

RAE

- 1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
- 2. TÍTULO:** 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
- 3. AUTOR (ES):** Christopher Votteler Pérez y Luis Felipe Ríos Zamudio
- 4. LUGAR:** Bogotá, D.C
- 5. FECHA:** Enero de 2019
- 6. PALABRAS CLAVES:** Vehículo eléctrico, Vehículo de combustión a gasolina, Normativa, Impacto, Zona urbana, Ruido, Modelo de simulación, Evaluación, Tráfico rodado, Caracterización, Emisión de ruido, Espectro en frecuencia, Hyundai Atos, Renault Twizy, Automóvil, Vehículo automotor.
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este trabajo es determinar el impacto de la sustitución 1:1 de vehículos automotores de combustión a gasolina por vehículos automotores eléctricos en una zona urbana de la ciudad de Bogotá. Además de esto, se plantea la caracterización comparativa de las principales fuentes de ruido de cada uno de los automotores (*mediante la normativa ISO 362 – 1: 2015*), planteando en cada apartado el proceso ingenieril y desarrollo de este para la aplicabilidad de los resultados a un modelo de cálculo de ruido por tráfico rodado (*modelo inglés*).
- 8. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Tecnologías actuales y Sociedad. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Acústica ambiental.
- 9. METODOLOGÍA:** De carácter cuantitativo evidenciando aspectos comparativos y un enfoque numérico en cada uno de los procesos experimentales desarrollados.
- 10. CONCLUSIONES:** 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 la zona geográfica de estudio genera una reducción de niveles de presión sonora de 5.13 dB(A) según el factor de sustitución calculado y de hasta 3.27 dB(A) en la mayor reducción al aplicar el modelo inglés. Para igualar los niveles de presión sonora actuales de la zona geográfica utilizando solo vehículos eléctricos, se debe incrementar en 3.3 veces el número de automóviles que circulan las vías, es decir, por cada cuatro (4) vehículos de características Hyundai Atos es posible introducir trece (13) vehículos de características Renault Twizy sin incrementar los niveles de presión sonora en la zona urbana. A las velocidades que se desarrolló la prueba por paso de vehículo para la caracterización de fuentes de los automóviles (entre 20 Km/h y 45 Km/h), no es posible determinar una banda de tercio de octava como aporte independiente del ruido por rodadura del resto de fuentes emisoras de ruido de los automotores como lo indica la revisión de la literatura de la norma ISO 362 – 1 del 2015. El incremento de la frecuencia fundamental (componente tonal del ruido generado) que genera el sistema de escape de un automóvil de combustión a gasolina se encuentra directamente relacionado con el incremento de la velocidad rotacional del motor de este (R.P.M.).

**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**

**Christopher Votteler Pérez
Luis Felipe Rios Zamudio**

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería de sonido

Bogotá, Colombia

Año 2019

II 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.

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

**Christopher Votteler Pérez
Luis Felipe Rios Zamudio**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de sonido:

Título y nombre del director

Luis Jorge Herrera Fernández
Máster en Ingeniería Acústica en la Industria y el transporte

Línea de Investigación:

Acústica

Nombre de la línea: Acústica Ambiental

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sonido

Bogotá, Colombia

Año 2019

Agradecimientos

Rios, L.F. (2018): *“Quiero agradecer a mi madre Sol Astrid Zamudio, a mi abuela Gloria Echavarría y a toda mi familia que me ha apoyado en mi proceso como profesional. De igual forma, quiero agradecer a nuestro tutor Luis Jorge Herrera por su benevolencia y por su apoyo en el desarrollo de este estudio.”*

Votteler, C. (2018): *“En primer lugar, quiero agradecer a mi Dios, en quien encontré un apoyo espiritual durante momentos difíciles y de necesidad durante mis estudios de pregrado. Asimismo, quiero agradecer a mi madre (Maribel Pérez) y a mi padre (Gunther Votteler), los cuales no solo en mis estudios de pregrado, sino que, durante toda mi vida, han sido un apoyo incondicional, aportando cada uno a su manera para que mi desarrollo como persona y, en este caso en especial, como profesional, sea el más humano y adecuado para el entorno en el cual me esté desarrollando en cada una de las etapas de mi vida. De igual forma, quiero agradecer a mi novia (Danna Chujmanova), la cual no solo hizo posible el desarrollo de este proyecto prestando el vehículo Hyundai Atos para los procesos metrológicos, sino que, además, fue un pilar importante de mi desarrollo como persona y estuvo en los momentos más difíciles que tuve que cruzar durante mi formación como profesional, brindándome soporte y el apoyo para seguir adelante. Además, quiero agradecer a nuestro tutor de tesis el físico Luis Jorge Herrera, el cual no solo demostró su interés por el proyecto desde un inicio cuando se planteó la propuesta de proyecto, sino que, durante todo el desarrollo de este, fue participe y brindo soluciones para las diferentes problemáticas que surgieron. Por último, quiero reconocer a la comunidad de Twizeros Bogotá (Pasos10), sin los cuales no hubiese sido posible el desarrollo de los procesos metrológicos del Renault Twizy y por lo tanto la culminación de este proyecto de grado.”*

VI 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.

Resumen

El presente trabajo, tiene como objetivo determinar el impacto de una sustitución 1:1 de vehículos de combustión a gasolina por vehículos eléctricos mediante un análisis matemático del comportamiento entre las variables de nivel de presión sonora, distancia y cantidad de vehículos que transitan en una zona urbana de la ciudad de Bogotá. Además de esto, el estudio pretende caracterizar las principales fuentes de emisión de ruido de ambos automotores basado en los procedimientos de la normativa ISO 362 – 1 del 2015, con el fin de evidenciar las principales diferencias en el espectro en frecuencia de un automóvil eléctrico con respecto a un automóvil de combustión a gasolina. Con base en lo anterior, y con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se plantean dos procesos metrológicos principales; el primero, corresponde a la caracterización de la zona urbana en la ciudad de Bogotá, registrando tanto los niveles de ruido ambiental que estos presentan mediante la Resolución 0627 como el flujo de automóviles en las vías aledañas al lugar donde se encuentra el punto de medición, y, el segundo, pretende caracterizar la emisión total de ruido y las fuentes de los automotores en estudio mediante los procedimientos de la normativa ISO 362 -1 del 2015. Durante dichos procesos metrológicos, se determina que existe una reducción de 5.13 dB(A) al realizar la sustitución planteada para el proyecto, y se confirma la hipótesis de que los vehículos eléctricos generan menos emisiones de ruido que los vehículos de combustión a gasolina, por lo menos, para las pruebas realizadas entre el *Renault Twizy (Vehículo eléctrico)* y el *Hyundai Atos (Vehículo de combustión a gasolina)*.

Palabras clave: *Vehículo eléctrico, Vehículo de combustión a gasolina, Normativa, Impacto, Zona urbana, Ruido, Modelo de simulación, Evaluación, Tráfico rodado, Caracterización, Emisión de ruido, Espectro en frecuencia, Hyundai Atos, Renault Twizy, Automóvil, Vehículo automotor.*

Abstract

The aim of this work is to determine the impact of a 1:1 substitution of gasoline combustion vehicles to electric vehicles through a mathematical analysis between SPL, distance and the number of vehicles that transit in an urban area of the city of Bogotá. Another objective of the study is to characterize the main sources of noise emission of both vehicles based on the procedures of ISO 362-1 of 2015, in order to demonstrate the main differences in the frequency spectrum of an electric car with respect to a gasoline combustion car. Based on the above, and to comply with the proposed objectives, two main metrological processes are proposed. The first one corresponds to the characterization of an urban area of the city of Bogotá by registering the levels of environmental noise they present by using “Resolución 0627” as the flow of cars on the neighboring roads next to where the measurement point is located. The second one, aims to characterize the total noise emission and the sources of the vehicles in study through the procedures of the ISO 362 ISO 362 – 1 of 2015. During these metrological processes, it is determined that there is a reduction of 5.13 dB (A) when making the proposed vehicle replacement for the project. The hypothesis that electric vehicles generate less noise emissions than gasoline combustion vehicles is confirmed, at least, for the tests carried out between the Renault Twizy (Electric vehicle) and the Hyundai Atos (Gasoline combustion vehicle).

Keywords: *Electric vehicle, Gasoline combustion vehicle, Normative, Impact, Urban area, Noise, Simulation model, Evaluation, Road traffic, Characterization, Noise emission, Frequency spectrum, Hyundai Atos, Renault Twizy, Automobile, Motor vehicle.*

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1: Problema de investigación.....	3
1.1 Planteamiento del problema.	3
1.2 Objetivos.	6
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	6
1.3 Justificación.....	6
2. Capítulo 2: Marco de referencia.....	8
2.1 Antecedentes del problema.	8
2.2 Marco conceptual.	12
2.2.1 <i>Sonido</i>	12
2.2.2 <i>Ruido</i>	12
2.2.2.1 <i>Tipos de ruido y ruido por tráfico rodado</i>	12
2.2.3 <i>Fuentes generadoras de ruido en un vehículo automotor</i>	14
2.2.4 <i>Zona urbana</i>	15
2.2.5 <i>Clasificación de los vehículos automotores</i>	16
2.2.6 <i>Cálculo de ruido por tráfico rodado – Modelo inglés</i>	18
2.3 Marco normativo.....	19
2.3.1 <i>Normativa ISO 362 – 1 2015</i>	19
2.3.2 <i>Resolución 0627 de 2006</i>	22
3. Capítulo 3: Diseño metodológico.	25
3.1 Tipo y enfoque de la investigación.	25
3.2 Recopilación de los datos.	26
3.2.1 <i>Metodología de la resolución 0627 de 2006</i>	26
3.2.2 <i>Metodología de la normativa internacional ISO 362-1 2015</i>	27
3.2.2.1 <i>Caracterización de ruido proveniente del motor</i>	29
3.2.2.2 <i>Medición del sistema de admisión y escape del automotor</i>	29
3.2.2.3 <i>Medición de la fricción entre los neumáticos contra el pavimento</i>	29
3.3 Instrumentos.....	30
3.3.1 <i>Bitácora para mediciones de aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá</i>	30
3.3.2 <i>Equipos de medición</i>	31
3.3.2.1 <i>Sonómetro Svantek 977</i>	31
3.3.2.2 <i>Sonómetro Svantek 943</i>	31
3.3.2.3 <i>Sonómetro Brüel 2250-l</i>	31
3.3.2.4 <i>Micrófono de medición Earthworks M30</i>	31
3.3.2.5 <i>Grabadora portátil Zoom H6</i>	32

- X 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.
-

3.3.2.6	<i>Estación Meteorológica Davis Vantage Vue</i>	32
4.	Capítulo 4: Procedimientos y resultados	33
4.1	Descripción de las fuentes.....	33
4.1.1	<i>Hyundai Atos Prime GL</i>	33
4.1.2	<i>Renault Twizy Technic</i>	34
4.2	Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá.....	35
4.3	Medición de ruido por paso de vehículo automotor de combustión y vehículo automotor eléctrico.....	38
4.4	Medición de ruido por rodadura para vehículo automotor a combustión y vehículo automotor eléctrico.....	41
4.4.1	<i>Procedimiento de calibración in situ para efectuar el registro de datos con micrófono</i>	42
4.4.2	<i>Registro de datos</i>	42
4.5	Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión.....	43
4.5.1	<i>Método uno: Distancia fija y ángulo variable</i>	44
4.5.2	<i>Método dos: Distancia variable y ángulo fijo</i>	46
4.6	Calibración de archivos registrados con los micrófonos para post procesamiento.....	48
4.6.1	<i>Archivos originales</i>	48
4.6.2	<i>Códigos en Matlab</i>	50
4.6.3	<i>Importación de archivos calibrados</i>	51
4.7	Modelo inglés – Cálculo de ruido por tráfico rodado.....	53
5.	Capítulo 5: Análisis de resultados	57
5.1	Aceleración de Vehículo eléctrico vs. Aceleración de Vehículo a combustión.....	57
5.2	Caracterización de fuentes generadoras de ruido en vehículos automotores.....	59
5.2.1	<i>Ruido por rodadura</i>	59
5.2.2	<i>Ruido proveniente del sistema de escape</i>	60
5.2.2.1	<i>Método uno: Distancia fija y ángulo variable</i>	61
5.2.2.2	<i>Método dos: Distancia variable y ángulo fijo</i>	64
5.2.3	<i>Ruido proveniente del sistema de admisión</i>	68
5.2.4	<i>Ruido proveniente del motor</i>	69
5.3	Aporte total de ruido de vehículos automotores.....	70
5.3.1	<i>Prueba por paso de vehículo según ISO 362-1 2015</i>	70
5.3.2	<i>Presión sonora vs. Distancia</i>	72
5.4	Cálculo del factor de sustitución de automóviles.....	83
5.5	Aplicación del modelo inglés para el cálculo de ruido por tráfico rodado.....	88
5.6	Discusión.....	92
6.	Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	93
6.1	Conclusiones.....	93
6.2	Recomendaciones.....	95
7.	Capítulo 7: Anexos	97
8.	Capítulo 8: Referencias	105

Lista de imágenes

	Pág.
Imagen 1: <i>Ilustración sobre niveles de presión sonora provenientes de diferentes fuentes</i>	13
Imagen 2: <i>Principales fuentes generadoras de ruido de un vehículo automotor</i>	15
Imagen 3: <i>Zona de pruebas 1</i>	20
Imagen 4: <i>Formato de Bitácora</i>	30
Imagen 5: <i>Zona geográfica urbana de la ciudad de Bogotá D.C[Barrio Cedritos – Bogotá]</i>	36
Imagen 6: <i>Primer punto de medición descartado a razón de construcción adyacente</i>	36
Imagen 7: <i>Segundo punto de medición descartado a razón de construcción adyacente</i>	36
Imagen 8: <i>Evaluación de ruido ambiental de ruido por tráfico vehicular en zona urbana de la ciudad de Bogotá; Instrumentos de medición: sonómetro Svantek 943 y estación meteorológica Davis Vantage Vue</i>	37
Imagen 9: <i>Zona de aceleración para las pruebas de paso con vehículos automotores</i>	40
Imagen 10: <i>Zona de desaceleración para las pruebas de paso con vehículos automotores</i>	40
Imagen 11: <i>Zona de medición para el procedimiento</i>	40
Imagen 12: <i>Micrófono de medición acoplado al vehículo automotor eléctrico Renault Twizy (plano cercano)</i>	42
Imagen 13: <i>Micrófono de medición acoplado al vehículo automotor eléctrico Renault Twizy (plano lejano)</i>	42
Imagen 14: <i>Montaje de micrófono Earthworks M30. Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión</i>	44
Imagen 15: <i>Espectro de onda a través del software dBFA Suite, archivo original para posición 2 del preamplificador</i>	49
Imagen 16: <i>FFT del archivo original a través del software dBFA Suite</i>	49
Imagen 17: <i>Espectro de onda a través del software dBFA Suite, archivo original para posición 3 del preamplificador</i>	49
Imagen 18: <i>FFT del archivo original a través del software dBFA Suite</i>	49

Imagen 19: Código implementado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador en la posición 2.....	51
Imagen 20: Código implementado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador en la posición 3.....	51
Imagen 21: Configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 2.....	51
Imagen 22: Configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 3.....	51
Imagen 23: Nuevo archivo de calibración para la posición 2 del preamplificador.	52
Imagen 24: FFT del nuevo archivo de calibración para la posición 2 del preamplificador.	52
Imagen 25: Nuevo archivo de calibración para la posición 3 del preamplificador.	53
Imagen 26: FFT del nuevo archivo de calibración para la posición 3 del preamplificador.	53
Imagen 27: Zona de pruebas 1.1.....	72
Imagen 28: Sonómetro Svantek 977 Tipo 1.	97
Imagen 29: Sonómetro Svantek 943 Tipo 2.	99
Imagen 30: Sonómetro Brüel modelo 2250-1 tipo 1.	100
Imagen 31: Especificaciones técnicas micrófono Earthworks M30 1.	101
Imagen 32: Especificaciones técnicas micrófono Earthworks M30 1.1.	102
Imagen 33: Grabadora portátil Zoom H6.....	103
Imagen 34: Estación meteorológica Davis Vantage Vue.....	104

