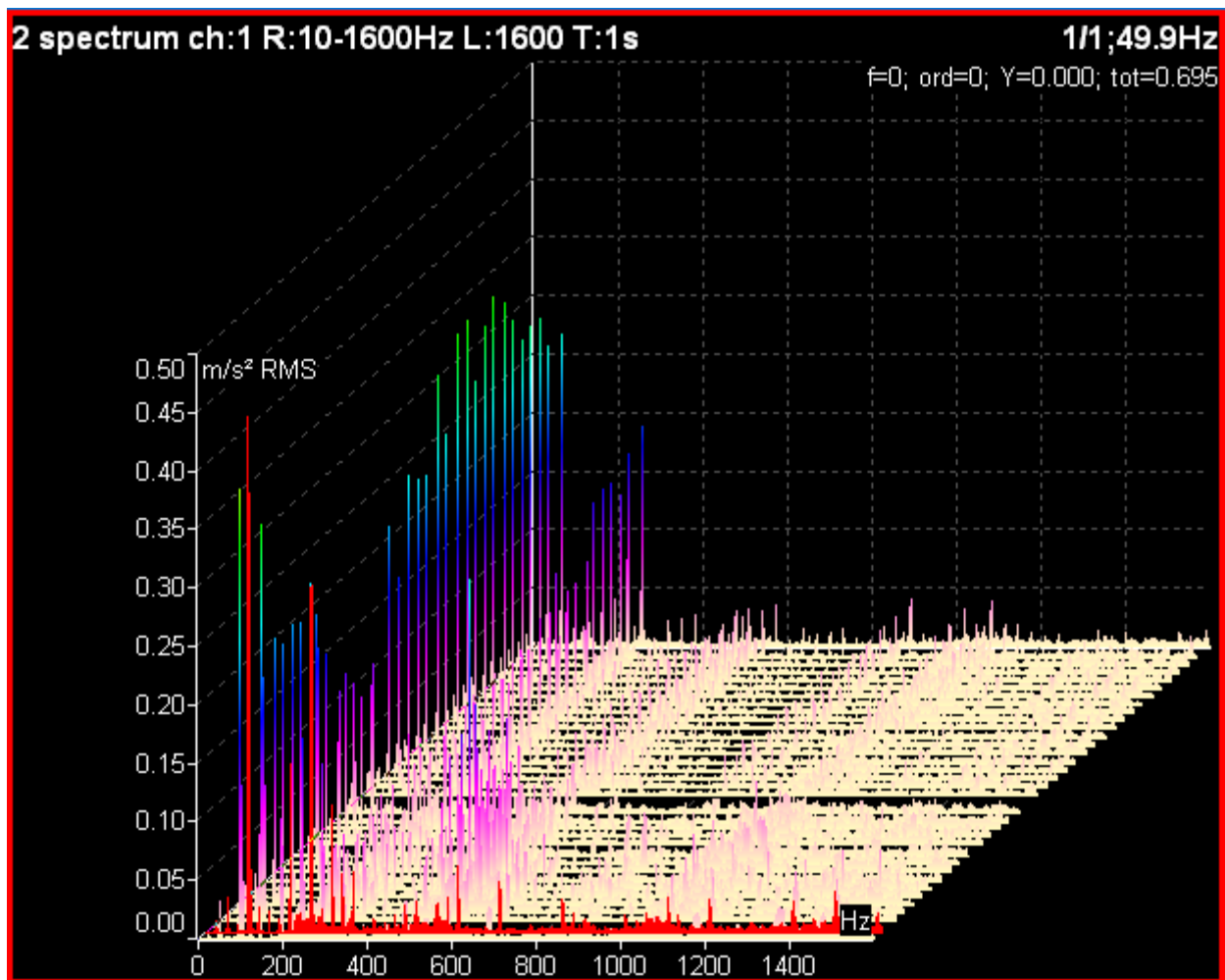
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 1 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 100% Material Reciclado y 0% de Azufre.



