

TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO

2. TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO PRODUCIDO POR LA INTERFAZ NEUMÁTICO/PAVIMENTO EN UN VEHÍCULO ELÉCTRICO, EMPLEANDO EL MÉTODO DE CAPTURA CLOSE PROXIMITY

3. AUTORES: Carlos Alberto Bernal Murillo, Germinton Lozano Salazar.

4. LUGAR: Bogotá, D.C

5. FECHA: Julio de 2021

6. PALABRAS CLAVE: Sonido, Ruido, Ruido de Tráfico Rodado, Interfaz Neumático/Pavimento, Vehículo de Combustión, Vehículo Electrico, Banda de 1/3 de Octava,

7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: El objetivo principal de este proyecto es la implementacion de una estructura que permita soportar minimo 3 microfonos, para la captura de audio por medio del metodo CPX ,del ruido generado por la interfaz neumatico-pavimento,para poder caracterizar este ruido en vehiculos electricos cuando se desplazan a menos de 50 Km/h .

8. LÍNEAS DE INVESTIGACION: Línea de Investigacion de la USB: Acústica Sub línea de Facultad de Ingenieria: Ruido de trafico rodado. Campo Temático del Programa: Acústica ambiental.

9. METODOLOGÍA: Esta investigación, es de tipo cuantitativo, ya que se realizan mediciones del nivel de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento, de un vehículo de motor eléctrico, en una vía seleccionada en la ciudad de Bogotá. Para luego hacer la determinación de cuanto es el nivel depresión sonora generado por esta interfaz y en este tipo de vehículos; cabe aclarar que se hace un análisis de datos por medio de la estadística aritmética y energética, para así poder entregar un valor cuantitativo y una hipótesis de cual seria el comportamiento de este tipo de ruido en velocidades entre los 5 km/h y los 60 km/h.

10. CONCLUSIONES: Se mide el nivel de presion sonora que genera la Interfaz neumapitco-pavimento en un vehiculo electrico obteniendo mediciones validas con niveles minimos de 10 dB por encima del ruido de fondo, obteniedo de esta manera 3 ecuaciones cuadraticas(una para cada canal utilizado en la medicion), que permiten predecir el nivel de presion sonora que genera la interfaz neumatico pavimento para cualquier velocidad entre los 0 Km/h y los 60 Km/h

Caracterización del ruido producido por la interfaz neumático/pavimento en un vehículo eléctrico, empleando el método de captura close proximity.

Carlos Alberto Bernal Murillo

Germinton Lozano Salazar

Trabajo de Grado presentado para optar al título de Ingeniero de Sonido

Asesor: Luis Jorge Herrera Fernández, Magíster (MSc), Oscar Esneider Acosta Agudelo, Doctor (PhD) en Ejemplo Gerencia de la Innovación.



UNIVERSIDAD DE
SAN BUENAVENTURA
COLOMBIA

Universidad de San Buenaventura

Facultad de Ingeniería (Bogotá)

Ingeniería de Sonido

Bogotá D.C., Colombia

2021

Citar/How to cite	Bernal Murillo, Lozano Salazar <i>et al.</i> [1]
Referencia/Reference	[1] C. Bernal Murillo, G. Lozano Salazar <i>et al.</i> , “Caracterización del ruido producido por la interfaz neumático/pavimento en un vehículo eléctrico, empleando el método de captura close proximity”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Bogotá (Cundinamarca), 2021.
Estilo/Style: IEEE (2020)	



Línea de investigación acústica y vibraciones (Bogotá)



Biblioteca Digital (Repositorio)
www.bibliotecadigital.usb.edu.co

Bibliotecas Universidad de San Buenaventura

Biblioteca Fray Alberto Montealegre O.F.M. - Bogotá.
 Biblioteca Fray Arturo Calle Restrepo O.F.M. - Medellín, Bello, Armenia, Ibagué.
 Departamento de Biblioteca - Cali.
 Biblioteca Central Fray Antonio de Marchena – Cartagena.

Universidad de San Buenaventura Colombia - www.usb.edu.co

Bogotá - www.usbbog.edu.co
 Medellín - www.usbmed.edu.co
 Cali - www.usbcali.edu.co
 Cartagena - www.usbctg.edu.co
 Editorial Bonaventuriana - www.editorialbonaventuriana.usb.edu.co
 Revistas científicas – www.revistas.usb.edu.co

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de San Buenaventura por la oportunidad que nos brindó para culminar el pregrado, a nuestros profesores, a quienes debemos la formación tanto académica, como de personas profesionales, en algunos casos siendo modelo a seguir para muchos de nuestros compañeros, queremos hacer una mención especial para el profesor Luis Jorge Herrera ya que sin su colaboración no hubiese sido posible realizar la medición, ya que él nos hizo el préstamo de sus equipos personales para llevar a cabo la medición del proyecto y además fue nuestro primer tutor y quien tuvo la amabilidad de aceptar trabajar con nosotros , también a nuestro tutor Oscar Acosta por ayudarnos a darle la forma final al proyecto y acompañarnos para poder culminar con éxito este documento.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
I. INTRODUCCIÓN	12
II. GENERALIDADES	15
Antecedentes	15
Justificación.....	27
Pregunta de investigación.....	28
Objetivos	28
Objetivo General.....	28
Objetivos Específicos.....	28
Alcances y limitaciones.....	29
Alcances	29
Limitaciones.....	29
III. MARCO DE REFERENCIA	30
Marco Teórico	30
Marco Conceptual	33
Marco Normativo	37
IV. DISEÑO METODOLÓGICO.....	38
Metodología	38
V. DESARROLLO INGENIERIL	44
Diseño y construcción de la estructura.....	44
Procedimiento previo a la medición.....	49
Procedimiento desarrollado para la medición	51
Selección de muestras de audio y video	52

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS	65
Calibración	65
Ruido de fondo	66
Análisis de tramos por frecuencia	69
Análisis estadístico de las líneas de tendencia en el comportamiento del ruido	77
VII. CONCLUSIONES	82
VIII. RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS	85
ANEXOS.....	88

LISTA DE TABLAS

TABLA I RES

Tabla 0. Comparación de los diez primeros modos de vibración, de los dos posibles materiales para la construcción de la estructura.	46
Tabla 1. Velocidades promedio de desplazamiento, por cada uno de los 5 tramos.	55
Tabla 2. Indicadores de Calibración.	66
Tabla 3. Niveles de presión sonora máximos y mínimos ruido de fondo.	69
Tabla 4. Niveles equivalentes lineales y ponderados.	69
Tabla 5. Sumatoria energética en los rangos y verificación del nivel respecto al ruido de fondo.	72
Tabla 6. Líneas de tendencia, aproximadas en la gráfica nivel de presión sonora vs velocidad....	78
ULTADOS DEL TEST	¡Error! Marcador no definido.
TABLA II CATEGORÍAS DE INVESTIGACIÓN	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Imagen corporativa

Figura 1. Comportamiento del ruido en las diferentes fuentes de ruido para un vehículo de combustión en función de la velocidad (Sandberg, 2001).	25
Figura 2. Posicionamiento de micrófono para la captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento (ISO, 2016).	40
Figura 3. Vehículo inicial de prueba (Bezpridel, 2014).	44
Figura 4. Diseño inicial de la estructura (Propia, 2020).	45
Figura 5. Medidas iniciales de la estructura (Propia, 2020).	46
Figura 6. Estructura implementada (Propia, 2020).	47
Figura 7. Vehículo inicial de prueba con la estructura implementada (Propia, 2020).	47
Figura 8. Vehículos iniciales de prueba para la estructura de prueba.	48
Figura 9. Vehículo de prueba con la estructura implementada.	49
Figura 10. Mapa de la ubicación de la medición.	50
Figura 11. Tramo total en la ubicación a desarrollar la medición.	50
Figura 12. Tramo escogido para la medición.	51
Figura 13. Medición de la temperatura, en el tramo vial de medición.	52
Figura 14. Sincronización de audio y video en Reaper.	53
Figura 15. Frames del tramo 4, para la velocidad de 60 km/h.	54
Figura 16. Calibración en REW para el canal 1.	56
Figura 17. Calibración en REW para el canal 2.	57
Figura 18. Calibración en REW para el canal 3.	58
Figura 19. Ruido de fondo canal 1.	59
Figura 20. Ruido de fondo canal 2.	60
Figura 21. Ruido de fondo canal 2.	60

Figura 22. Muestras de audio en Audacity.....	61
Figura 23. Muestra 4 a 5 km/h del espectrograma.	62
Figura 24. Análisis espectral de las muestras libres de eventos sonoros.	62
Figura 25. Muestras de audio en diferentes tramos capturados y a diferentes velocidades obtenidas en el rango de frecuencia de análisis, libres de eventos no deseados, para cada uno de los tres canales.	64
Figura 26. Factor de calibración en el software dBFA-Suite para el micrófono 1.	65
Figura 27. Configuración del post procesamiento de las muestras de audio.	66
Figura 28. Configuración, para obtener el nivel equivalente requerido.....	67
Figura 29. Niveles equivalentes de Ruido de fondo en función de la frecuencia, canales 1, 2 y 3 lineal y ponderado.	68
Figura 30. Niveles de presión sonora por velocidades en el canal 1.....	70
Figura 31 Niveles de presión sonora por banda ponderada A para Canal 1.	71
Figura 32. Niveles de presión sonora en las bandas analizadas y todas las velocidades.	75
Figura 33 Graficas canal 1, 2 y 3 del promedio energético de las 5 muestras por velocidad.	77
Figura 34. Graficas de nivel de presión sonora vs velocidad.....	79

Institute of E

Figura 1. Comportamiento del ruido en las diferentes fuentes de ruido para un vehículo de combustión en función de la velocidad (Sandberg, 2001).	27
Figura 2. Posicionamiento de micrófono para la captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento (ISO, 2016).	42
Figura 3. Vehículo inicial de prueba (Bezpridel, 2014).	46
Figura 4. Diseño inicial de la estructura (Propia, 2020).	47
Figura 5. Medidas iniciales de la estructura (Propia, 2020).	48
Figura 6. Estructura implementada (Propia, 2020).	49
Figura 7. Vehículo inicial de prueba con la estructura implementada (Propia, 2020).	49
Figura 8. Vehículos iniciales de prueba para la estructura de prueba.	50

Figura 9. Vehículo de prueba con la estructura implementada.	51
Figura 10. Mapa de la ubicación de la medición.....	52
Figura 11. Tramo total en la ubicación a desarrollar la medición.	52
Figura 12. Tramo escogido para la medición.	53
Figura 13. Medición de la temperatura, en el tramo vial de medición.....	54
Figura 14. Sincronización de audio y video en Reaper.....	55
Figura 15. Frames del tramo 4, para la velocidad de 60 km/h.	56
Figura 16. Calibración en REW para el canal 1.	58
Figura 17. Calibración en REW para el canal 2.	59
Figura 18. Calibración en REW para el canal 3.	60
Figura 19. Ruido de fondo canal 1.	61
Figura 20. Ruido de fondo canal 2.	62
Figura 21. Ruido de fondo canal 2.	62
Figura 22. Muestras de audio en Audacity.....	63
Figura 23. Muestra 4 a 5 km/h del espectrograma.	64
Figura 24. Análisis espectral de las muestras libres de eventos sonoros.	64
Figura 25. Muestras de audio en diferentes tramos capturados y a diferentes velocidades obtenidas en el rango de frecuencia de análisis, libres de eventos no deseados, para cada uno de los tres canales.	66
Figura 26. Factor de calibración en el software dBFA-Suite para el micrófono 1.	67
Figura 27. Configuración del post procesamiento de las muestras de audio.	68
Figura 28. Configuración, para obtener el nivel equivalente requerido.....	69
Figura 29. Niveles equivalentes de Ruido de fondo en función de la frecuencia, canales 1, 2 y 3 lineal y ponderado.	70
Figura 30. Niveles de presión sonora por velocidades en el canal 1.....	72
Figura 31 Niveles de presión sonora por banda ponderada A para Canal 1.	73
Figura 32. Niveles de presión sonora en las bandas analizadas y todas las velocidades.	77

Figura 33 Graficas canal 1, 2 y 3 del promedio energético de las 5 muestras por velocidad.	79
Figura 34. Graficas de nivel de presión sonora vs velocidad.....	81
lectrical and Electronics Engineers (IEEE)	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 2. Logo Biblioteca Digital (Repositorio) Universidad de San Buenaventura.....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

Esta investigación se obtuvo, la relación que existe entre el nivel de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento y la velocidad a la que viaja el vehículo eléctrico. Vale la pena destacar que se llegó a una ecuación polinomial de segundo orden, que describe la relación entre la velocidad y el ruido generado en el rango contemplado entre los 5 km/h y 60 km/h, para vehículos eléctricos, teniendo en cuenta que se contó con la posibilidad de realizar la captura con tres posiciones diferentes de micrófono de forma simultánea, los cuales fueron posicionados en la rueda trasera del vehículo, soportados con una estructura lateral al vehículo. Adicionalmente, después de realizar el proceso de medición y análisis de datos, se obtiene principalmente la relación que existe entre el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento y la velocidad para vehículos eléctricos por medio de una ecuación cuadrática y también, se pudo confirmar que, para este caso particular de estudio, la mayor concentración de energía se encuentra entre las bandas de 315 Hz a 5.000 Hz tal como se recomienda en la ISO 11819-2.

Palabras clave — ruido generado interfaz neumático/pavimento, vehículos eléctricos, relación ruido y velocidad, close proximity.

ABSTRACT

In this research, the relationship between the noise level generated by the tire/pavement interface and the speed at which the electric vehicle travels was obtained. It is worth noting that a second order polynomial equation was obtained, which describes the relationship between the speed and the noise generated in the range contemplated between 5 km/h and 60 km/h, for electric vehicles, taking into account that it was possible to perform the capture with three different microphone positions simultaneously, which were positioned on the rear wheel of the vehicle, supported with a lateral structure to the vehicle. Additionally, after performing the measurement and data analysis process, the relationship between the noise generated by the tire/pavement interface and the speed for electric vehicles is obtained mainly by means of a quadratic equation and also, it could be confirmed that, for this particular case of study, the highest concentration of energy is between the bands of 315 Hz to 5,000 Hz as recommended in ISO 11819-2.

Keywords — generated noise, tire/pavement interface, electric vehicles, noise/speed ratio, close proximity.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es una cuestión de vida o muerte es lo que dice Johnattan García Ruiz en una publicación realizada en el periódico del espectador el 16 de febrero del 2019, y a raíz de esto García Ruiz plantea esta pregunta, ¿cómo es que hemos permitido que Bogotá haya alcanzado los niveles de contaminación tan preocupantes que motivaron el decreto de alerta naranja ambiental en la ciudad? García Ruiz se basa en el dato propuesto por La Organización Mundial de la Salud que estima que cada año más de cuatro millones de personas mueren prematuramente en el mundo debido a la exposición de aire contaminado en las ciudades. En nuestro país, cerca de 8.000 personas mueren por la exposición a la contaminación. Es, sin duda alguna, uno de los retos más importantes de la salud pública en Colombia. Unas de las soluciones que plantea el gobierno es innovar para tener combustibles más limpios y para incentivar el uso de vehículos más modernos y amigables con el medio ambiente (vehículos eléctricos) (Ruiz, 2019).

Para ver la importancia de aplicar soluciones a esta problemática de la contaminación del aire en el mundo y especialmente en Bogotá, se puede ver la presentación escrita por Redacción Medio Ambiente en el periódico el espectador el día 16 de agosto de 2019 , la cual lleva como título ‘Gobierno presenta la primera Estrategia Nacional de Calidad del Aire del país’, donde dicen que tras presentar el ‘Informe del Estado de la Calidad del Aire - 2018’, que reportó un cumplimiento de la norma en el 93,8% de las estaciones de monitoreo nacionales, el plan para seguir cumpliendo abarca desde vehículos eléctricos, mejores combustibles, hasta incentivos económicos (Ambiente, 2019).

Así que el uso de los vehículos eléctricos, en el mundo cada día ha tenido un incremento significativo, como lo podemos evidenciar para Colombia y en especial para Bogotá, una de las soluciones para la mejora del aire es el uso de este tipo de vehículos, dando como soporte la firma de la ley 1964 del 2019, en la que se indica que los propietarios de este tipo de vehículos tienen como beneficios la no restricción de tránsito por la ciudad en ningún horario, ya que los vehículos con motor de combustión tienen restricción de circulación (pico y placa), y los impuestos son menores en comparación a los de un vehículo de combustión principalmente.

El ruido por tráfico rodado es otro de los factores contaminantes que afectan a las personas en las ciudades. Sandberg en el libro Tire/Road Noise Reference Book de Sandberg identifica las diferentes fuentes de ruido junto con los principales mecanismos de generación del mismo,

identificando que por debajo de 50 Km/h la principal fuente es el tren de potencia, mientras que para velocidades entre 50 y 110 Km/h la fuente predominante es debido a la interacción entre el neumático y el pavimento, dependiendo de factores como el labrado del neumático, tipo de pavimento (rígido o flexible), entre otros. Mientras que para velocidades superiores a 110 Km/h la fuente generadora es la de carácter aerodinámico, debido al paso del vehículo a través de un medio fluido (aire).

Para vehículos eléctricos el cambio de motor tiene implicaciones como la reducción de ruido debido a la desaparición de los procesos de combustión, llegando a ser un ruido prácticamente imperceptible para las personas. Prueba de ellos es la regulación que hace la Unión Europea en cuanto al mínimo nivel de ruido que debe ser emitido por este tipo de vehículos para que no pasen desapercibidos y se eviten accidentes con peatones, así como en estados unidos donde la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) de los Estados Unidos, en 2014 legisla acerca de los vehículos de combustión y sus riesgos en la movilidad.

Por lo tanto, la importancia de la caracterización de la interfaz neumático/pavimento para los vehículos eléctricos será para verificar cual es el comportamiento de esta fuente en función de la velocidad, haciendo un análisis enfático en velocidades inferiores a los 50 Km/h, ya que por lo menos para la ciudad de Bogotá el límite de velocidad se encuentra entre los 50 Km/h en la mayoría de las vías.

La presente investigación está compuesta en dos pasos principales el primero es obtener las muestras de audio que son generadas por la interfaz neumático/pavimento, a velocidades inferiores a los 60 km/h, en una vía en la ciudad de Bogotá que tenga un bajo o incluso nulo flujo vehicular, y posteriormente el segundo paso es obtener y mostrar los resultados de los niveles de presión sonora emitidos en cada una de las velocidades medidas. Finalmente, se realizó una aproximación para determinar el comportamiento del ruido de la interfaz neumático pavimento en función de la velocidad por medio de una tendencia de los datos obtenidos.

Con esta investigación se obtuvo, la relación que existe entre el nivel de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento y la velocidad a la que viaja el vehículo eléctrico. Vale la pena destacar que se llegó a una ecuación polinomial de segundo orden, que describe la relación entre la velocidad y el ruido generado en el rango entre 5 km/h y 60 km/h, para este tipo de vehículos, teniendo en cuenta que se contó con la posibilidad de realizar la captura con tres posiciones diferentes de micrófono de forma simultánea. Adicionalmente, después de realizar el proceso de

medición y análisis de datos se pudo confirmar que, para este caso particular de estudio, la mayor concentración de energía se encuentra entre las bandas de 315 Hz a 5.000 Hz tal como se recomienda en la ISO 11819-2.

II. GENERALIDADES

Antecedentes

Se presentan los antecedentes, con mayor relevancia para el desarrollo del presente trabajo de investigación, teniendo en cuenta, que en algunos casos existen antecedentes publicados en años como el 2014 o anteriores, pero son de gran relevancia ya que hacen un aporte importante a la investigación llevada y no se han encontrado publicaciones más actuales que traten los temas tratados. Mas sin embargo antes de hacer la publicación de la investigación, se hizo una revisión nuevamente y se tienen publicaciones hasta el año 2019, quizá no se tienen publicaciones aun del año 2020 o 2021 por la situación de la pandemia que vive el mundo, con los temas relacionados en esta investigación.

An alternative drum test method to UNECE regulation 117 for measuring tire/road noise under laboratory controlled conditions.

Autores: D. Clar-García, E. Velasco-Sánchez, M. Sánchez-Lozano, H. Campello-Vicente

Año de publicación: 2019

Su principal enfoque de estudio ha sido desarrollar pruebas en pistas, teniendo como referencia los siguientes métodos, el *Coast-By*, el *Close-Proximity*, el *Statistical Pass-By* o el Métodos de paso controlado, estos son los métodos que se han usado con anterioridad. En Europa se determinó que el método *Coast-By (CB)*, es el encargado de determinar la homologación de los neumáticos. Pero existen ciertas limitaciones con los métodos nombrados anteriormente como lo es la falta de repeticiones de medición, los factores ambientales y la más importante es la magnitud. Por lo tanto, se implementa un nuevo método que se denomina como (Clar-García et al. 2016) el cual es basado en pruebas de tambor y en la normativa ISO 3744 (Normalización Española, 2011), este método es desarrollado para lograr satisfacer algunas de las falencias o limitaciones que tienen los métodos clásicos de medición. El reglamento de la Comisión Europea (Oficial et al., 2015), describe la metodología para medir el tire/road. se habla que en teoría los resultados entre un método o el otro de medición no deberían cambiar, pero no es cierto existen variaciones de más o menos 2 dB, esto ocurre por diferentes aspectos como la velocidad del viento, la porosidad del pavimento entre otros factores. Los métodos más clásicos de implementación son el *Coast-By*, el *Close-Proximity*, *Statistical Pass-By*, existe otro método que se basa en metodologías de tambor propuesto en la

norma ISO 3744 (Normalizacion Española, 2011). El método usado para la medición fue el que está descrito en el reglamento 117 que consiste en medir el nivel de ruido producido por los neumáticos que están montados en un vehículo en una pista de prueba, los micrófonos de medición se ubican a una distancia de 7,5 m en ambos lados de la pista y a 1,2 m por encima del suelo, el vehículo debe desplazarse a velocidades menores a la velocidad de referencia que es 80 km/h, el área en que se debe analizar debe ser de 50 m, el total de pruebas realizados por lado son 4. Los resultados demostraron que ambos métodos se pueden comparar, también tienen espectros de sonido similares y por eso, el nuevo método (A-DR) se puede utilizar como una metodología basada en ensayos con tambores para obtener la homologación del ruido de Tire/road. Posteriormente escribir cómo se han ensayado los diferentes tipos de neumáticos según el método CB y el nuevo método de prueba de tambor alternativo (A-DR). Con el fin de realizar una comparación entre los métodos, ya que las magnitudes medidas y las condiciones de ensayo son diferentes para los métodos, el método normalizado de propagación sonora ISO 9613 (ISO 9613-2, 1996) se ha aplicado para obtener el valor de la presión acústica a 7,5 m a partir del nivel de potencia acústica de un neumático medido con arreglo en condiciones controladas por el laboratorio, al rodar contra un tambor: Los resultados son obtenidos mediante una regresión lineal, resultados para la prueba de tambor. El mayor aporte energético de los neumáticos se encuentra entre los 500 Hz hasta los 6300 Hz. Finalmente, se concluyó que la diferencia entre el método CB o el método de tambor, arroja una diferencia de más o menos 2 dB A, todo ocurre por interferencia de fuentes no deseadas, para el caso práctico del método CB (Clar-Garcia et al., 2019).

Prediction of annoyance evaluations of electric vehicle noise by using artificial neural networks.

Autores: Lisa Steinbach, M. Ercan Altinsoy

Año de publicación: 2019

El objetivo principal que se desarrolla en el siguiente artículo fue determinar la molestia que genera cada uno de los sonidos generado por los vehículos eléctricos para velocidades constantes en los peatones. Para ello se implementó la metodología de los Estudios de percepción, la correlación entre los parámetros físicos y psico acústicos, y las estimaciones de molestias obtenidas. Es usado también una red neuronal artificial (RNA).

Dentro de este estudio se emplearon 90 sonidos diferentes de paso de vehículos eléctricos con una velocidad constante de 10 km/h, para este propósito un módulo fue programado previamente en PureData, los sujetos evaluaron un total de 90 estímulos siendo todos ellos sonidos sintéticos.

Los estímulos que usamos en este estudio son sonidos de vehículos básicos generales, que puede ser adaptado por el fabricante a los respectivos requisitos en el sentido de un diseño de marca además todos los sonidos diseñados son compatibles con la directriz UN ECE.

Esta directriz sugiere que al menos dos de los niveles de banda de un tercio de octava deben estar por encima del nivel mínimo definido y una de estas bandas debe ser inferior a 1,6 kHz. En el caso de todas las variantes, el nivel mínimo requerido se alcanza en al menos dos bandas de 1/3 de octava a demás en todos los casos también se alcanza un nivel mínimo global de 50 dB (A)., El objetivo principal de una herramienta de este tipo es ahorrar tiempo, dinero y recursos, por esa razón, las estimaciones de molestias de los sonidos sintéticos de los vehículos eléctricos se obtienen mediante pruebas subjetivas por un jurado.

Los 90 estímulos sintetizados se utilizan para las pruebas de escucha con 22 sujetos, todos los resultados obtenidos se dan en diagramas de caja Máximo A, niveles de presión sonora ponderados, volumen, aspereza, nitidez y los valores de tonalidad se calculan para cada estímulo y se calculan los parámetros estadísticos y valores medianos de molestia obtenidos de la escucha para las pruebas.

Para la segunda parte, 150 redes neuronales artificiales diferentes se utilizan para luego debe obtener la arquitectura de trabajo realizar la comparación de resultados. Es claro que, adaptar una red neuronal es una parte importante de un estudio utilizando ANN como herramienta de predicción, ya que incluye diferentes parámetros a considerar. Comparando los valores de MSE, se ajusta a los datos obtenidos al escuchar bastantes pruebas calificadas como buenas.

Esta investigación examinó la utilidad de ANN en el campo de la estimación de molestias de los sonidos sintéticos de vehículos.

Finalmente se llegó a los resultados que la sonoridad, nitidez y rugosidad fueron unos de los parámetros a evaluar, en cuanto al ruido que se genera dentro del vehículo. Y la conclusión final fue que la percepción y molestia generada no están directamente relacionados con los parámetros. Y esto podría explicar por qué la regresión lineal no tiene un valor tan alto relacionado con la molestia (Steinbach & Altinsoy, 2019).

Dynamic and acoustic behaviour of electric versus combustion vehicles

Autores: Isabela Mocanu - Claus Aichinger - Martin Czuka - Andreas Fuchs - Sara Gasparoni - Peter Saleh

Año de publicación: 2016

El objetivo principal fue, investigar las posibles diferencias entre los vehículos eléctricos y de combustión, que podrían revelar posibles riesgos para la seguridad vial. Evaluación de la dinámica y acústica de los vehículos, la metodología empleada se aplicó para cinco vehículos diferentes: 1. Renault Fluence Z.E. 2. Renault Megane Grandtour. 3. Renault Zoe. 4. Renault Captur. 5. Mitsubishi i-MiEV Fiat 500. De los cuales únicamente el Fiat 500 es el único que tiene caja de cambios manual y el único vehículo eléctrico fue el Renault Zoe. Las pruebas fueron realizadas en tres pistas cerradas, esto para garantizar las mismas condiciones de superficie para los diferentes vehículos y poder generar prácticas de conducción específicas.

Los resultados preliminares del análisis dentro del proyecto E-ENDORSE dan una primera indicación sobre las posibles diferencias entre los automóviles eléctricos y de combustión.

Con respecto a la dinámica del vehículo, el análisis hasta el momento no reveló los riesgos directos de seguridad vial de los vehículos eléctricos, en comparación con los de combustión.

Con respecto a las mediciones de la acústica interior y las emisiones acústicas exteriores, se observaron diferencias significativas.

En cuanto a la emisión al exterior, se está realizando una prueba de audición para investigar la detectabilidad acústica de los autos electrónicos. Los resultados respectivos se utilizarán en el curso de simulaciones de accidentes para evaluar el impacto del posible retraso en el reconocimiento de los autos electrónicos que se aproximan por parte de usuarios vulnerables de la carretera.

Para el descubrimiento de posibles impactos relacionados con la acústica interior, ya se realizó una prueba de campo llamada "velocímetro oculto" para investigar la influencia de los diferentes comentarios acústicos en la elección y percepción de la velocidad del conductor. Sin embargo, el primer análisis no reveló ningún efecto adverso relevante para la seguridad vial de los diferentes comentarios acústicos de los autos electrónicos sobre la capacidad del conductor para lograr y mantener una cierta velocidad de conducción (Mocanu et al., 2016).

Auralization model for the perceptual evaluation of tire-road noise

Autores: Jens Forssen, Alice Hoffmann, Wolfgang Kropp

Año de publicación: 2018

El primer enfoque modelo se refiere a la auralización del sonido de paso de los vehículos de carretera y se ha desarrollado en el proyecto nacional sueco LISTEN. En estelas señales de origen para la interacción motor y neumático-carretera, construidas de los datos registrados, se separan de los efectos de propagación. Esto da la posibilidad de modificar tanto las señales de origen como la propagación de sonido a un oyente. El segundo enfoque se refiere a la predicción de la tercera octava niveles de ruido de rodadura para diferentes combinaciones de neumáticos y carreteras. Este modelo se basa en el trabajo realizado dentro del proyecto Sperenberg y es conocido como el modelo SPERON. La combinación de ambos modelos permite simulación y la auralización de los sonidos de paso para neumáticos arbitrarios-carretera combinaciones, siempre y cuando se consideren superficies densas de la carretera. Como resultados importantes se llega a que muestran que el modelo final, ajustado teniendo en cuenta el ruido del viento, da un mejor y agradable resultado entre grabaciones y simulaciones que el pre estudio. Para concluir, el acuerdo muestra una validación exitosa de la Metodología. Ilustración del proceso de auralización; SPERON estima el espectro de ruido rodante de las propiedades básicas de los neumáticos y la carretera.

La fuente en términos de la auralización se compara con el espectro calibrado y ajustado a la nueva fuente; los factores de calibración estimados a partir de la comparación con grabaciones se aplican para cada banda de frecuencia; los efectos de propagación se añaden a la fuente término y se genera una señal de paso para tales condiciones deseadas como distancia, velocidad y alrededores. Las primeras pruebas de audición muestran resultados prometedores y se llega a las siguientes conclusiones.

Las señales generadas se compararon con las grabaciones, para un enfoque inicial y un enfoque más refinado para combinar los dos modelos. Para el modelo final, el resultado sonidos se perciben similares a las grabaciones en agradable. Una herramienta potencialmente poderosa para la auralización del ruido entre los neumáticos y las carreteras es proporcionar, sin embargo, se necesitan más pruebas de audición para una validación del método propuesto (Forssén et al., 2018).