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: <i>Número de vehículos entre puntos y días (T=15 minutos).</i>	38
Tabla 2: <i>Valores sin corregir de LEQ de emisión y frecuencia de paso de automóviles (entre días y puntos).</i>	38
Tabla 3: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Renault Twizy.</i>	40
Tabla 4: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Hyundai Atos.</i>	41
Tabla 5: <i>Ruido por rodadura para el Hyundai Atos y el Renault Twizy.</i>	43
Tabla 6: <i>Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia fija y ángulo de 135 grados.</i> .45	45
Tabla 7: <i>Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia fija y ángulo de -135 grados.</i> 46	46
Tabla 8: <i>Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 1m y ángulo fijo.</i>	46
Tabla 9: <i>Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 1,5m y ángulo fijo.</i>	47
Tabla 10: <i>Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 2m y ángulo fijo.</i>	48
Tabla 11: <i>Ruido por rodadura – Niveles máximos y R.M.S.</i>	59
Tabla 12: <i>Análisis para las bandas de tercios de octava 400 Hz a 800 Hz.</i>	69
Tabla 13: <i>Análisis para las bandas de tercios de octava 100 Hz y 125 Hz.</i>	69
Tabla 14: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Renault Twizy. Izquierda y Derecha;</i> <i>Corresponden a las posiciones de medición del automotor desde la perspectiva del conductor.</i>	70
Tabla 15: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Hyundai Atos. Izquierda y Derecha;</i> <i>Corresponden a las posiciones de medición del automotor desde la perspectiva del conductor.</i>	71
Tabla 16: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 “SPL”</i>	72
Tabla 17: <i>Aproximación polinómica de cuarto orden para promedio del comportamiento del Renault Twizy dentro de la zona de aceleración.</i>	76
Tabla 18: <i>Aproximación polinómica de cuarto orden aproximación para promedio del comportamiento del Hyundai Atos dentro de la zona de aceleración.</i>	79
Tabla 19: <i>Número de vehículos entre puntos y días (T=15 minutos).</i>	84
Tabla 20: <i>Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 “Tiempos”</i>	84

Tabla 21: <i>Número de Vehículos eléctricos (EVs) para igualar emisiones en 15 Minutos</i>	87
Tabla 22: <i>Parámetros generales para la aplicación del modelo inglés.</i>	89
Tabla 23: <i>Aplicación del modelo inglés - Correcciones para hallar el nivel de presión sonora básico.</i>	89
Tabla 24: <i>Aplicación del modelo inglés - Cálculo del L_{10} aplicando las correcciones restantes</i>	90
Tabla 25: <i>Promedio entre días y puntos - Aplicación del modelo inglés para la evaluación del impacto que conlleva la sustitución de vehículos de características Hyundai Atos por vehículos Renault Twizy</i>	91

Lista de ecuaciones

	Pág.
<i>Ecuación 1</i>	18
<i>Ecuación 2</i>	23
<i>Ecuación 3</i>	53
<i>Ecuación 4</i>	54
<i>Ecuación 5</i>	54
<i>Ecuación 6</i>	54
<i>Ecuación 7</i>	55
<i>Ecuación 8</i>	56
<i>Ecuación 9</i>	56
<i>Ecuación 10</i>	58
<i>Ecuación 11</i>	73
<i>Ecuación 12</i>	73
<i>Ecuación 13 VRH 1</i>	77
<i>Ecuación 14 VRH 2</i>	80
<i>Ecuación 15</i>	85
<i>Ecuación 16</i>	86

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 1: <i>Aceleración de vehículo automotor eléctrico vs. aceleración de vehículo automotor a combustión. Valores calculados.</i>	58
Gráfica 2: <i>Ruido por rodadura Renault Twizy VS Hyundai Atos.</i>	59
Gráfica 3: <i>Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 1000 R.P.M.</i>	61
Gráfica 4: <i>Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 2000 R.P.M.</i>	62
Gráfica 5: <i>Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 3000 R.P.M.</i>	63
Gráfica 6: <i>Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 1000 R.P.M.</i>	64
Gráfica 7: <i>Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 2000 R.P.M.</i>	66
Gráfica 8: <i>Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 3000 R.P.M.</i>	67
Gráfica 9: <i>Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Renault Twizy.</i>	74
Gráfica 10: <i>Spl vs. Distancia - Hyundai Atos y Renault Twizy - Aproximaciones polinómicas de 2do y 4to orden.</i>	75
Gráfica 11: <i>Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Hyundai Atos.</i>	78
Gráfica 12: <i>Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Hyundai Atos y Renault Twizy.</i>	81
Gráfica 13: <i>Sustitución de vehículos en la Zona geográfica en términos de SPL.</i>	87
Gráfica 14: <i>Sustitución de vehículos automotores eléctricos en Zona Geográfica en función del número (Cantidad de vehículos automotores).</i>	88

Introducción

El ruido por tráfico vehicular es una problemática que se presenta en la actualidad y algunos estudios respaldan el hecho de que el mismo puede llegar a tener impactos nocivos en la salud humana (*investigaciones llevadas a cabo por el profesor Alberto Ramírez de la Universidad Javeriana, (Ramírez Gonzáles, Dominguez Calle, & Borrero Marulanda, 2011)*). Además de esto, en la mayoría de los casos en los que se desea tratar una zona afectada es necesario hacer una intervención del receptor o el medio, ya que trabajar sobre la fuente (*en este caso los automóviles*) resulta inviable gracias a que la intervención con el fin de reducir las emisiones de ruido provenientes del tren de potencia no solo es diferente para cada fabricante, sino que, puede representar costos demasiado elevados para los usuarios y sin estar avalada por los fabricantes, puede resultar en la pérdida de la garantía del automotor. Asimismo, el ruido por rodadura (*correspondiente a la fricción del neumático con el pavimento*) depende del tipo de neumático que utiliza cada automóvil que pasa por la carretera, la velocidad de tránsito, el peso del automóvil, el estado y deterioro del pavimento y si este se encuentra o no mojado, entre otras variables, que no solo resultan complicadas de controlar, sino además, difíciles de estandarizar y por lo tanto inviables de intervenir con el fin de reducir los niveles de presión sonora.

Debido al flujo de automóviles que se encuentran en las zonas urbanas y los problemas de movilidad que se presentan en las grandes ciudades (*como la disminución en la velocidad promedio de automóvil de 30.73 Km/h a 22.00 Km/h entre los años 2002 y 2016 para la ciudad de Bogotá, (SIMUR, 2016)*), el ruido por tráfico vehicular toma gran relevancia en la contribución a los niveles de presión sonora a los cuales se encuentran expuestos los transeúntes. Considerando lo anterior, se plantea la hipótesis de que la sustitución de vehículos de combustión a gasolina (*los cuales representan la mayor participación en el parque automotor colombiano*) por vehículos eléctricos, podrían llegar a generar una reducción en los niveles de emisión de ruido en dichas zonas. Asimismo, y con el fin de demostrar dicha hipótesis, este estudio pretende realizar una caracterización de la emisión total de ruido generada por un vehículo de combustión a gasolina (*Hyundai Atos*) y un

vehículo eléctrico (*Renault Twizy*) utilizando los procedimientos estipulados en la normativa ISO 362-1 del 2015. Además de esto, y con base en la misma norma, se pretende realizar la caracterización de las principales fuentes de emisión en el espectro en frecuencia de los vehículos, con el fin de evidenciar las principales diferencias en cuanto a sus sistemas corresponde. Por otra parte, se propone desarrollar la caracterización de una zona urbana de la ciudad de Bogotá utilizando los procedimientos estipulados en la resolución 0627 del 2006, con el fin de poder diseñar un modelo de análisis matemático que relacione las variables de nivel de presión sonora, distancia y número de vehículos que transitan en una zona urbana, el cual permita determinar el impacto en los niveles de emisión de ruido en dicha zona con base en una sustitución 1:1 de los vehículos de combustión a gasolina por vehículos eléctricos.

Gracias a que la normativa ISO 362 - 1 del 2015 estipula los métodos de medición para vehículos de combustión y la resolución 0627 del 2006 determina que no se pueden implementar los procedimientos planteados en dicha resolución para determinar la emisión de ruido por tráfico vehicular, los análisis y procesos metrológicos presentados en este estudio son basados en dichas normativas teniendo en cuenta las limitaciones y la aplicabilidad de estas a los objetivos propuestos para el desarrollo de este trabajo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrollan los procesos metrológicos planteados para alcanzar los objetivos propuestos, pudiendo verificar la hipótesis de que existe una reducción de nivel de presión sonora al realizar la sustitución 1:1 que fue mencionada en párrafos anteriores. Además de esto, se encuentra que los fabricantes durante su proceso de construcción tienden a hacer que las emisiones de los vehículos (eléctricos o a combustión de gasolina) sean las mismas para el lado derecho e izquierdo de los vehículos. Por último, se demuestra que es viable la aplicación de la mayoría de los análisis y procedimientos estipulados en las normativas para el caso de vehículos eléctricos y la emisión de ruido por tráfico vehicular en una zona urbana.

1. Capítulo 1: Problema de investigación.

1.1 Planteamiento del problema.

El ruido por tráfico vehicular se define como una fuente de contaminación auditiva tanto estática (*en reposo*) como dinámica (*en movimiento*), determinada principalmente por: el motor junto con el sistema de escape de los automóviles, camiones ligeros, buses y motocicletas. Dicha fuente tiene un impacto importante en el ruido ambiental en áreas urbanas (Quiñones Bolaños, Bustillo Lecompte, & Mehrvar, 2016). Con base en las estadísticas de la Secretaría Distrital De Ambiente (SDA) de Bogotá, el ruido por tráfico vehicular representa el 60% de la contaminación auditiva en la ciudad (Secretaría Distrital de ambiente, s.f.). Aunque la problemática no se encuentra directamente ligada a la pérdida auditiva, según la SDA y las investigaciones del profesor Alberto Ramírez de la Universidad Javeriana, el ruido por tráfico vehicular genera en la población problemas de estrés, pérdida del sueño (*insomnio*), ansiedad, depresión, cambios en el comportamiento (*conductas agresivas*) y baja productividad (Ramírez Gonzáles, Dominguez Calle, & Borrero Marulanda, 2011)

Por otra parte, un estudio llevado a cabo en la ciudad de Bogotá, Colombia, demuestra que las medidas de restricción vehicular que se han venido empleando desde el año 2009, no tienen ningún impacto en la atenuación de los niveles de ruido causados por el tráfico vehicular al que se encuentran expuestos los ciudadanos cotidianamente, registrando niveles de hasta 76.8 dB(A) en los días con pico y placa, y pico y placa ampliado, y de 77.8 dB(A) en los días sin carro, existiendo un aumento de los niveles de presión sonora debido al incremento de vehículos de transporte público en la ciudad, “*Cuantías que superan por sí mismas las normativas de la EPA-US (1974) y la OMS (1999)*” (Ramírez González, Dominguez Calle, & Borrero Marulanda, 2011). Lo anterior indica que el control de tráfico no es una alternativa para la reducción de los niveles de presión sonora en zonas urbanas.

Actualmente, los vehículos automotores se pueden clasificar de dos maneras; de acuerdo con el tipo de tren potencia que poseen y a la función de tránsito que desempeñan. Para el primer caso, se encuentran los **vehículos automotores a combustión** (*Diésel y gasolina*), “*los cuales basan su funcionamiento, como su nombre lo indica, en el quemado de una mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro, con el fin de incrementar la presión y generar con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón*” (Servicio Nacional de Aprendizaje, 2002), que a su vez pueden clasificarse de acuerdo al tipo de combustible y cilindraje del motor, los **vehículos automotores eléctricos**, “*los cuales son vehículos propulsados por uno o varios motores eléctricos alimentados por paquetes de baterías recargables*” (U.S Department Of Energy, 2017), los cuales además de reducir las emisiones de gases, mitigan la contaminación de ruido por tráfico vehicular (Kuppusamy, Magazine, & Rao, 2017) y los **vehículos automotores híbridos**, los cuales poseen un tren de potencia que implementa ambos mecanismos de propulsión (*eléctrico y a combustión*).

Para los tres casos, las fuentes generadoras de ruido de un vehículo automotor están determinadas por: El ruido debido a la fricción del viento con el vehículo (*Ruido por turbulencia aerodinámica*), el ruido debido a la interacción entre los neumáticos del vehículo y el pavimento (*Ruido por tráfico rodado*) y el ruido proveniente del tren de potencia, el cual, a su vez, para el caso de los vehículos automotores a combustión, se encuentra determinado por el ruido proveniente de los sistemas de refrigeración, escape, transmisión y del motor. Asimismo, este último se encuentra afectado por los sistemas de inyección, admisión y el bloque de cilindros (Sandberg & Ejsmont, 2002). Por otro lado, para el segundo caso de clasificación, se determinan tres grandes funciones de tránsito: vehículos automotores particulares, de transporte público y de carga y transporte de mercancías, las cuales determinan directamente el tipo de automotor, la cantidad de pasajeros, velocidades máximas específicas y horarios de tránsito. (Ley 769 del 6 de agosto de 2002, 2002)

La Organización Internacional para la Estandarización, estableció una prueba para la identificación de fuentes sonoras y el estudio del aporte de ruido de un vehículo automotor desplazándose a velocidad constante que ingresa a un área delimitada de aceleración, cuyo método de implementación se encuentra expuesto en la normativa ISO 362-1 de 2015, donde se evidencia que

las condiciones meteorológicas, el tipo de pavimento, las condiciones del mismo, el tipo de motor y cilindraje, el sistema de admisión y escape, el tipo de neumático y la velocidad a la cual se desplaza el vehículo, influyen directamente sobre el aporte de ruido que este genera. Además, establece que dicho aporte debe ser expresado en dB(A) (*Decibeles con filtro de ponderación en frecuencia A*). (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013)

Por otro lado, estudios respaldan la hipótesis que, además de reducir las emisiones de gases contaminantes que generan los vehículos a combustión, las propiedades de los motores de los vehículos eléctricos permiten reducir los niveles de ruido por tráfico vehicular en áreas urbanas (Campello Vicente, Peral Orts, Campillo Davo, & Velasco Sánchez, 2017) . Una investigación realizada por Campello, Pearl, Campillo y Velasco, acerca de la simulación del aporte de ruido de vehículos eléctricos, con el fin de determinar el impacto sobre la reducción de niveles en mapas de ruido por tráfico vehicular en áreas urbanas, concluye que a velocidades máximas de 30 km/h, existe una reducción de entre 1dB y 2dB, dependiendo de si los vehículos eléctricos usan o no señales de alerta (*Bocinas, pitos o sirenas*) respectivamente, en el aporte de ruido por tráfico vehicular a la zona urbana de estudio. (Campello Vicente, Peral Orts, Campillo Davo, & Velasco Sánchez, 2017)

A medida que pasan los años, el número de vehículos eléctricos presentes en el parque automotor colombiano está incrementando. Con base en las estadísticas presentadas por la Organización Colombiana De Vehículos Automotores “ANDEMOS”, la participación de motocicletas y automóviles eléctricos e híbridos para Julio del 2017 ocupa el 0.016 % (*2.012 vehículos*) del total de vehículos del parque automotor colombiano (*12.302.391 vehículos*), cifra que ha venido aumentando desde el año 2012 en un 0.005% (*año en el que esta clase de vehículos incursionan al mercado colombiano*) (Asociación Colombiana de Vehículos Automotores, 2017) Sin embargo, a la fecha actual no se registran estudios sobre el aporte de ruido de un vehículo eléctrico en una zona urbana de la ciudad de Bogotá.

Basado en lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el aporte de ruido generado por un vehículo particular automotor eléctrico en estado dinámico, en comparación con el

⁶ 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

ruido producido por un vehículo particular de motor a combustión a gasolina de inyección de 1000 centímetros cúbicos en una zona urbana de la ciudad de Bogotá?

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

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

1.2.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar las fuentes generadoras de ruido de un vehículo automotor particular eléctrico y un vehículo particular de motor a combustión a gasolina de inyección de 1000 centímetros cúbicos de uso urbano bajo el procedimiento estipulado en la normativa ISO 362-1: 2015.
- Determinar el aporte de ruido en estado dinámico de un vehículo particular automotor eléctrico y un vehículo particular de motor a combustión a gasolina de inyección de 1000 centímetros cúbicos en una zona urbana de la ciudad de Bogotá con base en la normativa ISO 362-1: 2015.