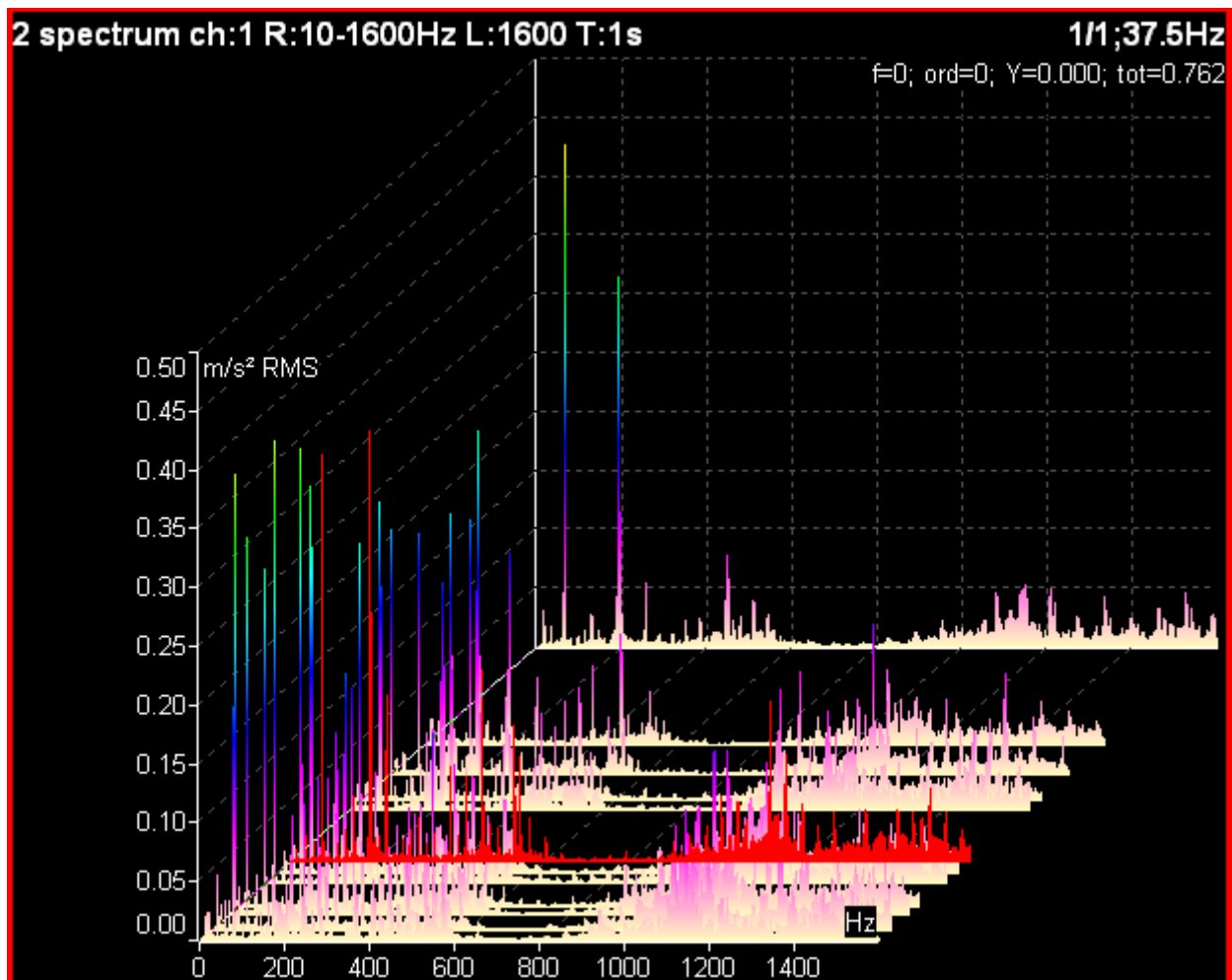
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 2 (IZQUIERDA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 99.5% Material Reciclado y 0.5% de Azufre.