An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a rolling tire

Autores: Nuria Campillo-Davó, Ramón Peral-Orts, Héctor Campello-Vicente, Emilio Velasco Sánchez

Año de publicación: 2018

El objetivo del proyecto fue presentar una nueva metodología basada en el método CPX que permite evaluar el nivel de potencia sonora del neumático rodante, introduciendo algunos cambios, la metodología se denomina A-CPX. Haciendo uso del método CPX se hace una modificación ligera de la metodología de captura, llamando el método A-CPX, el cual consiste en ubicar los micrófonos a diferentes distancias y posiciones alrededor del neumático, con el fin de evitar las reflexiones y facilitar la configuración de la instrumentación (micrófonos) ya que la hipótesis teórica, contempla el neumático como una fuente omnidireccional.

Se puede destacar que el nivel de intensidad a 40 km/h es de 84,9 dB estando 20 dB SPL por debajo de la intensidad medida a la velocidad de referencia (90 km/h). Por otro lado, la velocidad del vehículo es directamente proporcional a la frecuencia que se está generando en este tipo de ruido. Se concluye que este método brinda una magnitud alternativa que es el nivel de potencia acústica y no el nivel de presión acústicas, para caracterizar el ruido generado de tipo *tire/road*.

La viabilidad del método fue comprobada por medio de mediciones experimentales, analizando un rango de frecuencias entre 315 Hz a 4 kHz obteniendo así una relación logarítmica entre el nivel de potencia acústica y la velocidad del vehículo, esto puede variar para diferentes configuraciones de neumático (Campillo-Davo et al., 2019).

The effect of electric vehicles on urban noise maps

Autores: Héctor Campello-Vicente, Ramón Peral-Orts, Nuria Campillo-Davó, Emilio Velasco-Sánchez, Miguel Hernández.

Año de publicación: 17 de septiembre de 2016

En esta investigación se utilizaron procedimientos experimentales para añadir al modelo de predicción de ruido NMPB ROUTES del vehículo eléctrico como fuente de ruido potencial en el flujo de tráfico. Se analizaron varias condiciones y se evaluó el cambio en el número de ciudadanos expuestos a diversos rangos de niveles de ruido. El modelo de predicción ruido oficial francés, NMPB ROUTES fue utilizado para evaluar el ruido en función de las condiciones de flujo de tráfico el cual.

El modelo francés necesita diferentes insumos para desarrollar la simulación, los principales son:

- Flujo de vehículos ligeros por hora (peso <3.500 kg).
- Flujo de vehículos pesados por hora (peso > 3.500 kg).

– Velocidad de ambos tipos de vehículos.

Después de introducir los parámetros en el modelo, este proporciona el nivel de presión sonora (dB(A)/hora) a lo largo del área de simulación, teniendo en cuenta las reflexiones y el efecto de elementos como barreras, edificios o zonas verdes. Por otro lado, si los vehículos eléctricos utilizan sonidos de advertencia para mejorar la seguridad de los peatones. Finalmente, teniendo en cuenta los cambios de resultado en este caso, la reducción es de 1 dB sin vehículos pesados en el flujo de tráfico. Finalmente, se simuló un mapa de ruido real para mostrar que la sustitución vehículos de combustión por vehículos eléctricos generaría una mejora de 10% de los ciudadanos (Campello-Vicente et al., 2017).

An analytical study on the amplification of the tire rolling noise due to the horn effect

Autores: Bravo, Teresa

Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información (ITEFI), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 144, 28006 Madrid, Spain

Año de publicación: 7 de marzo de 2017

Se realizó un conjunto de mediciones de campo cercano para la disuasión. Medición de las contribuciones de ruido de vehículos individuales y la extrapolación a posiciones de campo lejano (Czuka et al., 2016), situado a 7,5 m. donde se instaló un sistema de a bordo en cada vehículo para la identificación de los responsables de la generación del Máximo Nivel de ruido (MNL). Este sistema estaba compuesto por dos micrófonos ubicados dentro del capó del motor y cerca de la parte posterior derecha Neumático que proporciona respectivamente una medida del tren de fuerza y ruido de rodadura Debido a los requisitos de esta aplicación, el máximo nivel de presión acústica y el rango dinámico de los sensores tuvo que alcanzar entre 130 dB SPL y presupuestos 105 dB SPL respectivamente.

Se registraron dos conjuntos diferentes de mediciones sincronizadas crónicamente: las mediciones de campo cercano para discriminar los drivers responsables de la generación de la MNL, y los niveles correspondientes propagados a las posiciones de campo lejano para evaluar el impacto del ruido del vehículo en el comportamiento de conducción particular. Para este último, dos micrófonos Fonestar 2214, protegidos del ruido aerodinámico de un parabrisas, se situaban en A 7,5 m del borde de la carretera a dos alturas diferentes: a 1,2 m de acuerdo con las normas y a 3 m para comparación propósitos

Se llega a la conclusión que, aunque los niveles correspondientes aumentan a medida que aumenta la velocidad, la tendencia general para el espectro de las diferentes señales es muy similar, con muy poca diferencia. Este fenómeno se presenta para frecuencias por encima de 1 kHz y más discrepancias en la baja frecuencia distancia. Asimismo, la superficie del neumático y la superficie del neumático al entrar en contacto entre si se presenta una deformación que atrapa el aire entre las ranuras propias del neumático lo cual genera un ruido característico en la rodadura llamado efecto de bocina o horn.

En este documento se ha considerado que este efecto puede ser modelado por el espacio formado entre la superficie curva de una esfera y el suelo. Una formulación analítica basada en la expansión del campo sonoro en términos de armónicos esféricos puede predecir el campo de presión en una posición particular sin el costo computacional de tratamientos numéricos (Bravo, 2017).

Sistema embarcado para la clasificación de carreteras con respecto a las características acústicas de la superficie de rodadura (trabajo fin de máster)

Autores: Luis Jorge Herrera Fernández

Año de publicación: 2011

En esta tesis de maestría se presenta un sistema portado dentro de un vehículo por medio del cual se permite realizar la caracterización de qué tipo de pavimento por donde se está rodando en tiempo real , para esto se utiliza el método CPX ya permite determinar el ruido con los micrófonos de medición a bordo , para esta investigación se realizó el proceso de captura con un solo micrófono sujeto en la parte de atrás del vehículo capturando el ruido generado en la parte de atrás del neumático.

Para el análisis de los datos se hizo uso de Matlab utilizando un ventaneo tipo Hanning a 31.5 ms para que mínimo se analicen 32 ventanas en un segundo de la señal, además para realizar el análisis por frecuencia se utilizó un filtro de ponderación A ya que es importante ver como se percibe este ruido por el oído humano , también se subdividieron los rangos frecuenciales analizados en tres grupos de anchos de banda de 1/3 de octava el primer grupo contiene las bandas de 1/3 de octava entre 200 Hz a 1250 Hz el siguiente grupo analizado contiene las bandas medias comprendidas entre 1600 Hz a 2500 Hz y el tercer grupo que contiene las bandas de frecuencias altas comprendido entre las bandas de 3150 Hz a 10 kHz.

Entre las conclusiones presentadas se resalta que no es necesario para este tipo de mediciones utilizar muchos micrófonos, ya que con solo un micrófono colocado justo detrás del neumático se puede obtener datos confiables ya que la mayor cantidad de eventos que generan el ruido producido entre el neumático y el pavimento se presentan en este lugar del neumático, también se concluye como recomendación implementar un sistema con el que se pueda confirmar la velocidad de desplazamiento del automóvil aunque se aclara que la norma ISO 11819-2 (ISO, 2016) por eso establece unas velocidades de referencia para realizar el proceso de captura y en donde se establecen unas desviaciones permitidas para realizar las correcciones (Herrera & Pavón, 2014).

Estudio del aporte del ruido generado por un vehículo particular automotor eléctrico en estado dinámico, en comparación con el ruido producido por un vehículo particular de motor a combustión a gasolina en una zona urbana en la ciudad de Bogotá. L

Autores: Christopher Votteler, Luis Felipe Ríos

Año de publicación: 2019

Este documento presenta la evaluación del aporte de ruido generado por un vehículo automotor eléctrico en estado dinámico en comparación con un vehículo automotor de combustión a gasolina. Para esto se utilizó la metodología de medición propuesta en la norma, ISO 362-1 2015 donde se define el método de medición de ruido CPB.

Como resultado relevante se presenta que la sustitución uno a uno de vehículos de características Hyundai Atos (Automotor de combustión a gasolina) por vehículos de características Renault Twizy (Automotor eléctrico) en Bogotá genera una reducción de niveles de presión sonora de 5.13 dBA SPL según el factor de sustitución calculado y de hasta 3.27 dBA SPL en la mayor reducción al aplicar el modelo inglés, debido a esto se concluye que el cambio de vehículos de combustión por vehículos eléctricos es una alternativa para la reducción de niveles e presión de sonora asociados al ruido de tráfico rodado en la ciudad de Bogotá.

Adicional a esto se pudo analizar que debido a las velocidades en las que se desarrolló la captura al paso de vehículo para la caracterización de fuentes de los automóviles (entre 20 Km/h y 45 Km/h), no fue posible determinar una banda 1/3 de octava que realice un aporte independiente del ruido por rodadura, del resto de fuentes emisoras de ruido (Bogotá, 2019).

Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá (tesis de maestría)

Autores: Blas Morales Quintana

Año de publicación: 2014

El objetivo de este documento es presentar un modelo que permita y promueva el uso masivo de vehículos eléctricos en Bogotá, teniendo en cuenta que los usuarios tienen diferentes requerimientos y necesidades a la hora de adquirir un vehículo. Además de esto se evaluó el impacto que tendría la masificación de este tipo de vehículos, así mismo, como debería desarrollarse toda una infraestructura para crear una red de distribución y recarga para los vehículos eléctricos, así como también el impacto generado en el medio ambiente al implementar el uso de los vehículos eléctricos en la ciudad de Bogotá.

De los resultados obtenidos en este modelo cabe resaltar que ,según las predicciones para el año 2034 el parque automotor en la ciudad de Bogotá tendrá rodando por sus vías alrededor de un 2% a un 8 % de vehículos eléctricos sin tener en cuenta los vehículos híbridos ni el parque automotor dedicado al transporte público, aunque según datos de la administración de la ciudad de Bogotá se tiene presupuestado que para esa fecha la ciudad contara con 174,000 vehículos lo que sería el 4,56 % del parque automotor de la ciudad.

También se presenta los niveles de reducción de partículas contaminantes en el aire, la cual es estimada en 150 MT en partículas en suspensión, lo cual es un impacto muy positivo para todos los indicadores medioambientales de la ciudad, la salud pública y la calidad de vida de la sociedad, ya que se presentaría una reducción en enfermedades de carácter respiratorio y la disminución de recursos destinados a tratar estas enfermedades.

También se concluye que el mayor impedimento para que la cifra de vehículos eléctricos adquiridos en la ciudad aumente es principalmente el costo del vehículo, que si bien en estos momentos se vería cobijado por la legislación actual donde lo exime de pago de impuestos y también de la restricción de pico y placa, no es de fácil adquisición por el elevado costo de estos vehículos, así como de las alternativas hibrida, lo cual desestimula al usuario a la hora de hacer la compra (Quintana, 2014).

Planteamiento del problema

Desde hace décadas se discute a nivel mundial las estrategias para mitigar los efectos de la polución en el aire mediante la disminución de las fuentes contaminantes. Se conoce que una de las principales fuentes de polución son los vehículos de combustión (Ruiz, 2019), que también son

fuentes generadoras de ruido por tráfico cuya componente principal es el ruido generado por el tren de potencia a bajas velocidades.

Una de las alternativas para solucionar el problema relacionado con contaminación por emisión de gases es el cambio de los vehículos de motor a combustión (VC) por los vehículos eléctricos (VE), ya que, al cambiar el tipo de motor, se modifica la principal fuente de emisión de gases y de ruido en el vehículo dependiendo de la velocidad de desplazamiento. En el libro *Tire/Road Noise Reference Book* de Sandberg, en el capítulo siete, *Tire/road noise sources and generation mechanisms* se presenta la Figura 1 (Sandberg, 2001).

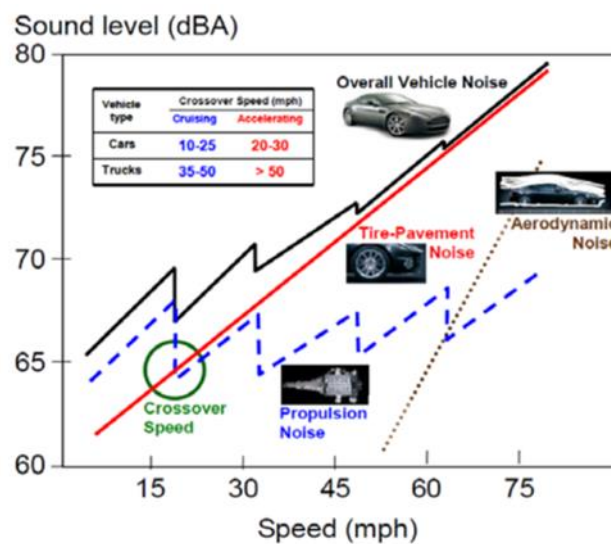


Figura 1. Comportamiento del ruido en las diferentes fuentes de ruido para un vehículo de combustión en función de la velocidad (Sandberg, 2001).

En la misma se puede apreciar que la línea negra corresponde a la suma de las fuentes de ruido generadas por el vehículo de combustión, siendo la línea azul punteada la fuente del tren de potencia (motor, transmisión y exosto), la línea recta roja es la fuente producida por la interfaz neumático/pavimento y finalmente la línea recta marrón punteada es la componente de ruido aerodinámico del vehículo.

Como se puede evidenciar la fuente relacionada con el tren de potencia es la que hace el mayor aporte energético para velocidades inferiores a las 30 mph, en comparación con la fuente asociada con la interfaz neumático/pavimento. Los decaimientos que se presentan son debido a la desaceleración del vehículo por los cambios de marcha. Cuando se llega a una velocidad

aproximadamente de 20 mph (32 Km/h) se presenta el cruce de los niveles sonoros de estas dos fuentes y son comparables los dos mecanismos de generación de ruido. Como se puede apreciar en la Figura 1, el círculo verde indica la velocidad de cruce entre el nivel de presión sonora emitido por el tren de potencia y el de la interfaz neumático/pavimento que se encuentra alrededor de las 15 mph, en donde se puede decir que los dos mecanismos de generación de ruido son iguales y se mantienen similares hasta alcanzar las 30 mph.

Después de 30 mph (48 Km/h) la fuente que predomina es la generada en la interfaz neumático/pavimento. Sin embargo autores como M.Czuka (Czuka et al., 2016) en los resultados presentados para el programa FOREVER indica que “a partir de los 30 Km/h el ruido generado por los VE ya es percibido”, y aumenta de manera constante a medida que se incrementa la velocidad. Es allí donde la interfaz neumático/pavimento pasa a ser la fuente principal generadora de ruido hasta alcanzar la velocidad de 50 mph (110 Km/h) en donde la fuente principal pasaría a ser la componente aerodinámica.

Para los vehículos eléctricos la fuente del tren de potencia tendrá un nivel de presión sonora bajo, casi que para algunas personas pueda llegar a ser imperceptible así que la fuente sonora que predomina para este tipo de vehículos puede llegar a ser la de la interfaz neumático/pavimento, lo cual se convierte en la hipótesis de este trabajo.

Haciendo la comparación de los VC y los VE, se puede decir que la fuente del tren de potencia para los VE cambia respecto a los VC, y este cambio hace que la fuente tenga una disminución significativa y que ahora la fuente que tendrá mayor aporte energético a velocidades inferiores a los 50 Km/h será la de la interfaz neumático/pavimento. De esta manera en los VE sería despreciable hacer el estudio de la fuente del tren de potencia debido a la disminución que presenta, y la componente aerodinámica por el límite de velocidad que exige la ley dentro de la ciudad de Bogotá que es de 50 Km/h para la mayoría de vías. M. Czuka (Czuka et al., 2016) realizó una comparación entre los VC y los VE en donde concluye que existe una diferencia de 2 a 3 dB SPL en cuanto al ruido generado por estos dos tipos de vehículos implementando la metodología de medición CPB (control pass by) a velocidades superiores a los 50 Km/h.

Sin embargo, el mismo M. Czuka (Czuka et al., 2016) en 2016 indica que para velocidades por debajo de los 30 Km/h el ruido generado por un VE es casi imperceptible con lo que concluye que este tipo de vehículos al desplazarse a bajas velocidades representa un riesgo para la seguridad vial de los peatones y ciclistas.

Justificación

En 2019 el gobierno del presidente Iván Duque firmó la ley 1964 (Congreso de Colombia, 2019) para el incentivo al uso de los VE, para así contribuir con la emisión de CO₂, ya que esta es una de las soluciones que propone el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para atacar las problemáticas medio ambientales que se han venido presentando en la última década. Morales (Quintana, 2014) hace una proyección que para el año 2034 habrá un incremento del 2 al 8 % de los VE dentro de la ciudad de Bogotá, lo cual es una cifra que indica el incremento en el uso de este tipo de vehículos esta ciudad respecto a años anteriores, de esta manera se presenta una disminución en la distribución de VC, ya que normalmente estos vehículos son los que entran en circulación a la ciudad todos los días.

Por otro lado, la Secretaría de movilidad en el año 2018 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018) inicia una campaña de regulación para la velocidad máxima permitida, con base en las recomendaciones que hace la Organización Mundial de la Salud, donde establece que la velocidad recomendada para evitar un alto índice de mortalidad en accidentes de tránsito dentro de las avenidas principales de la ciudad es de los 50 Km/h.

El código Nacional de Tránsito Terrestre indica en el artículo 106 que los límites de velocidad en zonas urbanas es de 60 km/h, excepto cuando las autoridades competentes por medio de señales indiquen velocidades distintas. Asimismo en el artículo 107 establece que la velocidad máxima para autopistas es de 80 km/h, y en algunas zonas por medio de señales pueden llegar a ser permitidas velocidades máximas de hasta 100 Km/h dependiendo del estado de la vía (*Código Nacional de Tránsito Terrestre*, 2002).

La *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) de los Estados Unidos, en 2014, después de realizar diferentes pruebas con peatones llegó a la conclusión que, los incidentes de accidentes viales con peatones donde se encuentra involucrado un VE o un vehículo híbrido es de 1,2% contrario a los que se presentaban con los VC que registraba una tasa de 0,6% (Administration, 2011), esto teniendo en cuenta que para este año tan sólo circulaban 8400 VE en Estados Unidos, a partir de estos datos la NHTSA entrega la normativa NHTSA-2011-0100 (Administration, 2011) en donde fijan un nivel mínimo de emisión de ruido para los VE de 66 dBA para una velocidad de 30 Km/h. También establece un nivel mínimo de ruido para la reversa de 55 dBA SPL y en estado de parqueo un nivel mínimo de 49 dBA SPL. Finalmente establece que el

ruido que deben emitir los VE debe emular el ruido producido por un VC y puede ser elegido por el fabricante.

A partir de esta normativa en Europa se empezó a trabajar en el 2014 en la implementación y legislación del sistema AVAS (*Acoustic Vehicle Alert System*) el cual por medio de la normativa comunitaria N° 540/2014 (The European Parliament and the Council of the European Union, 2014) y actualizada en 2019 con carácter de obligatoriedad indica que todo VE o VH debe emitir un nivel mínimo de ruido para que pueda ser detectado por peatones y ciclistas el cual debe ser el indicado en la regulación N° 138 de la norma 540 (The European Parliament and the Council of the European Union, 2014) y en esta nueva modificación a la norma se establece obligatorio este nivel de ruido mínimo y que no se puede suspender manualmente.

Por este motivo se hace relevante estudiar y caracterizar el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento ya que en los VE es el principal mecanismo de generación de ruido a velocidades inferiores a los 50 Km/h. Además, teniendo en cuenta la restricción de velocidad vigente y los estudios previamente mencionados, es de gran importancia identificar cual es el nivel de presión sonora que genera esta interfaz neumático/pavimento en función de los cambios de velocidad.

Pregunta de investigación

¿Cuál es la relación que existe entre el nivel de presión sonora generado en la interfaz neumático/pavimento y la velocidad, cuando se transitan a velocidades inferiores a los 50 km/h, usando la metodología de captura close proximity (CPX) para un vehículo eléctrico?

Objetivos

Objetivo General

Determinar la relación que existe entre el nivel de presión sonora del ruido generado en la interfaz neumático/pavimento y la velocidad en vehículos eléctricos para rapidez inferiores a 50 Km/h.

Objetivos Específicos

1. Implementar una estructura lateral al vehículo en la que se pueda ubicar los micrófonos de medición para la captura de la señal en campo directo generada por la interfaz neumático/pavimento.

2. Seleccionar de manera perceptual las señales capturadas que están libres de eventos sonoros no deseados.
3. Obtener los niveles de presión sonora asociados a las muestras seleccionadas libres de eventos sonoros no deseados en función de la velocidad.

Alcances y limitaciones

Alcances

1. Determinar la relación que existe entre el nivel de presión sonora y la velocidad del vehículo eléctrico.
2. Proponer una metodología para la captura y caracterización del ruido producido por la interfaz neumático/pavimento para vehículos eléctricos en Bogotá.

Limitaciones

1. La interfaz de audio: la interfaz de audio debe contar con una fuente de alimentación propia y debe tener como mínimo 2 canales.
2. Tipo de pavimento: no son conocidas las características de los pavimentos si son de tipo micro o macro textura, solamente que son unos flexibles y otros en concreto.
3. Neumáticos de referencia: la norma ISO 11819 – 2 (ISO, 2016) indica que las mediciones se deben hacer con los neumáticos propuestos en la normativa 11819 – 3, pero no se van a usar este tipo de neumáticos, sino que solamente se hará con los neumáticos que trae el vehículo de fábrica.
4. La medición se propone para solamente un vehículo eléctrico, a velocidades inferiores a los 50 Km/h.

III. MARCO DE REFERENCIA

Marco Teórico

Nivel de presión sonora (NPS)

“El nivel de presión sonora de un decibel es 20 veces el logaritmo de base 10 de la relación de la presión sonora efectiva de la presión sonora eficaz de referencia.” Esto se puede definir matemáticamente como:

$$NPS = 20 * \log\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Ecuación 1. Nivel de Presión sonora.

Donde:

P es la presión sonora efectiva RMS en pascuales

P₀ es la presión de referencia $2 \times 10^{-5} Pa$

La presión de referencia de uso común en las mediciones que tienen que ver con el oído y para las mediciones de nivel sonoro y ruido en el aire y los líquidos (Beranek, 1973).

Sumatoria energética

Cuando se desea sumar una o varias fuentes sonoras que radian sonido, y están equidistantes a un punto x, cuando se suman varias fuentes, la contribución no será igual a la suma numérica de los valores individuales en dB.

En donde el método de cálculo es:

$$Sumatoria\ Energetica = 10 * Log\left(\sum_{i=1}^n 10^{SPL_N/10}\right)$$

Ecuación 2. Sumatoria energética.

Donde:

SPL_n es: El nivel de presión sonora en una banda de tercio de octava.

n es: La banda de tercio de octava.

i es: La banda de tercio de octava inicial.

Estadística

Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central, permiten hacer un análisis estadístico del comportamiento de los datos en cuanto al promedio de los datos o la variación que tienen estos datos entre, la dispersión con la cual se comportaron en el momento de tomarlos y lo más importante una comparación entre estos resultados para luego poder obtener conclusiones de todos los resultados.

Media Aritmética

La media aritmética, es el dato promedio de todo el conjunto de muestras obtenidas luego de una medición (Quevedo, 2011), es decir si se mide la velocidad con la cual transita un vehículo en un tramo de carretera, se obtiene que en el primer instante de tiempo va a una rapidez diferente en la mitad o el final del tramo, si se desea saber cual fue la velocidad promedio con la que viajó en la totalidad del tramo se aplica la Ecuación 2.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 3. Media aritmética (Quevedo, 2011).

Donde:

n es: El número de muestras.

i es: La muestra inicial.

Xi es: Son las muestras.

Mediana

La media representa o indica cual es el dato medio, o que se encuentra en la mitad de la totalidad del conjunto de datos. Es decir si se tienen 20 datos de una medición, el dato que estaría representado como la mediana es el que se ubica en la posición 10 de la totalidad de los datos (Quevedo, 2011).

Moda

El dato de la moda representa el dato que tuvo mayor repetición durante toda la medición o la obtención de la totalidad de los datos o muestras (Quevedo, 2011). Si se desea calcular se puede hacer por medio de Microsoft Excel, por medio de la opción Moda, donde se seleccionan la totalidad de los datos en una celda y se aplica la opción moda (Ferrer, 2019).

Medidas de Dispersión

Las medidas de dispersión, permiten obtener la variación con la que se comportaron los datos durante la medición. Las medidas de dispersión que se usan usualmente son: el rango de variación, la desviación estándar y el coeficiente de variación, la varianza es solamente un paso antes de obtener la desviación estándar (Medeave, 2011).

La desviación estándar es la medida de dispersión que mejor representa la variación de los datos en la totalidad del conjunto de muestras, esta medida se obtiene a partir de sacar la raíz cuadrada a la varianza, las unidades en las que se obtiene son las mismas unidades que tienen el dato o la totalidad de los datos la desviación estándar se puede calcular a partir de la Ecuación 3.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f * (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Ecuación 4. Desviación estándar (Quevedo, 2011).

Donde:

f es: La frecuencia con que se presenta el dato.

$\bar{x}$ es: Promedio de los datos.

x_i es: La muestra.

n es: El número de muestras.

i es: La muestra inicial.

Análisis descriptivo de datos

La estadística tiene como efecto fundamental obtener conclusiones e hipótesis del comportamiento de los datos de un estudio, dicha descripción se puede representar de forma gráfica, o también por medio de las medidas de tendencia central, para finalmente ofrecerle al lector de una investigación de los datos, no solamente un valor número que representa algún dato cualitativo, sino una razón de la confiabilidad de dichas mediciones.

De forma que, cuando se intenta dar una explicación a un determinado fenómeno observado en una población (o en una parte de ella), es necesario disponer de una herramienta rigurosa que permita extraer conclusiones sobre dicha población y eliminar, en gran medida, la posible subjetividad presente en el observador. Esta herramienta es la estadística (*Análisis Descriptivo*, 2014).

Marco Conceptual

El primer vehículo eléctrico se desarrolla en Vermont por el herrero Thomas Davenport en 1834 cuyo funcionamiento era básicamente un vehículo tipo carrosa que cambio la locomoción tirada por caballos a un motor eléctrico que se desplazaba a 4 mph alimentado por una batería no recargable, con esto se empezó la investigación y el estudio de este tipo de motores logrando el mismo Davenport patentar el primer motor de corriente continua (Davenport, 1834).

A partir de este desarrollo se logró grandes avances como la primera locomotora eléctrica la cual fue desarrollada en 1837 con motores creados por William H Taylor, pero este tipo de motores vio su desventaja por las baterías deficientes que existían en el momento, además de la incapacidad para recargar las mismas, también por la existencia de los motores de combustión eléctrica.

En la década de 1970 se renueva el interés por este tipo de vehículos debido a la crisis energética deriva de la combustión de combustibles fósiles (Stankous, 2017).

Ahora bien, en la actualidad los vehículos eléctricos se subdividen en tres tipos en los vehículos eléctricos de batería (BEV), los vehículos híbridos (HEV) y los vehículos de célula de combustible (FCEV); para la propulsión de este tipo de vehículos se utilizan motores de energía alterna pues son más ligeros más potentes y no requieren constante mantenimiento como los motores de corriente continua.

Actualmente el auge de las energías limpias ha aumentado el uso de los VE, además de políticas generadas para el uso e incentivo de los VE como por ejemplo reducción de impuestos, acceso a los centros de las ciudades donde esto está restringido, subvenciones para la compra de vehículos entre otras (Stankous, 2017).

El ruido de tráfico rodado se puede entender como cualquier emisión sonora (SPL o nivel de presión sonora) generada por uno o varios vehículos bien sea en estado estático o en movimiento que afecten a una persona o a un grupo específico de personas.

Según Sandberg en el libro *Tire/Road Noise Reference Book* (Sandberg, 2001) en donde se plantean los distintos niveles de presión sonora y la fuente que lo genera Sandberg concluye que el ruido generado por el tráfico de vehículos puede llegar a alcanzar niveles de molestia y convertirse en perjudicial para la salud del ser humano.

Ahora bien, los Mecanismos de Generación de Ruido de Rodadura en la interfaz neumático/pavimento, se pueden clasificar de la siguiente manera: el efecto de martillo, este es generado por el impacto entre el neumático y la textura del pavimento, lo cual se asemeja al ruido

generado por varios martillos pequeños golpeando consecutivamente y cuya frecuencia de martilleo depende de la velocidad de desplazamiento del vehículo. Otro mecanismo de generación de ruido es el bombeo de aire el cual puede ser asimilado como el efecto de sonido que se genera al aplaudir debido a la existencia de espacios con partículas de aire, entre el pavimento y el neumático, luego estas partículas de aire son obligadas a salir cuando el neumático pierde contacto con el pavimento y son atrapadas nuevamente cuando vuelven a tener contacto, este procedimiento es llevado a cabo en cortos instantes de tiempo y de igual forma dependen de la velocidad en la que viaja el vehículo.

También existen mecanismos de generación de ruido dependientes de la adherencia entre el neumático y el pavimento, el primero de ellos es el efecto de adherencia y deslizamiento el cual es generado por la deformación y distorsión continua del caucho del neumático, por debajo de la rueda o en el punto donde la rueda esta exactamente sobre el pavimento, lo cual hace que el neumático se pegue o se adhiera al pavimento y al llegar al punto máximo de adherencia se deslice y emita un sonido similar al de una zapatilla cuando se desliza contra el piso. También por la adherencia se produce un efecto de chasquido el cual es generado por las ranuras propias del neumático que se comportan como una copa de succión que al pegarse a una superficie lisa y a causa de la fuerza de adhesión y un vacío que se crea cuando el aire de la copa es sacado, lo cual produce el sonido similar a un chasquido.

Por último, debido a la geometría del neumático y a las ranuras de su labrado además de las condiciones del pavimento en el que se desplace el vehículo, cuando el neumático hace contacto con el pavimento deja pequeños segmentos de aire entre las ranuras que, al seguir desplazándose el neumático, cuando este aire es liberado genera el efecto de una corneta (Ramussen et al., 2007).

Sonido

Es una perturbación que se propaga por un medio elástico y esto causa una alteración de la presión o un desplazamiento de las partículas de dicho medio conocida como una onda longitudinal y que el oído humano percibe como una variación de la presión atmosférica (Robledo, 2002).

También podemos definir el sonido como un efecto auditivo producto de una vibración en el aire caracterizada por una sucesión periódica en el tiempo y en el espacio de rarefacciones y compresiones.

Ruido

El ruido lo define la Resolución del Consejo de las Comunidades Europeas de 17 de mayo de 1977, relativa a la prosecución y la ejecución de una política y de un programa de acción de las Comunidades Europeas en materia de medio ambiente, define el ruido como un “conjunto de sonidos que adquieren para el hombre un carácter afectivo desagradable y más o menos inadmisibles a causa, sobre todo, de las molestias, la fatiga, la perturbación y, en su caso, el dolor que produce” (Robledo, 2002).