1.3 Justificación.

El presente trabajo da inicio a estudios de impacto ambiental de vehículos particulares automotores eléctricos en Colombia “*aún no registrados*”, los cuales a través de mapas de ruido y simulaciones, permiten determinar nuevas soluciones a las problemáticas de ruido vehicular existentes posicionando a la Universidad de San Buenaventura y al programa de Ingeniería de Sonido como pioneros en dichas investigaciones y abriendo la posibilidad de participación a los estudiantes en nuevos desarrollos y estudios en el campo. Adicionalmente, permite expandir el área de estudio de la línea de acústica ambiental e impacto de ruido en espacios públicos, determinando el aporte de

ruido no solo de vehículos de motor a combustión a gasolina y eléctricos, sino que, además, incluyendo los vehículos de motor a combustión Diesel. Asimismo, se podrán iniciar investigaciones para determinar el aporte de ruido de vehículos de transporte público, vehículos de carga, vehículos de servicios especiales y motocicletas, incluso llegando a clasificar los estudios de acuerdo al cilindraje del motor del vehículo, para posteriormente poder diseñar e implementar modelos matemáticos de predicción acertados, que permitan evaluar el impacto que tendría sobre una zona de estudio específica, la sustitución de vehículos 1:1 por tipo de motor (*eléctrico* \neg *determinado en este estudio* \neg , *combustión a gasolina* \neg *determinado en este estudio* \neg o *combustión Diesel*), cilindraje y/o función de tránsito (*automóvil particular* \neg *determinado en este estudio* \neg , *automóvil público*, *automóvil de carga*, *automóvil de servicios especiales* o *motocicletas*). Finalmente, y fundamentado en los principios franciscanos que imparte la Universidad de San Buenaventura, el estudio contiene un componente en pro del medio ambiente, el cual busca caracterizar las nuevas tecnologías que están incursionando al país con el fin de determinar si estas son viables para la reducción de problemáticas ambientales que actualmente existen en Colombia, puntualmente, los vehículos eléctricos y la contaminación auditiva proveniente del ruido por tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá.

2. Capítulo 2: Marco de referencia.

En este capítulo se exponen estudios acerca de los procedimientos metroológicos de aporte de ruido de vehículos automotores, modelos de simulación para mapas de ruido, simulaciones acerca de la sustitución de vehículos a combustión por vehículos eléctricos en escenarios específicos e incluso investigaciones acerca de los beneficios de la incursión de los EVs (*Vehículos Eléctricos*) y sus efectos sobre el medio ambiente y la salud humana.

2.1 Antecedentes del problema.

“**The effect of electric vehicles on urban noise maps**” (Campello Vicente, Peral Orts, Campillo Davo, & Velasco Sánchez, 2017) es una investigación realizada acerca de la simulación del aporte de ruido de vehículos eléctricos, con el fin de determinar el impacto sobre la reducción de niveles en mapas de ruido por tráfico vehicular en áreas urbanas.

Este estudio se basó en la implementación de un modelo de predicción que simulara las condiciones reales del área de estudio para el correcto desarrollo de los mapas de ruido. Por lo tanto, se hizo uso de un modelo oficial francés de simulación de ruido (**French official noise prediction model, NMPB ROUTES**) el cual fue usado para evaluar el nivel de ruido en función del flujo de tráfico. Este modelo de simulación requiere de la introducción de parámetros previamente medidos, de los cuales las principales se encuentran conformados por el flujo de vehículos livianos por hora (con un peso inferior a 3.500kg), el flujo de vehículos pesados (con peso superior a 3.500kg), la velocidad de cada tipo de vehículo y las condiciones de contorno. Para introducir los vehículos eléctricos al modelo de predicción, fue necesario saber la potencia acústica emitida y desarrollar un algoritmo para la respectiva modelación del nivel de emisión en función de la velocidad de la fuente.

Con base en lo anterior, los niveles de ruido encontrados en función de los efectos de los vehículos eléctricos (**EVs**) en mapas de ruido según el modelo NMPB ROUTES, mostró resultados para cuatro casos diferentes. El primero trata sobre el ruido de un vehículo eléctrico circulando en un carril de tráfico libre. El segundo sobre un vehículo eléctrico equipado con (**AVAS “Acoustic Vehicle Alerting System**, el cual es un sistema que funciona mediante sonidos previamente diseñados que permiten alertar a los peatones sobre la presencia de vehículos eléctricos) circulando en un carril de tráfico libre. El tercero se enfoca en un vehículo eléctrico circulando en una zona urbana real. Y el cuarto incluye el vehículo eléctrico con (**AVAS**) circulando por una zona urbana real.

Para el caso de los mapas de ruido, la simulación efectuada mostró que la sustitución de vehículos automotores a combustión (**ICE**) por vehículos automotores eléctricos (**EVs**) generaría una mejora en términos del ruido en lo que respecta al medio ambiente y estaría por debajo del límite de lo que se plantea en la legislación española.

Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test: Literature review (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013) es una propuesta sobre la revisión de la literatura y apuntes correspondientes a la normativa internacional ISO 362-1. La cual establece tanto el procedimiento de caracterización de fuentes de ruido individuales de un vehículo automotor, como la medición del aporte del ruido total (*con todas las fuentes de ruido involucradas*) proveniente del mismo.

“Quantifying the costs of a rapid transition to electric vehicles” (Riesz, Sotiriadis, Ambach, & Donovan, 2016) es un estudio que considera los costos financieros sobre una transición nacional rápida a vehículos eléctricos (**EVs**) en comparación con un escenario base que se encuentra caracterizado por el uso continuo de vehículos automotores a combustión. Este documento utiliza como caso de estudio la flota de automóviles australiana, la cual según se afirma, es la responsable del 8% de las emisiones nacionales de efecto invernadero.

Dentro de la metodología de este estudio, como se mencionó anteriormente, se desarrolló un modelo para cuantificar el costo financiero de una transición rápida a vehículos eléctricos en Australia

comparado con un escenario de referencia en donde existe un continuo uso de vehículos automotores a combustión. Estas fueron denominadas “Opciones” “*Éstas fueron determinadas “Opciones”, ya que los que toman decisiones tienen la opción de implementar políticas para promover un cambio rápido a EVs (Vehículos Eléctricos) (o no)*” (Riesz, Sotiriadis, Ambach, & Donovan, 2016). La primera opción consistió en el análisis de la parte financiera, asumiendo que la flota de vehículos automotores siga estando dominada por vehículos automotores a combustión épocas posteriores. La segunda, trata precisamente sobre el modelado de la rápida transición a vehículos automotores eléctricos, teniendo en cuenta que los vehículos automotores a combustión se suprimirían progresivamente a partir del año 2015 en adelante. Según mencionan en el estudio “*En ambas Opciones, se implementaron las proyecciones acerca de la población y el análisis histórico sobre las tendencias de la composición de la flota de automóviles para estimar el tamaño y las composiciones probables de la flota de automóviles desde el año 2015 hasta el 2035*” (Riesz, Sotiriadis, Ambach, & Donovan, 2016).

Dentro de las conclusiones en términos generales sobre este estudio, como se es mencionado en el texto, se encuentra que efectivamente el análisis planteado sugiere que un cambio rápido a vehículos eléctricos podría ser un método económico para reducir las emisiones de **GHG** (Greenhouse Gas) “Gases de efecto invernadero” (lo cual también fue tenido en cuenta en el estudio, en el momento de aplicaciones que se encuentran relacionadas a las energías renovables para la comparación entre las emisiones de (**GHG**) asociadas con la flota de automotores a combustión vs las de automotores eléctricos) bajo ciertas condiciones. Incluso, un cambio rápido a vehículos automotores eléctricos podría tener un costo menor en comparación con el uso continuo de automotores a combustión a razón de que es demostrado que el aumento por el costo del capital que se presentaría en los automotores a combustión sería compensado por la reducción de los gastos de combustible y mantenimiento. También, es mencionado que existen diversas oportunidades de reforzar y replantear este tipo de estudios a medida que pasa el tiempo y surgen nuevos métodos de entrada para futuros análisis. (Riesz, Sotiriadis, Ambach, & Donovan, 2016)

“How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health” (Requia, Mohamed, Higgins, Arain,

& Ferguson, 2018). Es un estudio que proporciona una profunda revisión de los efectos que causan la adopción de vehículos eléctricos en el aire, emisiones de gases de efecto invernadero y en la misma salud humana. Este estudio se sintetiza en literatura previamente consultada, la cual se encuentra relacionada con la adopción de vehículos automotores eléctricos en los aspectos mencionados anteriormente. Durante este estudio, realizando la revisión de la literatura se demostró que existen reducciones de estos efectos nocivos.

La metodología de este estudio, como fue mencionado anteriormente, consistió en una revisión de literatura relacionada con el tema de estudio. Se realizó una búsqueda dentro de bases de datos específicas (PubMed, ISI web of knowledge, Google Scholar, y ScienceDirect) con palabras clave que fueron previamente definidas. “*“electric vehicles”, “electric mobility”, “environment”, “air pollution”, “air quality”, “greenhouse gases”, “health impacts”, and “human exposure”.*” (Requia, Mohamed, Higgins, Arain, & Ferguson, 2018) en donde no hubo restricciones que fueran relacionadas acerca del año de publicación. Los estudios incluidos contenían reportes cuantitativos acerca de emisiones atmosféricas, que estuviera relacionado con las ciencias de la salud, efectos asociados con el aumento de la cuota por el mercado actual de (EVs) “*vehículos automotores eléctricos*” y estudios acerca de la contaminación. Solo fueron seleccionados artículos que estuvieran revisados por pares y escritos en el idioma inglés.

Después de haber relacionado y realizado la respectiva revisión de la literatura encontrada, se demuestra que efectivamente la implementación de (EVs) “*vehículos automotores eléctricos*” pueden tener un papel en la reducción de la contaminación del aire especialmente con sus consecuencias ligadas a la salud humana. También es adicionado que varios países que tengan un alto porcentaje de fuentes de energía renovables con el cambio a estos nuevos medios de transporte eléctrico tendrían un gran potencial para reducir el consumo de petróleo y las emisiones de gases contaminantes (GHG) “Gases de efecto invernadero” a las que son expuestos los seres humanos. (Requia, Mohamed, Higgins, Arain, & Ferguson, 2018)

2.2 Marco conceptual.

2.2.1 Sonido.

El sonido es una variación de densidad y otras variables en el aire, que se propaga a una velocidad aproximadamente de 340 m/s (metros por segundo) traduciéndose a lo que se conoce como la velocidad del sonido, “*la cual es comúnmente denotada como c* ” Este, se conoce como una onda de tipo longitudinal “*la cual, en varios casos, se ilustra mediante la ondulación en una superficie acuática seguido de una perturbación, como cuando una piedra es arrojada a dentro del agua*” (Sandberg & Ejsmont, 2002) Incluso el oído humano tiene la capacidad para reaccionar a la fuerza que en este caso se conoce como la **amplitud** de éstas variaciones en la presión atmosférica del aire. Respecto a las variaciones de la presión atmosférica del aire en función de la velocidad serán captadas como la **frecuencia**. (Sandberg & Ejsmont, 2002)

2.2.2 Ruido.

El ruido es cualquier percepción audible no deseada por un individuo o grupo de individuos (Redondo, 2008), que no necesariamente precisa de un alto nivel de presión sonora para ser molesto e indeseado, “*que, generado en cualesquiera condiciones, trasciende al medio ambiente o a un espacio público*” (Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2006) y el cual, de acuerdo con el tiempo de exposición, puede causar efectos nocivos tanto físicos como psicológicos en la salud de las personas. (Zuluaga Echeverry, 2009)

2.2.2.1 Tipos de ruido y ruido por tráfico rodado.

Actualmente, se plantean diferentes tipos de ruido de acuerdo a la fuente que los emite (*transporte, industrial, propio de actividades humanas y electromagnético (Señales de radio, antenas, etc.)*), dentro de los cuales se puede encontrar el ruido proveniente de elementos de transporte como se mencionó anteriormente, y aún más específico, el **ruido por tráfico vehicular**; el cual se plantea como cualquier emisión sonora (*Nivel de presión sonora*) nociva proveniente de uno o varios vehículos automotores (*Automóviles, motocicletas, camiones ligeros y buses*), tanto en estado estático (*en reposo*), como en estado dinámico (*en movimiento*), que afecta directa o indirectamente a un individuo o grupo de personas en una zona geográfica específica (Quiñones Bolaños, Bustillo

Lecompte, & Mehrvar, 2016). Asimismo, dicho nivel de presión sonora se expresa a su vez en decibeles con filtro de ponderación acústica frecuencial A “*dB(A)*”, el cual permite reflejar la respuesta del oído humano, en cuanto a la percepción de sonidos respecta. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006).

Según (Sandberg & Ejsmont, 2002) se presenta a continuación la *Imagen 1* extraída del libro “*Tyre/Road Noise Reference Book, 2002*” la cual plantea los niveles de presión sonora provenientes de diferentes fuentes que se encuentran presentes comúnmente en una sociedad. Dichas fuentes, podrían entonces asumirse como aquel ruido que puede llegar a ser nocivo para la salud “*los niveles definidos “seguros” en el rango de 30-80, podrían hasta incluso tener efectos negativos; por ejemplo, hablando acerca del bienestar, hipertensión y trastornos del sueño*” (Sandberg & Ejsmont, 2002). Es por esta razón que la ilustración proveniente del libro plantea tres diferentes áreas. El área roja, se define como la “zona dañina”, la amarilla como “la zona peligrosa” y la verde “zona segura”.

EFECTO	SPL ponderado-A en dB		Fuente Sonora Típica a Este Nivel
Daño auditivo serio	140		Lanzamiento de cohete espacial junto al encendido del motor de un jet (25m de distancia)
Daño auditivo y dolor	130		
Daño auditivo después de baja exposición	120		Alarma de ataque aéreo (5m de distancia)
Peligro de daño auditivo serio	110		Concierto de música Rock, cerca al escenario
Riesgo auditivo	100		Avión aterrizando (300m de distancia)
Algo de riesgo auditivo	90		Salón industrial ruidoso
Daños a la salud	80		Camión pesado (70Km/h a 10m de distancia)
Algunos daños a la salud Molestia severa	70		Automóvil (60Km/h a 10m de distancia)
Molestia	60		Conversación normal (1m de distancia)
Molestia moderada	50		Conversación tranquila (1m de distancia)
Buen ambiente	40		Música de radio tenue
	30		Murmullo (1m de distancia)
	20		Habitación tranquila
	10		Hoja crujiente
Incomodó "Callado"	0		Sala anecoica para mediciones de sonido.
			UMBRAL DE AUDICIÓN

Imagen 1: Ilustración sobre niveles de presión sonora provenientes de diferentes fuentes. Fuente: Modificado de: (Sandberg & Ejsmont, 2002)

Considerando lo anterior, y como se encuentra también señalado en la *Imagen 1*, se tiene en cuenta que los niveles de presión sonora producidos, ya bien sea por parte de los automóviles como carros particulares o tráfico pesado (*un vehículo automotor es un vehículo de transporte terrestre, el cual posee un mecanismo de propulsión específico (Tren de potencia) y transita mínimo sobre cuatro ruedas que mantienen siempre el contacto con el suelo. Además de esto, por lo menos dos de las ruedas son encargadas de dar propulsión al vehículo y dos de determinar la dirección en que este se desplaza.* (Servicio Nacional de Aprendizaje, 2002)), se encuentran en los rangos, que como fueron mencionados, podrían llegar a tener efectos negativos sobre la salud del ser humano. Este tipo de fuentes, entrarían entonces a formar parte del **ruido por tráfico vehicular**.