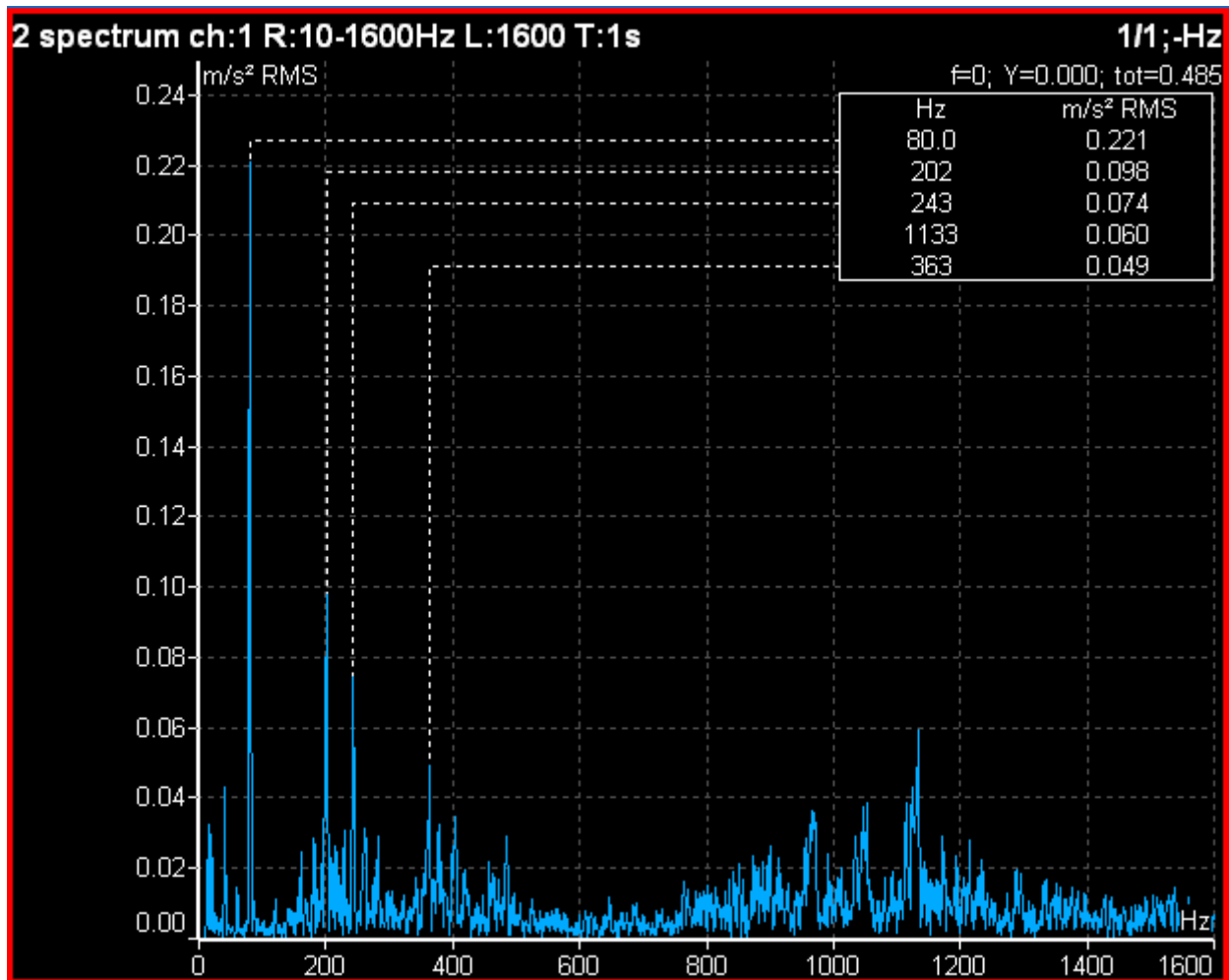
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 2 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 99.5% Material Reciclado y 0.5% de Azufre.



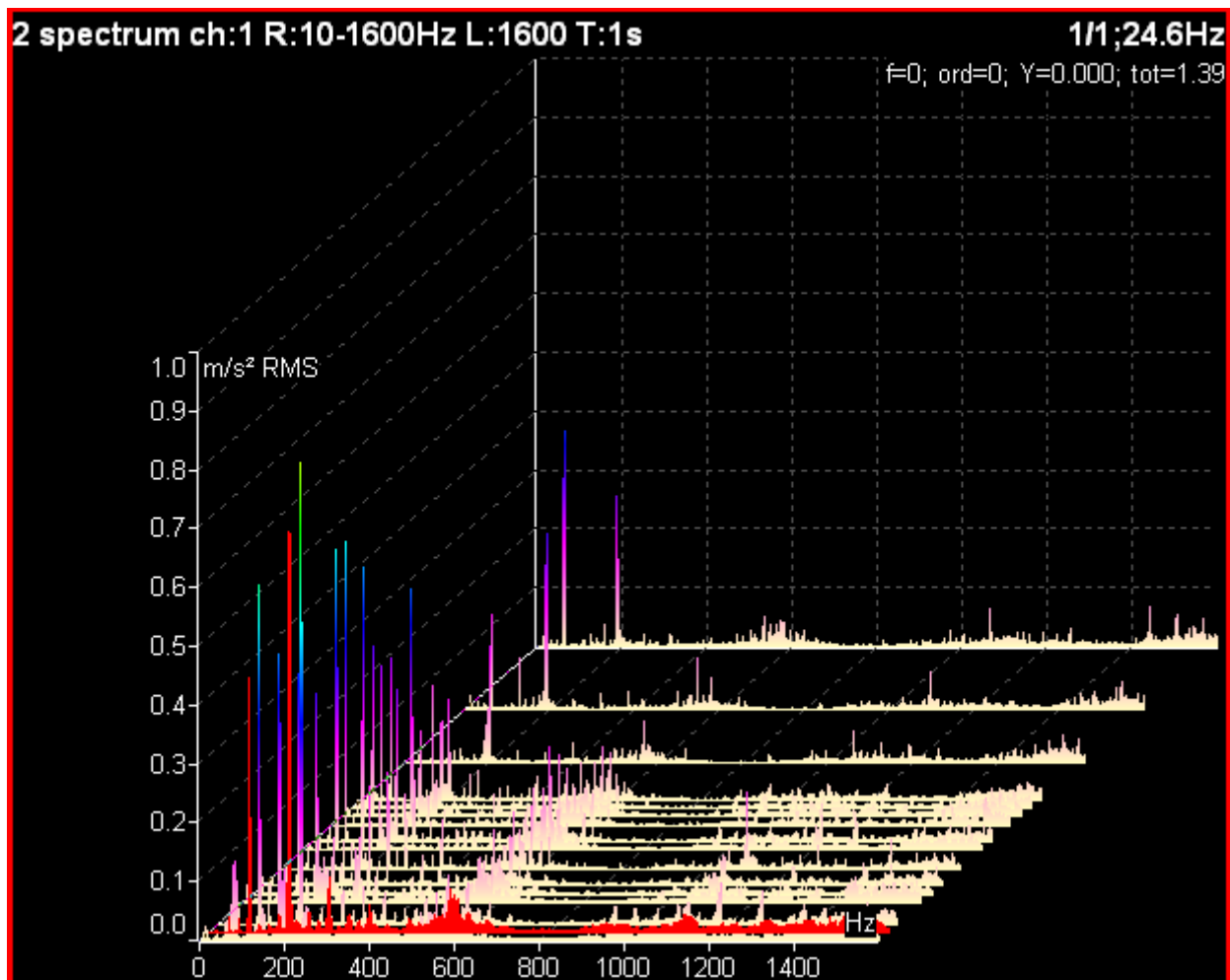