También podemos decir que el ruido es una mezcla de ondas sonoras en el espectro audible con fase y magnitud aleatoria, o como una mezcla compleja y desordenada de tonos que por su aleatoriedad se percibe de manera molesta o poco agradable.

Ruido continuo estable

Es aquel cuyo nivel de presión sonora permanece casi constante con fluctuaciones inferiores o iguales a 5 dBA SPL durante un periodo de medición de un minuto. Se caracteriza por niveles de presión sonora que no presentan cambios rápidos o repentinos. Ejemplos son los ruidos producidos por los motores a chorro (Robledo, 2002).

Ruido continuo fluctuante

Es aquel que presenta variaciones en los niveles de presión sonora mayores a 5 dBA SPL durante un periodo de medición de un minuto (Robledo, 2002).

Ruido de impulso o impacto

Es aquel que presenta elevaciones bruscas del nivel de presión sonora de corta duración y que se produce con intervalos regulares o irregulares con tiempo entre pico y pico iguales o superiores a un segundo. Cuando los intervalos sucesivos son menores de un segundo, el ruido se considera como continuos (Robledo, 2002).

Ruido por tráfico rodado

El ruido de tráfico rodado es el que se produce por el movimiento de vehículos sobre una vía y está compuesto por 3 variables principales. La primera es el ruido de propulsión, el cual es producido por los diferentes componentes del tren de potencia. La segunda variable es el ruido de la interfaz

neumático/pavimento, este es generado por el movimiento de la llanta sobre el pavimento. Por último el ruido aerodinámico. Las componentes de ruido, para los vehículos de motor a combustión, se presentan de igual forma en tres secciones de velocidad diferentes, como se muestra en la Figura 1. La primera componente está en el rango de los 5 km/h y los 50 km/h (Tren de Potencia). La segunda componente se encuentra en el rango de velocidades de 50 km/h y 100 km/h (Interfaz neumático/pavimento), finalmente la componente aerodinámica esta, para velocidades superiores a los 110 km/h, este tipo de comportamientos también lo podemos ver, así como se presenta en la siguiente Figura 2. Cabe aclarar que, para esta investigación, el objetivo principal es estudiar el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento en un vehículo eléctrico, pero este tipo de vehículos por su composición no cuentan con un tren de potencia, así que por esta razón se hace el estudio en velocidades inferiores a los 50 km/h.

El ruido de tráfico rodado es el producido por cualquier automotor de combustión, eléctrico o híbrido (moto, mototaxi, carro, camioneta, camión, tractocamión, volqueta, etc) que se desplaza por cualquier vía, bien sea primaria, secundaria o terciaria, e incluye todas las fuentes generadoras de ruido presentes en el vehículo los cuales generan molestias a las personas y contribuyen a la contaminación auditiva en un entorno urbano (Herrera & Pavón, 2014).

Técnica de Captura Close Proximity

Este método de captura, está definido en la normativa consultada ISO 11819-2, el cual consiste en hacer la ubicación de 3 o más micrófonos de medición, como se puede apreciar en la Figura 2. Este tipo de ubicación es para obtener la captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento en campo directo.

Debido a que convencionalmente para la medición de ruido de tráfico rodado se utiliza el método Coast-By, ya que permite caracterizar el comportamiento de una vía principal o secundaria realizando el conteo de vehículos además del tipo y luego promediando los datos, este tipo de medición no es pertinente en esta investigación, ya que no permite caracterizar un VE pues ya está claro que este carece de un tren de potencia, que se constituye en la principal fuente generadora de ruido en un VC, por eso se escogió el método Close Proximity .

El método Close Proximity está definido en las normas ISO 11819-2, comenzando por establecer que este método realiza la captura del audio en campo directo de la señal que se genera por todos los agentes generadores de ruido por la interacción del pavimento con el neumático definidos

anteriormente, además se define la distancia mínima a la que se deben colocarse los micrófonos que es de 10 cm y con un mínimo de un micrófono se puede realizar la captura, la norma también recomienda las posiciones a las cuales debe ser colocados los micrófonos, cabe resaltar que este método que contiene la norma ISO fue diseñado para la caracterización de ruido en VC y a velocidades superiores a 50 km/h, por este motivo en este trabajo no se aplica como tal un marco normativo si no solamente se emplea el método de captura de los audio (ISO, 2016).

Sección de carretera

Tramo total del carril de la carretera sujeto a pruebas segmento de carreteras: Parte de un tramo de carretera, de 20 m de largo y destinado a la normalización de los niveles de presión velocidad real en ese segmento a una cierta velocidad de referencia.

Marco Normativo

En el marco normativo, la norma que se consultó para tener una metodología similar a la desarrollada en la investigación fue la ISO 11819-2. No se aplica la normativa en su totalidad, solamente se tiene en cuenta el método de captura (CPX), as consideración de la toma de muestras. Pero no se tiene en cuenta por ejemplo el neumático de referencia, así como lo indica la normativa o el tipo de pavimento, ya que estas son limitaciones de la investigación.

Adicionalmente cabe aclarar que la metodología aplicada en la norma es para vehículos de motor de combustión, y las velocidades que indica la normativa para hacer la captura de las muestras son mayores a los 50 km/h. por otro lado la normativa no indica nada respecto a que se aplica en un tipo de vehículo específico (ISO, 2016). La descripción detallada sobre cómo se aplicó esta norma en la presente investigación se describe con detalle en la sección 3 del documento.

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

Metodología

Tipo y enfoque de la investigación

Esta investigación, es de tipo cuantitativo, ya que se realizan mediciones del nivel de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento, de un vehículo de motor eléctrico, en una vía seleccionada en la ciudad de Bogotá. Para luego hacer la determinación de cuanto es el nivel depresión sonora generado por esta interfaz y en este tipo de vehículos; cabe aclarar que se hace un análisis de datos por medio de la estadística aritmética y energética, para así poder entregar un valor cuantitativo y una hipótesis de cuál sería el comportamiento de este tipo de ruido en velocidades entre los 5 km/h y los 60 km/h.

En un vehículo eléctrico es ausente el tren de potencia, a diferencia del VC, donde este es el primer factor generador de ruido de tráfico rodado en velocidades inferiores a 60 km/h. Adicional a esto, en la ciudad de Bogotá está regulada la velocidad máxima permitida en 50 km/h, así como lo indica la alcaldía mayor de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018). Finalmente, otra de las razones por las cuales se tomaron datos hasta 60 km/h, fue para tener una mayor cantidad de datos, para el análisis estadístico.

Cabe aclarar que un estudio cuantitativo, tiene un enfoque investigativo donde las muestras obtenidas a partir de una medición, entregan un valor numérico, que luego puede predecir un comportamiento de los datos por medio de una aproximación.

Línea de investigación

La investigación que se lleva a cabo esta dentro de la línea de acústica principalmente, en el programa de ingeniería de sonido, debido a las mediciones realizadas para obtener la captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento, también está relacionada directamente con el área de la acústica ambiental, ya que las mediciones son realizadas en una vía de la ciudad de Bogotá.

Variables de la investigación

Dependientes

- Nivel de presión Sonora

- Condiciones meteorológicas

Independientes

- Velocidad a la que viaja el vehículo
- Presencia de fuentes externas, a la de la interfaz neumático/pavimento
- Pavimento de la vía de medición
- Neumático del vehículo de medición

La norma ISO 11819-2 propone una metodología de medición para obtener un índice de nivel de presión sonora en función de la velocidad, esta metodología no está diseñada para algún tipo de vehículo específico, lo que sí indica es que debe ser aplicada solamente para vehículos livianos, mas no si el vehículo debe ser un VC o un VE.

Por otro lado, la norma propone que la medición se puede realizar por medio de dos formas, la primera es por medio de un tráiler y que es arrastrado por un vehículo y en este tráiler hacer la ubicación de los micrófonos de medición. La segunda forma es por medio de una estructura que pueda ser ubicada paralela al vehículo y en esta hacer la ubicación de los micrófonos. La cantidad de micrófonos que propone la norma a usar es de mínimo 2 y máximo 5 micrófonos, se debe hacer la ubicación de un micrófono en la parte frontal del neumático y otro en la parte de atrás de este, los otros tres micrófonos son opcionales.

En la Figura 2, se presenta la ubicación de los tres micrófonos de medición usados, para la captura de las muestras de audio, el primero se ubica en la parte posterior del neumático, es decir hacia la parte de atrás del vehículo, con un ángulo de inclinación respecto al suelo de 45° y con una separación de 10 cm; el segundo es posicionado lateralmente a la rueda, exactamente en el centro donde el neumático y el pavimento tienen el punto máximo de interacción, con las mismas características de separación y angulación del primer micrófono, y finalmente el tercero es colocado en la parte delantera, es decir entre las ruedas delanteras y traseras del vehículo, pero con las mismas características de ángulo de inclinación respecto al suelo del primero y con la misma separación de los 10 cm entre el micrófono y el neumático.

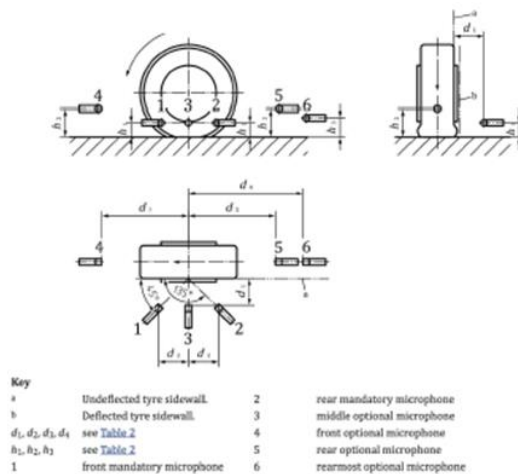


Figura 2. Posicionamiento de micrófono para la captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento (ISO, 2016).

Otras de las consideraciones que propone la norma es la de la temperatura del pavimento, que las condiciones climáticas no estén en lluvia. Por otro lado para la medición del nivel de presión sonora en función de la velocidad en función para un VE se aplicará una metodología similar a la que propone la ISO 11819-2 (ISO, 2016).

Instrumentos de medición

Instrumentación de análisis de frecuencia

Es obligatorio realizar un análisis de frecuencia del sonido medido mediante una resolución de banda de un tercio de octava entre 315 Hz y 5000 Hz (frecuencias centrales de bandas de un tercio de octava) es el rango mínimo cubierto. Los filtros de banda de un tercio de octava se ajustarán a la norma IEC 61260-1.

Instrumentación de calibración del sonido

Al principio de las mediciones, y después de cualquier tiempo de calentamiento especificado por el fabricante, la sensibilidad general de los medidores de nivel sonoro o el sistema de medición equivalente (incluyendo el micrófono) se comprobará.

Si es necesario, se debe ajustar de acuerdo con las instrucciones del fabricante, éste puede requerir el uso de una fuente de sonido estándar, como un calibrador o un Pistófono. Este control será

repetido al final de las mediciones, o al menos después de cada 4 horas de funcionamiento, el dispositivo de calibración de sonido deberá cumplir los requisitos de la norma IEC 60942, clase 1.

Instrumentación de medición de temperatura

La medición de la temperatura en el aire y el pavimento, en donde se llevará a cabo el registro de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento, pueden ser opcionales, deberán tener una desviación máxima permisible de error de 1 °C, según lo especificado por el fabricante.

Los medidores que utilicen el infrarrojo no podrán ser utilizados para mediciones de temperatura del aire, la temperatura deberá ser medida al inicio y al final de la captura de las muestras de audio.

Procedimiento de medición

La posición del micrófono se comprobará regularmente, por ejemplo, cada vez que se realice la captura de un tramo completo por velocidad de medición o de ensayo, o cuando se realice la calibración acústica. Antes de realizar cualquier medición estándar, los neumáticos se pondrán en funcionamiento con temperatura ambiente.

Medición del sonido

Se determinará el SPL de banda de un tercio de octava ponderada en A de 315 Hz a 5000 Hz en cada posición del micrófono promediando sobre cada segmento de carretera de 20 metros. Esto constituye la base de todas las evaluaciones adicionales, es obligatorio medir el espectro de frecuencia de banda por tercio de octava.

El nivel de presión sonora promedio de tiempo para una banda individual de un tercio de octava con la frecuencia central f medida en la posición del micrófono m para el segmento de carretera con el índice i y medido a velocidad de referencia (V_{ref}).

Procedimiento para el estudio de la sección de carretera

Los siguientes requisitos se aplican si el propósito de la medición es obtener un nivel de CPX que sea representativo de un tramo de carretera (varios segmentos de carretera consecutivos). Después de eliminar los segmentos de carretera para los que no se cumplen los requisitos de prueba, por ejemplo, debido a ruido o demasiada velocidad de desviación, se considerará una sección de medida, es decir, la carrera aceptada, si al menos la mitad de los segmentos de carretera, con un diferencial razonable en toda la sección se han medido en condiciones aceptables.

Sin embargo, no menos de cinco tales segmentos se medirán como lo sugiere la literatura. El resultado final por neumático es entonces el promedio aritmético de todas las carreras o recorridos.

Número mínimo de recorridos para tramos de carretera muy cortos

Un tramo de carretera consta de una serie de segmentos de carretera (normalmente al menos cinco). Donde la sección disponible para la prueba es de sólo 20 m a 100 m, como máximo 200 m.

Posición lateral en la carretera

A menos que exista alguna restricción o se tenga limitaciones, las mediciones se realizarán en ambos carriles de prueba. La selección de la vía puede hacerse sobre la base de una conducción segura del vehículo.

Consideración del ruido molesto

Todavía existen varias fuentes de ruido molesto que podrían influir en los niveles de ruido durante las mediciones. Estos incluyen el ruido inducido por el viento, especialmente en sistemas no cerrado; ruido de fondo de fuentes no relacionadas, como vehículos que pasan y reflexiones contra la carretera u objetos además de fuentes de perturbación. Los segmentos de carretera en los que los niveles de ruido se consideren perturbados o potencialmente perturbados se marcarán para su posterior procesamiento o descartado inmediatamente, según corresponda.

Velocidad de prueba y desviaciones aceptables

Durante cada prueba se medirá la velocidad real del vehículo. Para cada segmento de carretera, la prueba de velocidad es la velocidad media del vehículo sobre ese segmento de la carretera. La velocidad de ensayo real en cada segmento de carretera no se desviará de la velocidad de referencia en más de 15 %.

Medición de la temperatura

Las mediciones de la temperatura del aire son obligatorias, mientras que las mediciones de la temperatura de la superficie de la carretera se recomiendan como suplemento. Las mediciones de temperatura se realizarán a tiempo de la medición del sonido, ya sea de forma continua o intermitente, y el resultado se debe reportar redondeado al grado más cercano en Celsius.

Se prefiere que los sensores se coloquen en el vehículo de prueba. Si esto no es práctico o posible, aquella(s) temperatura(s) se medirán en el camino lo más cerca posible de la carretera y de manera segura.

NOTA La temperatura de la superficie, puede variar sustancialmente a lo largo de una sección de prueba dependiendo de sombreado de árboles, montañas, edificios, etc., así como en vientos cruzados y propiedades de absorción de luz superficial.

V. DESARROLLO INGENIERIL

Diseño y construcción de la estructura

Para el diseño inicial se utilizó como herramienta de diseño Sketchup en donde se realizó un diseño previo de la estructura, para ajustar las medidas se hizo uso de un vehículo similar el cual se representa en la Figura 3. a las características del vehículo que se utilizaría para la medición destacando sobre todo que tuviese un tamaño de rueda similar para así dejar la estructura con la distancia mínima requerida para realizar la medición.



Figura 3. Vehículo inicial de prueba (Bezpridel, 2014).

La ubicación de la estructura fue pensada inicialmente en una de las ruedas delanteras del vehículo, pero en esta posición, el vehículo de prueba no tenía una parte del chasis donde se pudiese anclar la estructura diseñada para el posicionamiento de los micrófonos. Finalmente se define que la ubicación fuera en una de las ruedas traseras del vehículo, para evitar golpear la estructura en el momento en que él se realice cualquier giro. Así que se diseñó con estos parámetros y medidas del vehículo de prueba, debido a que no se contaba con el vehículo de la medición en ese momento, para ver el primer acercamiento del diseño de la estructura lo podemos evidenciar en la Figura 4.

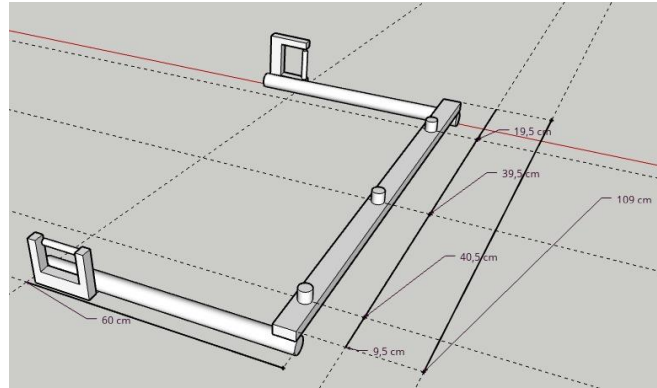


Figura 4. Diseño inicial de la estructura (Propia, 2020).

El material que se escogió para la construcción de la estructura fue madera, ya que este tipo de material es considerado macizo y esto nos garantiza firmeza en la estructura, por otro lado, es de bajo costo ya que se contaba con las piezas de madera, y la única inversión que se tuvo que hacer fue en la compra de dos prensas en C de 3' y una prensa en C de 1', para anclar y asegurar la estructura al vehículo. Luego de implementar la estructura mostrada en la Figura 4, en una de las ruedas delanteras, se identificó que si se ubicaba la estructura en esta posición al momento que el vehículo necesitara hacer algún tipo de giro, la estructura era impedimento. Así que finalmente se replanteó la ubicación de esta estructura para una de las ruedas traseras del vehículo.

Como se puede ver en la Tabla 0 se realizó un análisis de manera simulada de los modos de vibración propios de dos materiales (aluminio y madera), los cuales fueron analizados con el fin de escoger cuál de los dos presenta menos modos de vibración entre las frecuencias a analizar en la investigación (315 Hz a 5.000 Hz), con el objetivo de obtener muestras de audio libre de eventos sonoros o que se vean afectadas por dichas vibraciones.

Como se puede notar en la Tabla 0, se analizaron los 10 primeros modos de vibración para la estructura de madera, los 6 primeros de estos 10 modos están por debajo de la primer banda de 1/3 de octava que se va a analizar la cual es de 315hz, contrario al caso del aluminio donde de los 10 modos de vibración 5 influirían fuertemente en los datos obtenidos en las capturas ya que aparte de estar presente en las bandas a analizar el comportamiento de los modos para la estructura de aluminio empiezan en el sexto modo, donde la frecuencia es de 475 Hz y hasta el décimo modo que la frecuencia es de 765 Hz, esto quiere decir que estos modos influirían de manera directa en el rango de frecuencias, que se presenta el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento.

Por este motivo se escoge la madera como el material que presenta un menor rango de frecuencias modales, que va desde los 328 Hz hasta los 449 Hz, es decir que este material presenta un mejor ajuste para la estructura. Además del bajo costos de la madera y su fácil obtención teniendo en cuenta que la estructura se manufacturo en medio de la emergencia sanitaria del año 2020.

Numero de Modo	Frecuencia Madera HZ	Frecuencia Aluminio HZ
1	35,8	61,1
2	60,2	103,2
3	71,7	123,6
4	123,9	212,4
5	133,5	228,0
6	277,9	475,5
7	328,0	556,8
8	340,0	581,2
9	402,5	683,1
10	449,3	765,3

Tabla 0. Comparación de los diez primeros modos de vibración, de los dos posibles materiales para la construcción de la estructura.

Finalmente, la estructura implementada se muestra en las Figuras 5 y 6 con las respectivas medidas, la Figura 5 corresponde a la vista lateral de la estructura y la Figura 6 a la vista frontal de la misma.

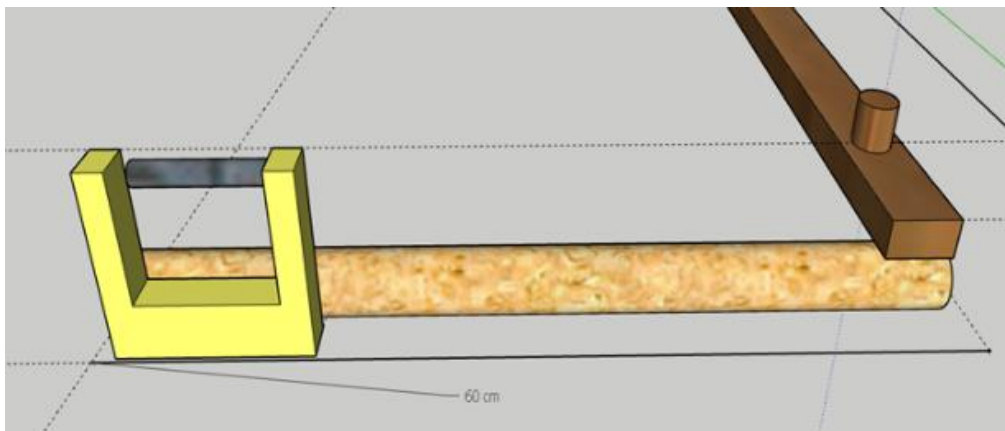


Figura 5. Medidas iniciales de la estructura (Propia, 2020).

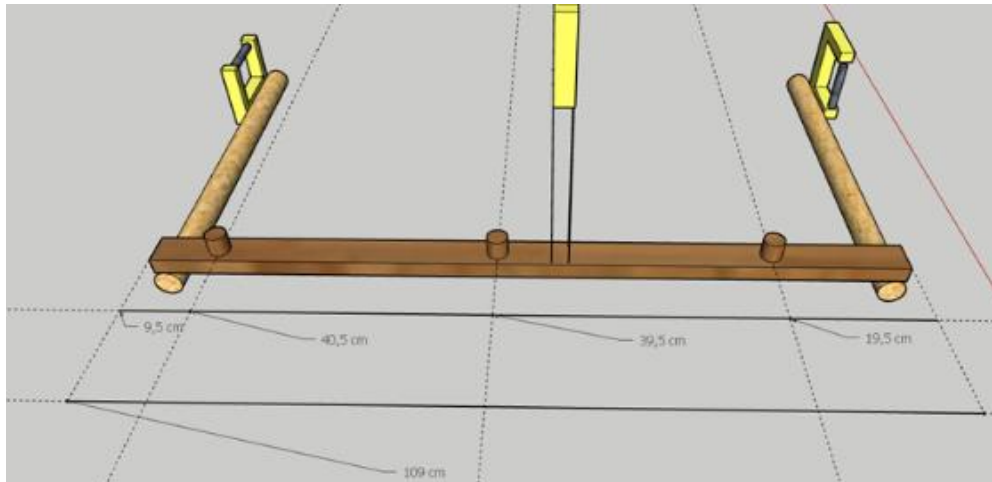


Figura 6. Estructura implementada (Propia, 2020).

Al momento de colocar la estructura al vehículo se hizo la ubicación, así como se muestra en la Figura 7, teniendo en cuenta las medidas de la estructura mostrada en la Figura 6, la cual está colocada en el vehículo de prueba, vale la pena mencionar que su chasis es similar al VE en el que se realizó la medición, grabación y captura de los datos. Para la ubicación de los micrófonos se colocaron tornillos en la tabla de madera para acoplar las piañas de los micrófonos, esta se ubica frontal a la estructura, la distancia que se tuvo en cuenta entre los tornillos de las piañas es la señalada en la Figura 5. Se tomaron estas distancias teniendo en cuenta la distancia de separación que debe existir entre la capsula del micrófono el neumático y el ángulo de inclinación respecto al suelo, así como se muestra las medidas que existen desde la capsula del micrófono hasta la neumático en la Figura 7, teniendo en cuenta las recomendaciones indicadas por la literatura, que nos indica que esta distancia mínima debe ser de 10 cm (ISO, 2016).

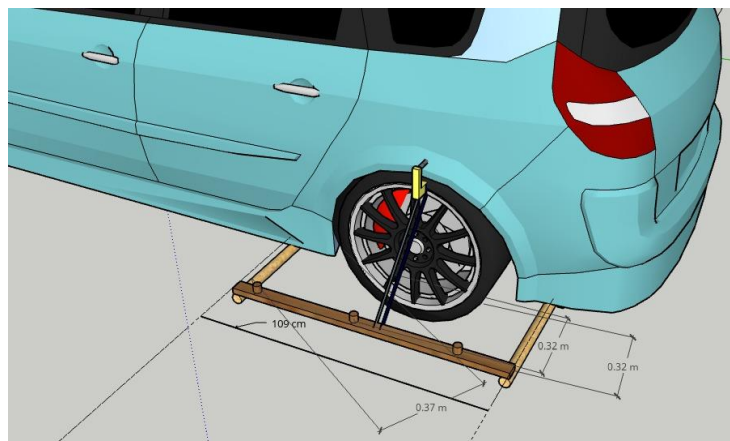
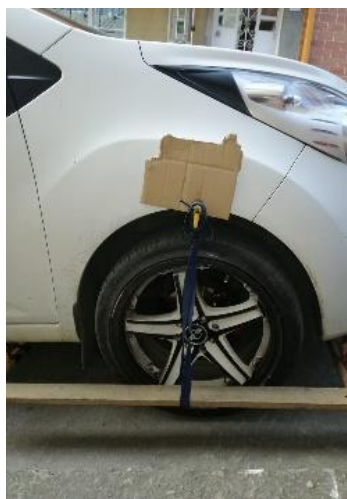


Figura 7. Vehículo inicial de prueba con la estructura implementada (Propia, 2020).

Para asegurar la baja generación de ruido con componente en medias-altas frecuencias, al momento en el que se viaja a distintas velocidades, se colocó la estructura en el vehículo usado como modelo y un vehículo más de prueba. Esto permitió optimizar el diseño obtenido. El primer vehículo fue un Renault Scenic, el cual cuenta con un rin de 15' de diámetro y el segundo vehículo fue un Chevrolet Spark GT, donde su rin era de 17'. Se hicieron recorridos por diferentes vías, así como lo podemos ver en la Figura 8, y finalmente la estructura se acopló al vehículo eléctrico BYD de modelo E6 en cual se hizo la respectiva captura del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento que se muestra en la Figura 9.



a. Vehículo Chevrolet Spark GT



b. Vehículo Renault Scenic

Figura 8. Vehículos iniciales de prueba para la estructura de prueba.

Para la selección de la ubicación final de la estructura con la cual se capturó la totalidad de las muestras se tomó como criterio el trabajo “Sistema embarcado para la clasificación de carreteras con respecto a las características acústicas de la superficie de rodadura” (Herrera & Pavón, 2014) en donde se indica que, al ubicar los micrófonos en el tren trasero del vehículo, se puede capturar la mayor cantidad de fuentes generadoras de ruido por la interfaz neumático/pavimento. Adicionalmente, en la práctica de la medición se encontró que, en la parte trasera del vehículo este contaba con una superficie (soporte agarre) en la que se facilitaba el anclaje de la estructura. En la Figura 9 se puede apreciar la ubicación final de la estructura de soporte diseñada.



Figura 9. Vehículo de prueba con la estructura implementada.

Procedimiento previo a la medición

La primera consideración que se tuvo en cuenta para proceso de medición, era que la vía por la cual se iba a tomar los datos debía ser una vía con un bajo flujo vehicular (Montoya, 2005), así como lo indica el análisis de flujo vehicular (Navarro, 2008), es decir en visitas realizadas al sitio de medición se hizo un conteo de los vehículos, que transitaban en la vía durante una hora, dicho conteo fue de 4 vehículos, tres de servicio público (taxis) y uno particular. Este conteo fue realizado posterior a la medición, pero cabe la salvedad que no existiría una variante significativa del tránsito de vehículos de un día para otro, ya que es una vía cerrada, la cual lleva a la entrada de una planta de tratamiento del acueducto de Bogotá.

El estado de la vía debía ser bueno en el sentido de que no tuviera huecos o baches, y finalmente la vía debe estar seca al momento de la medición, para que los equipos que se usaron no sufrieran ningún tipo de daño por el agua y adicionalmente la ISO 11819-2 exige que la medición se haga bajo condiciones de clima seco. Otro de los criterios para escoger la vía de la medición era que fuera lo suficientemente larga de por lo menos unos 280 m, ya que se escogieron 5 tramos continuos de 20 m para la captura de los audios, entonces si la vía no contaba con una buena distancia para que el vehículo alcanzara la velocidad requerida no se podrían haber hecho las mediciones. En la siguiente Figura 10 se muestra la vía seleccionada y en la Figura 11, por medio de la herramienta de medición que nos muestra Google Maps, se determinó que la vía tenía la distancia requerida para las mediciones.

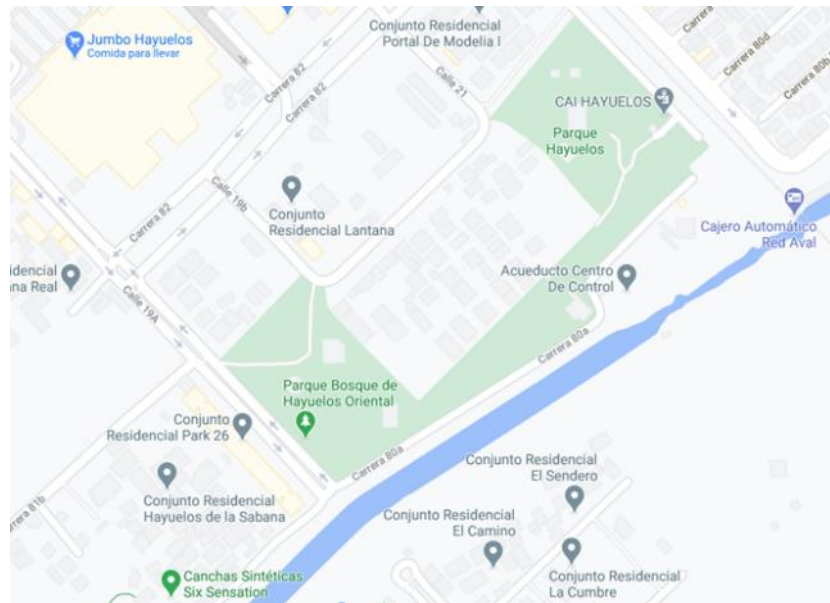


Figura 10. Mapa de la ubicación de la medición.