2.2.3 Fuentes generadoras de ruido en un vehículo automotor.

Ahora, específicamente hablando acerca de las fuentes generadoras de ruido en un vehículo automotor, se presenta la *Imagen 2* de nuevo extraída del libro “*Tyre/Road Noise Reference Book, 2002*” en donde se encuentran las principales fuentes generadoras de ruido para cualquier vehículo automotor. Cabe resaltar que los vehículos automotores de tráfico pesado, como los camiones o los buses usualmente tienen fuentes extras, las cuales se componen de sistemas de equipamiento especial, como por ejemplo para el caso de los buses, se conocen los sistemas de aire comprimido para abrir y cerrar las puertas de ingreso y salida de pasajeros “*pneumatic systems*” (sistemas de aire comprimido). (Sandberg & Ejsmont, 2002)

Estas fuentes generadoras de ruido se dividen en 3 grupos, de los cuales el primero se encuentra relacionado con las fuentes aerodinámicas que se relacionan con el flujo del aire turbulento que fluye alrededor y a través del vehículo. El segundo se encuentra relacionado el ruido de la unidad de potencia, en este caso el sistema del motor (sistema de inyección, sistema de admisión y el sistema de bloque de cilindros) el ventilador, el exosto y el sistema de transmisión. Y el tercero se encuentra relacionado con el ruido efectuado por el contacto del neumático contra el pavimento. (Sandberg & Ejsmont, 2002)

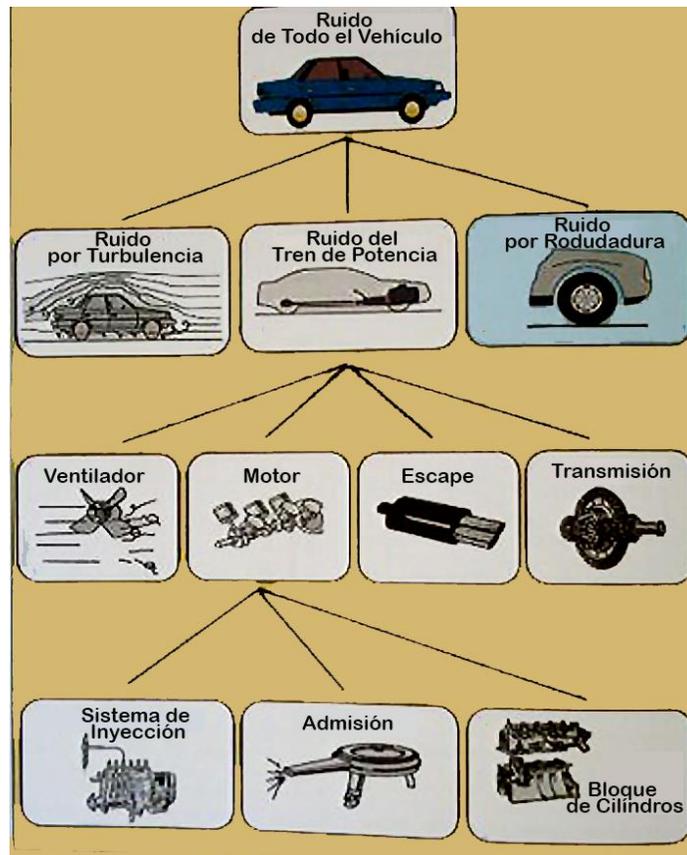


Imagen 2: Principales fuentes generadoras de ruido de un vehículo automotor. Fuente: Modificado de: (Sandberg & Ejsmont, 2002)

Dichas fuentes son determinadas con base en la norma internacional ISO 362-1 del 2015, la cual establece los métodos para la caracterización de fuentes presentes en el automotor y la medición del aporte de ruido total de todas las fuentes con el automotor en movimiento. Para el ruido proveniente de la fricción entre los neumáticos del automotor y el pavimento, la normativa establece la aplicación de la prueba de ruido por paso del vehículo, acoplando un sistema estático (*mientras el automotor se encuentre en movimiento los micrófonos conservaran su posición*) de dos micrófonos a 180 grados uno de otro a la llanta del automotor, realizando el análisis de las bandas de tercios de octava de 1 KHz en adelante.

2.2.4 Zona urbana.

Como se había planteado en un principio, el ruido por tráfico vehicular afecta diferentes zonas geográficas. Estas zonas geográficas, se encuentran, para el caso de la ciudad de Bogotá, categorizadas en sectores, los cuales determinan directamente los niveles de ruido permisibles en

estas áreas para horarios tanto diurnos como nocturnos. La Resolución 0627 de 2006, establece 4 principales sectores; El sector A “*Tranquilidad y silencio*”, el sector B “*Tranquilidad y ruido moderado*”, el sector C “*Ruido intermedio restringido*” y el sector D “*Zona suburbana o rural de tranquilidad y ruido moderado*”. Para el caso específico, en el sector B se encuentran los subsectores asociados a zonas urbanas, ya sean de uso residencial, institucional educativo o recreativo. (Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2006)

“Una zona urbana se puede definir por medio de uno o más de los siguientes factores: criterios administrativos o fronteras políticas (como formar parte de la jurisdicción de un municipio o comité de la ciudad); el tamaño de la población (cuando el número mínimo de habitantes en los asentamientos urbanos de la región es de 2.000, aunque puede oscilar entre 200 y 50.000); la densidad demográfica; la función económica (por ejemplo, cuando la actividad primordial de una gran mayoría de los habitantes no es la agricultura, o cuando existe empleo de sobra); y la existencia de características urbanas (como calles pavimentadas, alumbrado público o alcantarillado)...”. (UNICEF, 2012)

Asimismo, para dichas zonas, la normativa vigente establece estándares máximos permisibles de ruido de 65 dB(A) en horario diurno (7:01 a las 21:00 horas) y de 50 dB(A) en horario nocturno (21:01 a las 7:00 horas) (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006). Además de esto, la Ley nacional 769 de 2002 del código nacional de tránsito terrestre, determina que la velocidad máxima de un vehículo automotor en vías urbanas debe ser 60 Km/h independiente de su función de tránsito. (Ley 769 del 6 de agosto de 2002, 2002)

2.2.5 Clasificación de los vehículos automotores.

En adición a lo anterior, los vehículos automotores se pueden clasificar de dos maneras; con base al tipo de tren potencia que poseen y a la función de tránsito que desempeñan. Para el primer caso, se encuentran los vehículos automotores a combustión (*Diésel y gasolina*), “*los cuales basan su funcionamiento, como su nombre lo indica, en el quemado de una mezcla comprimida de aire y combustible dentro de una cámara cerrada o cilindro, con el fin de incrementar la presión y generar*

con suficiente potencia el movimiento lineal alternativo del pistón” (Servicio Nacional de Aprendizaje, 2002), , que a su vez pueden clasificarse de acuerdo al tipo de combustible y cilindraje del motor, los vehículos automotores eléctricos, *“los cuales son vehículos propulsados por uno o varios motores eléctricos alimentados por paquetes de baterías recargables”* (U.S Department Of Energy, 2017), que además de reducir las emisiones de gases, mitigan la contaminación de ruido por tráfico vehicular (Kuppusamy, Magazine, & Rao, 2017), y los vehículos automotores híbridos, que se caracterizan por poseer un tren de potencia que implementa ambos mecanismos de propulsión (*eléctrico y a combustión*). Para los tres casos, las fuentes generadoras de ruido de un vehículo automotor están determinadas por: el ruido debido a la fricción del viento con el vehículo (*Ruido por turbulencia aerodinámica*), el ruido debido a la fricción entre las neumáticos del vehículo y el pavimento (*Ruido por rodadura*) y el ruido proveniente del tren de potencia, el cual, a su vez, para el caso de los vehículos automotores a combustión, se encuentra determinado por el ruido proveniente de los sistemas de refrigeración, escape, transmisión y del motor. Asimismo, este último se encuentra afectado por los sistemas de inyección, admisión y el bloque de cilindros (Sandberg & Ejsmont, 2002). Por otro lado, para el segundo caso de clasificación, se determinan tres grandes funciones de tránsito: vehículos automotores particulares, de transporte público y de carga y transporte de mercancías, las cuales determinan directamente el tipo de automotor, la cantidad de pasajeros, velocidades máximas específicas y horarios de tránsito. (Ley 769 del 6 de agosto de 2002, 2002)

Según la Organización de los Estados Americanos (OEA) en el *“Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos”* establece que existen 3 categorías (L, M y N) para clasificar los vehículos automotores según su cantidad de ruedas, su cilindraje y la cantidad de pasajeros que puedan llevar. Dentro de las categorías mencionadas, los vehículos L *“Vehículo automotor con menos de cuatro ruedas.”* vehículos M *“Vehículo automotor que tiene por lo menos 4 ruedas o que tiene 3 ruedas cuando el peso máximo excede 1 ton. métrica, y es utilizado para el transporte de pasajeros 1.”* vehículos N *“Vehículo automotor que tenga por lo menos 4 ruedas o que tengan 3 ruedas cuando el peso máximo excede 1 ton. métrica, y que se utilice para transporte de carga.”* (SISTEMA DE INFORMACION SOBRE COMERCIO EXTERIOR, 2018)

2.2.6 Cálculo de ruido por tráfico rodado – Modelo inglés

Los modelos de cálculo de ruido por tráfico rodado permiten predecir el nivel de presión sonora a partir de diferentes parámetros, correcciones y/o condiciones. Actualmente, se pueden encontrar diferentes modelos oficiales de predicción de ruido por tráfico rodado, entre ellos destacan: el modelo francés (NMPB ROUTES), el modelo alemán (RLS90), el modelo nórdico (SP96) y el modelo inglés (CoRTN). (Arana, Martínez de Vírjala, Aleixandre, San Martín, & Vela, 2000) Siendo este último, el modelo de predicción utilizado durante el desarrollo del presente trabajo debido a su sencillez en el cálculo de la predicción del nivel de presión sonora.

De acuerdo con lo anterior, el modelo inglés permite el cálculo del aporte de nivel de presión sonora para el percentil L_{10} “*Ver Ecuación 1*” (*Nivel de ruido excedido el 10% del tiempo durante una hora*, (Departament Of Transport Welsh Office, 1998)) proveniente de una carretera de tránsito vehicular teniendo en cuenta correcciones en concordancia con: El número total de vehículos que transitan a través de la vía (q), la velocidad promedio de desplazamiento (v), el porcentaje de vehículos pesados (p , C_{use}), las condiciones de la superficie de tránsito de la vía (C_{cond}), la inclinación (C_{grad}) (*si se trata de una vía ascendente*), la absorción por tierra o pasto (C_{ground}), la interrupción de la emisión por barreras ($C_{barrier}$), la posición del receptor de la vía (C_{dis}), el ángulo de vista (C_{view}) y la influencia de reflexiones provenientes de fachadas en el punto de simulación (*Correcciones por fachadas*). (Departament Of Transport Welsh Office, 1998)

$$L_{10-1,hr} = 42.2 + 10 \log(q) + C_{dis} + C_{use} + C_{grad} + C_{cond} + C_{ground} + C_{barrier} + C_{view} [dB(A)] \quad \text{Ecuación 1}$$

Como bien se determina anteriormente, el modelo inglés propone el cálculo del nivel de presión sonora percentil L_{10} y no el del nivel equivalente (L_{eq}), esto se debe a que según los procesos experimentales de Barry y Reagan (1978) el percentil L_{10} tiende a converger al nivel equivalente en vías que no son consideradas autopistas. Por otro lado, y aunque la literatura plantea una conversión del percentil al nivel equivalente, esta solo debe ser implementada para ajustar el modelo a las

mediciones, ya que no es necesariamente una corrección, y, si el modelo para el percentil L_{10} ajusta a los niveles equivalentes medidos, no se debe realizar ninguna conversión de los datos calculados. (Kean, 2008)

2.3 Marco normativo.

2.3.1 Normativa ISO 362 – 1 2015.

La normativa ISO 362 – 1 del año 2015, específicamente los procedimientos allí definidos, aportan una medida del nivel de presión acústica para vehículos automotores en condiciones que sean controladas y repetibles.

Asimismo, dicha norma está determinada para llevar a cabo los procedimientos de registro de ruido para vehículos de categorías M y N, excluyendo las categorías L1 y L2, las cuales se encuentran cubiertas en la ISO 9645, de igual manera que los vehículos de categorías L3, L4 y L5, los cuales también se encuentran categorizados en dicha norma.

Para las pruebas, esta reglamentación implementa diseños que permiten realizar procedimientos independientes del diseño de los vehículos, que sean al mismo tiempo adaptables para tecnologías futuras, así como también futuras condiciones de tráfico. Esta parte de la normativa proporciona un método ingenieril que se pueda implementar para medir el ruido emitido por vehículos de carretera. Específicamente las categorías mencionadas anteriormente como lo son M y N. El método, se encuentra diseñado para cumplir con los requisitos de sencillez en la medida en que sean sólidos con la reproducción de los resultados bajo las condiciones de operación en las que se encuentre el vehículo. Este método de prueba requiere específicamente un entorno acústico de campo abierto extenso. (International Organization for Standardization, 2015)

Para la aplicación del procedimiento, la normativa establece una zona de pruebas de 40 metros de longitud, delimitada en la *Imagen 3* de la siguiente manera:

- Zona de velocidad constante (*Color azul*): Está compuesta por los primeros 10 metros de la zona, donde el vehículo debe ingresar en la marcha a la cual se va a desarrollar la prueba a velocidad constante durante todo el trayecto.
- Zona de aceleración (*Color verde*): Posterior a la zona de velocidad constante, el conductor del vehículo debe oprimir a fondo el pedal del acelerador durante los próximos 20 metros.
- Zona de desaceleración (*Color naranja*): Por último, el conductor debe soltar del todo e inmediatamente el pedal del acelerador durante los últimos 10 metros de la zona.

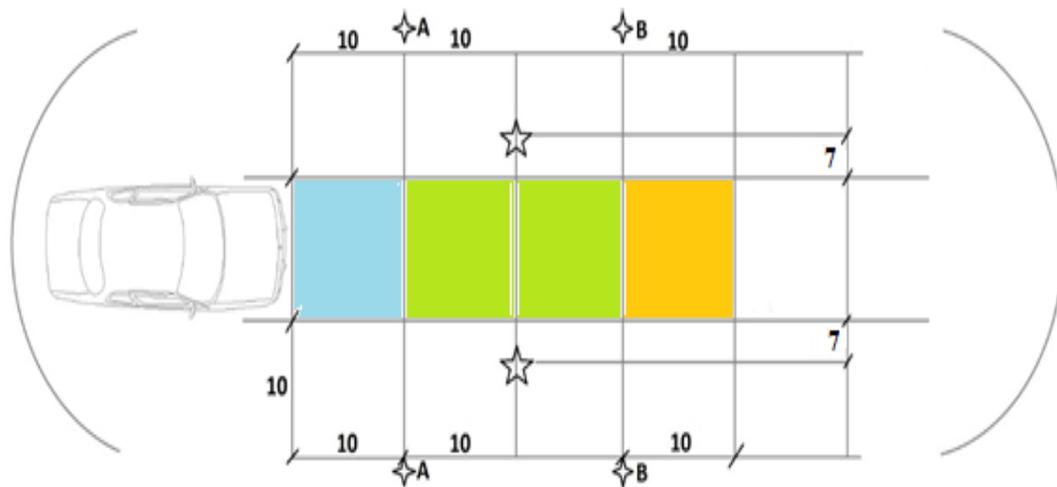


Imagen 3: Zona de pruebas 1. Fuente: ISO 362-1 del 2015.

Además de lo anterior, la normativa plantea que los sonómetros deben ser ubicados de manera paralela a la vía, a una distancia de 7 metros del centro del trazado, a 20 metros desde el inicio de la zona de pruebas (*Sonómetros representados por las estrellas cercanas a la zona verde*), esto con el fin de registrar de manera independiente las emisiones de ruido provenientes del lado derecho y el lado izquierdo del vehículo. Asimismo, toda la zona de pruebas debe ser demarcada con una línea en la mitad que oriente al conductor a través del trazado. Por último, se recomienda que al final de la zona de pruebas exista una distancia prudente según el vehículo y la marcha de pruebas, con el fin de que el conductor tenga el tiempo suficiente para detener el vehículo sin poner en riesgo su integridad o la de terceros.

Al momento de realizar las pruebas por paso de vehículo, la normativa establece el registro o monitoreo de datos de las siguientes variables:

- Nivel de presión sonora durante las pruebas.
- Velocidades de ingreso a cada una de las subzonas de la zona de pruebas.
- Condiciones meteorológicas (*Humedad, velocidad del viento, temperatura, presión barométrica*)
- Tiempos de cada paso del automotor a través de las subzonas.
- Velocidad rotacional del motor (R.P.M.) de ingreso a cada una de las subzonas de la zona de pruebas.

Además de lo anterior, la normativa establece el uso de datos básicos del automotor que realiza la prueba por paso de vehículo, tales como: Masa y potencia máxima, siendo estos necesarios para el cálculo del valor PMR (*Power to mass ratio o en español relación masa potencia*).

Con base en los datos registrados, la normativa permite calcular el nivel de presión sonora que emite el automotor en condiciones urbanas.

Una revisión de la literatura de la normativa ISO 362 -1 del 2015 (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013), plantea procedimientos de análisis en función de la frecuencia de acuerdo con la velocidad de la prueba, con el fin de determinar los mecanismos de emisión de ruido de un automotor de combustión que realiza la prueba por paso, y, de esta forma, poder determinar los aportes energéticos de cada una de los mecanismos que componen el automotor (*Ruido proveniente del motor y el sistema de admisión*). Además de esto, dicha revisión plantea dos procedimientos metrológicos para la caracterización del ruido proveniente del sistema de escape de un vehículo automotor a combustión, los cuales son: Registro de datos en ángulo fijo y distancia variable y registro de datos en ángulo variable y distancia fija.

2.3.2 Resolución 0627 de 2006.

Esta resolución establece la norma nacional en Colombia de emisión de ruido y ruido ambiental para determinar las regulaciones que sean aplicables a todas las actividades que puedan producir de forma directa indirecta daños de carácter ambiental. Dicha resolución, consta de 6 capítulos, 32 artículos y 5 anexos, en donde se establecen los términos que se usarán a lo largo del texto.

Asimismo, se establecen los horarios tanto diurnos como nocturnos para efectos de la aplicación de la resolución en donde se deben tener en cuenta que las unidades de medida se encuentran expresadas en decibeles (dB) y la presión sonora en Pascales. En donde las medidas que se efectúen deberán indicar el tipo de filtro implementado de ponderación frecuencial ya sea A, D, C, u otro. Para este caso, el filtro de ponderación [F, S ó I]. Continuando con lo anterior, se deberá que, para todas las mediciones y cálculos, el nivel de referencia es 20 μ Pa.