### 13 Espectrograma de la Base Motor Ensayo 3 (IZQUIERDA).

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 98% Material Reciclado y 2% de Azufre.



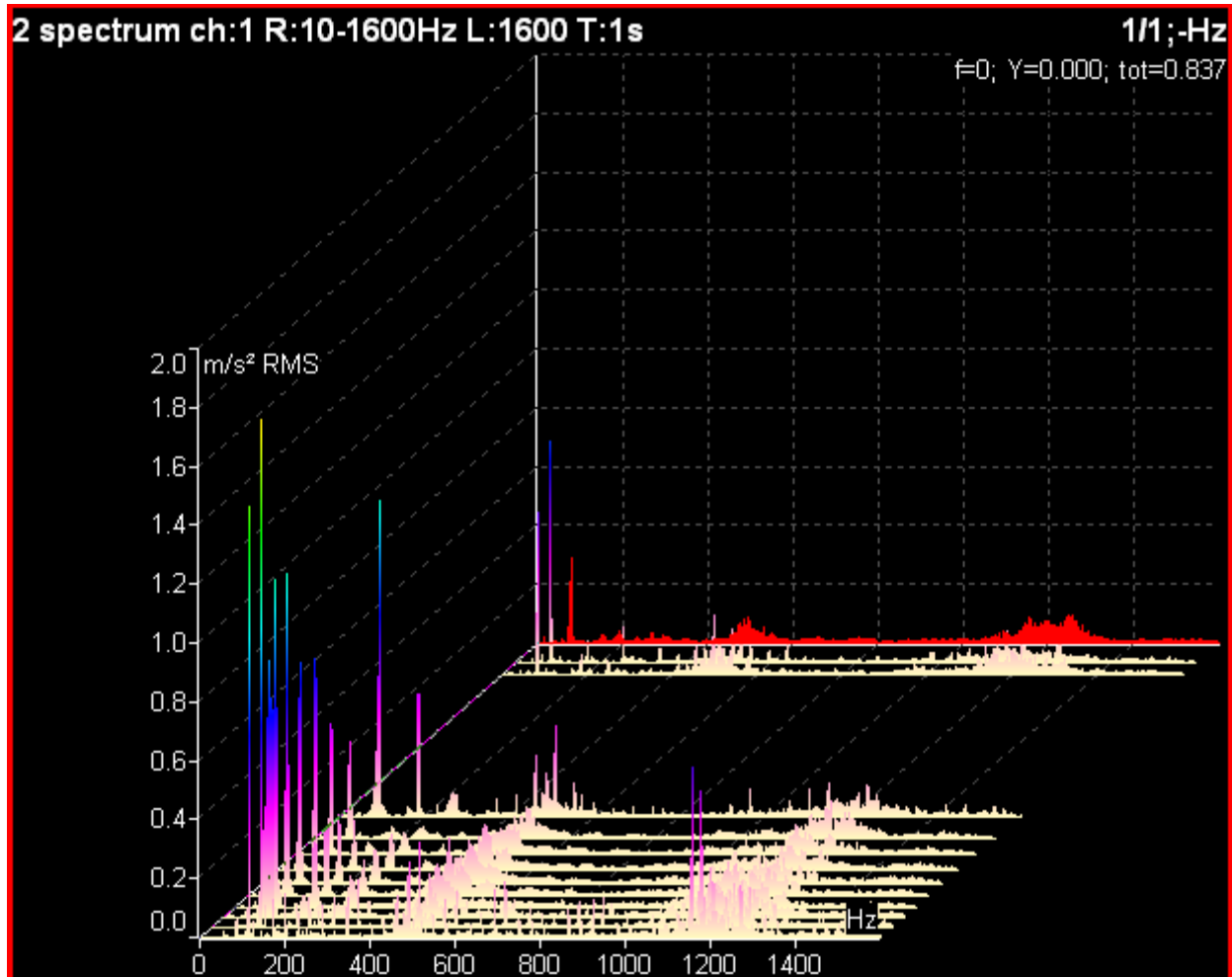
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 3 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 