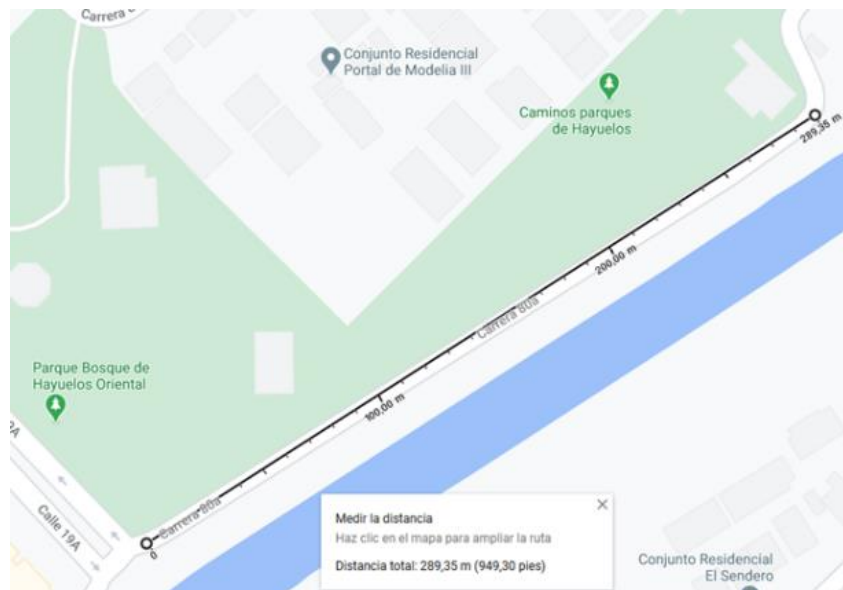
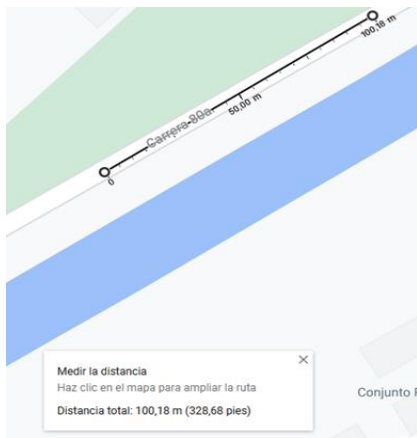


Figura 11. Tramo total en la ubicación a desarrollar la medición.

La vía está ubicada por dirección en la Carrera 80ª # 19ª – 2 hasta la 19ª – 98, se muestra el estado de la vía el día de la medición, el tramo de medición escogido fue precisamente los 100 m en la mitad de la vía, así como se muestra en la Figura 12, se tomaron estos 100 m para que el vehículo tuviera casi 100 m antes para alcanzar y mantener la velocidad requerida.



a. Tramo de medición, Google Maps



b. Tramo de medición.

Figura 12. Tramo escogido para la medición.

Para el proceso de marcación de cada tramo de 20 metros se colocaron palos en el andén lateral de la vía y así fue como se hizo la marcación de cada tramo, al momento de hacer el proceso de captura por medio de la voz en cada audio se iba registrando la marca por voz.

Procedimiento desarrollado para la medición

El registro de la medición fue desarrollado el día 24 de septiembre del año 2020, para este proceso de medición en primera instancia se debía visitar el lugar para asegurarse de que no estuviera húmeda la vía o con charcos, posterior a esto se tomó la medición de la temperatura del pavimento como dato de referencia así como es sugerido en la metodología, para ello se hizo a partir de un termómetro digital, se tomaron tres puntos de medición a lo largo de la vía, en la Figura 13, se muestra la medición de la misma en dos de los tres puntos medidos.



a. Punto de medición 1



b. Punto de medición 2

Figura 13. Medición de la temperatura, en el tramo vial de medición.

Posterior a ello se hizo el montaje de la estructura al vehículo donde se colocan los micrófonos, así como se muestra en la Figura 9, luego haciendo uso de la grabadora zoom H6 se hizo el registro total para la medición. Primero se realizó el proceso de calibración para cada uno de los tres micrófonos usando un pistófono. Para ello se grabó el tono de 1 kHz a 114 dB SPL y a 94 dB SPL, dejando los preamplificadores en un solo valor constante durante toda la medición, este valor se determinó con la ayuda de los indicadores de la grabadora y haciendo un chequeo, en Audacity para verificar que no existiera saturación en los canales con la generación del tono con mayor intensidad (114 dB SPL). Otra de las pruebas que se realizaron para verificar que no existirá saturación, fue hacer una grabación inicial con la velocidad más alta a que se iba a medir (60 km/h). Posteriormente se realizó el registro del ruido de fondo. Y luego se dio inicio a hacer las capturas correspondientes a cada una de las velocidades deseadas, iniciando con la velocidad de 5 km/h y finalizando con la velocidad de 60 km/h; haciendo pasos de 5 km/h. cada una de las velocidades se registraron en 5 tramos de carretera, cada uno de 20 m a lo largo del mismo.

Selección de muestras de audio y video

Para la verificación de la velocidad a la que se desplaza el vehículo durante la medición se hizo la grabación del tacómetro de velocidad del vehículo, de forma sincronizada con la grabación de audio que se estaba realizando con la interfaz Zoom H6, así como se muestra en la Figura 14, también se colocaron los marcadores correspondientes para cada velocidad, identificando el inicio y el final de cada uno de los tramos de carretera.

Luego de estas marcaciones se obtuvieron los fragmentos de video por cada tramo de 20 m y para todas las velocidades obtenidas, en el formato .mov, luego de ello por medio del software VLC se importaron los fragmentos obtenidos de video, para luego exportar todos los frames de cada uno de los fragmentos y hacer un promedio ponderado de la velocidad de desplazamiento en cada uno de los tramos, esto para evidenciar la velocidad real a la que se viajó.

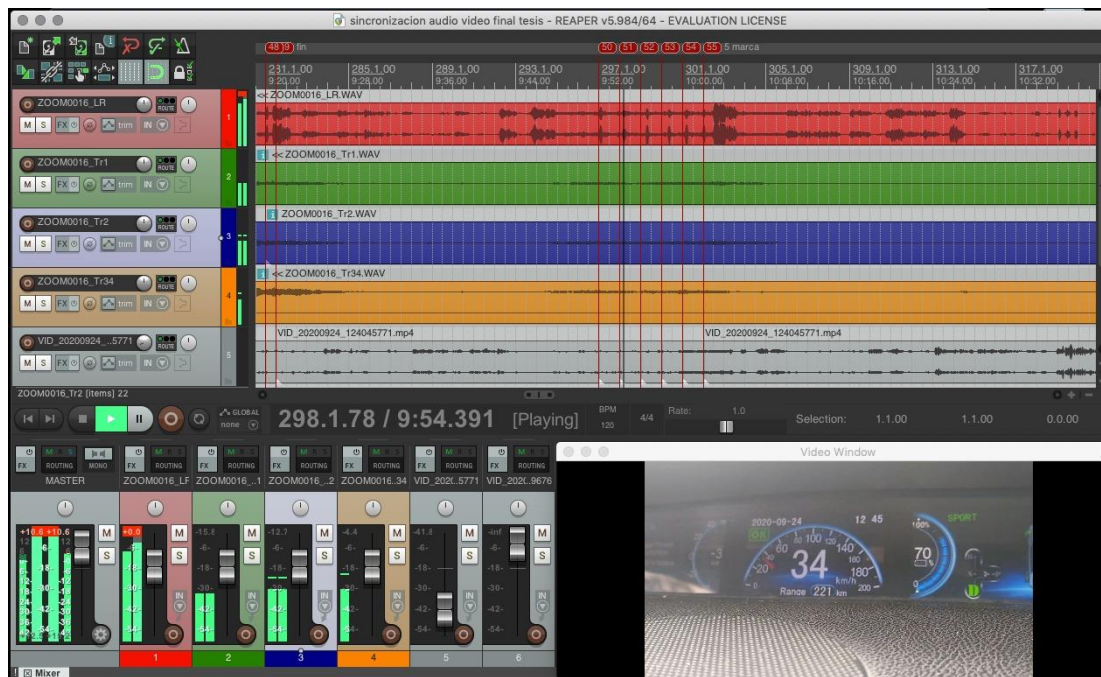


Figura 14. Sincronización de audio y video en Reaper.

Para ver con claridad el proceso de la totalidad de los frames, se presenta la Figura 15, en donde se tiene todos los frames del tramo 4 de carretera y se viajaba a 60 km/h, en total son 22 frames en todo el segmento, a diferencia de las velocidades más bajas que son muchos más frames, como por ejemplo cuando se viaja a 5 km/h se tienen entre 188 y 235, claramente en cuanto se avanza en las velocidades se van disminuyendo la cantidad de muestras, se verifica la velocidades a la que viajó el vehículo en ese instante de tiempo y luego se hace el promedio ponderado para determinar la velocidad real de desplazamiento en el fragmento de carretera.



Figura 15. Frames del tramo 4, para la velocidad de 60 km/h.

Para ver de forma completa, las velocidades a las que se viajó en cada uno de los tramos y en cada una de las velocidades a las que se quería medir, se presenta la Tabla 1, donde se tiene la velocidad deseada, que está entre los 5 km/h y los 60 km/h variando de 5 en 5 km/h, la velocidad real a la que se viajó en cada uno de los 5 tramos capturados, esta velocidad real claramente es obtenía a partir de los frames trabajados anteriormente con el promedio ponderado, posterior a ello se calcula la desviación estándar entre los 5 tramos de carretera, para obtener la variación entre ellos.

Se determina que para las velocidades de medición deseadas, se cumple con lo sugerido en la norma ISO 11819 (ISO, 2016), que indica que la variación de la velocidad por cada uno de los 5 tramos medidos no puede tener una diferencia entre tramo y tramo de 5 km/h. Sin embargo, el tramo 1 para la velocidad de 10 km/h está al límite de esta consideración respecto a los otros 4 tramos de esta velocidad de desplazamiento. Así mismo al realizar el análisis estadístico con los datos obtenidos para la velocidad se llega a que la desviación estándar es inferior a los 2,70 km/h, esto indica que los datos obtenidos son confiables al compararlos con la velocidad deseada.

Velocidad deseada [km/h]	Tramo 1 [km/h]	Tramo 2 [km/h]	Tramo 3 [km/h]	Tramo 4 [km/h]	Tramo 5 [km/h]	Des. Estan [km/h]
5	5,04	5,07	5,11	6,86	6,79	0,96
10	6,00	11,00	11,00	11,71	11,04	2,34
15	17,97	17,00	16,07	15,01	14,00	1,57
20	20,64	21,00	21,00	20,12	19,75	0,56
25	26,60	26,48	25,35	25,00	24,12	1,04
30	27,35	30,10	31,53	32,36	30,83	1,92
35	35,83	32,61	31,82	36,29	36,59	2,24
40	42,33	41,93	41,00	41,00	40,81	0,67
45	44,63	45,93	47,00	48,06	45,67	1,31
50	50,48	48,07	48,06	53,00	53,03	2,48
55	57,67	58,00	56,71	55,83	53,40	1,84
60	56,46	57,48	62,53	61,00	57,00	2,70

Tabla 1. Velocidades promedio de desplazamiento, por cada uno de los 5 tramos.

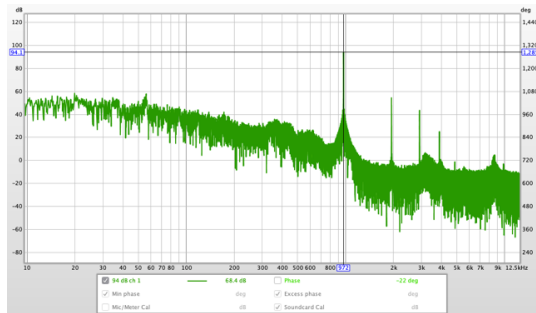
En segunda instancia, se hizo una selección de las muestras de audio, teniendo en cuenta que estas estén libres de eventos sonoros no deseados, la cual en primera instancia se hizo de manera perceptual, en la que se identificó en cada una de las muestras, si existían eventos tales como el ruido generado por la maquinaria de una construcción aledaña a la vía donde se tomó la captura de los datos. Posterior a esta escucha, se verificó en las muestras que se presentaba este evento, si este ruido afectaba el rango de interés con la ayuda del software REW y la herramienta espectrograma, comprobando que, entre el rango de 315 Hz hasta 5.000 Hz, donde se nota que este ruido no afecta tal rango, así como se puede apreciar en la Figura 24.

Para los audios de calibración en el micrófono 1 se puede ver en el cuadro de análisis por SPL en la Figura 16, la respuesta en frecuencia del micrófono con un pico en 1 kHz de niveles de presión de 94 dB SPL y 114 dB SPL, esto obedece al proceso de calibración.

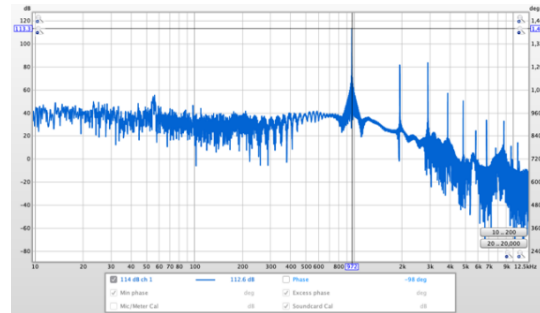
En el cuadro de análisis Waterfall se puede ver el comportamiento del tono puro para el canal 1 en la Figura 16, la duración de la muestra para el tono de 94 dB SPL es de 9 segundos y de 6 segundos para el tono de 114 dB SPL, esta es una medición de ruido de tráfico rodado, la herramienta Waterfall que es una gráfica en 3D del comportamiento de la señal en frecuencia, amplitud y tiempo, solo es útil en esta parte del análisis de las muestras.

Usando la herramienta espectrograma se ve el tono puro de 114 dB SPL y su duración en el tiempo, por el contrario, para la calibración a 94 dB SPL se ve ruido en baja frecuencia, y aunque se puede

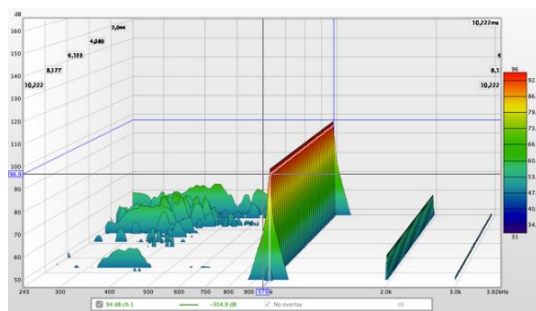
apreciar claramente el tono en 1 kHz también se presenta este ruido en los otros dos micrófonos lo cual se puede asemejar a ruido eléctrico.



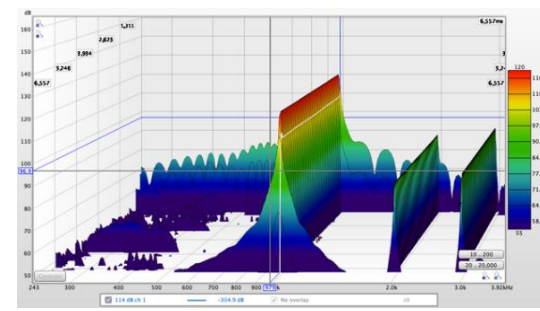
Calibración ch 1 - 94 dB SPL



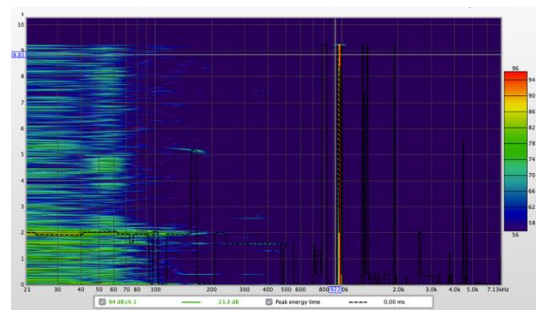
Calibración ch 1 - 114 dB SPL



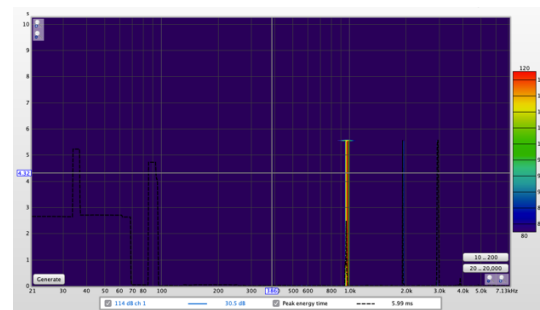
Calibración ch 1 - 94 dB Waterfall



Calibración ch 1 - 114 dB Waterfall



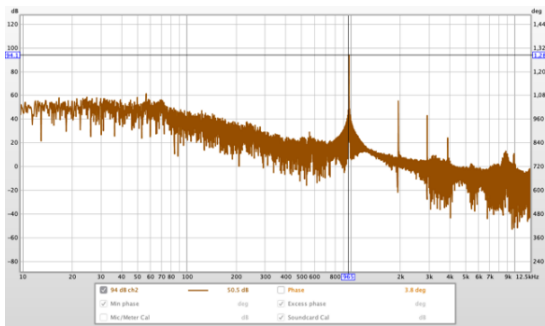
Calibración ch 1 - 94 dB Espectrograma



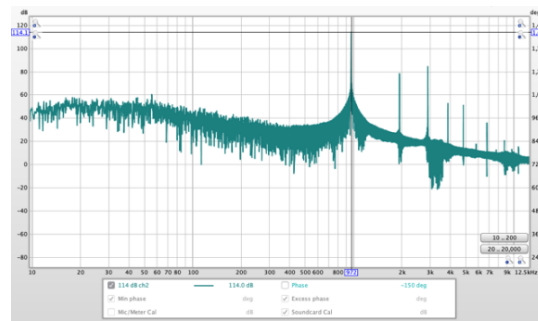
Calibración ch 1 - 114 dB Espectrograma

Figura 16. Calibración en REW para el canal 1.

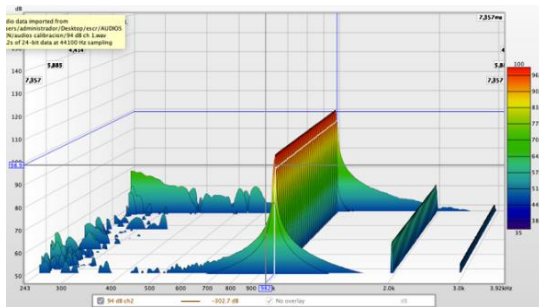
Para los audios de calibración en los micrófonos 2 y 3 se puede ver en el cuadro de análisis por SPL en las Figuras 17 y 18, la respuesta en frecuencia del micrófono con un pico en 1 kHz de niveles de presión de 94 dB SPL y 114 dB SPL, de la misma manera para el micrófono 1.



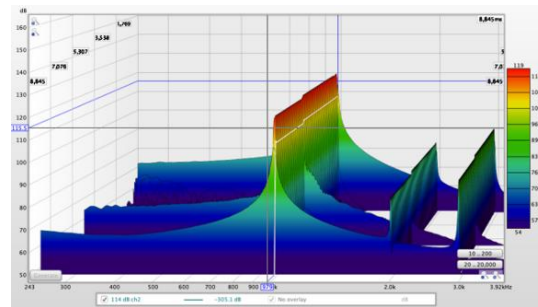
Calibración ch 2 - 94 dB SPL



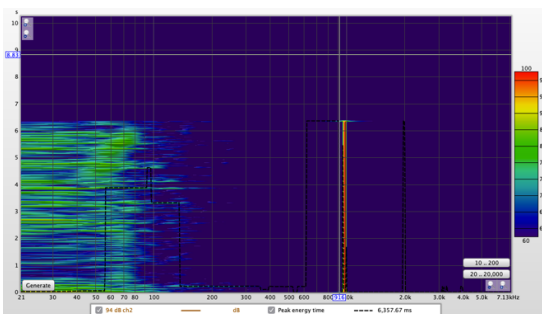
Calibración ch 2 - 114 dB SPL



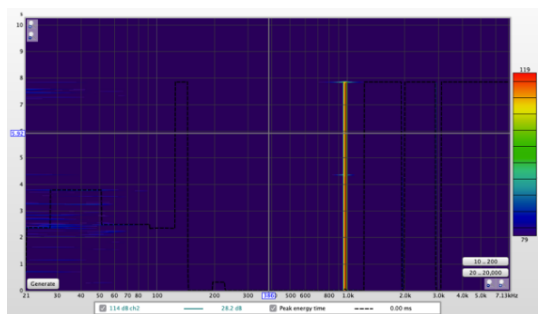
Calibración ch 2 - 94 dB Waterfall



Calibración ch 2 - 114 dB Waterfall.



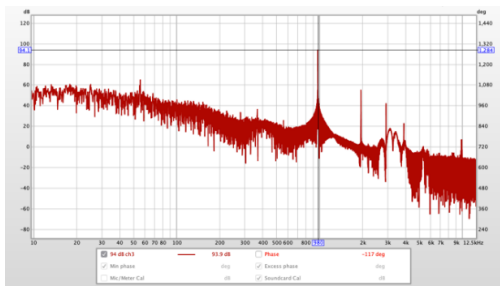
Calibración ch 2- 94 dB Espectrograma



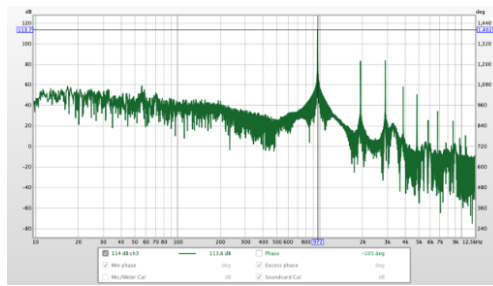
Calibración ch 2 - 114 dB Espectrograma

Figura 17. Calibración en REW para el canal 2.

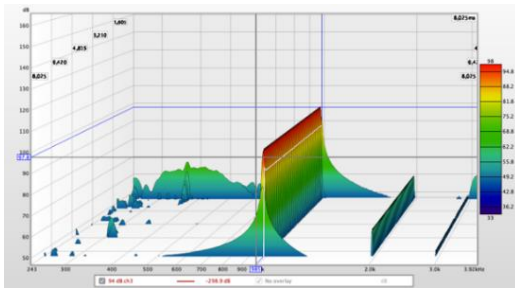
De la misma manera el análisis por Waterfall que es una gráfica en 3D del comportamiento de la señal en frecuencia, amplitud y tiempo, solo es útil esta herramienta del REW en esta parte del análisis de las muestras. Además, también se presenta el ruido eléctrico en los registros del tono de 94 dB SPL.



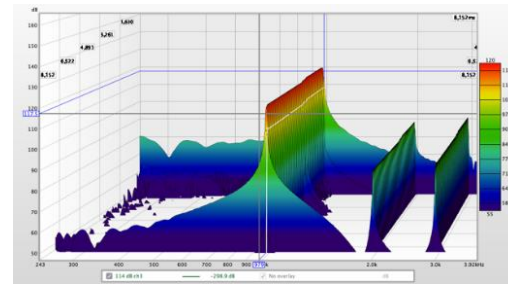
Calibración ch 3 - 94 dB SPL



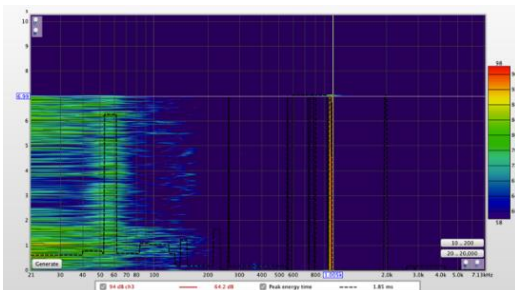
Calibración ch 3 - 114 dB SPL.



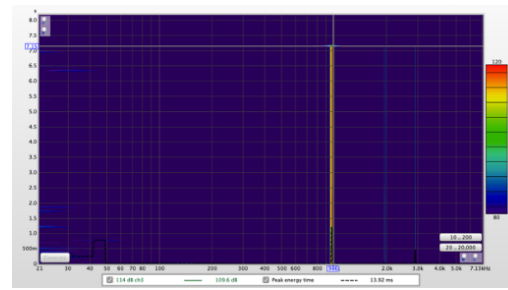
Calibración ch 3 - 94 dB Waterfall.



Calibración ch 3 - 114 dB Waterfall.



Calibración ch 3 - 94 dB Espectrograma.

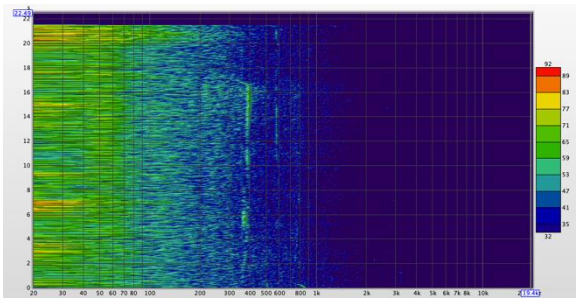


Calibración ch 3 - 114 dB Espectrograma.

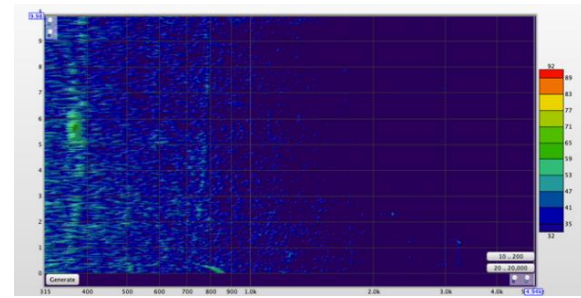
Figura 18. Calibración en REW para el canal 3.

Para analizar el ruido de fondo durante la captura de las muestras, se utiliza el espectrograma para cada uno de los micrófonos. Al realizar un análisis para el micrófono 1 se puede apreciar que al iniciar el proceso de medición existía un ruido de fondo muy similar al que se presentó al finalizar la captura. Sin embargo, al realizar un análisis en el ancho de banda entre 315 Hz a 5.000 Hz, como lo sugiere la norma, se puede evidenciar que el ruido de fondo al finalizar el proceso de captura fue mayor a la inicial, con un incremento visible entre las bandas de 315 Hz y 400 Hz como se aprecia en la Figura 19.

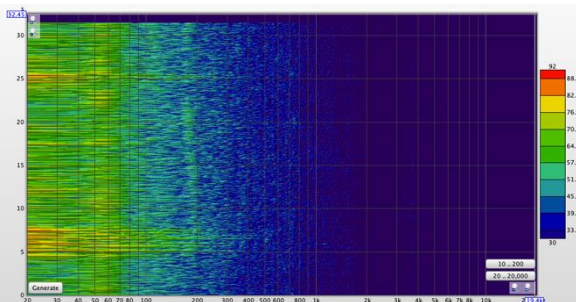
Este incremento en el ruido de fondo al realizar una escucha de las capturas realizadas se puede entender por el aumento del tráfico en la vía en la que se estuvo realizando esta medición.



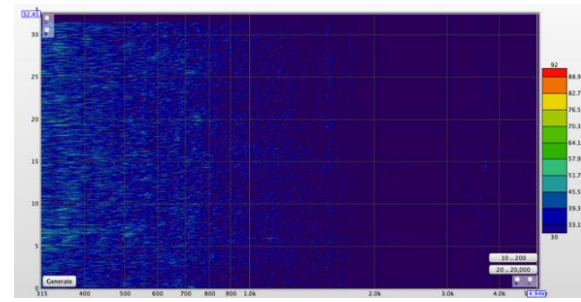
Ruido de fondo final ch 1 full rango (20 – 20.000 Hz)



Ruido de fondo final ch 1 rango (315 – 5000 Hz)



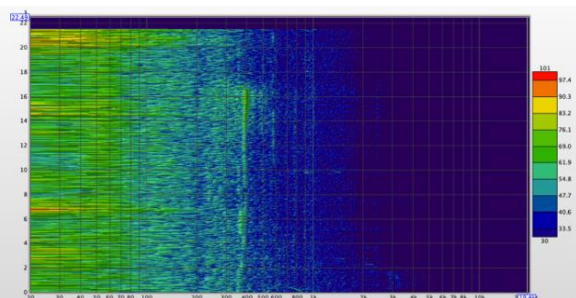
Ruido de fondo inicial ch 1 full rango (20 – 20.000 Hz)



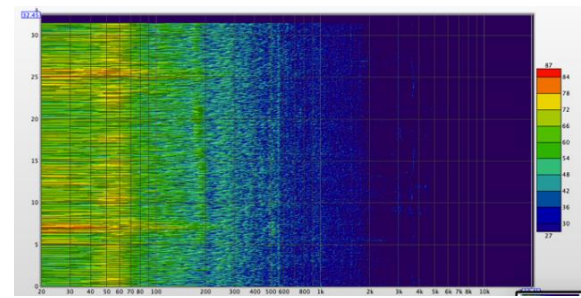
Ruido de fondo inicial ch 1 rango (315 - 5000 Hz)

Figura 19. Ruido de fondo canal 1.

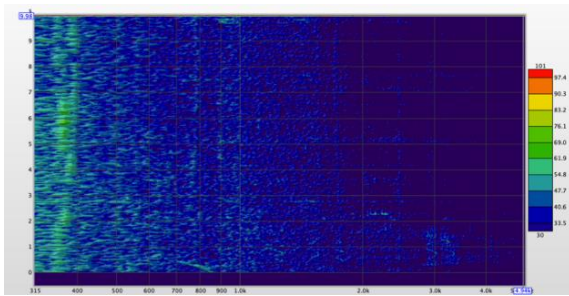
Para los micrófonos 2 y 3 se puede ver un incremento del nivel de presión sonora en las bandas de 315 Hz y 400 Hz (ver Figuras 20 y 21) el cual corresponde al registro del ruido de fondo capturado al finalizar la medición. Esto puede ser debido a la ubicación de los mismos en la estructura lateral a la llanta, ya que el micrófono 2 se ubicó con la capsula apuntando a el neumático, y la capsula del micrófono 3 estaba apuntando a la parte delantera de la llanta.



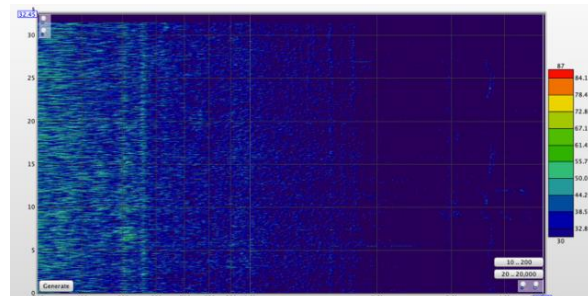
Ruido de fondo final ch2 full rango (20 – 20.000 Hz)



Ruido de fondo inicial ch 2 full rango (20 – 20.000 Hz)

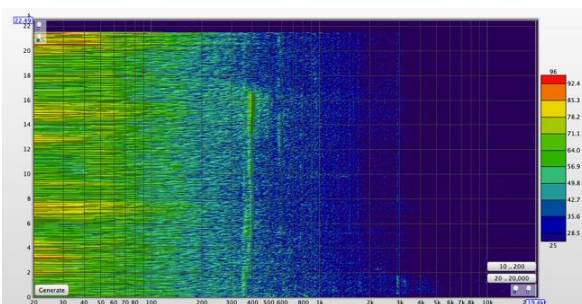


Ruido de fondo final ch 2 entre (315 – 5000 Hz)

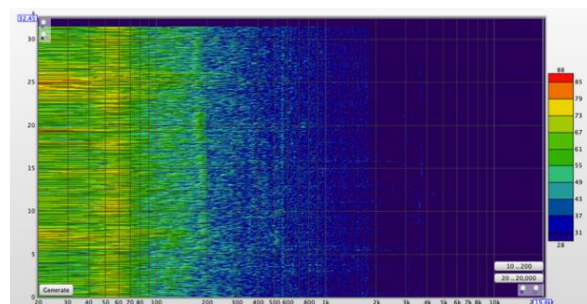


Ruido de fondo inicial ch 2 entre (315 - 5000 Hz)

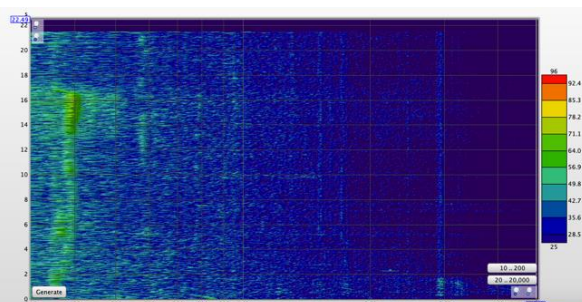
Figura 20. Ruido de fondo canal 2.