Para los parámetros de medida se tienen en cuenta como los niveles de presión sonora continuos equivalentes ponderados [A, L_{Aeq} , T] y ponderado lento (S). También se tienen en cuenta el ruido residual, que se mide como el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado [A, L_{Aeq} , T, Residual] y el nivel percentil, que corresponde a (L_{90}). Hay que aclarar que después de cada proceso, se deben considerar las correcciones ya que éstas ayudan a clarificar los resultados obtenidos a causa de cualquier anomalía. Éstas se pueden realizar por impulsividad, tonalidad, condiciones meteorológicas, horario, tipo de fuente y tipos de receptores.

Por otro lado, para mediciones efectuadas en cuanto a la emisión de ruido, se debe tener en cuenta su proceso de medición el cual se efectúa mediante un intervalo unitario de tiempo de medida siguiendo lo que se establece en el Artículo 5 y con el método que se encuentra descrito en el capítulo 1 del anexo 3 de la resolución. Para su cálculo, en cuanto al aporte de ruido de una fuente, se puede obtener mediante la resta logarítmica del ruido residual corregido del valor del nivel de presión sonora corregido continuo equivalente ponderado. Ver *Ecuación 2*.

$$L_{eq}emisión = 10 \log(10^{(L_{RAeq,1h})/10} - 10^{(L_{RAeq,1h,Residual})/10}) \text{ Ecuación 2}$$

Para los estándares máximos en cuanto a niveles de emisión de ruido, la resolución establece, mediante una tabla definida, los niveles máximos permisibles que se encuentran expresados en dB(A) en horarios tanto diurnos como nocturnos para los sectores y subsectores.

La aplicabilidad del ruido ambiental, considerando las mediciones efectuadas previamente, se establece que para los resultados que sean obtenidos en las mediciones, deberán ser utilizados para la realización del diagnóstico del ambiente por ruido. Estos, llevan mapas de ruido, lo cuales permitirán visualizar la realidad en lo que refiere al ruido ambiental.

El intervalo de tiempo de referencia se encuentra planteado dentro del rango de 14 horas diurnas y 10 horas nocturnas correspondientes con lo planteado en el Artículo 2 de la resolución. Para el intervalo de largo plazo de tiempo de medida, se establece que este intervalo es de 1 año. Si las aplicaciones del estudio ambiental son inferiores a 1 año como en casos de aplicación para eventos especiales como lo son carnavales, altas temporadas de turismo, ferias y fiestas, este podrá reducirse, pero deberá ser especificado claramente.

Continuando con el ruido ambiental, es importante tener en cuenta que, para esta aplicabilidad, también se deben considerar los estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental, en donde mediante una tabla expuesta en la resolución se encuentran definidos en dB (A) en horarios tanto diurnos como nocturnos para los sectores y subsectores.

Considerando ahora los equipos de medida y las mediciones, el equipo para las mediciones es el sonómetro el cual deberá tener la capacidad de medir la presión sonora a la cual será sometido directa o indirectamente. Este equipo debe cumplir con especificaciones de tipo 1 o tipo 2 y como dice el apartado, los sonómetros promedidores e integradores deberán ser ponderadores (**Clase P**). El pistófono es el instrumento con el que el sonómetro debe calibrarse. También, hay que tener cuenta los efectos del viento en términos de velocidad junto con las condiciones meteorológicas durante las mediciones, porque podría llegarse a necesitar un filtro anti-vientos ya que la velocidad del viento

no puede sobrepasar los 3 metros por segundo ($3m/s$). De igual forma, para el correcto montaje, se tiene que implementar el uso de un trípode, el cual funcione para el soporte del instrumento de medición. Los niveles equivalentes de presión sonora ponderados (A, L_{Aeq} , T) deberán efectuarse en tiempo seco, sin que exista la presencia de lluvias, lloviznas, truenos o caída de granizo, y los pavimentos deberán estar secos. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

Finalmente, para la realización de los informes técnicos sobre cada medición de emisión de ruido y ruido ambiental, deberán contener como mínimo los ítems descritos en el Artículo 21 de la resolución.

3. Capítulo 3: Diseño metodológico.

3.1 Tipo y enfoque de la investigación.

Según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006), en términos generales, un estudio cuantitativo es un enfoque investigativo, cuyas características miden fenómenos, utilizan estadísticas, se emplean experimentaciones, y también existen análisis causa-efecto. Este tipo de estudio posee un proceso secuencial que es deductivo, probatorio, y analiza la realidad objetiva.

Las ventajas de este tipo de investigación son que debido a que los análisis contienen datos numéricos, se puede llegar a una precisión y control sobre fenómenos, dando también una predicción de estos con una generalización de resultados. *“Usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías.”* (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006)

Considerando lo anterior, este estudio se considera de tipo cuantitativo, debido a que el enfoque en el análisis y la toma de datos se sigue metodológicamente tal y cómo se encuentra expuesto en la normativa ISO 362-1: 2015, en donde el procedimiento definido, proporciona la forma de calcular el nivel de presión sonora por paso a partir de mediciones del nivel de presión acústica de los vehículos con condiciones controladas y repetibles. Teniendo en cuenta la normativa se hizo una comparación en cuanto al nivel de ruido producido en estado dinámico por vehículos automotores eléctricos y a combustión de gasolina. Además, en este estudio, no se darán calificativos cualitativos, a razón de que se determinará un enfoque numérico y comparativo durante los procesos experimentales.

3.2 Recopilación de los datos.

3.2.1 Metodología de la resolución 0627 de 2006.

Para implementar la metodología planteada por la resolución 0627 del año 2006 para el objeto la medición de aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá, se tienen en cuenta los procedimientos estipulados en el “ANEXO 3/PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN/CAPÍTULO 2/Procedimiento de medición para ruido ambiental”, cabe aclarar, que no se utilizan los procedimientos estipulados para emisión de ruido debido a que la normativa establece que estos no son válidos para la medición de ruido por tráfico vehicular en general.

Según el procedimiento estipulado para la medición de ruido ambiental, se establece que la altura del sonómetro debe ser de 4 metros a partir del suelo. Sin embargo, debido a las condiciones de medición (*cercanía a una avenida de flujo de vehículos, la ausencia de un trípode para elevar un trípode de forma segura a dicha altura, la limitación de espacio para instalar un trípode de estas dimensiones sobre la acera peatonal y el riesgo operacional que conlleva elevar un equipo a estas alturas*) y, teniendo en cuenta que la caracterización de los vehículos está siendo realizada a través de los métodos de la normativa ISO 362-1 del 2015 y la resolución 0627 establece que se puede utilizar una altura diferente mientras se referencie la norma a la cual ésta corresponde, por lo tanto se decide ubicar el sonómetro a una altura de 1.20 metros al igual que los procedimientos de la norma ISO 362-1 del 2015. Asimismo, se asume que el ruido residual corresponde al nivel percentil L_{90} , criterio que se establece en el procedimiento de emisión de ruido de la resolución 0627 ya que no es posible medir el ruido de fondo sin intervención de la fuente, con el fin de que el ruido proveniente de las actividades de los transeúntes cercanos al punto de medición (*conversaciones, ruidos provenientes de mascotas, ruidos provenientes de actividades físicas, ruido proveniente de la promoción de los vendedores, etc.*), el cual se encontró presente más del 90% del tiempo de registro de datos, no genere impacto en los niveles de presión sonora provenientes de la fuente objetivo (*el ruido por tráfico vehicular en las calles de la zona en estudio*).

Los tiempos de medición, según los intervalos unitarios de tiempo de medida expuestos en el artículo 5 de la resolución, para cada proceso de medición, deberá ser de al menos 15 minutos para la obtención del nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A, $L_{Aeq,1h}$, el cual deberá ser corregido para la obtención del nivel de emisión total $L_{RAeq,1h}$ y otro sin que las fuentes se encuentren presentes para determinar el ruido residual, el cual también será corregido para obtener el $L_{RAeq,1h,Residual}$.

Para la emisión de ruido o el aporte de ruido de una fuente se debe tener en cuenta la expresión que se encuentra definida en la sección del marco normativo, *Ecuación 1*, la cual se encuentra relacionada con el Artículo 8 de la resolución. De igual manera, para las correcciones de los niveles equivalentes de emisión total y residual por tonos o por impulsividad, se deberá proceder como se especifica en el Anexo 2.

Los instrumentos de medición deberán estar calibrados de acuerdo como se indica en las instrucciones del fabricante haciendo uso del calibrador o pistófono. Cabe resaltar, que este proceso se debe efectuar antes y después de haber realizado las mediciones. El sonómetro deberá encontrarse instalado en un trípode, de manera que el micrófono se encuentre orientado en dirección a la fuente que se quiere medir.

Para los lugares de medición, es importante que no se efectúen mediciones con la presencia de lluvia. Si se llegasen a realizar, sus resultados serán completamente descartados. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

3.2.2 Metodología de la normativa internacional ISO 362-1 2015.

La metodología de la normativa internacional ISO 362, como ya se había mencionado anteriormente, aporta una medida del nivel de presión acústica para vehículos automotores en condiciones que sean controladas y repetibles.

Para el caso del método de medición del aporte de ruido total del vehículo en estado dinámico, la normativa establece la prueba de ruido por paso del vehículo. Esta estipula en su procedimiento, que el vehículo automotor debe ingresar a velocidad constante de 50 km/h en una zona de aceleración delimitada de 20 metros por 20 metros, la cual posee una línea recta trazada en la mitad a lo largo de ella, con el fin de guiar la trayectoria del automotor.

Dos micrófonos de iguales características deben ser posicionados a 7.5 metros de distancia del centro del área de aceleración a una altura de 1.2 metros. En el momento en que la parte frontal del vehículo ingresa al área de aceleración, el acelerador de este debe ser completamente presionado, de igual forma, al abandonar el área de aceleración, el acelerador del vehículo debe ser completamente liberado. Además de esto, el procedimiento debe estar monitoreado meteorológicamente durante toda la prueba, teniendo presentes los datos de velocidades del viento e indicadores de lluvia y humedad (*esta prueba no podrá ser llevada a cabo en condiciones de vientos extremos – velocidades iguales o superiores a 3 m/s – o lluvias*). Se deben realizar cuatro mediciones con el vehículo ingresando tanto en segunda como en tercera marcha a la zona de aceleración, verificando que los valores registrados entre marchas se encuentren en un margen de tolerancia de 2 dB(A) – *de no ser posible realizar las pruebas en tercera marcha debido a las velocidades que alcanza el vehículo y/o a la zona de pruebas, la prueba se puede llevar a cabo registrando los datos del vehículo desplazándose únicamente en segunda marcha* –.

Por otra parte, para el tratamiento de datos, la normativa establece el análisis de los datos registrados en contenido frecuencial (por bandas de tercio de octava) y nivel de presión sonora aportado Vs. distancia. Todo este procedimiento, permite determinar y analizar el aporte de ruido total del vehículo en estudio. Para los métodos de caracterización de fuentes sonoras del automotor, se tienen en cuenta 3 procedimientos de medición para los ruidos provenientes de: El motor, el sistema de admisión y escape y la fricción de los neumáticos con el pavimento.

3.2.2.1 Caracterización de ruido proveniente del motor.

En el caso del ruido del motor, la normativa establece la aplicación de la prueba de ruido por paso del vehículo, ya no ubicando dos micrófonos en el centro de la zona de aceleración distanciados a 7.5 metros, sino ubicando un arreglo de micrófonos lo más cercanos posibles a dicha área.

Posteriormente, se observan los aportes registrados por bandas de tercios de octava, en segunda marcha para la banda de tercio de octava de 120 Hz y en tercera marcha para la banda de tercio de octava de 180 Hz, los cuales se trabajan como datos aislados provenientes únicamente del motor del automóvil.

3.2.2.2 Medición del sistema de admisión y escape del automotor.

En el sistema de admisión y escape, se realizan dos procedimientos distintos. Para el sistema de admisión, se aplica el mismo método que con el ruido proveniente del motor, analizando esta vez las bandas de tercios de octava de 400 Hz, 500Hz 630 Hz y 800 Hz, donde este sistema presenta las mayores amplitudes. Por otro lado, para el sistema de escape, se realiza una prueba estática (con el vehículo en reposo) que posee dos escenarios. El primero, plantea la toma de datos ubicando un micrófono a una distancia fija de 0.9 metros del orificio del escape, realizando registros entre +135 grados y - 135 grados alrededor del tubo. Para el segundo escenario, se maneja un ángulo fijo de 45 grados respecto al orificio y se realizan registros variando la distancia entre la cápsula del micrófono y el tubo de escape.

3.2.2.3 Medición de la fricción entre los neumáticos contra el pavimento.

Por último, para el ruido proveniente de la fricción entre los neumáticos del automotor y el pavimento, la normativa establece la aplicación de la prueba de ruido por paso del vehículo, acoplado un sistema estático (*mientras el automotor se encuentre en movimiento los micrófonos conservaran su posición*) de dos micrófonos a 180 grados uno de otro a la llanta del automotor, realizando el análisis de las bandas de tercios de octava de 1 KHz en adelante.

3.3 Instrumentos.

En esta sección, se encuentran los instrumentos de recopilación de datos y los equipos de medición implementados para el desarrollo experimental de este estudio. Asimismo, se describe su aplicación para cada procedimiento.

3.3.1 Bitácora para mediciones de aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá.

El formato de bitácora que se encuentra en la *Imagen 4* es un instrumento de recopilación de datos para llevar a cabo el conteo de los automóviles transitando por la zona correspondiente al proceso metrológico “4.1 *Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá*”.

Día:	09	2018	Sonómetro:	SvanTek
Hora de inicio:			Hora de fin:	
Factor de cal. In.			Factor de cal. Fi.	
Punto de medición	Automóvil	Motocicleta	Tráfico Pesado	

Imagen 4: Formato de Bitácora. Diseño realizado por los integrantes que conforman el presente proyecto grado.

Como se puede observar las variables de registro del formato son; puntos de medición, información acerca del tipo de sonómetro, parámetros calibración e información de fecha, hora de inicio y hora de finalización de cada medición. Para el conteo de automotores, se tienen tres variables, las cuales

se encargan de la verificación del tipo de automotor transitando por la zona, ya sean automóviles, motocicletas o tráfico pesado.

3.3.2 Equipos de medición.

A continuación, se presentan los equipos de registro de datos y la información correspondiente a su uso durante el desarrollo de las pruebas metrológicas del proyecto.

3.3.2.1 Sonómetro Svantek 977.

Este equipo de medición es un sonómetro clase 1 el cual fue utilizado para los procedimientos **“4.2 Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá y 4.3 Medición ruido por paso de vehículo automotor de combustión y vehículo automotor eléctrico.”** Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo A*.

3.3.2.2 Sonómetro Svantek 943.

El Svantek 943 es un sonómetro clase 2, el cual fue implementado para los procedimientos experimentales **“4.2 Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá”** Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo B*.

3.3.2.3 Sonómetro Brüel 2250-1

El Brüel 2250-1 es un sonómetro clase 1, el cual fue usado para los procedimientos experimentales **“4.3 Medición ruido por paso de vehículo automotor de combustión y vehículo automotor eléctrico.”** Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo C*.

3.3.2.4 Micrófono de medición Earthworks M30.

El micrófono Earthworks M30 es un micrófono de medición de alta precisión el cual fue utilizado en los procedimientos **“4.4 Medición de ruido por rodadura para vehículo automotor a combustión y vehículo automotor eléctrico y 4.5 Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión.”** siendo amplificado en una de las entradas de la grabadora portátil Zoom H6. Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo D*.

3.3.2.5 Grabadora portátil Zoom H6.

La Zoom H6 es una grabadora portátil, la cual se empleó en la captura y registro de datos para los procedimientos **“4.4 Medición de ruido por rodadura para vehículo automotor a combustión y vehículo automotor eléctrico y 4.5 Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión.”** Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo E*.

3.3.2.6 Estación Meteorológica Davis Vantage Vue.

Este es un equipo de medición el cual es capaz de monitorear las condiciones meteorológicas el cual fue implementado en los procedimientos experimentales **“4.2 Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá, 4.3 Medición ruido por paso de vehículo automotor de combustión y vehículo automotor eléctrico, 4.4 Medición de ruido por rodadura para vehículo automotor a combustión y vehículo automotor eléctrico y 4.5 Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión”** Para más información técnica sobre este equipo, consultar el *Anexo F*.