98% Material Reciclado y 2% de Azufre.



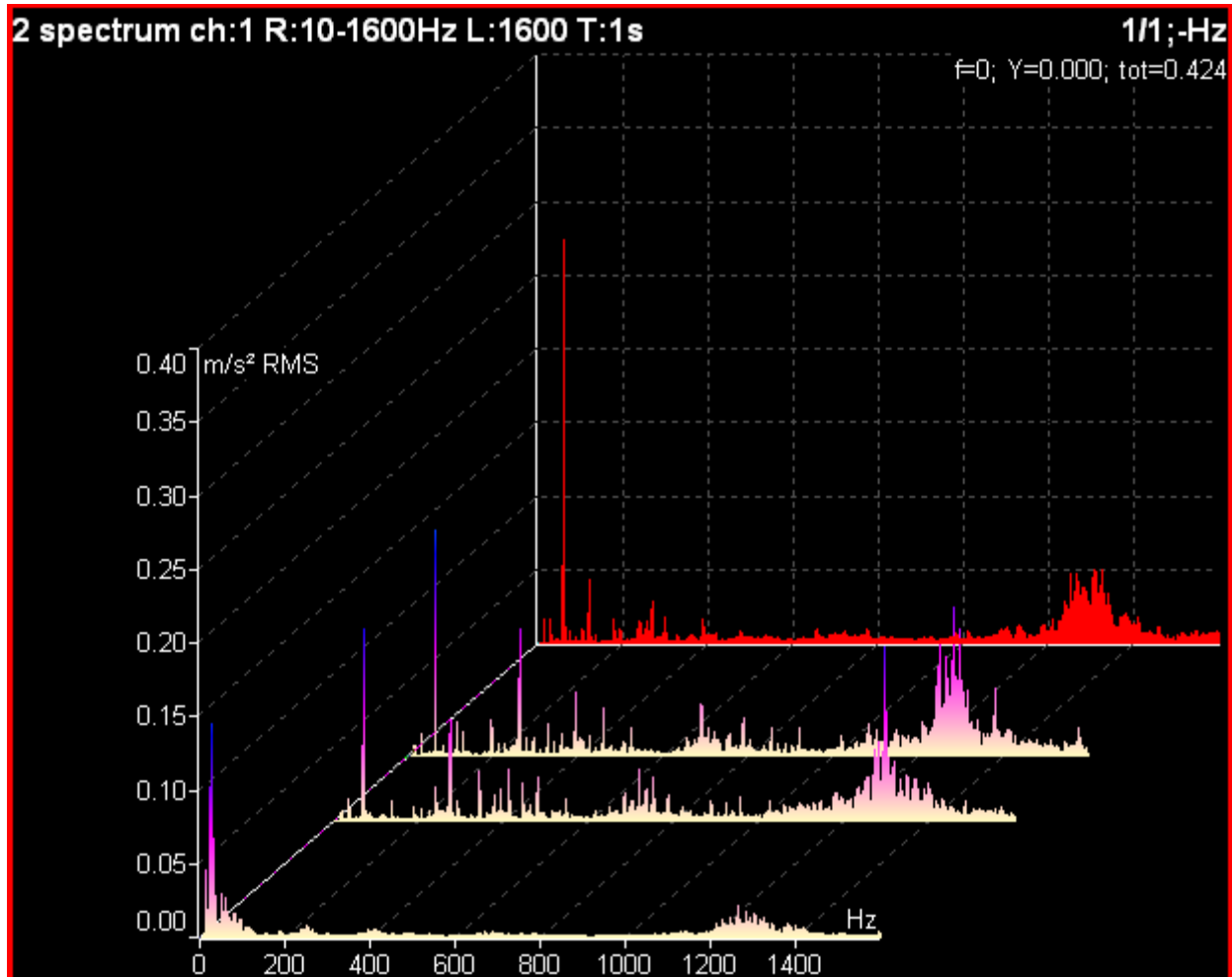
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 4 (IZQUIERDA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 96.5% Material Reciclado y 3.5% de Azufre.