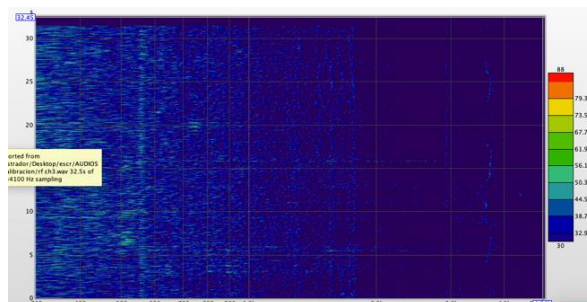
Ruido de fondo final ch 3 full rango (20 – 20.000 Hz)



Ruido de fondo inicial ch 3 full rango (20 – 20.000 Hz)



Ruido de fondo final ch 3 entre (315 – 5000 Hz)



Ruido de fondo inicial ch 3 entre (315 - 5000 Hz)

Figura 21. Ruido de fondo canal 2.

Ahora, para obtener los fragmentos de audio correspondientes a cada uno de los tramos de 20 m, que fueron identificados inicialmente por medio de las marcas de audio, se colocaron las marcas de inicio y fin de los tramos por medio de marcadores en Reaper. Finalmente, se exportó de forma individual cada una de las muestras que representan los 5 tramos obtenidos; este proceso es

aplicado en cada uno de los micrófonos. Ahora bien, para verificar que las muestras exportadas de Reaper se hace un segundo análisis en Audacity, así como se muestra en la Figura 22.

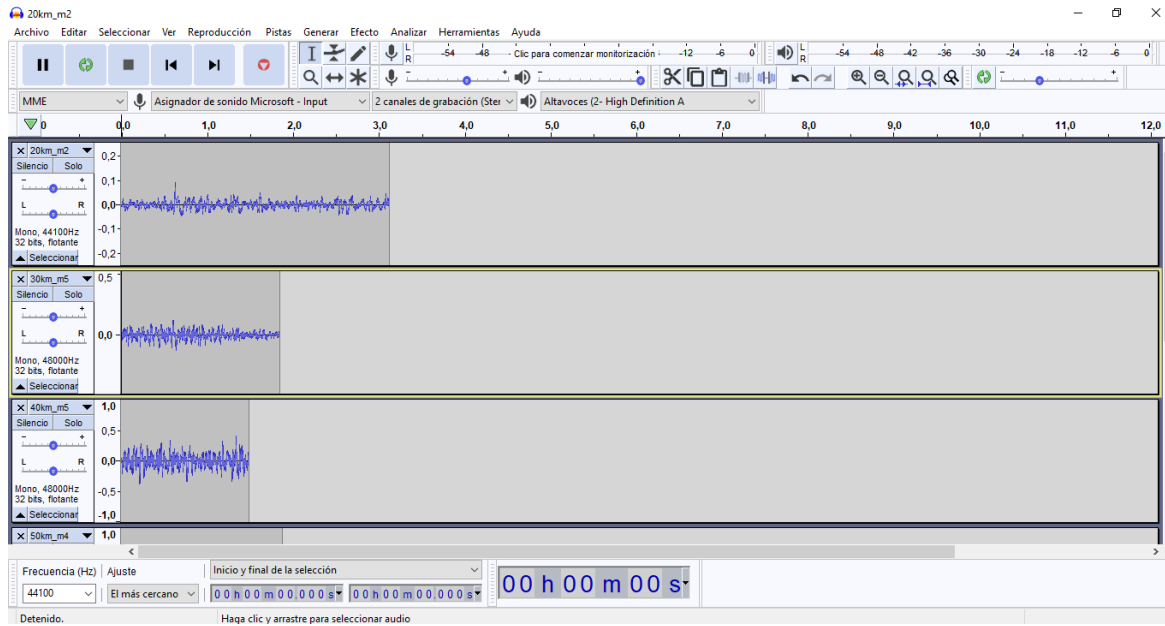


Figura 22. Muestras de audio en Audacity.

Posteriormente se hace una verificación perceptual auditiva a cada una de las muestras para identificar en cuales existen posibles eventos sonoros no deseados, para luego comprobar la existencia de estos haciendo uso del software Room EQ Wizard (REW). De esta forma se pudo verificar que las muestras de audio están libres de eventos no deseados, en el rango de frecuencias de interés.

De manera perceptual en las muestras de audio por velocidad, inicialmente en las muestras de velocidad baja, es decir 5 km/h, se presenta un silbido intermitente a lo largo de la muestra, esto es ocasionado por el frenado que debe hacer el vehículo para mantener esta velocidad deseada, ya que como es un vehículo de transmisión automática su torque y su impulso es inmediato y la única forma de mantener o controlar esta velocidad es frenando el vehículo. Por lo tanto, este ruido es ocasionado por el roce entre las pastillas de freno del vehículo y el disco del mismo. En la Figura 23 en la parte a se presenta el espectrograma de la muestra de audio 4 a una velocidad de 5 km/h y la sección que está encerrada en un rectángulo rojo, es la que nos permite definir de forma visual este fenómeno que se presenta, mientras que en la parte b de la figura se muestra el mismo fenómeno, pero con una mejor resolución o un rango de acotación de frecuencias más corto entre

los 315 y 10.000 Hz. Igualmente, se puede observar que se presenta en forma de puntos el sonido del roce de las pastillas de freno con el disco.

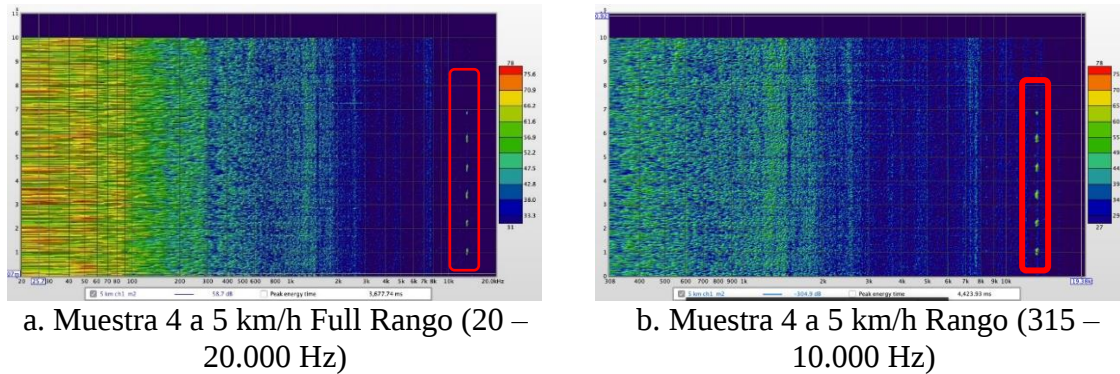


Figura 23. Muestra 4 a 5 km/h del espectrograma.

Así como se perciben los eventos sonoros no deseados, también se puede apreciar ruido en baja frecuencia, como se presenta en la Figura 24 en la parte a, que contempla un rango de frecuencias entre los 20 y 20.000 Hz. Allí existe una concentración de un nivel de presión sonora de más de 84,8 dB SPL, entre los 20 y 80 Hz que pueden ser el aporte de ruido generado por una construcción que había al momento de hacer la medición a unos 500 m de distancia del punto de medición. No obstante, cabe aclarar que la parte b de la Figura 24, tiene un comportamiento totalmente uniforme en cuanto a que no se percibe ningún tipo de evento sonoro no deseado, así como se veía anteriormente en la muestra de 5 km/h (Figura 23). Otra de las consideraciones que se tienen en cuenta es que existe un decaimiento en función de la frecuencia del nivel de presión sonora, ya que si se observa ambas partes de la Figura 24 se puede ver como la intensidad en la gama de colores empieza a degradarse a medida que aumenta la frecuencia (vale la pena subrayar que los espectrogramas cuentan con la escala de NPS calibrado).

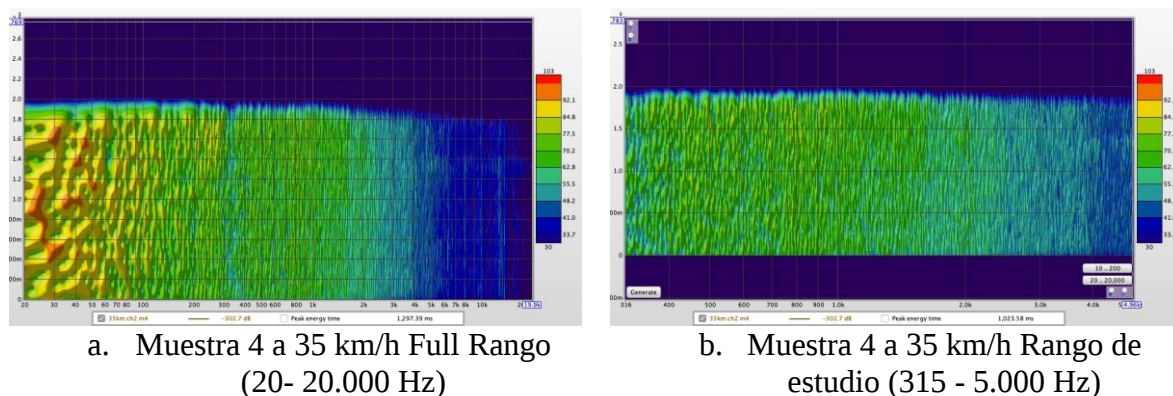
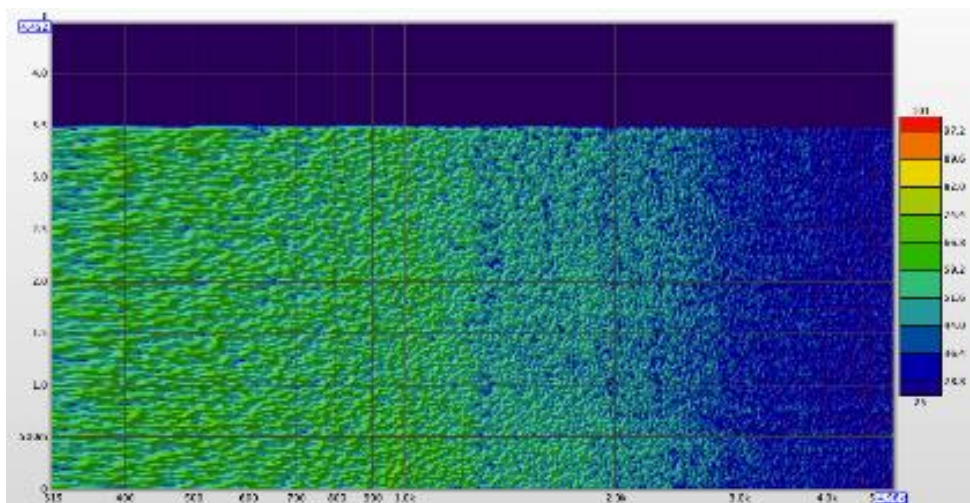
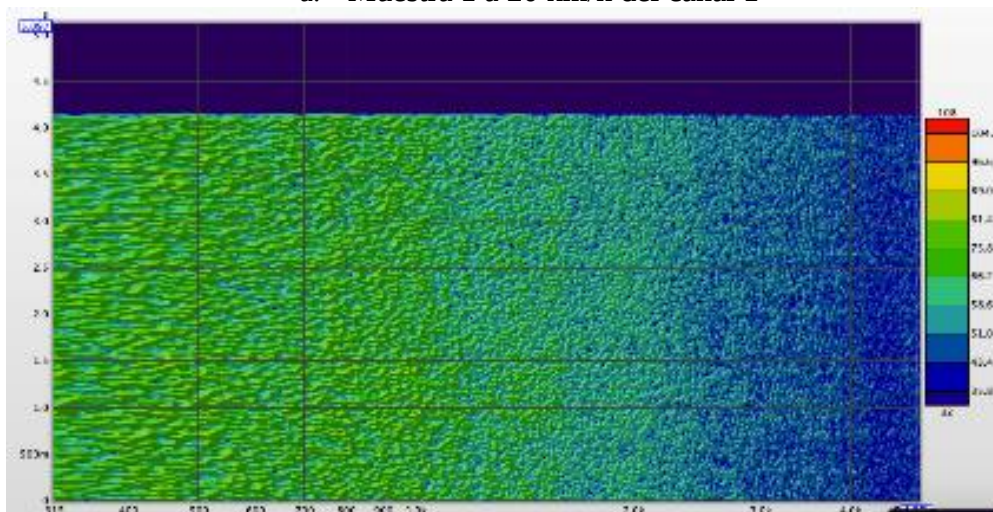


Figura 24. Análisis espectral de las muestras libres de eventos sonoros.

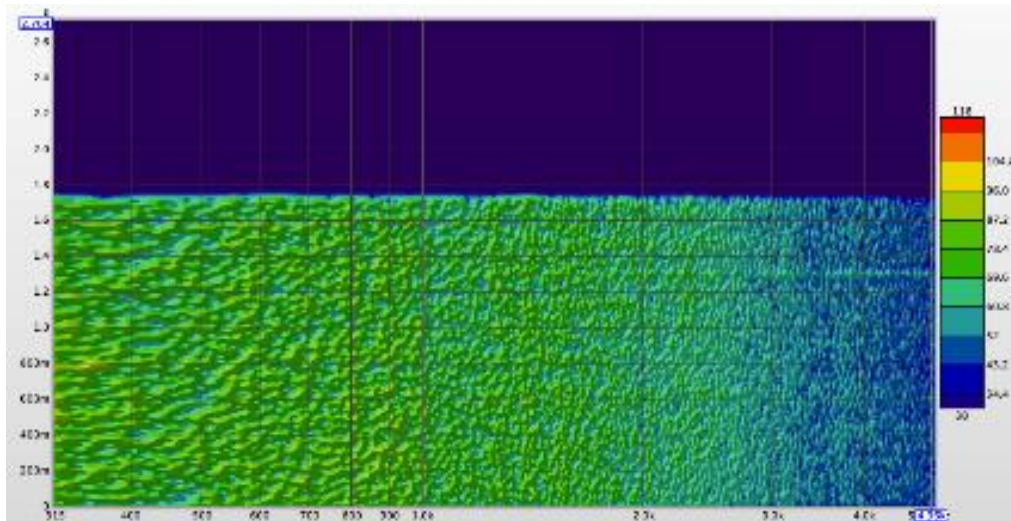
El procedimiento de verificación en la totalidad de las muestras para los canales 1, 2 y 3 se hizo de la misma forma, haciendo un análisis entre las frecuencias de 315 Hz y los 5.000 Hz, las diferencias que se presenta entre las velocidades es el nivel de presión sonora. Sin embargo, si se observa la Figura 25, se puede apreciar que se tornan con el mismo comportamiento en función del tiempo y en función de la frecuencia, asimismo no existen eventos notorios como silbidos de fuentes externas, o chasquidos de piedras tal como se presentaba en la Figura 22, a pesar de que se están tomando velocidades distintas en los tres canales trabajados.



a. Muestra 1 a 20 km/h del canal 1



b. Muestra 1 a 30 km/h del canal 2



c. Muestra 1 a 40 km/h del canal 3

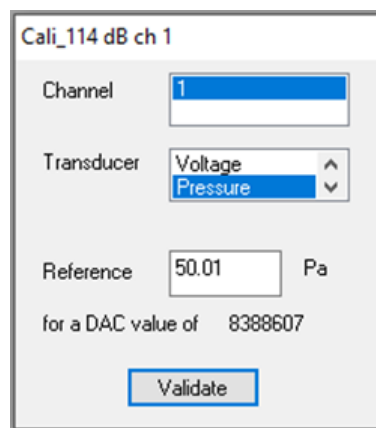
Figura 25. Muestras de audio en diferentes tramos capturados y a diferentes velocidades obtenidas en el rango de frecuencia de análisis, libres de eventos no deseados, para cada uno de los tres canales.

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Calibración

Inicialmente se hace el proceso de calibración del sistema, este proceso consiste en grabar un tono puro de 1 kHz a 94 dB SPL y posteriormente el mismo tono pero con un nivel de 114 dB SPL, los cuales son generados desde un pistófono, este proceso se lleva a cabo en cada uno de los micrófonos de medición y ajustando la ganancia de manera que no exista saturación del audio; posterior a ello se verifica cada audio de cada micrófono en el DAW Audacity para asegurar que no exista dicha saturación digital. Para definir luego el factor de calibración usado en el software dBFA-Suite se debe importar los audios de 94 dB SPL y 114 dB SPL del mismo canal al software e indicar un valor de referencia equivalente en pascales, así como se muestra en la Figura 26, hasta que el nivel equivalente para ambos tonos coincida de acuerdo con el tono de referencia correspondiente.

A continuación, en la Tabla 2 se muestra los factores correspondientes para cada uno de los micrófonos 1, 2 y 3. También se muestra la desviación estándar entre los tres micrófonos para los dos niveles de presión sonora de referencia. Con base en lo anterior, se encontró que para el nivel de 94 dB SPL existe una desviación de 1,73 dB SPL, debido a que la muestra tomada por el micrófono 1 registró un nivel inferior de 3 dB SPL respecto a los micrófonos 2 y 3, mientras que para el nivel de 114 dB SPL la desviación es cero, debido a que los tres micrófonos presentan el mismo nivel. Estas diferencias pueden ser atribuidas al deterioro de cada uno de ellos causado por el uso, así como variaciones en la respuesta en frecuencia propia de cada micrófono. Debido a esto fue necesario obtener un factor de calibración para cada micrófono.



Cali_114 dB ch 1

Channel: 1

Transducer: Voltage / Pressure

Reference: 50.01 Pa

for a DAC value of 8388607

Validate

Figura 26. Factor de calibración en el software dBFA-Suite para el micrófono 1.

Canal	Factor de Calibración	Tono 1 kHz a 94 dB	Tono 1 kHz a 114 dB
1	50,01	90,8	114
2	60,85	93,8	114
3	113,65	93,8	114
Desviación Estándar		1,73	0,00

Tabla 2. Indicadores de Calibración.

Ruido de fondo

Para la toma del ruido de fondo se capturaron tres fragmentos de 10 segundos en cada uno de los micrófonos, al inicio de la medición y al final de la medición. Luego se hizo un promedio energético contemplando las 6 muestras tomadas por cada canal y posteriormente se promedia el ruido de fondo total que entrega los tres micrófonos. Para el proceso de obtener los niveles equivalentes por frecuencia para cada una de las muestras, se importaron al software de análisis acústico dBFA-Suite post, cada uno de los audios con sus respectivos factores de calibración para cada canal. Posterior a ello se configuró el software de post procesamiento en banda de tercio de octava y en el rango de frecuencias de 20 hz y 20.000 hz, así como se muestra en la Figura 27. Luego de la configuración se obtiene un archivo, el cual se puede exportar a formato .TXT con todos los niveles por banda de tercio de octava, para posteriormente importarlos a una hoja de Excel.

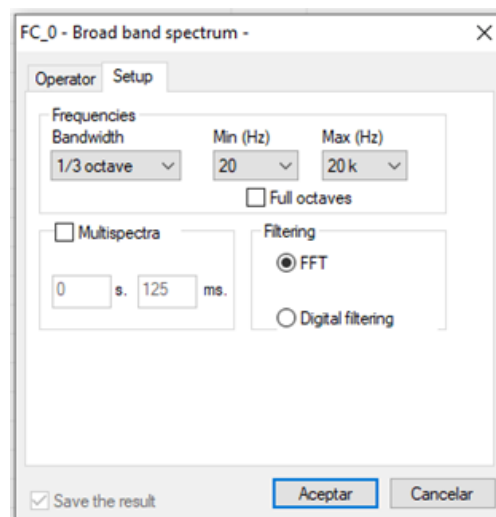


Figura 27. Configuración del post procesamiento de las muestras de audio.

Luego, con el fin de obtener el nivel continuo equivalente lineal y ponderado A se hace uso de uno de los indicadores que nos presta el software dBFA-Suite, que se puede configurar como se muestra en la Figura 28, la parte a de la figura nos muestra la configuración con la ponderación y la parte b sin ningún tipo de ponderación, en este tipo de configuración también nos permite hallar los niveles máximos, mínimos, pico de la muestra de audio entre otros.

Este proceso se realizó con la totalidad de las muestras de audio, es decir por cada velocidad se tomaron 5 tramos de 20 m, y en total fueron 12 velocidades iniciando a 5 [km/h] y llegando a alcanzar una velocidad de 60 [km/h], haciendo cambios de 5 [km/h] entre las velocidades. Este proceso se aplicó para las 60 muestras de audio y para los canales 1, 2 y 3.

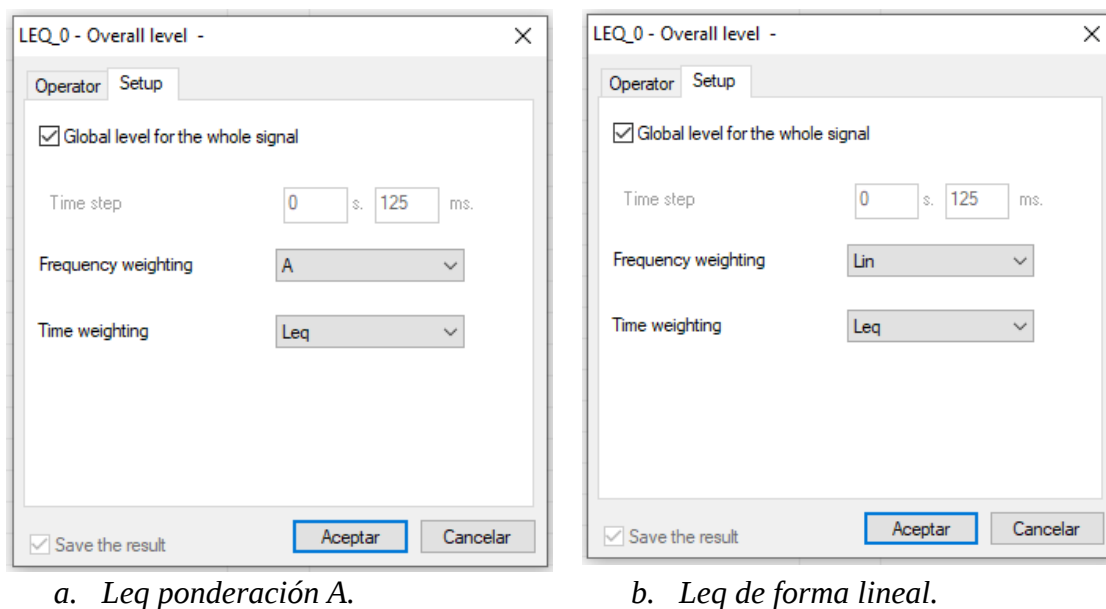


Figura 28. Configuración, para obtener el nivel equivalente requerido.

A continuación, en la Figura 29 se presenta el comportamiento del ruido de fondo en función de la frecuencia para cada uno de los micrófonos, de forma lineal y con ponderación A. En el comportamiento lineal del ruido de fondo se presenta un decaimiento constante desde 63 Hz a medida que aumenta la frecuencia, mientras que cuando se analiza este mismo ruido, pero ponderado A presenta la atenuación en frecuencias bajas (como podría esperarse), mientras que en frecuencias medias y altas tiene aproximadamente el mismo comportamiento que presentaba linealmente el ruido sin la ponderación. Durante la medición, cabe aclarar que existía una

construcción a más o menos unos 300 m del lugar de la medición, por lo tanto, esta es una de las razones por las que el nivel equivalente de ruido de fondo es alto sin aplicar la ponderación. Cuando se hace el análisis de forma perceptual (ver sección 2 desarrollo ingenieril) se identificaron fuentes como, la construcción y una sirena de una ambulancia, la cual pasaba por una de las vías alternas al lugar donde se desarrollaba el proceso de medición, también existía un flujo de personas y taxistas que acudían esta zona para descansar o tomar su almuerzo. Adicionalmente, cuando se comparó el nivel equivalente total para el ruido de fondo inicial y el final, se presenta un comportamiento similar en ambas mediciones.

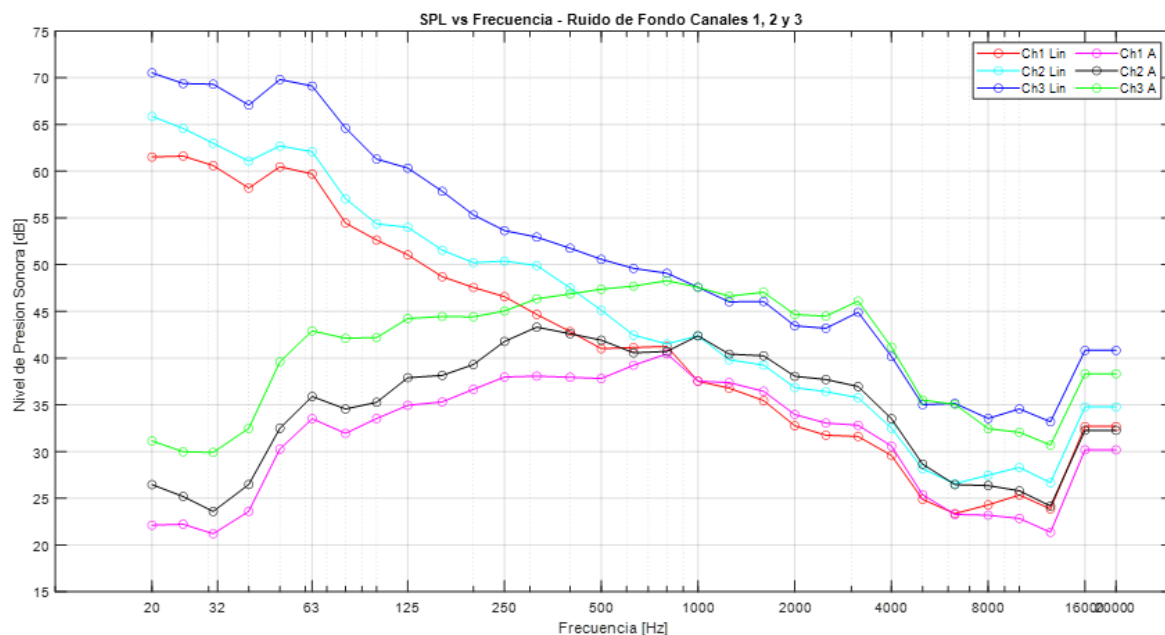


Figura 29. Niveles equivalentes de Ruido de fondo en función de la frecuencia, canales 1, 2 y 3 lineal y ponderado.

Para comprender de una manera eficiente se realizó un análisis estadístico para el ruido de fondo en cada uno de los canales, donde se obtuvieron datos como los máximos y mínimos presentados en todo el espectro de frecuencia y también se verificó la desviación estándar entre los tres canales para los niveles equivalentes lineales y ponderados A. en la Tabla 3 se puede apreciar que los mínimos son presentados en las frecuencias centrales de bandas superior a 5.000 Hz, y la desviación estándar para los niveles equivalentes entre los canales no es mayor a los 3 dB, tal como se presenta en la Tabla 4.

Se presenta el nivel equivalente lineal y ponderado A, obtenido de las 6 muestras tomadas de ruido de fondo por cada uno de los canales en la siguiente Tabla,

Canal	Banda Max [Hz]	Max [dB]	Banda Min [Hz]	Min [dB]
1	20	60,58	6300	24,05
2	20	68,27	6300	26,99
3	20	66,34	5000	29,09

Tabla 3. Niveles de presión sonora máximos y mínimos ruido de fondo.

Canal	Leq Lin [dB]	Leq A [dB]
1	68,81	50,60
2	71,80	55,40
3	77,69	55,80
Des. Estándar	4,51	2,89

Tabla 4. Niveles equivalentes lineales y ponderados.

Análisis de tramos por frecuencia

Durante este proceso se llevó a cabo un análisis en frecuencia luego de hacer el promedio energético con las 5 muestras de cada una de las velocidades, (5 km/h, 10 km/h, 15 km/h, 20 km/h, 25 km/h, 30 km/h, 35 km/h, 40 km/h, 45 km/h, 50 km/h, 55 km/h, 60 km/h) para posterior a ello definir el rango de frecuencia en que se analiza el comportamiento del ruido de rodadura generado por la interfaz neumático/pavimento en el vehículo eléctrico considerado. Adicionalmente, estos datos fueron comparados con información previamente de la literatura y la normativa guía ISO 11819-2 (ISO, 2016). Para definir la frecuencia de corte inferior se evidencia en la Figura 30, que existe un decaimiento constante desde la banda de tercio de octava de 50 Hz hasta la banda de 315 Hz. En esta última banda empieza a existir un comportamiento ascendente y luego se mantiene semejando el comportamiento de un filtro pasa banda, para posterior a ello presentar nuevamente un decaimiento hasta la banda de corte superior que se presenta en 5000 Hz. Este rango de frecuencia entre 315 Hz y 5000 Hz es evidenciado con mayor claridad en velocidades bajas, mientras que, en velocidades altas, existe un corrimiento en algunos casos a la siguiente banda, o a las dos bandas superiores siguientes.