4. Capítulo 4: Procedimientos y resultados.

En el presente capítulo, se describen y caracterizan los automóviles a utilizar durante las pruebas. Asimismo, se estipulan los procedimientos y los resultados para la medición del aporte de ruido vehicular en la zona urbana de estudio. Además de esto, se encuentran expuestos los procedimientos y resultados correspondientes a la caracterización de las fuentes generadoras de ruido del *Hyundai Atos* y el *Renault Twizy* y a la aplicación del modelo inglés para la predicción del nivel de ruido por tráfico rodado.

4.1 Descripción de las fuentes

En este apartado, se encuentran expuestas las especificaciones técnicas de los vehículos automotores utilizados durante las pruebas. Asimismo, se detalla el estado y las características de estos el día que fue realizado el registro de datos.

4.1.1 Hyundai Atos Prime GL

El Hyundai Atos Prime GL utilizado para las pruebas del proyecto es un vehículo automotor a combustión de gasolina modelo 2011, el cual desarrolla una potencia máxima de 43.99 KW y un torque máximo de 84.3 Nm. Además de esto, el vehículo cuenta con una masa de 847 Kg en vacío, cinco asientos incluyendo al conductor, una transmisión de 5 velocidades con tracción delantera y un motor de 999cc.

El día de las pruebas, el vehículo contaba con 57,236 Km registrados en el odómetro, se encontraba con todas sus revisiones al día y en un adecuado estado de funcionamiento de acuerdo con la revisión técnico-mecánica. Además de esto, en cuanto a los neumáticos corresponde, el vehículo utilizaba como medida en las cuatro llantas 165/65/R13 (*Marca / referencia: General / Altimax RT (Vai Technology)*) con un labrado de ciudad o multipropósito. Mientras que los neumáticos traseros se

encontraban calibrados a una presión de 30 PSI, los neumáticos delanteros se encontraban a una presión de 35 PSI, valores estipulados por el fabricante del vehículo para su óptimo rendimiento. Asimismo, el desgaste de estos era menor al 95% (*de acuerdo con las líneas de desgaste que estipula el fabricante*) y se encontraban alineados y balanceados. Por último, durante las pruebas el vehículo no contaba con cargamento extra ni en el baúl, donde solo se encontraban alojados el kit de carreteras y la llanta de repuesto, ni en las sillas de los pasajeros – *a no ser que el procedimiento de medición implicara introducir instrumentos al vehículo para el registro de datos* –.

4.1.2 Renault Twizy Technic

El Renault Twizy Technic utilizado para las pruebas es un vehículo automotor eléctrico modelo 2016, el cual desarrolla una potencia máxima de 12.67 KW y un torque máximo de 57 Nm. Asimismo, el vehículo cuenta con una masa en vacío de 473 Kg, dos asientos incluyendo el del conductor, un sistema de frenado regenerativo y tracción trasera.

El día de las pruebas, el vehículo contaba con 23,785 Km registrados en el odómetro y una salud de la batería del 98%, se encontraba con todas las revisiones al día y en buen estado de funcionamiento de acuerdo con las revisiones del concesionario. Además de esto, en cuanto a los neumáticos corresponde, el vehículo utilizaba como medida 125/80/R13 (*Marca / referencia: Continental / Conti Eco Contact*) para las llantas delanteras con labrado para ciudad o multipropósito a una presión de 32 PSI, y, 145/80/R13 (*Marca / referencia: Continental / Conti E. Contact*) para las llantas traseras de igual labrado a las delanteras a una presión de 30 PSI, valores de calibración de acuerdo con el manual de usuario para su óptimo funcionamiento. Asimismo, el desgaste de estos era menor al 95% (*de acuerdo al criterio descrito en la sección 4.1.1*) y se encontraban alineados y balanceados. Por último, el vehículo de igual forma que el *Hyundai Atos*, no contaba con cargas extras en la silla del pasajero – *a no ser que el procedimiento de medición implicara introducir instrumentos al vehículo para el registro de datos*–.

4.2 Medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá.

Este procedimiento consistió en la medición del aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá considerando los procedimientos especificados en la resolución 0627 para la evaluación de ruido ambiental asumiendo los parámetros que fueron especificados también en el apartado (3.2 Recopilación de los datos/3.2.1 Metodología de la resolución 0627 de 2006)

Para la definición de la zona geográfica en donde se efectuarían las mediciones, se realizó un trazado y establecimiento de puntos específicos en una zona residencial del barrio Cedritos de la ciudad de Bogotá D.C descritos en la *Imagen 5* el cual proporcionara en total 19 puntos, de los cuales solamente dos fueron descartados a razón de que se encontraban construcciones adyacentes. El primero se encuentra en la *Imagen 6*, el segundo en la *Imagen 7*.

El rango de la zona urbana de la *Imagen 5* (*Puntos cardinales de los mapas de la zona en estudio: Norte – Arriba, Sur – Abajo, Este – Derecha y Oeste - Izquierda*), comprendió desde la calle 144 con carrera 12 hasta la calle 146 con carrera 12. Asumiendo el rango anterior, desde la carrera 12 hasta la carrera 15. Desde *P1* hasta *P16* con aproximadamente 130 metros de separación entre cada punto, mientras que los últimos 3 puntos [*P17*, *P18* y *P19*] con aproximadamente 93.3 metros de separación.

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



Imagen 5: Zona geográfica urbana de la ciudad de Bogotá D.C [Barrio Cedritos – Bogotá] Fuente: Google Maps.

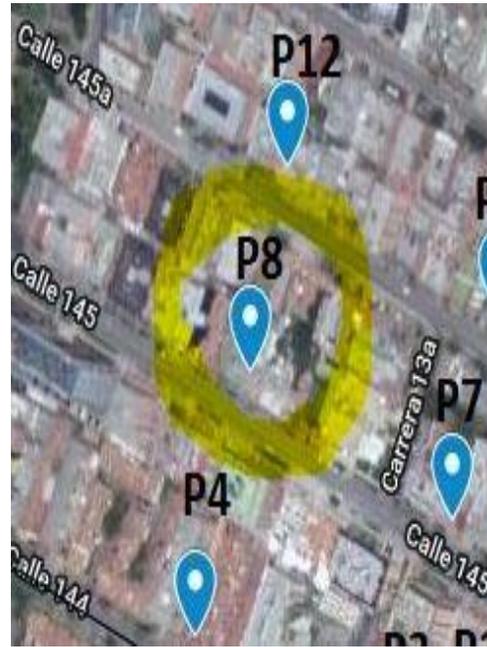


Imagen 6: Primer punto de medición descartado a razón de construcción adyacente. Fuente: Google Maps.



Imagen 7: Segundo punto de medición descartado a razón de construcción adyacente. Fuente: Google Maps.

Los instrumentos de medición utilizados para este procedimiento fueron los sonómetros *Svantek 977* y *Svantek 943*. El primero de tipo 1 y el segundo de tipo 2. Para el monitoreo de las condiciones climáticas se usaron 2 estaciones meteorológicas *Davis Vantage Vue*. Para el conteo de tráfico por la zona urbana, se implementó el formato previamente diseñado de bitácora que se encuentra descrito en el apartado (3.3.1 *Imagen 4: Bitácora para mediciones de aporte de ruido vehicular en una zona urbana de la ciudad de Bogotá.*) de forma en la que este, facilitara el proceso de medición y el conteo del tráfico circulando por la zona. Por un lado, el sonómetro tipo 1 abarcó las mediciones de los puntos definidos impares y el sonómetro tipo 2, los puntos definidos pares.

Las mediciones se realizaron durante un periodo de 3 días, entre 10 de la mañana y 2 de la tarde, en donde por cada punto de medición la duración de la toma de datos fue de 15 minutos, el cual es el mínimo requisito tal y como se especifica en el artículo 5 de la resolución 0627 dentro de los intervalos unitarios de tiempo de medida. A continuación, en la *Imagen 8* se encuentran los equipos de medición situados en el punto de medición (*P15*) el cual se encuentra en la *Imagen 5*.



Imagen 8: Evaluación de ruido ambiental de ruido por tráfico vehicular en zona urbana de la ciudad de Bogotá; Instrumentos de medición: sonómetro Svantek 943 y estación meteorológica Davis Vantage Vue.

A continuación, en las *Tablas 1 y 2*, se presenta la información acerca del promedio entre días y puntos a lo largo de las mediciones en la zona urbana de la ciudad de Bogotá D.C y los valores de LEQ de emisión sin corregir según la norma.

Calle	# Automóviles	# Motocicletas	# Tráfico Pesado	% Automóviles
Calle 144	39	6	2	82,95
Calle 145	48	7	2	84,27
Calle 145a	42	8	1	82,71
Calle 146	47	10	0	82,02
Carrera 13	88	12	2	85,64

Tabla 1: Número de vehículos entre puntos y días (T=15 minutos).

Calle	LEQ de emisión sin corregir (dB(A))	# Automóviles en 15 minutos
Calle 144	63,02	39
Calle 145	66,46	48
Calle 145a	62,18	42
Calle 146	62,94	47
Carrera 13	67,51	88

Tabla 2: Valores sin corregir de LEQ de emisión y frecuencia de paso de automóviles (entre días y puntos).

4.3 Medición de ruido por paso de vehículo automotor de combustión y vehículo automotor eléctrico.

Para la medición de ruido por paso de un vehículo automotor de combustión y un vehículo automotor eléctrico, se consideraron los procedimientos para medir el ruido generado por los mecanismos propios de un vehículo especificados en la normativa ISO 362-1 2015 los cuales, como ya fue mencionado anteriormente, “*aportan una medida del nivel de presión acústica en condiciones controlables y repetibles*” En este caso los vehículos para las pruebas de este estudio fueron el Hyundai Atos Prime (*automotor a combustión*) y el Renault Twizy (*automotor eléctrico*). Los instrumentos de medición utilizados fueron los sonómetros tipo 1 Svantek 977 y el Bruel 2250 I. Así mismo, se implementó una estación meteorológica Davis Vantage Vue.

Cabe resaltar que si bien, dentro de la normativa existen procedimientos únicamente para vehículos automotores a combustión, la caracterización del vehículo automotor eléctrico estuvo estrictamente ligada a esta normativa, ya que, para la comparación en términos de aporte de ruido, es necesario ser

consistente en los procedimientos que se aplican en ambos vehículos para poder tener una comparación adecuada. Las pruebas de velocidad constante, que también se encuentran especificadas en la normativa, no se tuvieron en cuenta, ya que el vehículo automotor eléctrico carece de un instrumento de diagnóstico de velocidad rotacional (R.P.M) y no se puede mantener una velocidad constante en el mismo. Además de lo anterior, en el artículo “*Pass by Noise Regulation as ECE R41 and ECE R51 - Vehicle Exterior Noise Engineering –*” (Brüel & Kjør, 2015) se explican las condiciones ASEP (**Adicional Sound Emission Provisions**) de la normativa ISO 362, las cuales basan sus cálculos de los niveles de emisión de ruido en la velocidad rotacional (R.P.M) del motor del automóvil. Ya que, el motor del vehículo eléctrico carece de esta característica debido a la arquitectura de su tren de potencia y el enfoque de este estudio es de carácter comparativo, es decir, se pretende que los procedimientos para ambos vehículos sean los mismos, se descartan los procedimientos ASEP.

Para las pruebas de paso, los dos sonómetros se posicionaron entre la mitad de la zona de aceleración y la zona de desaceleración paralelamente a 1.2 metros de altura y su distancia del centro acústico fue de 4.5 metros. El lugar de medición en la *Imagen 11* el cual fue la zona de medición definida para el procedimiento (*ubicada en Autonorte a 3km del Castillo Marroquin, Chía, Cundinamarca*), poseía una limitante ya que la norma plantea que la distancia del centro acústico debe ser a 7,5 metros de los equipos de medición, pero los equipos no se pudieron posicionar a esa distancia por limitaciones de espacio a razón de entrar a ser una zona privada. Descritas en la *Imagen 9* y en la *Imagen 10* se encuentran las dos zonas mencionadas previamente. Las cuales, por medio de dos carteles, daban la señalización del punto en donde cada vehículo para la debía entrar en estado de aceleración y en desaceleración. La estación meteorológica se encontraba cerca de la zona para monitorear las condiciones meteorológicas. Antes de cada medición se realizó previamente una medición de ruido de fondo.



Imagen 9: Zona de aceleración para las pruebas de paso con vehículos automotores.



Imagen 10: Zona de desaceleración para las pruebas de paso con vehículos automotores.

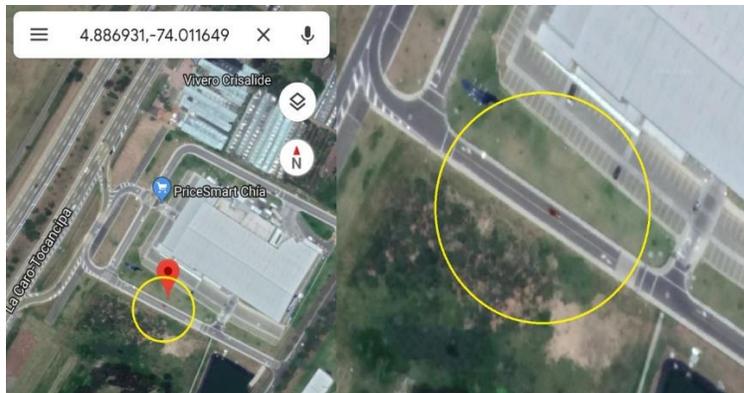


Imagen 11: Zona de medición para el procedimiento. Fuente: Google Maps.

En la *Tabla 3*, se presentan los resultados de aporte de ruido de las pruebas por paso del vehículo automotor eléctrico Renault Twizy aplicada según la normativa ISO 362 – 1 2015.

Prueba	Izquierda (dB(A))	Derecha (dB(A))	Diferencia (dB(A))
Primera	56,80	56,90	0,10
Segunda	56,50	57,60	1,10
Tercera	56,50	56,50	0,00
Cuarta	56,40	56,00	0,40
Total Leq (dB(A))	56,55	56,79	0,24
Total Emisión R. Twizy (dB(A))	56,67		

Tabla 3: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Renault Twizy.

En la *Tabla 4*, se presentan los resultados de aporte de ruido de las pruebas por paso del vehículo automotor a combustión Hyundai Atos aplicada según la normativa ISO 362 – 1 2015.

Prueba	Izquierda (dB(A))	Derecha (dB(A))	Diferencia (dB(A))
Primera	61,30	61,30	0,00
Segunda	61,50	61,40	0,10
Tercera	61,30	59,90	1,40
Cuarta	61,30	61,30	0,00
Total Leq (dB(A))	61,35	61,02	0,33
Total Emisión H. Atos (dB(A))	61,19		

Tabla 4: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Hyundai Atos.

4.4 Medición de ruido por rodadura para vehículo automotor a combustión y vehículo automotor eléctrico.

La medición de ruido por rodadura fue una prueba que se realizó para conocer el ruido generado por el contacto del neumático contra el pavimento en ambos tipos de vehículo automotor. En este procedimiento se hizo uso del micrófono de medición Earthworks M30 acoplado al vehículo y una grabadora portátil Zoom H6 para el registro de los datos. Los procedimientos fueron basados en la normativa ISO 362-1 2015. Este procedimiento se dividió en dos etapas. La primera requirió un procedimiento inicial de calibración, la segunda, trata precisamente sobre el registro mismo de los datos.

Aunque, si bien el ruido por rodadura se ve afectado por el labrado, las medidas del neumático, el desgaste de estos y la masa del vehículo automotor (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013), para el caso del proceso experimental, y puesto a lo complicado que es conseguir un vehículo eléctrico que posea el peso de un vehículo de motor a combustión y además tenga los mismos neumáticos (*ya que el costo de adquisición de estos vehículos actualmente es demasiado elevado y no son de fácil acceso*), se decidió realizar el proceso experimental obviando dichas diferencias, eligiendo el *Hyundai Atos* como vehículo a combustión para las mediciones por su baja masa y debido a que posee la misma medida de rin que el *Renault Twizy “R13”*.

4.4.1 Procedimiento de calibración in situ para efectuar el registro de datos con micrófono.

Al momento de la captura de datos, fue realizado un proceso de calibración haciendo uso del pistófono (*el cual genera un tono de calibración a 1kHz a 94dB*). Después de obtener este registro, se notó durante el monitoreo de las grabaciones las señales registradas entraban en distorsión, razón por la cual, se volvió al procedimiento de calibración ajustando ahora los niveles de los preamplificadores en valores inferiores obteniendo que para el vehículo automotor eléctrico el valor de pre-amplificación fue el potenciómetro posicionado en el nivel 3, mientras que para los registros de audio con el vehículo automotor a combustión fue en el nivel 2.