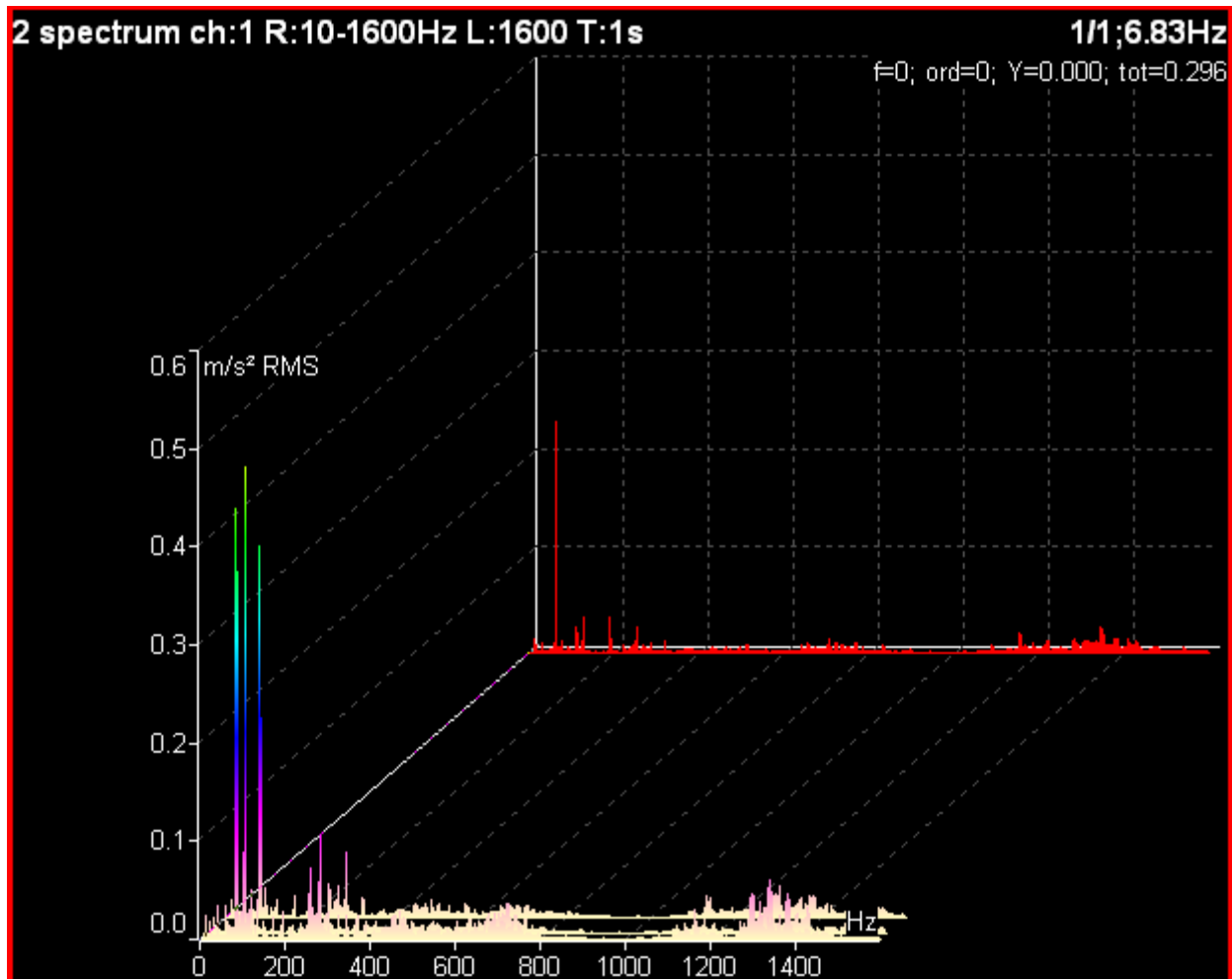
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 4 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 96.5% Material Reciclado y 3.5% de Azufre.



- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 5 (IZQUIERDA).**

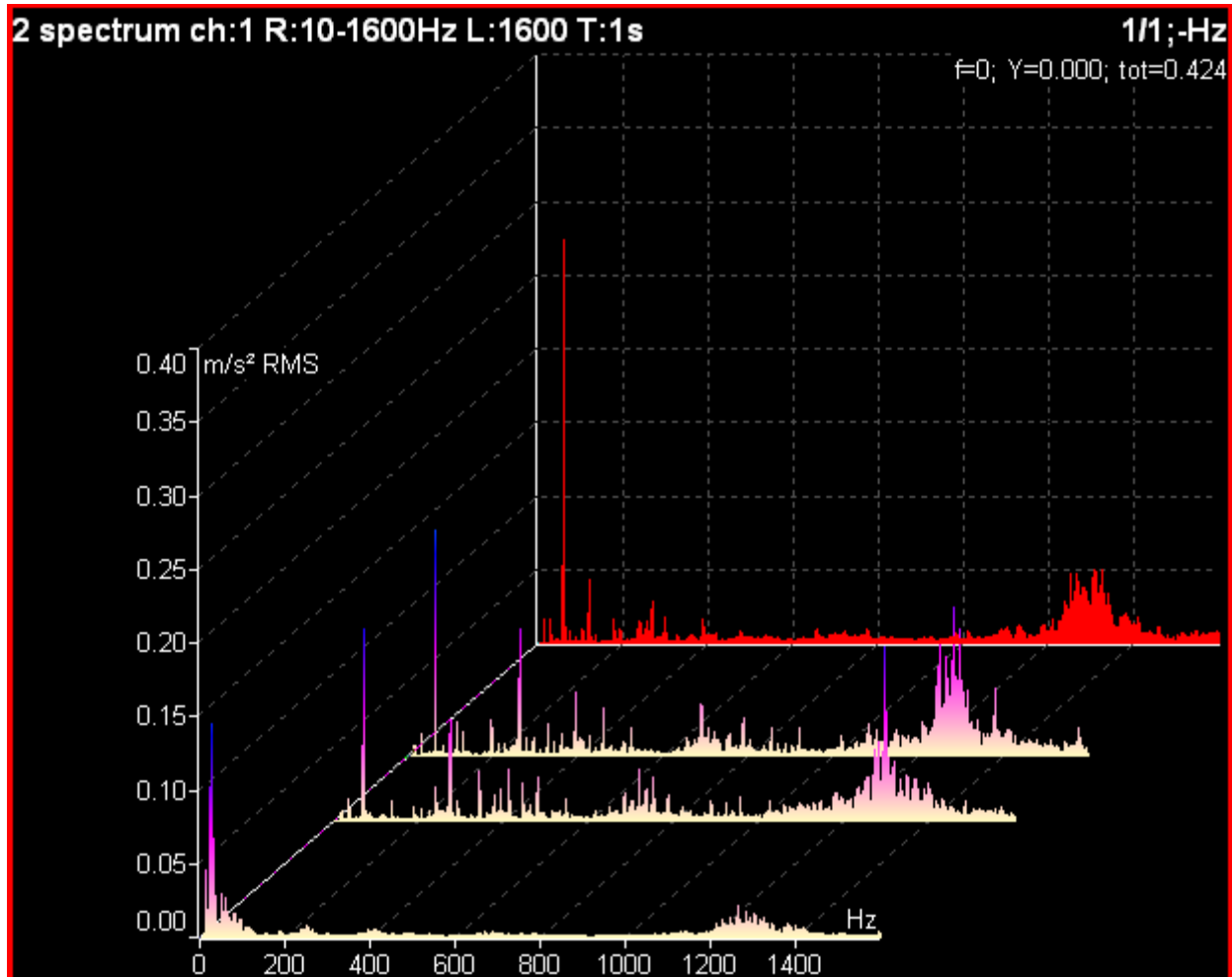
En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 95% Material Reciclado y 5% de Azufre.