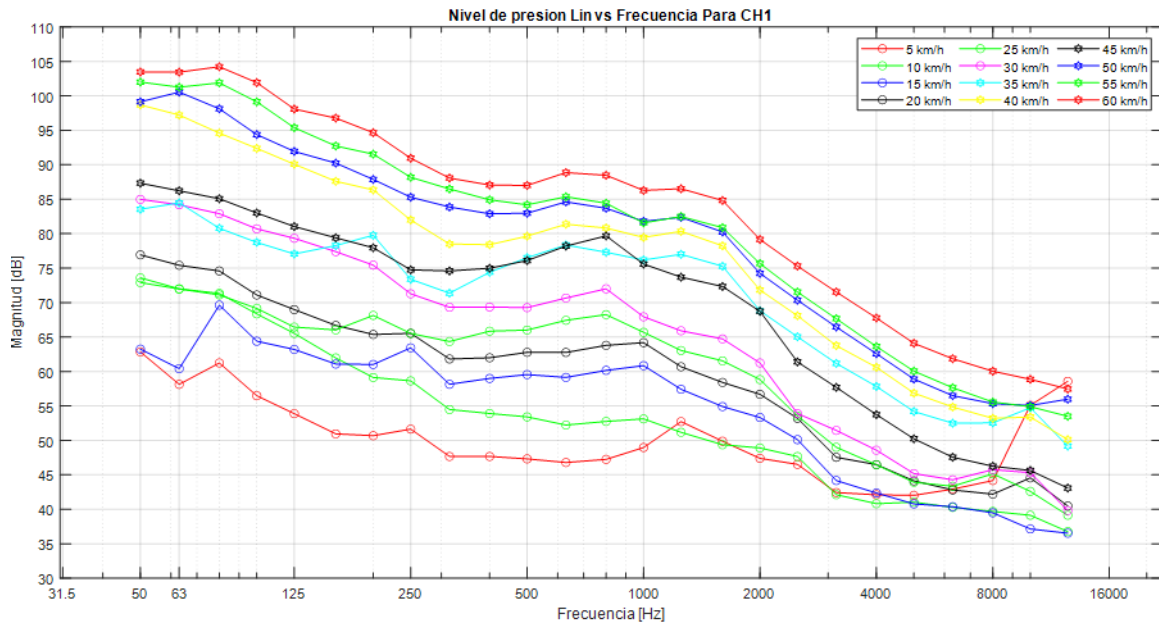


Figura 30. Niveles de presión sonora por velocidades en el canal 1.

Como punto de partida se aplica la ponderación A las muestras anteriores, y posterior a ello se hace el promedio energético con las 5 muestras, así como se presenta en la Figura 31. Lo más importante de esta figura es que se evidencia el mismo efecto de un filtro pasa banda entre las bandas de 315 Hz y 5000 Hz. Al detallar todo el espectro en este rango de frecuencias es donde existe la mayor concentración de energía. Ahora bien, sí se observa la Tabla 5, se presenta la suma energética en frecuencia full rango que comprende desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz, teniendo en cuenta que este valor es similar al nivel equivalente que se haya por medio del dBFA-Suite, el rango entre los 315 Hz y 5000 Hz que es el rango definido anteriormente. De acuerdo con lo anterior se llega a la conclusión que para el promedio energético en frecuencia para los dos rangos, es similar de acuerdo a cada una de las velocidades. Este procedimiento de la sumatoria energética por frecuencia se lleva a cabo de acuerdo con Ecuación 2.

Todo el procedimiento presentado anteriormente corresponde a los datos obtenidos con el micrófono 1. De igual forma, se llevó a cabo el mismo ejercicio con el micrófono 2 y 3, los cuales presentan el mismo comportamiento, de igual manera, se presentan las respectivas graficas lineal y ponderado A en la Figura 31.

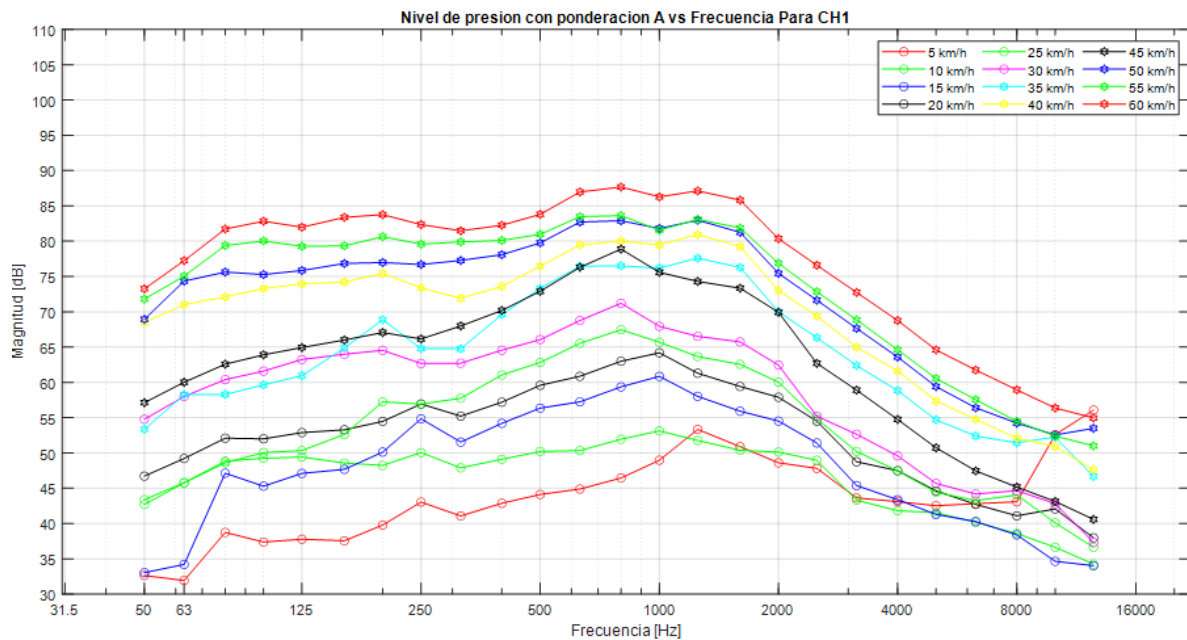


Figura 31 Niveles depresión sonora por banda ponderada A para Canal 1.

Los niveles de presión sonora en el espectro lineal que se presentan en la Figura 30, para las bandas entre los 50 Hz y 250 Hz, varían entre los 60 dB SPL y los 105 dB SPL, de acuerdo a la velocidad; sin embargo cuando se compara los niveles de presión sonora entre las bandas de 315 Hz y 5.000 Hz varían entre los 45 dB SPL y 89 dB SPL, y al considerar la Figura 31 para este mismo rango de frecuencia los niveles oscilan entre los 40 dB SPL y 88 dB SPL, mientras que los niveles del rango entre los 50 Hz y los 250 Hz tienen una variación de 32 dB SPL a 89 dB SPL. Esto quiere decir que, claramente existe una componente de ruido por vibraciones, pero que este ruido no hace un aporte significativo en el rango de interés que se encuentra entre los 315 Hz y los 5.000 Hz, ya que la variación que existe de niveles de presión sonora tanto lineal como ponderada, tiene una diferencia de 2 dB SPL.

De acuerdo con lo indicado en la normativa ISO 11819, se verificó la relación señal ruido para las muestras del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento en la columna 4 de la Tabla 5. Allí se presenta la diferencia que existe, entre la suma energética obtenida entre el rango de frecuencias de estudio y el nivel de ruido de fondo, esta diferencia no puede ser menor que 10 dB. Se puede ver que incluso cuando el vehículo viaja a la velocidad más baja (5 km/h) es superado el nivel de ruido de fondo, es decir, que desde velocidades bajas de desplazamiento ya existe un ruido característico generado por la interfaz neumático/pavimento.

De igual forma se presenta un nivel superior cuando el vehículo viaja a 10 km/h, el nivel por encima del nivel de ruido de fondo, es apenas 2 dB SPL, de los 10 dB SPL mínimos que sugiere la literatura consultada, y si se observa la velocidad mas alta que fue registrada la de 60 km/h, se tiene que el nivel de presión sonora sin el nivel del ruido de fondo es de 47 dB SPL, los cuales son la diferencia mas alta. En conclusión, a medida que aumenta la velocidad, también aumenta el nivel de ruido generado por la interfaz neumático/pavimento.

Sumatoria energética por bandas de frecuencia ponderadas A Canal 1			
Vel. [km/h]	Full Rango (20-20000 Hz)	Rango de estudio (315-5000 kHz)	S/N Respecto a la norma
RF	49,5	47,9	
5	61,6	58,7	10,8
10	62,6	60,8	12,9
15	67,5	67,0	19,1
20	71,0	70,4	22,5
25	73,8	73,5	25,6
30	77,7	76,7	28,8
35	84,8	84,5	36,6
40	88,9	87,8	39,9
45	84,4	84,0	36,1
50	91,6	90,5	42,7
55	93,0	91,3	43,4
60	96,4	95,0	47,1

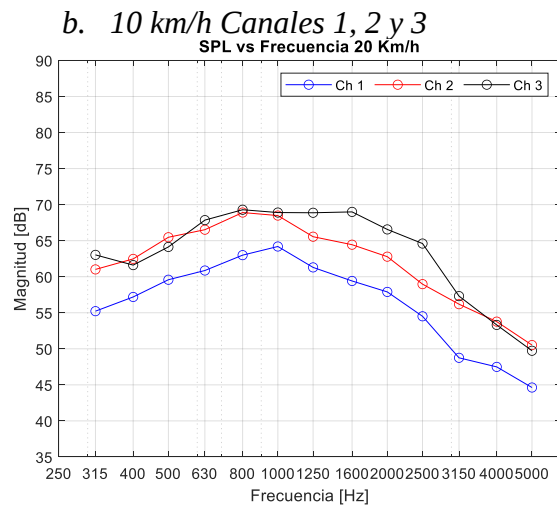
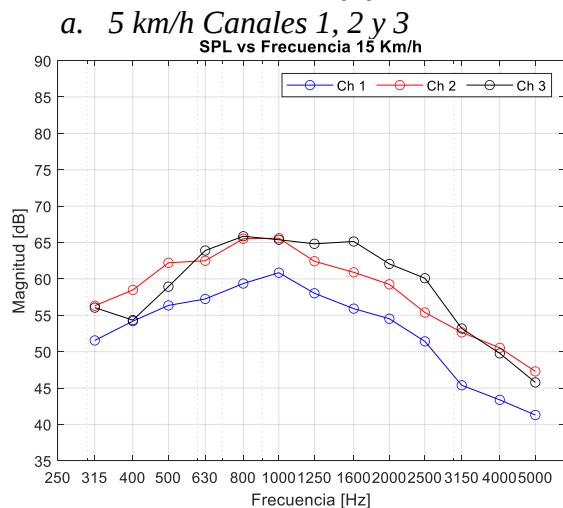
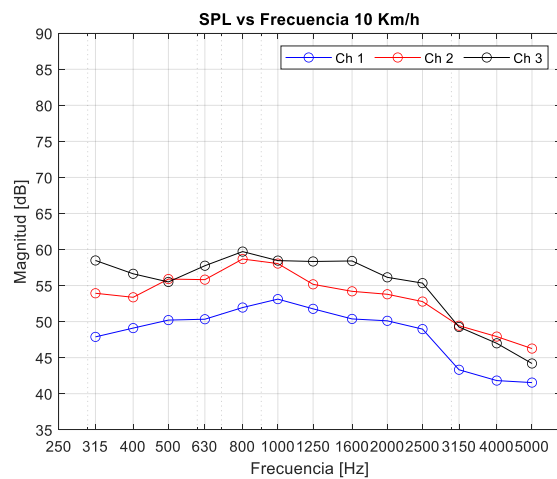
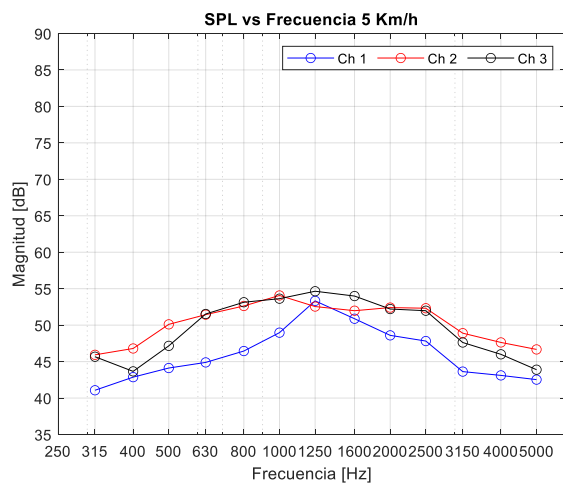
Tabla 5. Sumatoria energética en los rangos y verificación del nivel respecto al ruido de fondo.

A continuación, en la Figura 32 se tiene la representación gráfica por cada una de las velocidades y los tres micrófonos en función de la frecuencia y el nivel de presión sonora. Se puede observar que cuando se analiza el comportamiento del ruido para velocidades superiores a 20 km/h, la componente de ruido en función de la frecuencia se comporta de forma ascendente hasta llegar a su punto máximo en la banda de 1250 Hz, y a partir de esta banda se empieza a comportar de forma descendente hasta llegar a la banda de 5.000 Hz.

Para velocidades superiores a 30 km/h se puede ver que la componente de ruido en baja frecuencia tiene un mayor nivel de presión sonora a diferencia de las frecuencias medias altas, en donde el

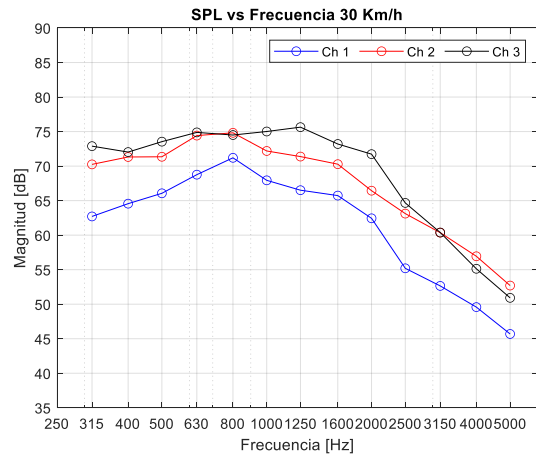
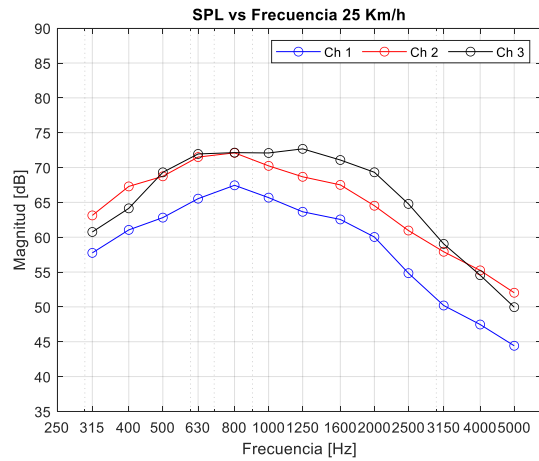
decaimiento puede ser de 30 dB entre la banda de 1250 Hz hasta la banda de 5000 Hz, este comportamiento confirma el por qué se analiza hasta la banda de 5.000 Hz, debido a que ha decaído más de 30 dB SPL con respecto a las bandas con mayor energía.

Existe un fenómeno de desplazamiento en la banda de frecuencia con el nivel de presión sonora máximo, y es debido al ruido producido por el mecanismo de generación que se asimila al fenómeno de martilleo, o el impacto de la rueda con el pavimento cada vez que gira (Campillo-Davo et al., 2019), en donde se demostró en análisis previos que el ruido del impacto, empieza a generarse sobre los 400 Hz e inicia un desplazamiento de forma ascendente en función de la frecuencia, esta variable depende de la velocidad de desplazamiento del vehículo eléctrico, es decir si la velocidad aumenta la banda de frecuencia que tiene la mayor cantidad de energía se desplaza hacia la frecuencia superior respecto a la anterior.



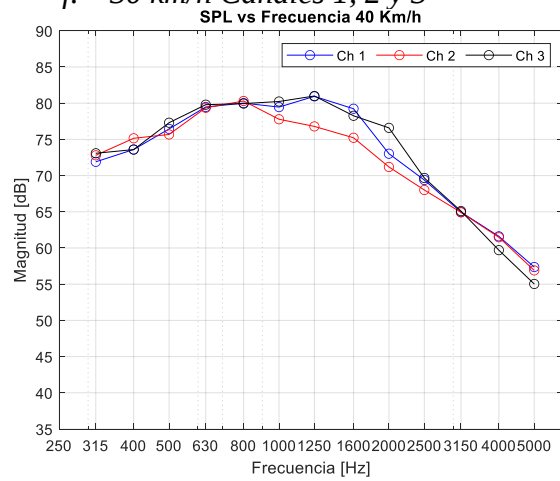
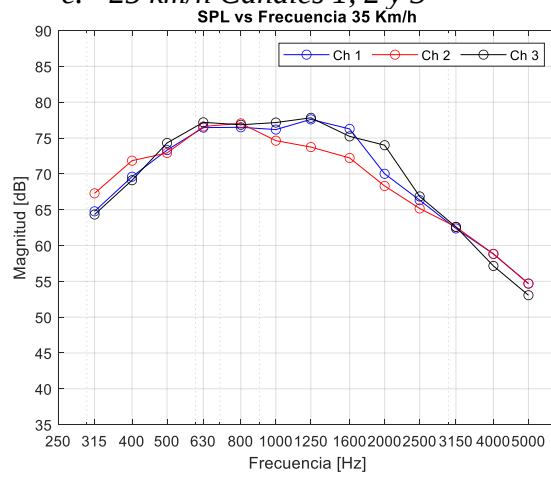
c. 15 km/h Canales 1, 2 y 3

d. 20 km/h Canales 1, 2 y 3



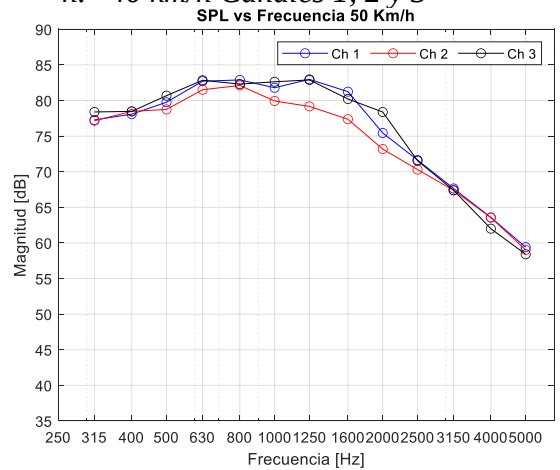
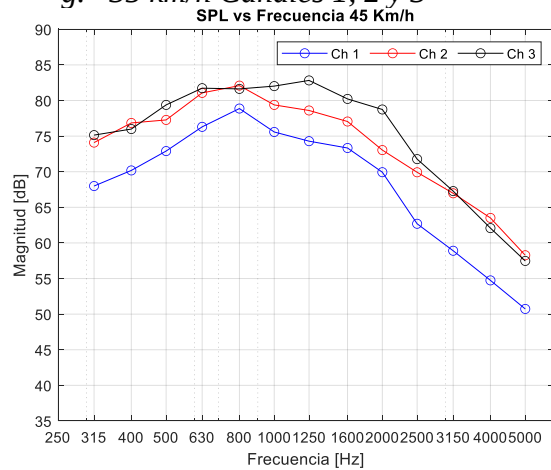
e. 25 km/h Canales 1, 2 y 3

f. 30 km/h Canales 1, 2 y 3



g. 35 km/h Canales 1, 2 y 3

h. 40 km/h Canales 1, 2 y 3



i. 45 km/h Canales 1, 2 y 3

j. 50 km/h Canales 1, 2 y 3

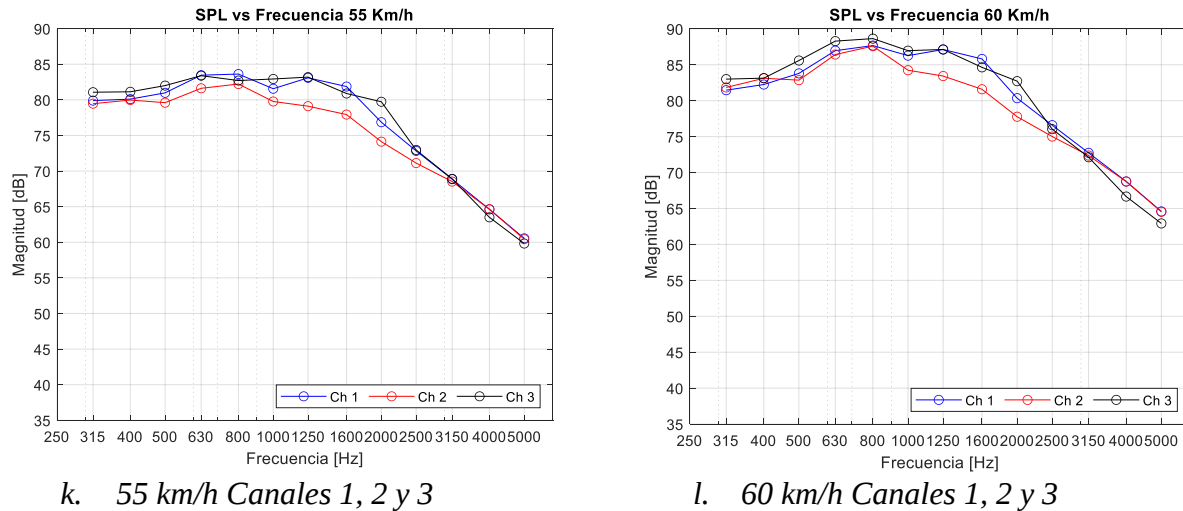


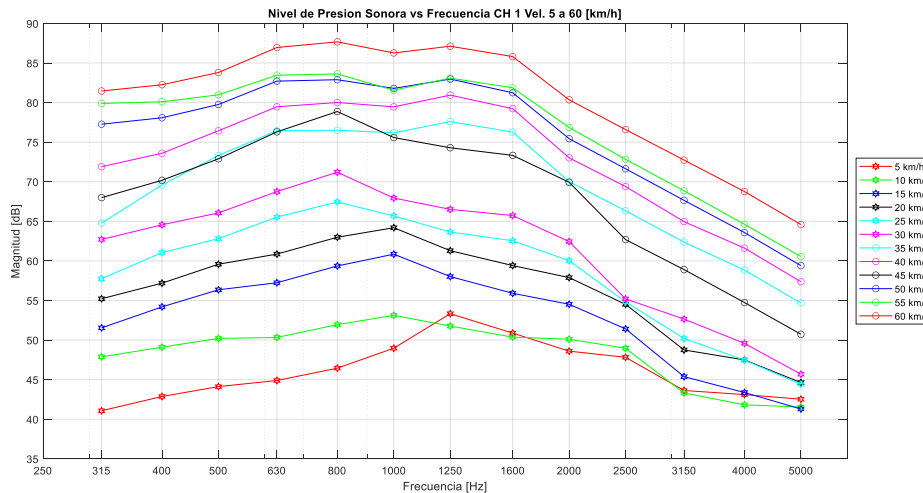
Figura 32. Niveles de presión sonora en las bandas analizadas y todas las velocidades.

El micrófono uno, que para la medición fue ubicado en la posición posterior del neumático, es decir en la parte de atrás del vehículo, es el que recibe el mayor contenido de energía en la interfaz neumático/pavimento, ya que en esta posición como se ha demostrado en estudios previos (Herrera & Pavón, 2014), es donde se encuentran la mayor cantidad de mecanismos generadores de ruido, como por ejemplo el de efecto Horn o corneta, el efecto de chasquido, y todos los ruidos generados por la adherencia en la interfaz neumático/pavimento. Ahora bien, el comportamiento del micrófono tres, el cual está ubicado en la parte delantera del neumático, es el micrófono que captura menos mecanismo de generación de ruido, el principal mecanismo de generación de ruido, que se ubica en esta posición, es el de impacto entre el neumático y el pavimento.

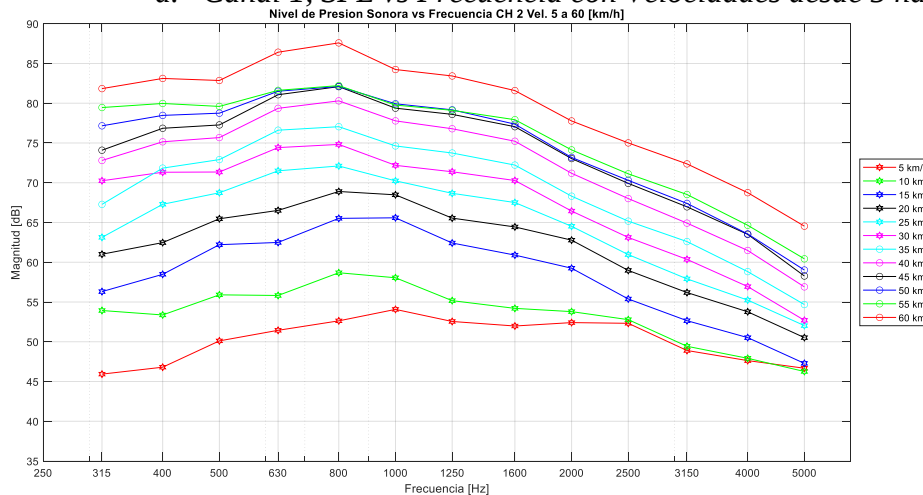
Finalmente se analiza la posición del micrófono 2, este es ubicado en el centro del neumático, con una separación de 10 cm y una angulación respecto al suelo de 45° C, en la captura de audio que hace este micrófono, se encuentran los mecanismos de generación de ruido producidos por la adherencia entre el neumático y el pavimento, este análisis es llevado a cabo respecto a la Figura 33.

Cuando se hace el análisis en función de la frecuencia para cada uno de los canales, es claro que los mecanismos de generación de ruido son capturados en las tres posiciones diferentes de micrófono, pero esto no quiere decir que en todos los canales o posiciones se capturen la totalidad de los mecanismos y debido a este, es que existe una variación de niveles de precisión sonora de aproximadamente 3 o 2 dB SPL entre los canales. También es importante mencionar que los niveles máximos de cada micrófono no se presentan en la misma banda de frecuencia, en el caso del

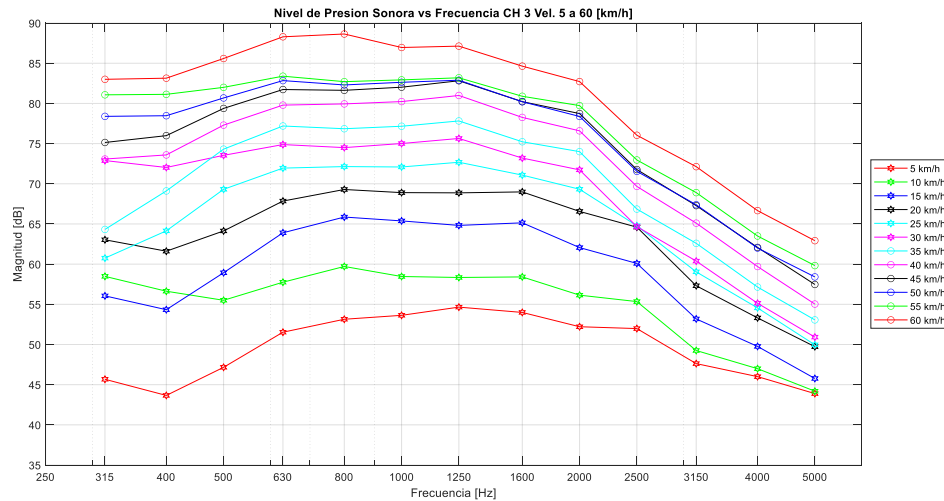
micrófono tres se puede decir que el mayor contenido energético se presenta en la banda de 2.000 Hz, pero para el micrófono uno que es el que captura más mecanismos de generación de ruido, excluyendo el impacto, la frecuencia en donde se encuentra el mayor contenido energético es 1.600 Hz. Finalmente, para el micrófono dos la banda de frecuencia que presenta mayor contenido energético es la banda de 1.250 Hz, posiblemente es debido al amortiguamiento que se presentan, luego del impacto entre el neumático y el pavimento, ocasionado por el aire contenido dentro del neumático.



a. Canal 1, SPL vs Frecuencia con Velocidades desde 5 hasta 60 km/h.



b. Canal 2, SPL vs Frecuencia con Velocidades desde 5 hasta 60 km/h



c. Canal 3, SPL vs Frecuencia con Velocidades desde 5 hasta 60 km/h

Figura 33 Graficas canal 1, 2 y 3 del promedio energético de las 5 muestras por velocidad.

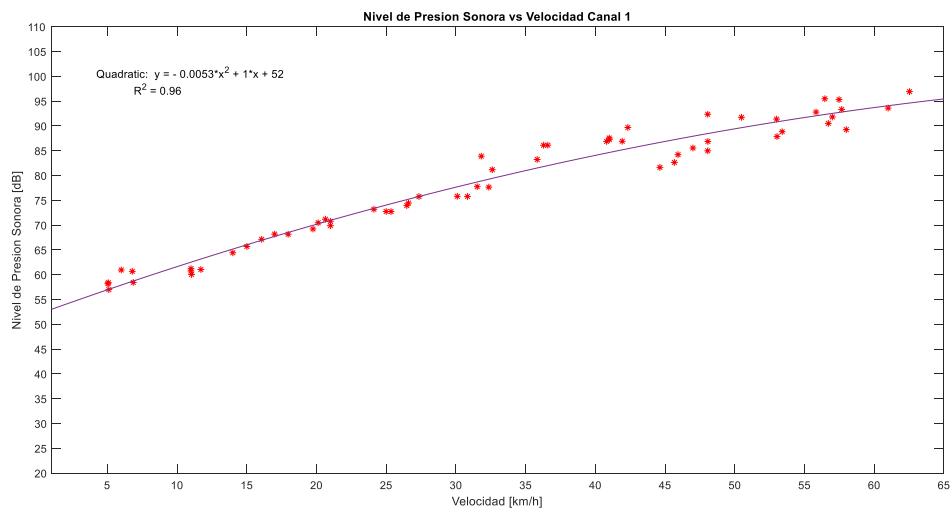
Análisis estadístico de las líneas de tendencia en el comportamiento del ruido

Ahora se presenta el análisis y determinación, de las líneas de tendencia para el comportamiento del ruido de rodadura en función de la velocidad. Este proceso se determina a partir del análisis que se puede hacer por medio de la desviación estándar, entre los tres canales y haciendo la comparación con respecto a las líneas de tendencia que se pueden calcular por medio de la herramienta de MatLab llamada Basic Fitting, la cual permite obtener una aproximación de los datos y entrega la regresión lineal de los mismos y el factor R. En la Tabla 6 se presentan las líneas de tendencia que mejor se ajusta al comportamiento del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento para un vehículo eléctrico en las velocidades analizadas, es el polinomio cuadrático. Aunque el polinomio del noveno o décimo grado se percibe, como el mejor ajuste, no es escogido debido a la complejidad de la ecuación ya que la ecuación del polinomio menor presenta una desviación similar.