4.4.2 Registro de datos.

Para el registro de los datos, se realizaron grabaciones a una frecuencia de muestreo de 48kHz y a una profundidad en bits de 24 bits. El micrófono fue acoplado a 180° como lo establece la norma tanto en el vehículo automotor a combustión y el vehículo automotor eléctrico. Esta prueba se realizó en estado dinámico para cada vehículo (*realizando primero el registro de datos para el Renault Twizy y después para el Hyundai Atos*), ya que su objetivo fue conocer el ruido generado por el contacto del neumático contra el pavimento. En las *Imágenes 12 y 13*, se puede observar el micrófono de medición acoplado a uno de los vehículos automotores. En este caso, al vehículo automotor eléctrico.



Imagen 12: Micrófono de medición acoplado al vehículo automotor eléctrico Renault Twizy (plano cercano)



Imagen 13: Micrófono de medición acoplado al vehículo automotor eléctrico Renault Twizy (plano lejano).

A continuación, en la *Tabla 5*, se presentan los resultados para el ruido por rodadura de los dos vehículos automotores utilizados en las pruebas.

f (Hz)	R. Twizy	H. Atos	f (Hz)	R. Twizy	H. Atos
	SPL (dB)			SPL (dB)	
20	44,80	47,80	630	31,60	39,10
25	46,70	49,70	800	34,60	39,10
31,5	43,40	50,30	1000	30,20	41,70
40	41,70	50,20	1250	32,40	39,70
50	42,40	45,70	1600	28,60	40,60
63	42,10	46,00	2000	29,60	40,40
80	40,20	46,60	2500	28,00	37,20
100	38,00	45,90	3150	26,70	36,60
125	36,50	47,00	4000	25,50	35,70
160	34,00	47,20	5000	26,20	34,20
200	34,30	48,30	6300	22,30	31,80
250	38,30	44,30	8000	20,80	28,70
315	34,90	46,50	10000	19,70	27,30
400	32,80	43,80	12500	17,70	27,40
500	31,60	42,50	16000	17,30	26,10

Tabla 5: Ruido por rodadura para el Hyundai Atos y el Renault Twizy.

4.5 Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión.

Este procedimiento fue realizado únicamente en el vehículo automotor a combustión, puesto que el vehículo automotor eléctrico carece de este sistema. Esta prueba, que es de tipo estático, sigue los procedimientos de la norma ISO 362-1 2015, es decir que el automotor se encontraba en estado de reposo durante el procedimiento.

Para esta medición se implementó el micrófono de medición Earthworks M30 junto con la grabadora portátil Zoom H6. Esta prueba, como ya se mencionó anteriormente, posee dos escenarios. El

primero, plantea la toma de datos ubicando un micrófono a una distancia fija de 0.9 metros del orificio del escape, realizando registros en +135 grados y – 135 grados en el tubo de escape. Para el segundo escenario, se manejó un ángulo fijo de 45 grados respecto al orificio y se realizaron registros variando la distancia entre la cápsula del micrófono y el tubo de escape. Este procedimiento de medición se encuentra estipulado en la revisión de la literatura de la normativa ISO 362 -1 del 2015 (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013) A continuación se presenta en la *Imagen 14* el montaje del micrófono para la medición del ruido de escape del vehículo automotor a combustión.



Imagen 14: Montaje de micrófono Earthworks M30. Medición de ruido de escape para vehículo automotor a combustión.

4.5.1 Método uno: Distancia fija y ángulo variable.

En las *Tablas 6 y 7*, se presentan los resultados para la prueba de escape a distancia fija y ángulo variable por bandas de 1/3 de octava a 1000, 2000 y 3000 R.P.M para el vehículo automotor Hyundai Atos.

f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.	f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.
	SPL (dB)				SPL (dB)		
20	63,10	58,60	60,30	630	44,20	44,40	57,60
25	61,20	62,70	61,40	800	44,80	45,90	53,20
31,5	61,20	61,70	62,10	1000	45,50	46,40	53,20
40	58,10	57,60	57,80	1250	47,70	49,40	53,30
50	57,40	57,20	60,00	1600	47,70	50,50	56,90
63	73,90	76,00	56,50	2000	45,90	47,90	57,30
80	58,20	61,30	54,60	2500	45,40	47,50	57,30
100	52,20	53,50	73,20	3150	43,30	45,00	54,40
125	51,80	60,20	55,20	4000	43,30	44,80	53,00
160	48,30	51,40	56,70	5000	42,60	44,50	51,70
200	52,00	54,10	64,30	6300	40,90	41,30	50,30
250	45,00	45,60	49,70	8000	36,50	37,90	47,00
315	42,30	43,40	55,40	10000	34,50	35,90	43,90
400	48,40	49,40	56,80	12500	37,50	37,20	41,70
500	47,40	49,60	56,00	16000	42,00	43,10	44,80

Tabla 6: Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia fija y ángulo de 135 grados.

f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.	f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.
	SPL (dB)				SPL (dB)		
20	61,70	56,10	63,30	630	45,30	47,70	57,60
25	65,70	62,40	64,90	800	47,00	46,80	54,30
31,5	61,50	61,60	64,20	1000	48,60	50,40	57,30
40	60,50	56,40	63,20	1250	51,20	52,20	60,20
50	59,20	57,70	63,30	1600	50,90	53,10	60,20
63	76,90	78,60	64,30	2000	48,20	50,00	58,80
80	60,10	62,90	60,60	2500	48,80	50,10	59,20
100	66,20	57,50	75,10	3150	47,50	48,60	57,80
125	53,30	57,30	57,40	4000	46,40	48,80	56,10
160	55,30	57,80	55,20	5000	43,50	46,60	53,60
200	55,50	54,30	64,00	6300	41,50	43,10	52,20
250	46,10	49,30	52,00	8000	38,00	39,50	48,60
315	45,10	45,60	56,60	10000	36,00	37,40	45,00
400	51,10	51,00	58,50	12500	40,80	40,20	42,90

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

500	49,00	51,20	59,70	16000	42,20	43,50	46,40
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla 7: Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia fija y ángulo de -135 grados.

4.5.2 Método dos: Distancia variable y ángulo fijo.

En las *Tablas 8, 9 y 10*, se presentan los resultados para la prueba de escape a distancia variable y ángulo fijo por bandas de 1/3 de octava a 1000, 2000 y 3000 R.P.M para el vehículo automotor Hyundai Atos.

f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.	f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.
	SPL (dB)				SPL (dB)		
20	58,30	60,50	58,40	630	46,80	50,90	59,90
25	61,10	62,30	61,00	800	48,50	51,30	59,30
31,5	62,90	64,90	63,10	1000	48,40	52,50	59,90
40	57,00	59,30	64,40	1250	49,90	52,50	60,00
50	55,40	57,90	65,20	1600	52,40	54,70	62,50
63	77,60	81,20	67,40	2000	48,60	51,50	58,60
80	55,70	60,80	63,20	2500	49,90	52,60	59,80
100	56,20	55,50	74,80	3150	48,90	52,50	58,20
125	53,80	55,30	56,90	4000	46,60	51,00	56,80
160	49,40	55,00	56,10	5000	45,30	50,90	54,60
200	54,80	55,20	62,90	6300	44,60	48,60	53,70
250	46,60	50,70	60,10	8000	40,60	45,30	50,90
315	46,10	48,00	62,00	10000	38,70	42,00	48,40
400	51,10	53,00	60,10	12500	45,30	45,90	49,00
500	50,10	55,30	61,60	16000	44,90	47,20	51,60

Tabla 8: Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 1m y ángulo fijo.

f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.	f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.
	SPL (dB)				SPL (dB)		
20	62,10	62,20	63,50	630	47,90	49,20	60,90
25	72,80	64,70	63,00	800	51,00	49,10	55,90
31,5	81,00	64,90	62,30	1000	50,20	49,50	56,40
40	65,80	56,40	62,60	1250	50,20	52,10	62,10
50	61,10	59,50	61,50	1600	50,90	50,50	57,80
63	61,80	77,30	61,30	2000	49,30	47,90	57,10
80	63,90	55,70	60,80	2500	46,10	50,00	60,80
100	58,00	58,20	74,70	3150	45,30	48,20	58,20
125	64,40	56,60	59,20	4000	41,80	47,20	56,60
160	59,60	53,10	56,00	5000	39,80	44,90	53,30
200	55,20	53,90	67,20	6300	36,90	42,90	51,90
250	55,80	50,50	54,20	8000	34,50	39,90	48,80
315	52,10	46,80	56,00	10000	34,10	38,70	46,50
400	56,00	52,00	54,70	12500	32,90	44,10	46,40
500	50,50	49,50	57,60	16000	30,20	46,00	49,10

Tabla 9: Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 1,5m y ángulo fijo.

f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.	f (Hz)	1000 R.P.M.	2000 R.P.M.	3000 R.P.M.
	SPL (dB)				SPL (dB)		
20	57,90	64,60	61,30	630	42,20	46,40	56,40
25	70,80	65,00	65,10	800	43,30	48,60	55,30
31,5	79,10	64,40	64,70	1000	44,70	47,90	54,00
40	57,20	62,40	62,80	1250	45,30	51,10	58,90
50	57,70	62,60	64,20	1600	44,20	51,80	56,70
63	58,80	73,20	64,50	2000	41,90	48,10	56,30
80	55,10	60,90	61,70	2500	39,80	48,40	55,70
100	52,50	62,50	74,70	3150	38,80	47,60	56,80
125	51,00	58,10	59,00	4000	36,40	46,70	55,40
160	47,50	55,90	56,70	5000	34,80	44,90	52,00
200	45,40	54,40	61,10	6300	33,30	40,80	48,50
250	44,10	49,20	51,70	8000	31,20	37,10	46,10

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

315	43,50	46,50	52,70	10000	31,30	36,00	44,00
400	48,80	49,20	54,70	12500	30,80	41,30	44,20
500	42,60	47,10	55,10	16000	28,00	41,20	46,80

Tabla 10: Ruido del sistema de escape del Hyundai Atos - Distancia de 2m y ángulo fijo.

4.6 Calibración de archivos registrados con los micrófonos para post procesamiento.

El proceso de corrección de los archivos de calibración y emisión de ruido registrados con la grabadora Zoom H6 detallado a continuación, parte de que la sensibilidad del sistema de registro durante las mediciones de calibración y los registros de emisión de ruido utilizando los niveles de pre-amplificación correspondientes, es la misma, y por lo tanto, es válido llevar a cabo un proceso de normalización entre los archivos de audio de emisión de ruido y los archivos de calibración, considerando que estos se encuentran registrados con la misma posición del preamplificador.

4.6.1 Archivos originales.

En esta sección, se muestran los archivos originales de calibración tanto en función del tiempo como en función de la frecuencia.

En la *Imagen 15* se muestra el archivo original de calibración para la posición 2 del preamplificador de la grabadora (*grabación de audio continua del pistófono reproduciendo un tono de 94 dB*), donde, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la amplitud de la señal registrada. Asimismo, en la *Imagen 16* se aprecia la señal de audio procesada mediante una FFT (*transformada rápida de Fourier*) a través del software dBFA Suite, donde se evidencia en la esquina superior derecha que el aporte en la banda de tercio de octava de un 1 KHz, banda en la cual el pistófono emite el tono de calibración, tan solo es de 81.6 dB, mientras que, durante el proceso de calibración este se encontraba emitiendo un nivel de presión sonora de 94 dB. Por lo tanto, es necesario realizar un proceso de normalización de la señal de calibración mediante un código de procesamiento de audio desarrollado en Matlab.

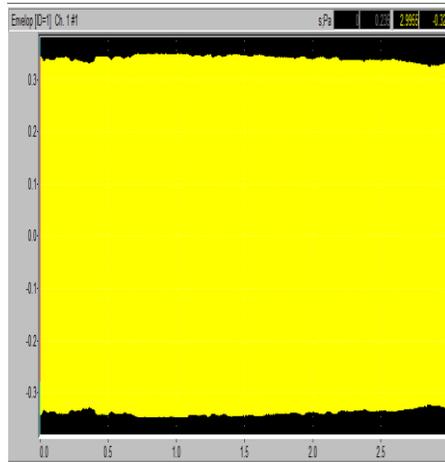


Imagen 15: Espectro de onda a través del software dBFA Suite, archivo original para posición 2 del preamplificador.

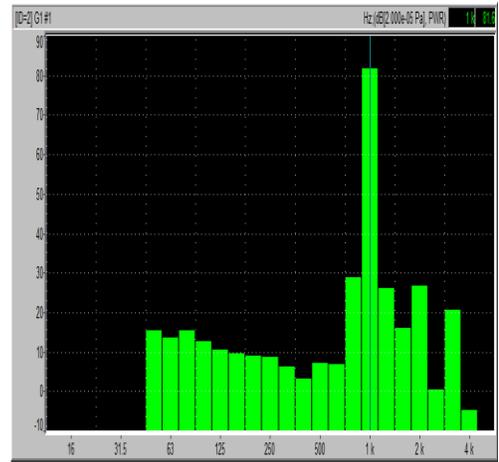


Imagen 16: FFT del archivo original a través del software dBFA Suite.

En la *Imagen 17* se muestra el archivo original de calibración para la posición 3 del preamplificador de la grabadora (*grabación de audio continua del pistófono reproduciendo un tono de 94 dB*), donde, el eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical la amplitud de la señal. De igual manera que para el primer archivo de calibración, en la *Imagen 18*, se aprecia la señal de audio procesada mediante una FFT (*transformada rápida de Fourier*) a través del software dBFA Suite, donde se evidencia en la esquina superior derecha que el aporte en la banda de tercio de octava de un 1 KHz, es de 90.9 dB, valor que si bien se encuentra más cercano de los 94 dB que emite el pistófono debido al aumento en el nivel de pre-amplificación, no es el correspondiente al proceso de calibración y debe ser ajustado de igual forma que el anterior mediante un proceso de normalización de datos en Matlab.

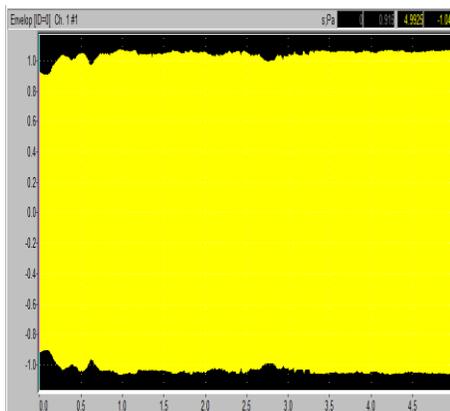


Imagen 17: Espectro de onda a través del software dBFA Suite, archivo original para posición 3 del preamplificador.

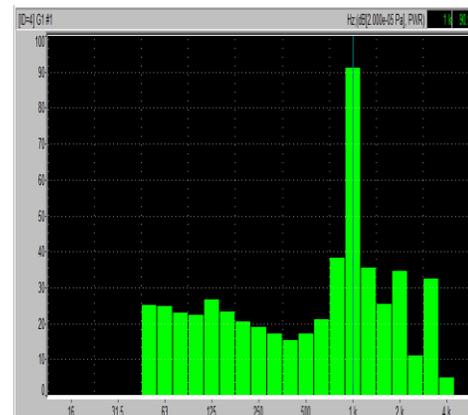


Imagen 18: FFT del archivo original a través del software dBFA Suite.

4.6.2 Códigos en Matlab.

En este apartado, se muestran y explican los códigos de Matlab utilizados para la lectura, la normalización y la exportación de los archivos de audio de calibración corregidos.

En la *Imagen 19* se evidencia el código utilizado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador 2. Como se puede notar, el código se encuentra dividido en 2 partes (*hasta la línea 11 y después de esta*), la primera parte corresponde a la lectura, normalización (*respecto al valor máximo*) y exportación del audio de calibración como tal, asimismo, la segunda parte corresponde al código implementado para la lectura, la calibración (*respecto al archivo de calibración*) y la exportación de los archivos de audio que fueron registrados para el Hyundai Atos, los cuales se normalizan respecto al audio de referencia de 94 dB.

En la *Imagen 20* se encuentra el código utilizado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador en la posición 3. De igual forma que para el archivo en posición de preamplificador 2, el código se encuentra dividido en 2 partes (*hasta la línea 11 y después de esta*), la primera parte corresponde a la lectura, normalización (*respecto al valor máximo*) y exportación del audio de calibración como tal, asimismo, la segunda parte corresponde al código implementado para la lectura, la calibración (*respecto al archivo de calibración*) y la exportación de los archivos de audio que fueron registrados para el Renault Twizy, los cuales se normalizan respecto al audio de referencia de 94 dB.