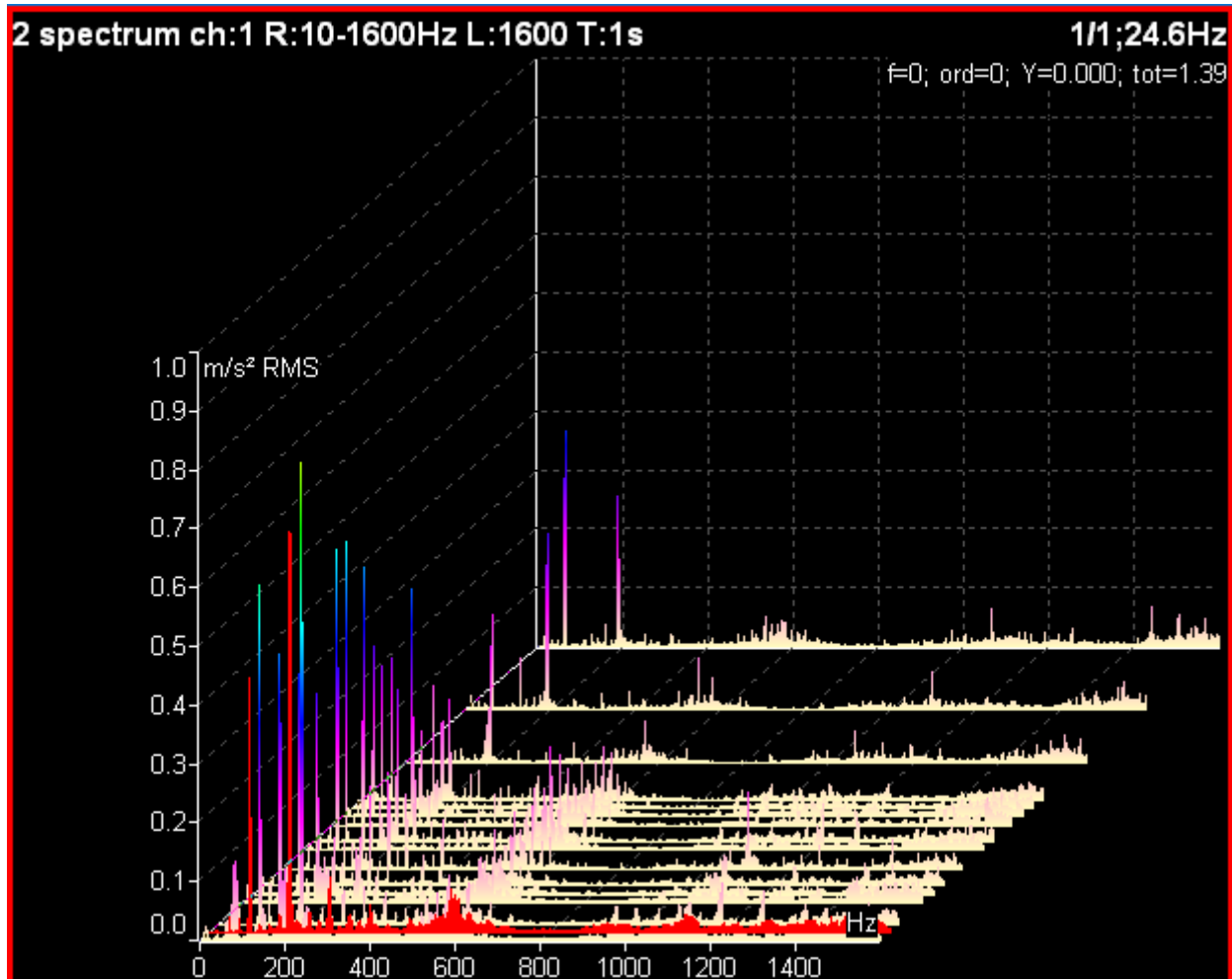
- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 5 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 95% Material Reciclado y 5% de Azufre.



- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 6 (IZQUIERDA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 93.5% Material Reciclado y 6.5% de Azufre.



- **Espectrograma de la Base Motor Ensayo 6 (DERECHA).**

En la figura se presentan los diferentes resultados de la base original del motor con composición de 93.5% Material Reciclado y 6.5% de Azufre.