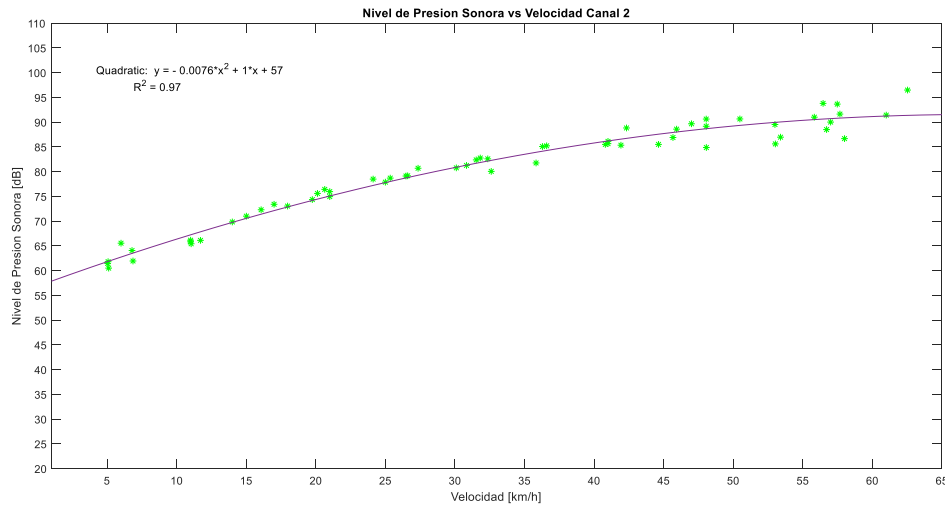
	Índice R ² Líneas de Tendencia en MatLab			
	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Des. Estándar
Lineal	0,95	0,92	0,93	0,0153
Cuadrática	0,96	0,97	0,97	0,0058
Cubica	0,96	0,97	0,98	0,0100
Polinomio 4	0,97	0,97	0,98	0,0058
Polinomio 5	0,97	0,97	0,98	0,0058
Polinomio 6	0,97	0,97	0,98	0,0058
Polinomio 7	0,97	0,97	0,98	0,0058
Polinomio 8	0,97	0,97	0,98	0,0058
Polinomio 9	0,98	0,98	0,98	0,0000
Polinomio 10	0,98	0,98	0,98	0,0000

Tabla 6. Líneas de tendencia, aproximadas en la gráfica nivel de presión sonora vs velocidad.

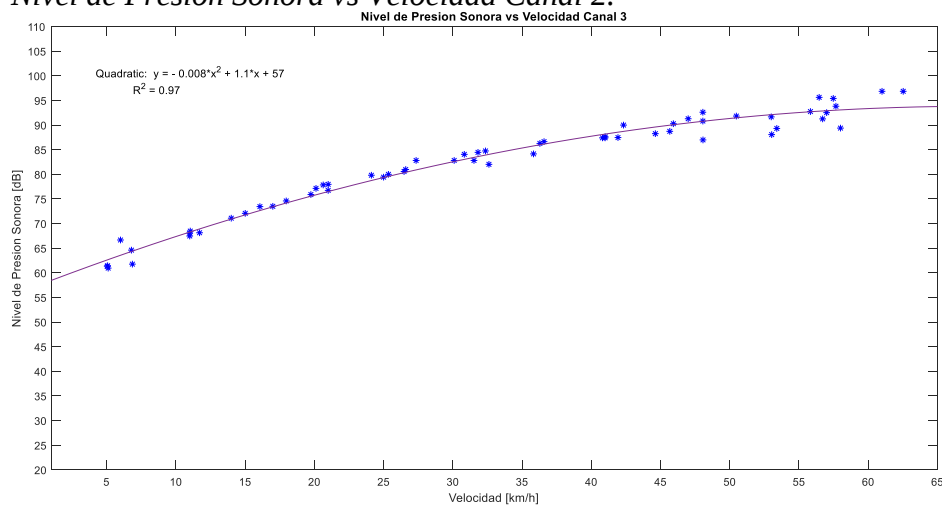
A continuación, en la Figura 34 se presentan las gráficas correspondientes a cada uno de los canales, donde representan el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento en función de la velocidad, con la línea de tendencia que mejor se ajusta definida anteriormente, basándose en el factor R², y la ecuación correspondiente a esta línea de tendencia.



Nivel de Presión Sonora vs Velocidad Canal 1.



Nivel de Presión Sonora vs Velocidad Canal 2.



Nivel de Presión Sonora vs Velocidad Canal 3.

Figura 34. Gráficas de nivel de presión sonora vs velocidad.

La variación de los datos en función de la velocidad fue mayor en velocidades mayores a 35 km/h, debido a que la pista usada tenía 250 m en total y al conductor en ocasiones se le dificultaba mantener o alcanzar la velocidad requerida. Por otro lado, en velocidades de 5 a 10 km/h, la dificultad o la dispersión se presentó, ya que el vehículo es automático y la tracción es inmediata por lo cual era resultaba tedioso estabilizar el vehículo a esa velocidad baja.

Para cada uno de los canales, existe una variación leve en los factores que multiplican las variables de la ecuación obtenida de la línea de tendencia del comportamiento del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento a medida que varía la velocidad, debido a la posición correspondiente a cada uno de los micrófonos.

Ahora bien, con el objetivo de determinar la relación entre velocidad y nivel de presión sonora para el caso de del vehículo eléctrico estudiado, se obtuvo la Ecuación 5. En este caso la variable v representa la velocidad a la cual se desea calcular el nivel de presión sonora deseado en la posición de micrófono 1. Por otro lado, las Ecuaciones 6 y 7 representan, de igual forma, el nivel de presión sonora en las dos posiciones restantes (2 y 3) específicas de los micrófonos de medición.

Es importante definir que estas ecuaciones resultantes, permiten hacer una aproximación del nivel de presión sonora, en función de la velocidad para un vehículo de motor eléctrico que pese aproximadamente 2.4 toneladas (vehículo BYD E6 modelo 2012) y que viaje a velocidades mayores o iguales a los 5 km/h y velocidades menores o iguales a los 60 km/h.

$$SPL_{canal\ 1} = -0.0053 * v^2 + 1.0 * v + 52$$

Ecuación 5. Nivel de Presión Sonora Micrófono 1.

$$SPL_{canal\ 2} = -0.0076 * v^2 + 1.0 * v + 57$$

Ecuación 6. Nivel de Presión Sonora Micrófono 2.

$$SPL_{canal\ 3} = -0.008 * v^2 + 1.1 * v + 57$$

Ecuación 7. Nivel de Presión Sonora Micrófono 3.

Finalmente, si es deseado obtener el nivel de presión sonora total generado por la interfaz neumático/pavimento, se puede hacer un promedio energético con los tres niveles de presión sonora así como se muestra en la Ecuación 2, obtenidos en cada uno de los canales.

Toda la investigación llevada a cabo en este trabajo, tiene como finalidad estudiar el ruido generado por la interfaz neumático/pavimento para un vehículo eléctrico, así como se ha hecho la aclaración durante la investigación, este ruido en los vehículos de combustión, se presenta cuando se supera la velocidad de los 50 km/h. debido a que, en el VC para velocidades inferiores a los 50 km/h la fuente principal generadora de ruido, es la del tren de potencia, así que como el VE no cuenta con esta fuente, por esta razón se tornó interesante llevar a cabo la investigación, para entregar un nivel de ruido para estos vehículos para velocidades inferiores a 50 km/h.

Así como se ha consultado también la literatura, y teniendo en cuenta la predicción de la tendencia de los VE en la ciudad de Bogotá (Quintana, 2014), también se ha visto que en los países que cuentan con un parque automotor mayor de VE dentro de las ciudades, se ha incrementado la

accidentalidad en la población con discapacidad visual o auditiva, donde se presentaba un porcentaje del 0,6% de accidentalidad con VC, mientras que con VE la accidentalidad aumenta al 1,2% con respecto a la misma población, es decir que este tipo de vehículos se tornan con un mayor grado de inseguridad debido a la ausencia del ruido generado por un VE. Otros de los actores viales afectados son los ciclistas, peatones, motociclistas, etc. (Administration, 2011). Se sugiere que el VE debe emitir un nivel de presión sonora mínimo de 49 dBA SPL, en estado de reposo (estacionado y encendido). Así que, con esta investigación, para trabajos futuros se puede llegar a pensar, en tomar este nivel de presión sonora generado por la interfaz neumático/pavimento y hacer un sistema de amplificación, para que el vehículo tenga una percepción auditiva para los diferentes agentes viales, dentro de la ciudad de Bogotá, y no se genere un incremento en la accidentalidad de la ciudad, por la ausencia del ruido de los VE.

VII. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de grado se midió el nivel de presión sonora que genera la interfaz neumático/pavimento para un vehículo eléctrico modelo BYD E6, en donde se colocó una estructura manufacturada en madera y ajustable para cualquier tipo de vehículo, de fácil instalación y retiro, y con posibilidad de soportar 3 micrófonos simultáneamente para poder hacer la captura directa del ruido generado por la interfaz neumático/pavimento. Con los datos obtenidos de la captura del ruido de rodadura se realizó un análisis de las muestras para depurarlas de eventos sonoros no deseados, debido a esto se confirma el espectro de banda donde se encuentra el ruido de rodadura generado por la interfaz neumático/pavimento, como lo aplica la normativa ISO 11819-2 (ISO, 2016) entre las bandas de frecuencia de 315 Hz y 5000 Hz, además al realizar el análisis por frecuencia y ponderado A, se puede apreciar el efecto de un filtro pasa banda para cada velocidad analizada como se puede observar en la Tabla 5 y Figura 33.

Al analizar las muestras entre 20 - 20.000 Hz se encontró que la concentración de energía es muy similar a la que se presenta en el ancho de banda recomendado por la ISO (315 -5.000 Hz), esas diferencias en términos de nivel de presión sonora al utilizar como indicador de ruido el nivel continuo equivalente se encuentran entre 0,28 y 2,93 dBA SPL (Tabla 5). Un ejemplo de lo mencionado anteriormente también se puede observar para la velocidad de 40 km/h en donde el nivel de presión sonora registrado entre 20 – 20.000 Hz es de 88,87 dBA SPL y, al comparar respecto al rango 315 – 5.000 Hz se tiene un nivel de presión sonora de 87.79 dBA así que la diferencia es de 1,08 dBA SPL.

Aunque no se tuvo inconvenientes para realizar la medición aparte de los retrasos que se presentaron por condiciones de tiempo lluvioso, ya que se contempló desde el principio de la investigación que debía realizarse en pavimento seco, se tuvo varios inconvenientes no contemplados con el VE puesto que como el automóvil cuenta con torque eléctrico el cual es casi instantáneo, cuando el conductor pisa el acelerador es muy difícil mantener la velocidad constante a velocidades bajas y se debe emplear el sistema de frenado el cual tiene una frecuencia propia la cual al sonar interfería en las mediciones a baja velocidad así como quedo registrado en el Capítulo

2. Por el contrario, para las velocidades superiores a 25 Km/h ya era suficiente con dejar de acelerar para mantener la velocidad relativamente constante del VE.

Al realizar los análisis de la S/N para las velocidades analizadas se puede comprobar que los niveles equivalentes superan los 10 dB SPL con respecto al Nivel señal/ruido con respecto al ruido de fondo medido, lo cual se puede observar en la Tabla 5. Lo anterior, permite sustentar que las mediciones cumplen con los requerimientos de la ISO 11819-2 con respecto a este apartado.

Con base en los resultados obtenidos mostrados en las Tablas 6 y Figura 34 se pudo determinar que para describir el comportamiento de la tendencia que tendría el nivel de presión sonora con relación a la velocidad, la ecuación cuadrática o polinomial de segundo orden fue la que permitió realizar un ajuste óptimo de los datos al presentar un valor R^2 de aproximadamente 0,96 encontrando una desviación estándar entre los datos del micrófono de 0,0058. De igual forma, dado que, aunque se puede notar en el análisis realizado con los distintos tipos de líneas de tendencia el cambio en el factor R^2 entre la ecuación de segundo orden y de cualquier orden más alto no es muy diferente, se decide tomar como las ecuaciones que define el nivel de presión sonora en función de la velocidad la forma cuadrática, ya que no cuenta con tantos coeficientes para ser evaluados y la gráfica satisface las necesidades de la investigación.

VIII. RECOMENDACIONES

Verificar estado y respuesta en frecuencia de los micrófonos en un lugar controlado para después de las mediciones poder realizar una depuración de datos utilizando un filtro de corrección individual por micrófono.

Se recomienda realizar las mediciones usando distintos tipos de pavimento, para contrastar datos entre los ya obtenidos en esta investigación con los obtenidos por otros vehículos eléctricos de mayor peso y envergadura.

También es recomendable tratar de medir en la rueda delantera del vehículo y contrastar ya que si bien en este documento se obtiene los niveles de una rueda trasera no está definido aún cuál de los trenes si el delantero o el trasero genera más nivel de presión sonora.

REFERENCIAS

- Administration, N. H. T. S. (2011). *Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles-Draft environmental assessment. January*, 114.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). *Programa de gestión de la velocidad*. 96. [https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/2019-03-18/Programa de Gestión de la Velocidad para Bogotá.pdf](https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/2019-03-18/Programa%20de%20Gesti%C3%B3n%20de%20la%20Velocidad%20para%20Bogot%C3%A1.pdf)
- Análisis descriptivo*. (2014).
- Beranek, L. L. (1973). Acustica. In *Ultrasonics* (Vol. 11, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0041-624x\(73\)90544-1](https://doi.org/10.1016/0041-624x(73)90544-1)
- Bezpridel, G.-. (2014). *Scenic, Renault*. <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/b4d9e2c5e2136e475f50f6b47a09131c/Renault-Scenic?hl=es>
- Bogotá, L. (2019). *Estudio del aporte de ruido generado por un vehículo particular automotor eléctrico en estado dinámico , en comparación con el ruido producido por un vehículo particular de motor a combustión a gasolina en una zona urbana de la ciudad de Bogotá*.
- Bravo, T. (2017). An analytical study on the amplification of the tyre rolling noise due to the horn effect. *Applied Acoustics*, 123, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.03.009>
- Campello-Vicente, H., Peral-Orts, R., Campillo-Davo, N., & Velasco-Sanchez, E. (2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>
- Campillo-Davo, N., Peral-Orts, R., Campello-Vicente, H., & Velasco-Sanchez, E. (2019). An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a rolling tyre. *Applied Acoustics*, 143, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.017>
- Clar-Garcia, D., Velasco-Sanchez, E., Sanchez-Lozano, M., & Campello-Vicente, H. (2019). An alternative Drum test method to UNECE Regulation 117 for measuring tyre/road noise under laboratory controlled conditions. *Applied Acoustics*, 151, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.005>
- Código Nacional de Tránsito Terrestre* (p. 112). (2002).
- Congreso de Colombia. (2019). *Ley N° 1964 de 2019*. 6, 6.
- Czuka, M., Pallas, M. A., Morgan, P., & Conter, M. (2016). Impact of Potential and Dedicated

- Tyres of Electric Vehicles on the Tyre-road Noise and Connection to the EU Noise Label. *Transportation Research Procedia*, 14, 10. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.443>
- Davenport, T. (1834). *Se patenta el motor electrico*. <https://www.socialfuturo.com/tal-dia-como-hoy/se-patenta-el-motor-electrico/>
- Ferrer, C.-B. C. (2019). *Calculo de Moda, Mediana y Media en Excel*. <https://www.businessinsider.es/como-podemos-calcular-moda-media-mediana-excel-452835>
- Forssén, J., Hoffmann, A., & Kropp, W. (2018). Auralization model for the perceptual evaluation of tyre-road noise. *Applied Acoustics*, 132(December 2016), 232–240. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.11.023>
- Herrera, L. J., & Pavón, I. (2014). Sistema embarcado para la clasificación de carreteras con respecto a las características acústicas de la superficie de rodadura. *IX Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA2014*.
- ISO. (2016). *ISO 11819-2* (Vol. 2016).
- Medeave. (2011). *Medidas de Dispersion*. <https://www.medwave.cl/link.cgi/Medwave/Series/MBE04/4934>
- Mocanu, I., Aichinger, C., Czuka, M., Fuchs, A., Gasparoni, S., & Saleh, P. (2016). Dynamic and Acoustic Behaviour of Electric Versus Combustion Vehicles. *Transportation Research Procedia*, 14, 2517–2526. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.332>
- Montoya, G. (2005). *Ingeniería De Transito*. 34. <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/apuntes-ingenieria-de-transito.pdf>
- Navarro, J. (2008). *Analisis de flujo vehicular*. <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/analisis-de-flujo-vehicular-cal-y-mayor.pdf>
- Normalizacion Española, I. O. for S. (2011). *Norma Española UNE - EN ISO 3744*.
- Oficial, D., Solicitud, D., & Modificaci, E. E. (2015). *Actos adoptados por órganos creados mediante acuerdos internacionales*. 78, 30–59.
- Propia, F. (2020). *Estructura Lateral*.
- Quevedo, F. (2011). Medidas de tendencia central y dispersión. *Medwave*, 11(03), 1–6. <https://doi.org/10.5867/medwave.2011.03.4934>
- Quintana, B. M. (2014). Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá D.C. *Universidad Nacional De Colombia. Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica*, 137.

- Ramussen, R. O., Bernhard, R. J., Sandberg, U., & Mun, E. P. (2007). The little book of quieter pavements. *Security, July*, 1–33.
- Robledo, F. H. (2002). *Ruido , vibraciones y presiones anormales*. <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2015/08/Riesgos-fisicos-I.pdf>.
- Ruiz, J. G. (2019). *Calidad del aire: un asunto de vida o muerte*. El Espectador. <https://www.elespectador.com/salud/calidad-del-aire-un-asunto-de-vida-o-muerte-article-840078/>
- Sandberg, U. (2001). Tyre/ road noise - Myths and realities. In *Inter-noise 2001* (Issues 27–30).
- Stankous, N. V. (2017). *Internationalization of Higher Education in the light of some indicators 2nd PAN-AMERICAN INTERDISCIPLINARY CONFERENCE , PIC 2016 24-26 February , Buenos Aires Argentina* (Issue May 2016). https://www.researchgate.net/profile/Silvina_Elias/publication/305046323_Internationalization_of_Higher_Education_in_the_light_of_some_indicators/links/59073f2b4585152d2e98e92a/Internationalization-of-Higher-Education-in-the-light-of-some-indicators.pdf#p
- Steinbach, L., & Altinsoy, M. E. (2019). Prediction of annoyance evaluations of electric vehicle noise by using artificial neural networks. *Applied Acoustics*, 145, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.09.024>
- The European Parliament and the Council of the European Union. (2014). REGULATION (EU) No 540/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 April 2014 - On the sound level of motor vehicles and of replacement silencing systems, and amending Directive 2007/46/EC and repealing Directive 70/157/EEC. *Official Journal of the European Union*, 158(540), 131–195.

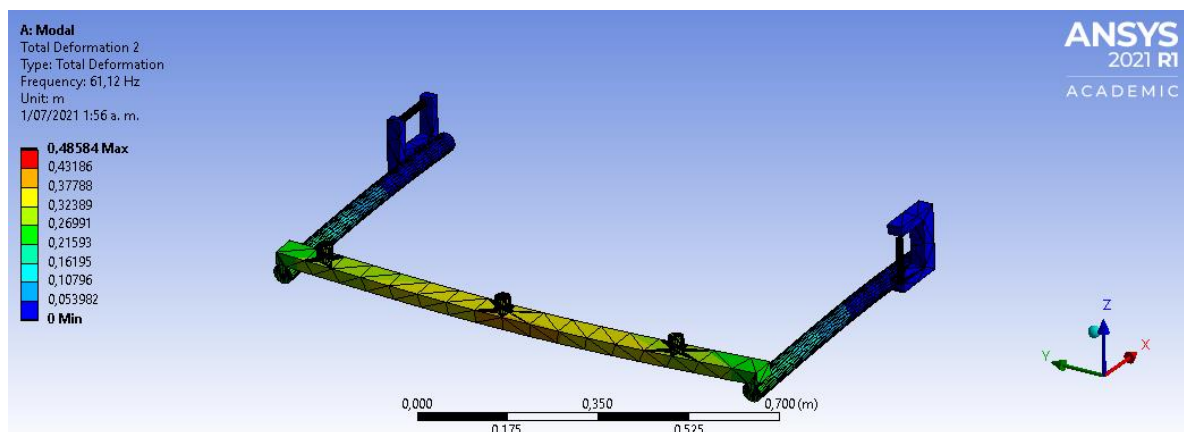
ANEXOS

En esta sección se encuentran los anexos correspondientes mencionados en la totalidad del documento, como Figuras, que no tenían un tamaño adecuado y legible.

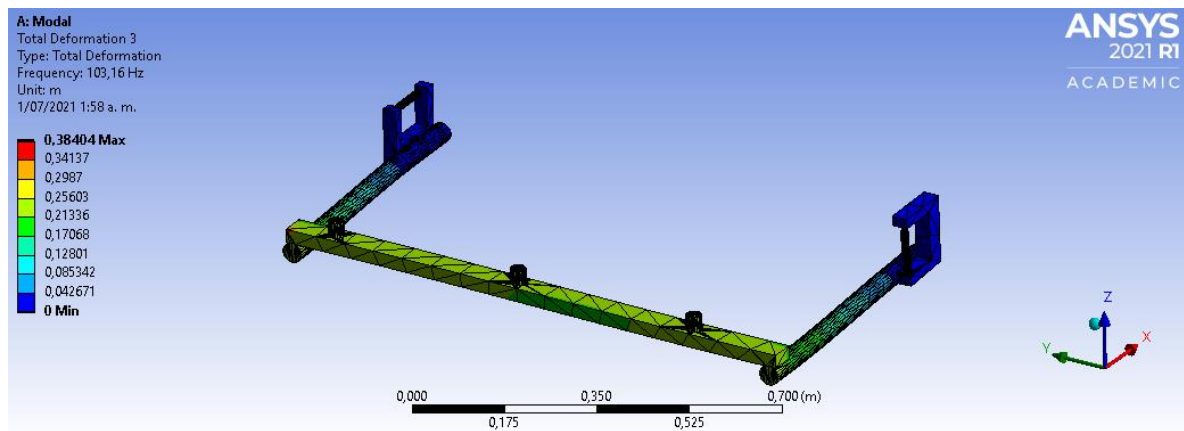
Anexo 1

Figuras de la simulación, de los modos de vibración, para los dos materiales usados.

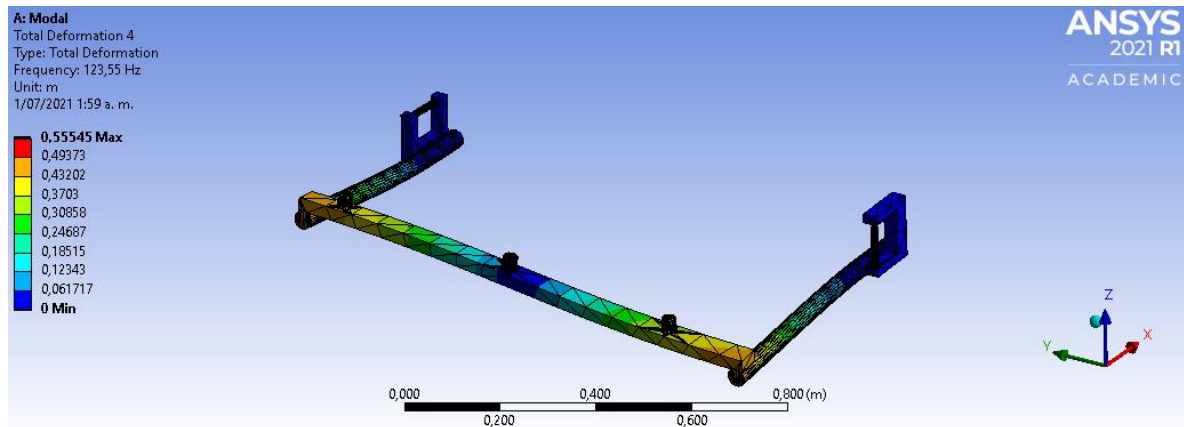
Figura 1. Simulación en ANSYS para el aluminio



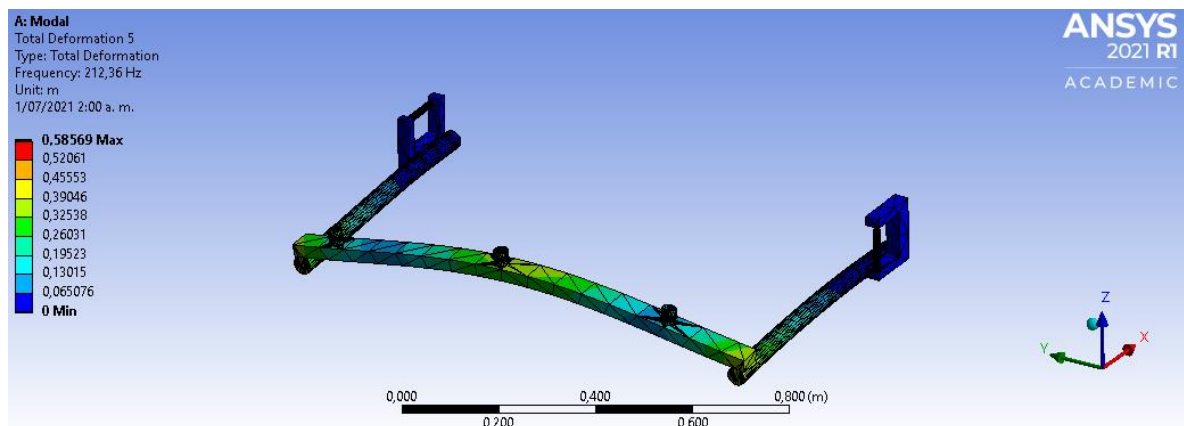
Primer modo de vibración para el aluminio.



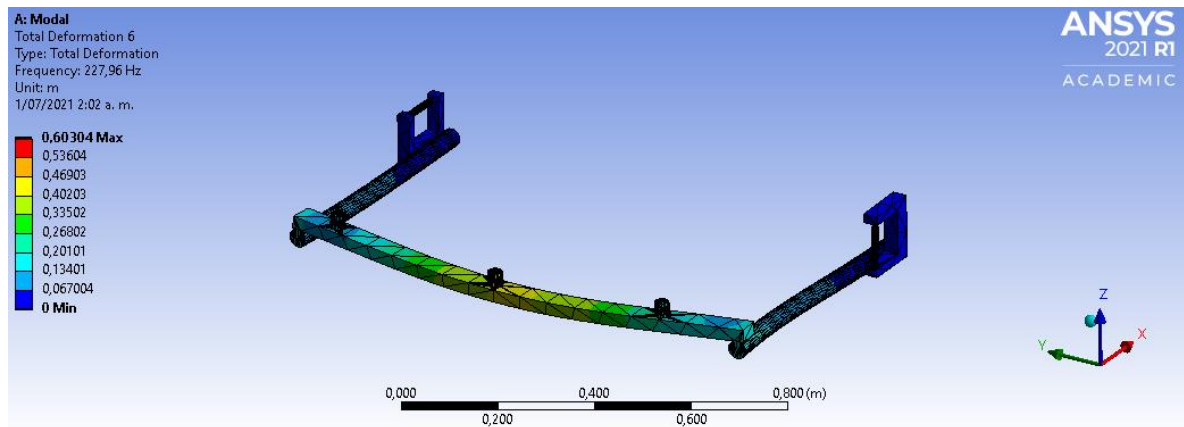
Segundo modo de vibración para el aluminio.



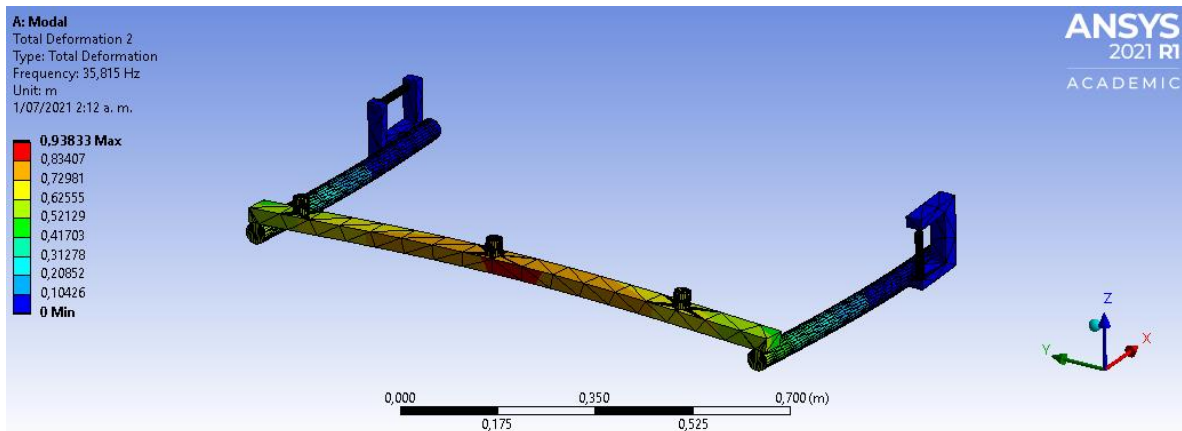
Tercer modo de vibración para el aluminio.



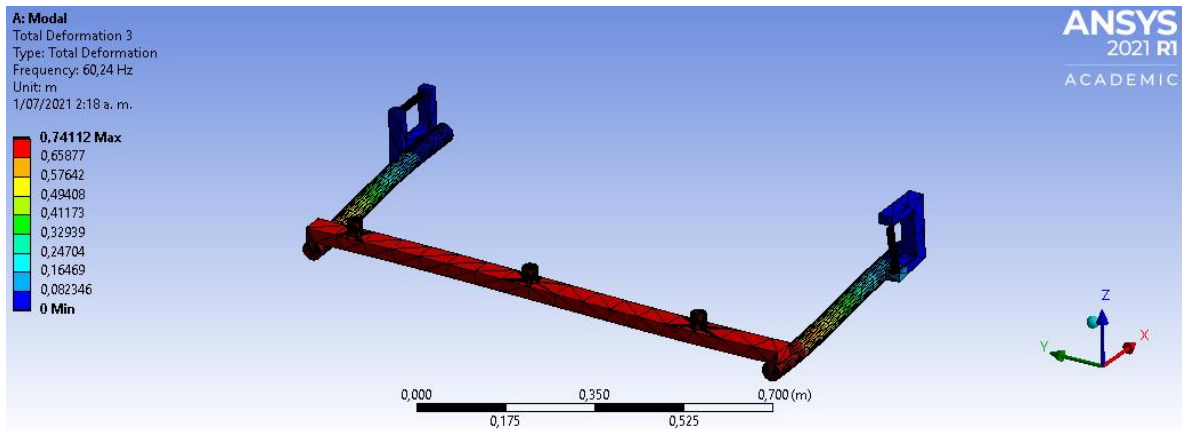
Cuarto modo de vibración para el aluminio.



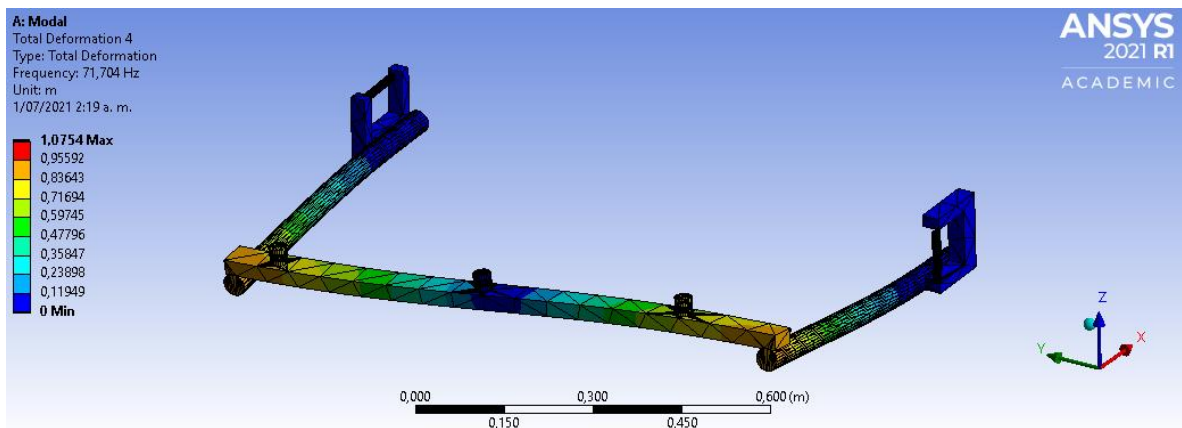
Quinto modo de vibración para el aluminio.

Figura 2. Simulación en ANSYS para la madera

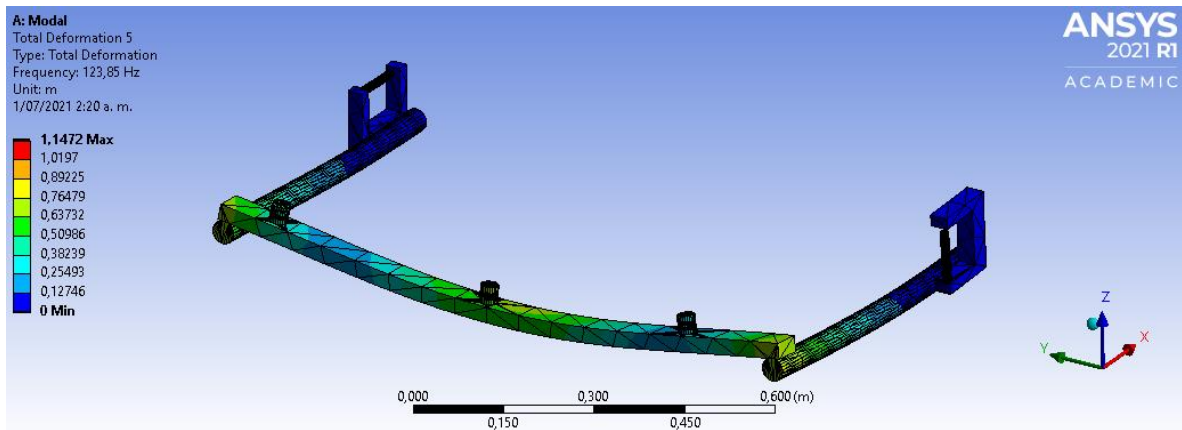
Primer modo de vibración para la madera.



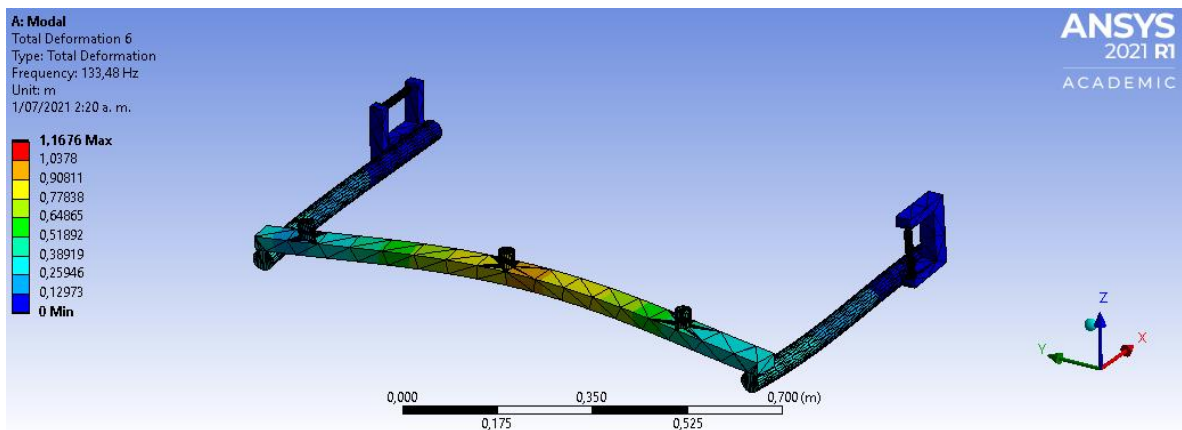
Segundo modo de vibración para la madera.



Tercero modo de vibración para la madera.



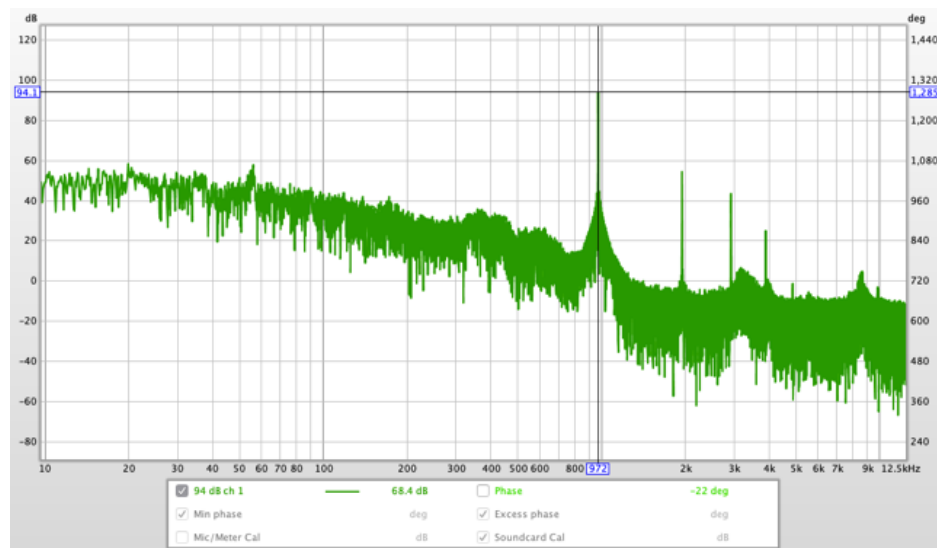
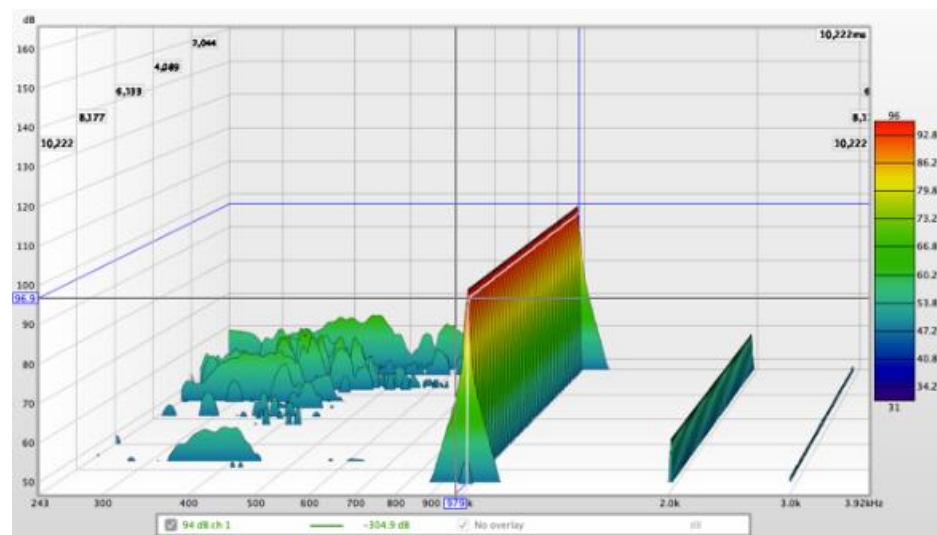
Cuarto modo de vibración para la madera.

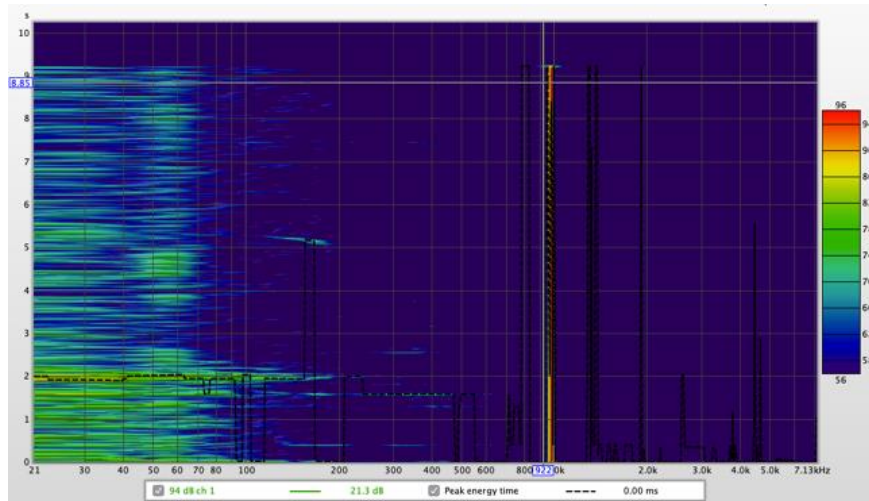


Quinto modo de vibración para la madera.

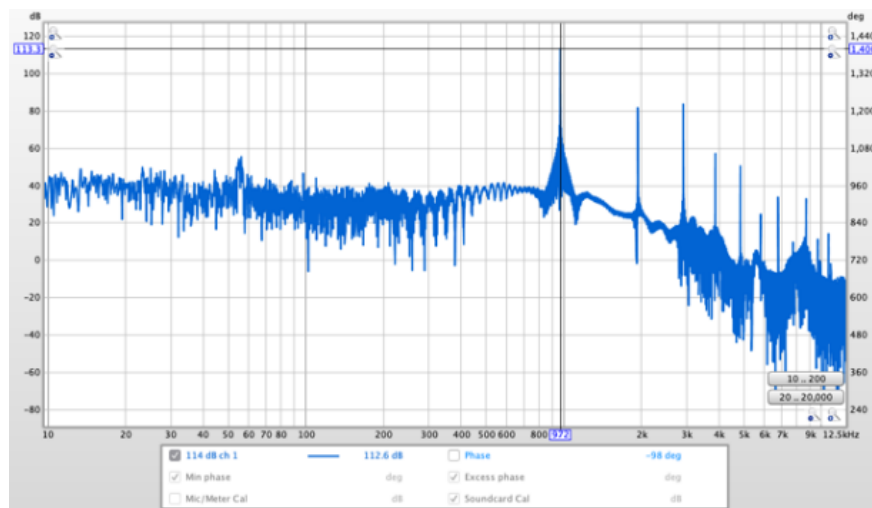
Anexo 2

Figuras de la 16 a la 18, se hace la ubicación con un tamaño mejor, para la facilidad de la visualización.

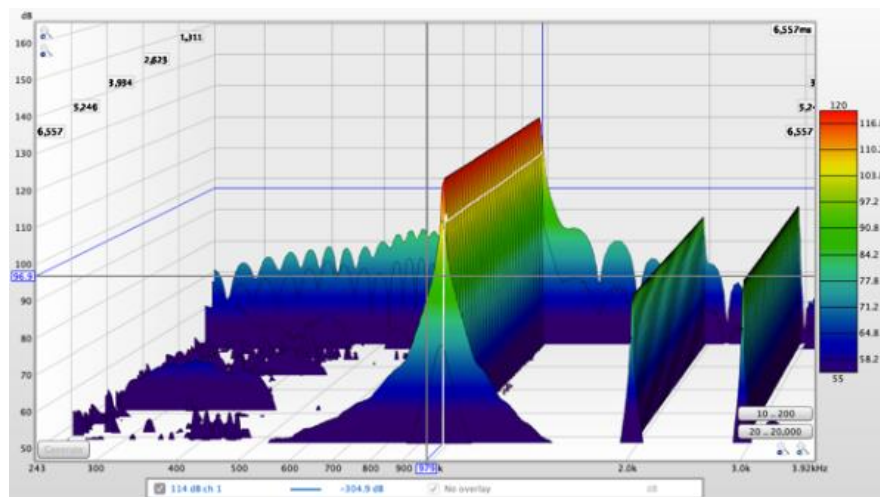
Figura 16. Calibración en REW para el canal 1.*Calibración ch 1 - 94 dB SPL**Calibración ch 1 - 94 dB Waterfall*



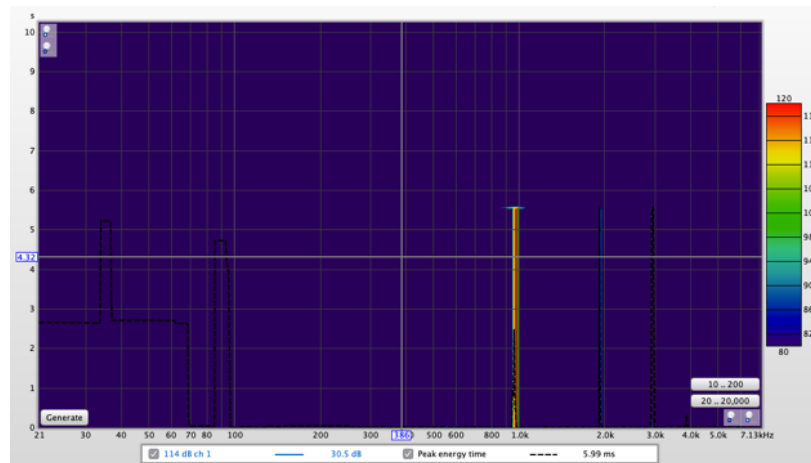
Calibración ch 1 - 94 dB Espectrograma



Calibración ch 1 - 114 dB SPL

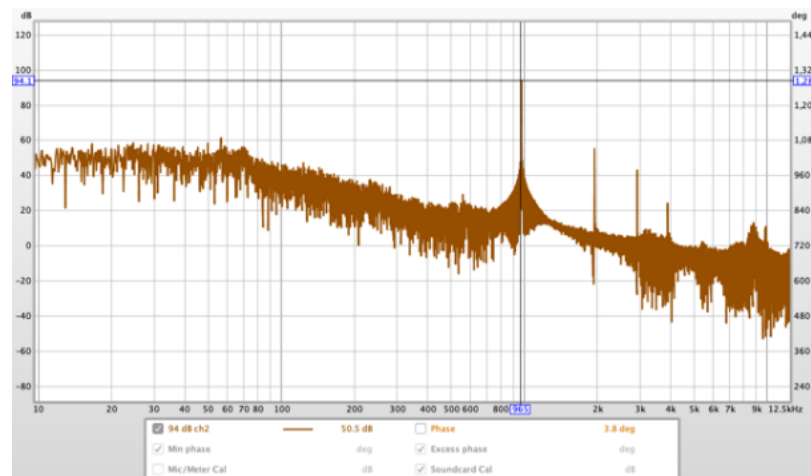


Calibración ch 1 - 114 dB Waterfall

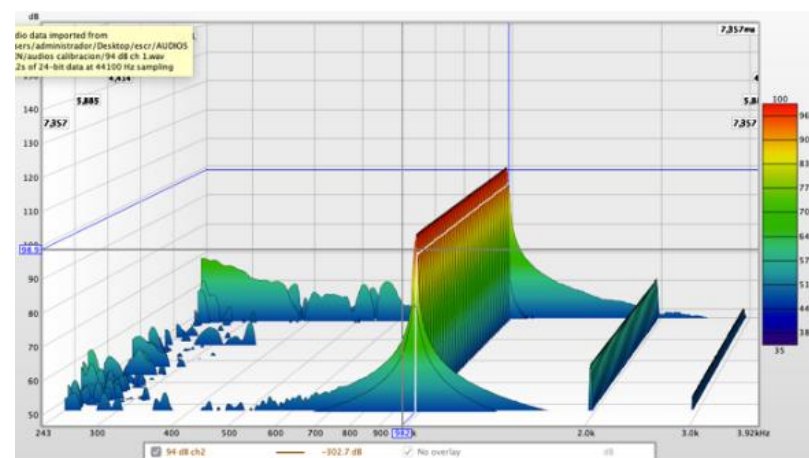


Calibración ch 1 - 114 dB Espectrograma

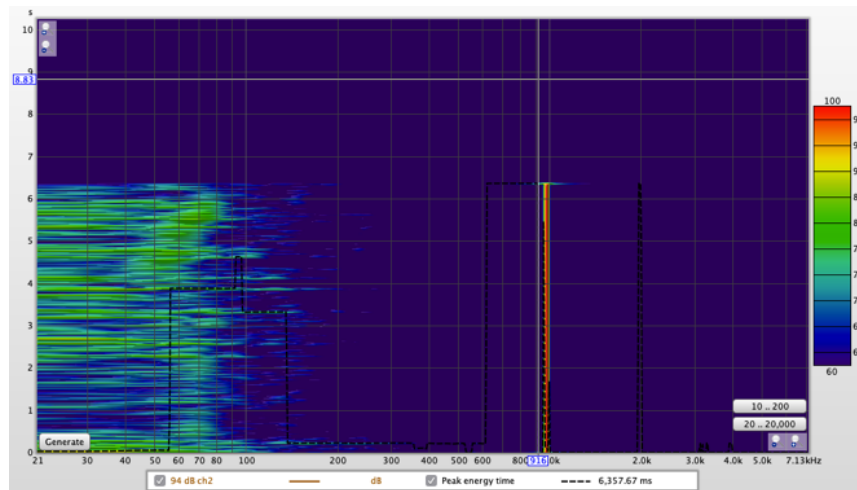
Figura 17. Calibración en REW para el canal 2.



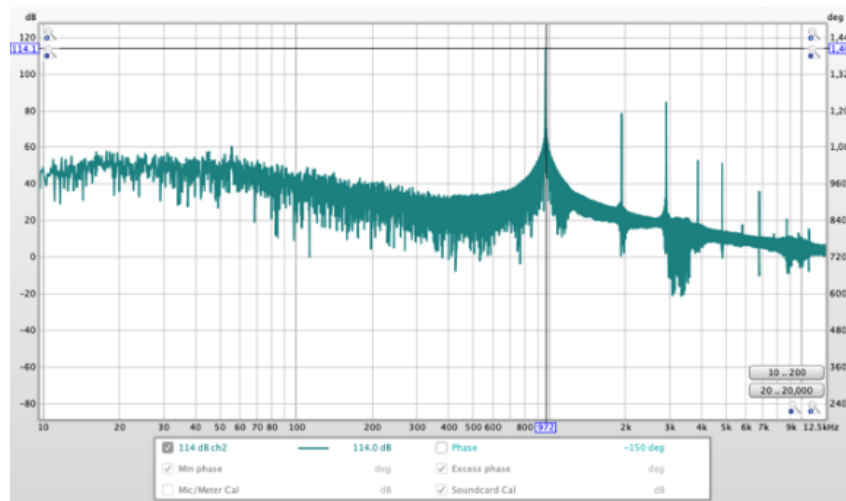
Calibración ch 2 - 94 dB SPL



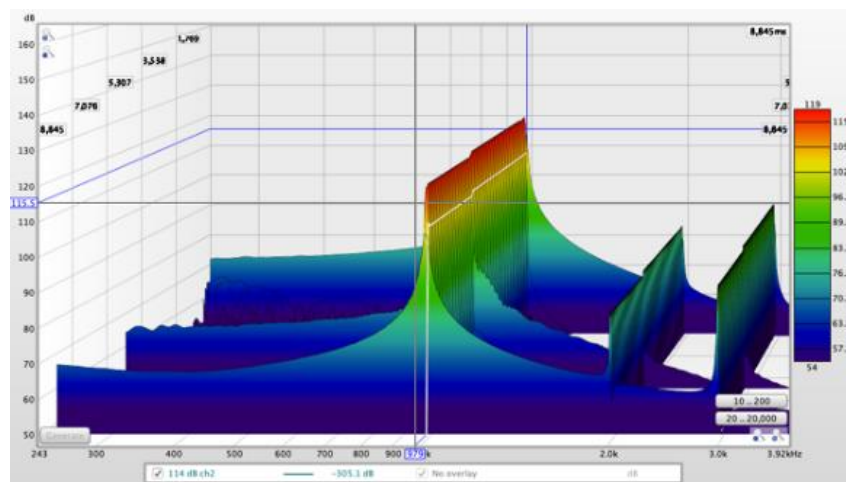
Calibración ch 2 - 94 dB Waterfall



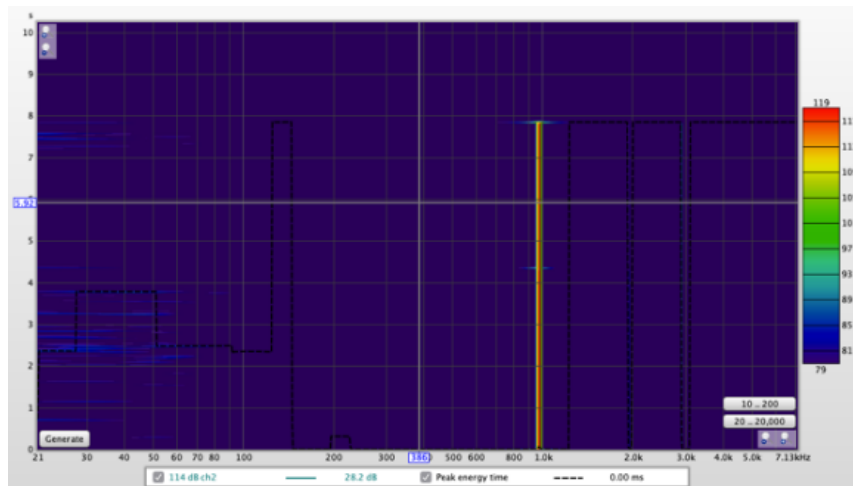
Calibración ch 2- 94 dB Espectrograma



Calibración ch 2 - 114 dB SPL

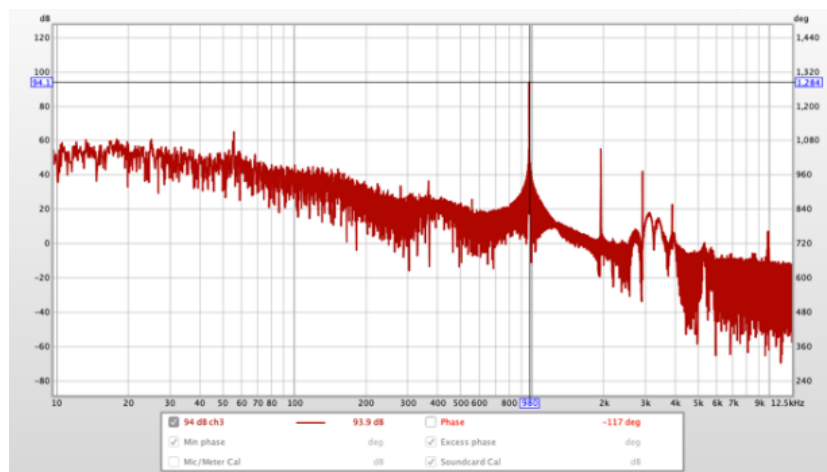


Calibración ch 2 - 114 dB Waterfall.

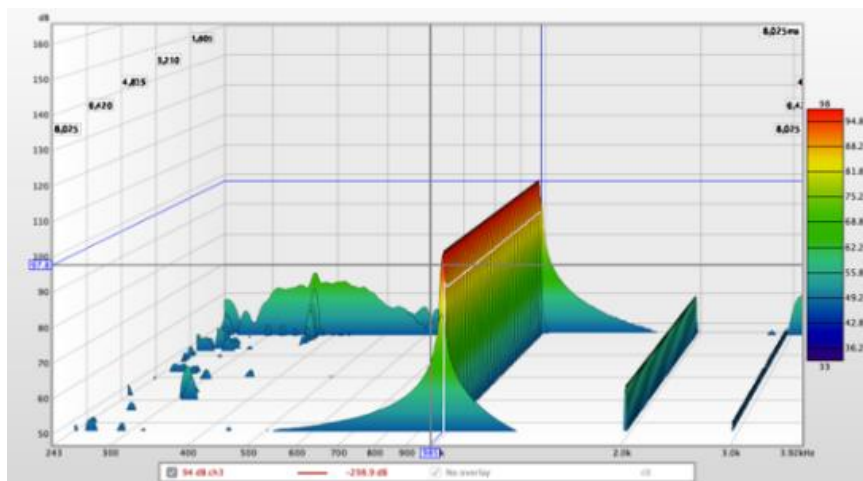


Calibración ch 2 - 114 dB Espectrograma

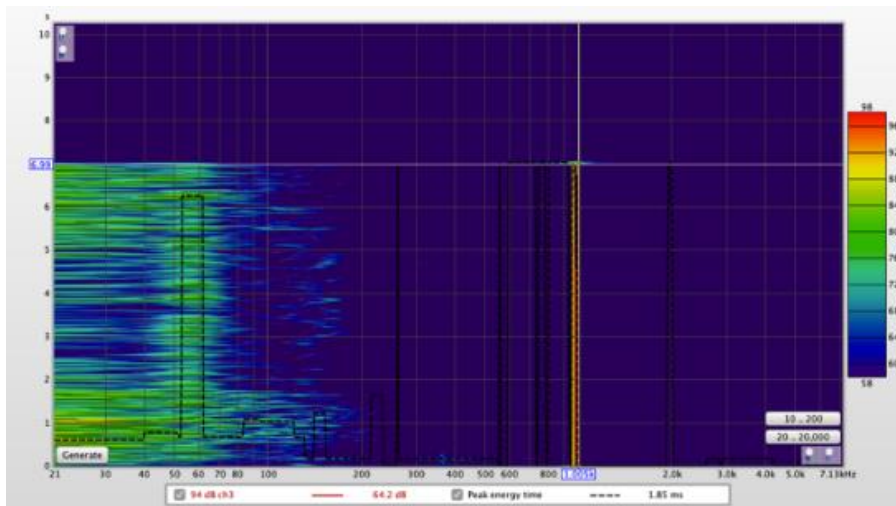
Figura 18. Calibración en REW para el canal 3.



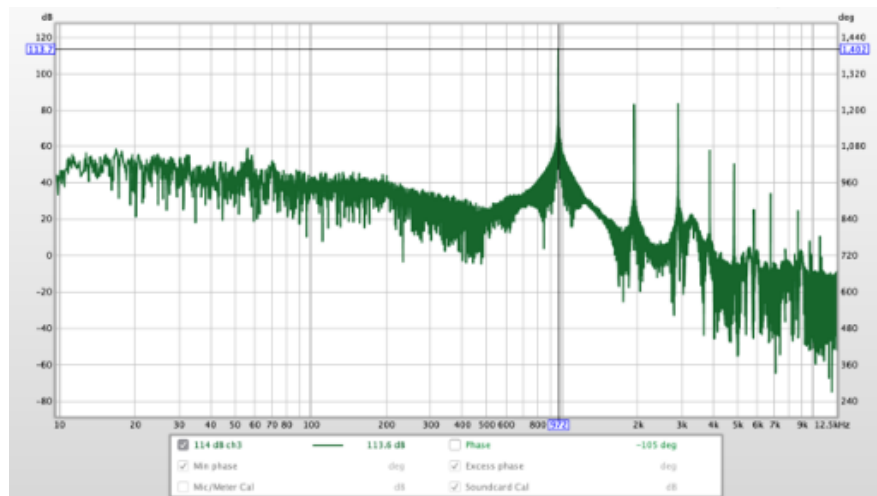
Calibración ch 3 - 94 dB SPL



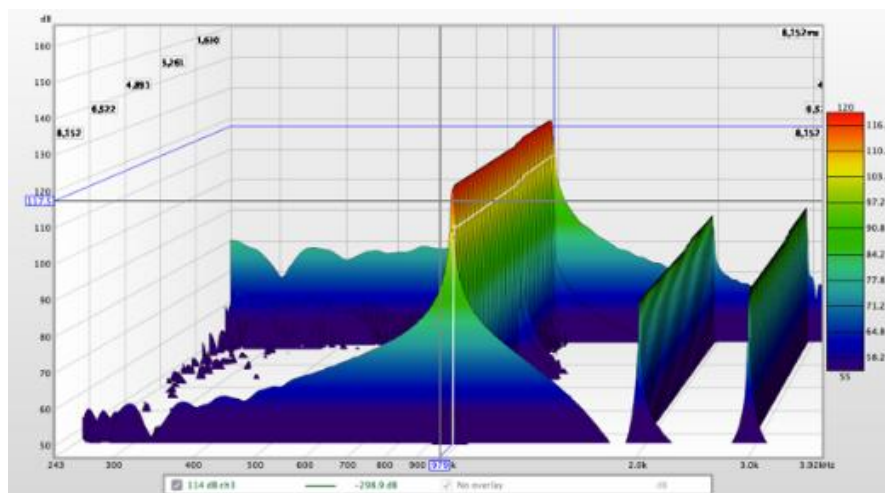
Calibración ch 3 - 94 dB Waterfall.



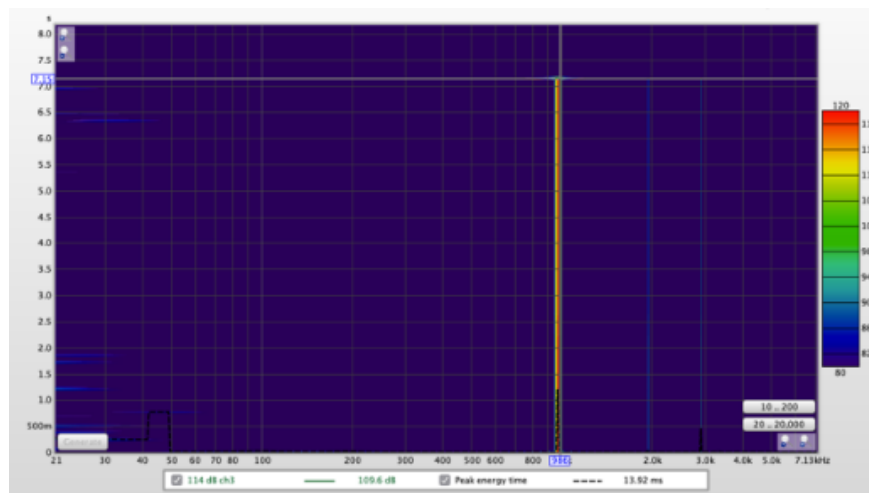
Calibración ch 3 - 94 dB Espectrograma.



Calibración ch 3 - 114 dB SPL.



Calibración ch 3 - 114 dB Waterfall.



Calibración ch 3 - 114 dB Espectrograma.