Como se puede notar, aunque esencialmente los códigos funcionan de la misma manera, es necesario realizar dos programas de calibración debido a que la duración en tiempo de las grabaciones de los audios de calibración no es la misma y los niveles de pre-amplificación también varían. Por lo tanto, los datos del arreglo se recorren y procesan en rangos distintos.

```

1 - clear all
2 - clic
3
4 % Calibración de datos con el pre-amp de la zoom H6 en la posición 2
5 % Lectura del archivo de calibración
6 [y,Fs] = audioread('Calibración_94dB_Nivel2.wav');
7 % Normalización a 1 pascal - 94 dB
8 y1 = y/(96000:144000,1) ./ max(y(96000:144000,1),1);
9 % Generación del archivo de calibración corregido - Solo se realiza una vez
10 %audiowrite('Calibración_94dB_Nivel2_Corregido.wav',y1,Fs)
11
12 % Audio de salida calibrado
13 % Lectura del archivo a calibrar
14 [ya,Fs] = audioread('Zoom 005_Hyundai_5 [a 3000 revoluciones].wav');
15 % Corrección de datos respecto al archivo de calibración corregido
16 ya = ya ./ max(y(96000:144000,1),1);
17 % Generación del archivo calibrado
18 audiowrite('Zoom 005_Hyundai_5 [a 3000 revoluciones]_Corregido.wav',ya,Fs)
19
20
    
```

Imagen 19: Código implementado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador en la posición 2.

```

1 - clear all
2 - clic
3
4 %Calibración de datos con el pre-amp de la zoom H6 en la posición 3
5 % Lectura del archivo de calibración
6 [y,Fs] = audioread('Calibración_94dB_Nivel3.wav');
7 % Normalización a 1 pascal - 94 dB
8 y1 = y/(192000:240000,1) ./ max(y(192000:240000,1));
9 % Generación del archivo de calibración corregido - Solo se realiza una vez
10 %audiowrite('Calibración_94dB_Nivel3_Corregido.wav',y1,Fs)
11
12 % Audio de salida calibrado
13 % Lectura del archivo a calibrar
14 [ya,Fs] = audioread('Zoom 001_Twizy_1.wav');
15 % Corrección de datos respecto al archivo de calibración corregido
16 ya = ya ./ max(y(192000:240000,1));
17 % Generación del archivo calibrado
18 audiowrite('Zoom 001_Twizy_1_Corregido.wav',ya,Fs)
19
20
    
```

Imagen 20: Código implementado para la normalización de audio del archivo calibrado con la posición del preamplificador en la posición 3.

4.6.3 Importación de archivos calibrados.

Aquí, se describe el proceso de importación de los archivos calibrados al software dBFA Suite y la verificación de que la corrección funciona de manera adecuada. En la Imagen 21 se muestra la configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 2, donde, se selecciona el canal de importación, el tipo de transductor utilizado, para el caso un transductor de presión (*micrófono de condensador*), y el valor de referencia, el cual se determina como $\sqrt{2}$ con el fin de que el software asuma los datos para el procesamiento como valores pico y no R.M.S.

En la Imagen 22, se aprecia la configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 3 la cual posee los mismos parámetros de importación que para la posición de pre-amplificación 2.

Imagen 21: Configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 2.

Imagen 22: Configuración de importación del archivo de audio para la posición de pre-amplificación 3.

Ahora, como se muestra en la *Imagen 23*, la duración del nuevo archivo de calibración para la posición del preamplificador 2 es de 1 segundo. Esto se debe a que se realiza un recorte de la señal con el fin de tomar el tramo de la señal donde más estable es el comportamiento de la amplitud respecto al tiempo, sin dejar de tener una muestra lo suficientemente significativa para el procesamiento de la FFT mediante el software dBFA Suite.

En la *Imagen 24*, se detalla la señal con el nivel del 2 preamplificador corregida y procesada mediante una FFT, y se evidencia en la esquina superior derecha que el nivel de aporte energético en la banda de 1 KHz es de 93.7 dB, el cual se encuentra muy cercano al valor de emisión del pistófono “94 dB” y, por lo tanto, confirma que el proceso de corrección del archivo de calibración es adecuado y se procede a calibrar los archivos de audio correspondientes a la emisión de ruido del Hyundai Atos mediante el mismo método y con base al archivo de calibración corregido.

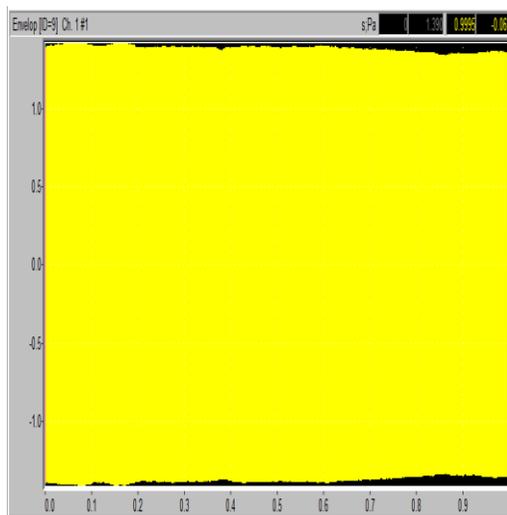


Imagen 23: Nuevo archivo de calibración para la posición 2 del preamplificador.

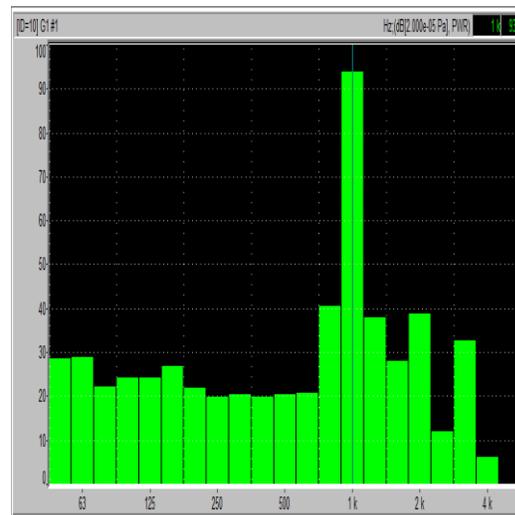


Imagen 24: FFT del nuevo archivo de calibración para la posición 2 del preamplificador.

En la *Imagen 25*, la duración del nuevo archivo de calibración para la posición del preamplificador 3 es de 1 segundo y el espectro de amplitud respecto al tiempo es más constante que el espectro evidenciado en los archivos originales.

En la *Imagen 26*, se detalla la señal con el nivel del preamplificador 3 corregida y procesada mediante una FFT, y se evidencia en la esquina superior derecha que el nivel de aporte energético en la banda de 1 KHz es de 93.8 dB, el cual se encuentra muy cercano al valor de emisión del pistófono “94 dB” y, por lo tanto, confirma que el proceso de corrección del archivo de calibración es adecuado y se procede a calibrar los archivos de audio correspondientes a la emisión de ruido del Renault Twizy mediante el mismo método y con base al archivo de calibración corregido.

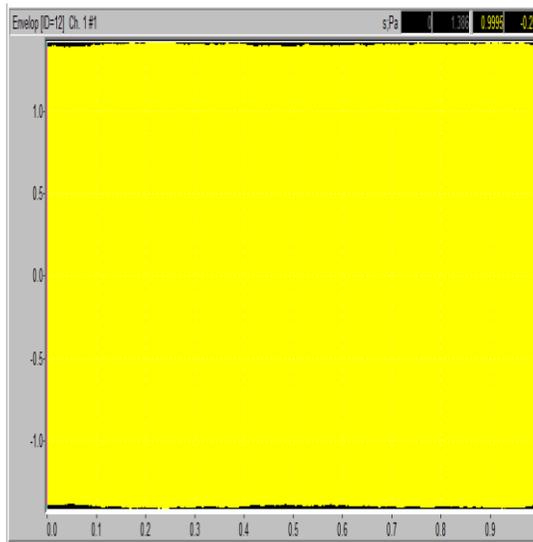


Imagen 25: Nuevo archivo de calibración para la posición 3 del preamplificador.

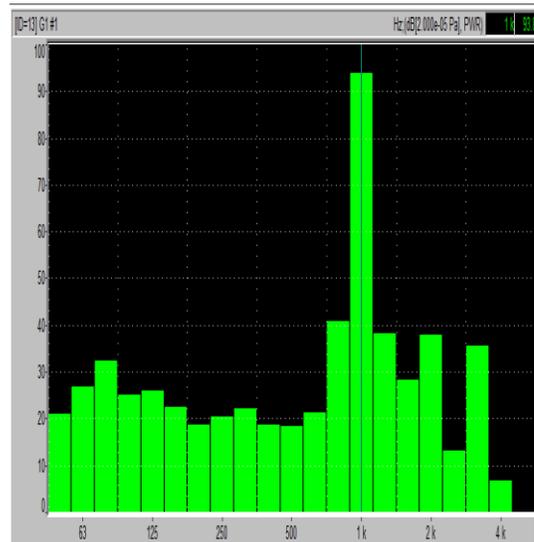


Imagen 26: FFT del nuevo archivo de calibración para la posición 3 del preamplificador.

4.7 Modelo inglés – Cálculo de ruido por tráfico rodado.

Al momento de abordar cada una de las correcciones, el modelo inglés propone tres niveles de evaluación. Para el primer caso, el modelo plantea el cálculo de un nivel de presión sonora básico, el cual tiene en cuenta los siguientes parámetros:

- El número de vehículos que transitan (q).
- El porcentaje de vehículos pesados (C_{use}), el cual es calculado a través de la siguiente expresión:

$$C_{use} = 33 \log \left[v + 40 + \left(\frac{500}{v} \right) \right] + 10 \log \left[1 + \left(\frac{5p}{v} \right) \right] - 68.8 \text{ [dB(A)] Ecuación 3}$$

donde:

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

- v: La velocidad promedio de tránsito.
- p: El porcentaje de vehículos pesados del total de automóviles a modelar.
- La inclinación de la vía (C_{grad}), la cual aplica para el flujo ascendente y es determinada por la siguiente ecuación:

$$C_{grad} = 0.3G [dB(A)] \text{ Ecuación 4}$$

donde:

- G: Corresponde al porcentaje de gradiente de la vía.
- La condición de la superficie de tránsito (C_{cond}), para la cual se determinan las siguientes relaciones:
 - Si la velocidad de tránsito es mayor o igual a 75 Km/h y/o el suelo es pavimentado, no se aplica corrección.
 - Si el suelo de la vía es asfaltado impermeabilizado se aplica una corrección de -1 dB(A).
 - Si el suelo de la vía es un camino permeable se aplica una corrección de -3.5 dB(A).

Para el segundo caso, el modelo plantea las correcciones por propagación, las cuales son:

- Corrección por distancia (C_{dis}), la cual está determinada por las siguientes ecuaciones:

$$d' = \sqrt{h^2 + (3.5 + d)^2} [m] \text{ Ecuación 5}$$

$$C_{dis} = -10 \log \left(\frac{d'}{13.5} \right) [dB(A)] \text{ Ecuación 6}$$

donde:

- d': Es la distancia directa entre la fuente y el receptor.
- d: Es la distancia horizontal entre la fuente y el receptor.
- h: Es la altura a la cual se encuentra el receptor de la vía.

- Corrección por barrera (C_{barrier}), debido a que no es utilizada en el trabajo y la teoría es extensa, si se desea ahondar más en el procedimiento de cálculo se recomienda remitirse a la literatura base.
- Corrección por absorción del suelo (C_{ground}), la cual está definida por la siguiente ecuación para terrenos planos:

$$H = \frac{h+1}{2} \text{ Ecuación 7}$$

donde H corresponde a la altura promedio de propagación y cumple con alguna de las siguientes condiciones:

$$\text{si } 0.75 \leq H \leq \frac{d+5}{6} ; C_{\text{ground}} = (5.2)(I) \log \left(\frac{6H-1.5}{d+3.5} \right) [dB(A)] \text{ (condición a)}$$

$$\text{si } H < 0.75 ; C_{\text{ground}} = (5.2)(I) \log \left(\frac{3}{d+3.5} \right) [dB(A)] \text{ (condición b)}$$

$$\text{si } H \geq \frac{d+5}{6} ; C_{\text{ground}} = 0 [dB(A)] \text{ (condición c)}$$

Si se desean conocer los valores para I de acuerdo con el porcentaje de suelo absorbente, ya que para la simulación del proyecto estos no son utilizados, se recomienda remitirse a la literatura base donde se encuentra expuesta la tabla correspondiente.

Por último, el modelo plantea las correcciones por composición del lugar, las cuales tienen en cuenta:

- Las reflexiones provenientes de fachadas, donde se plantean dos casos:
 - Si el receptor se encuentra a menos de 1 metro de alguna fachada se deben adicionar aritméticamente 2.5 dB(A).
 - Si existen fachadas al otro lado de la vía donde se encuentra ubicado el receptor, el modelo plantea la siguiente ecuación:

$$\text{Corrección por reflexión} = 1,5 \left(\frac{\theta'}{\theta} \right) [dB(A)] \text{ Ecuación 8}$$

donde:

- θ' : Es el ángulo en el cual se encuentra la fachada respecto al receptor.
 - θ : Es el ángulo de vista.
- Corrección de vista (C_{view}), la cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_{view} = 10 \log \left[\frac{\theta}{180} \right] [dB(A)] \text{ Ecuación 9}$$

donde:

- θ : Es el ángulo de vista, y, si este es igual a 180° no existe corrección por vista.

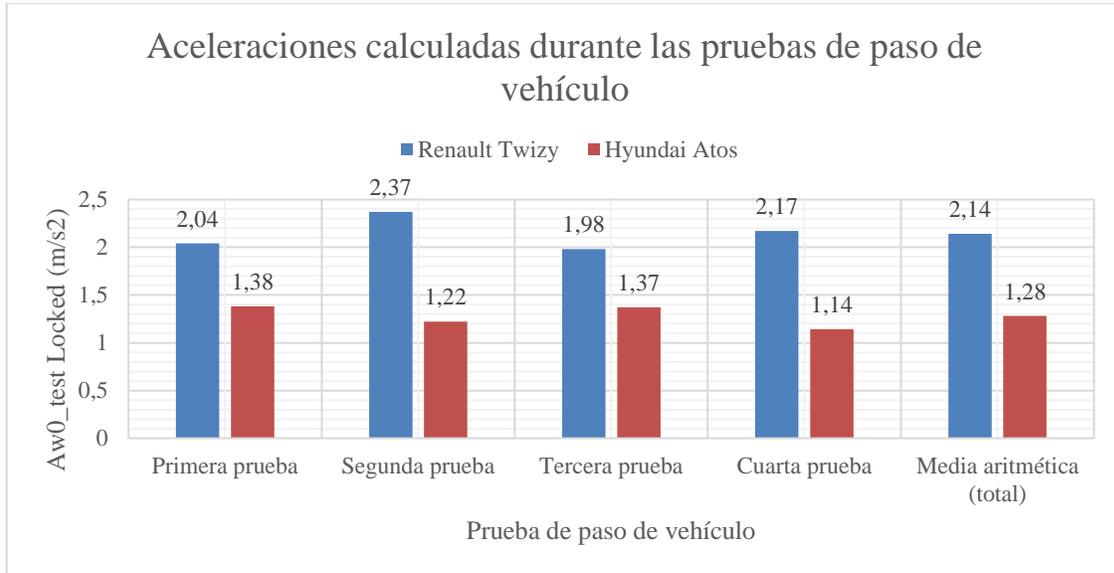
Con base en las correcciones anteriormente planteadas, el modelo expresa el cálculo de la predicción del nivel L_{10} para el periodo de 1 hora como: la suma aritmética del nivel de presión sonora dado por el número de vehículos (q), más todas las correcciones que aplican a la situación que se desea simular (Ver Ecuación 1).

5. Capítulo 5: Análisis de resultados.

En el presente capítulo, se desarrollan los análisis de los resultados obtenidos durante los procesos metrológicos de la zona urbana en la ciudad de Bogotá, la caracterización de las fuentes en vehículos automotores de combustión a gasolina y eléctricos y el aporte total de ruido de dichos vehículos durante la prueba por paso de vehículo según lo estipula la normativa ISO 362 – 1 del 2015. Además de esto, se presenta el modelo de cálculo que permite determinar el impacto en la emisión de ruido de la zona geográfica proveniente de vehículos automotores, si se realizará una sustitución de vehículos de características Hyundai Atos por vehículos de características Renault Twizy.

5.1 Aceleración de Vehículo eléctrico vs. Aceleración de Vehículo a combustión.

Como se puede evidenciar en la *Gráfica 1*, el Renault Twizy posee una mayor aceleración que el Hyundai Atos (*aceleración del Renault Twizy 1.67 veces el valor del Hyundai Atos para la media aritmética de todas las pruebas realizadas*), llegando incluso a casi duplicar el valor de esta, ya que *la aceleración del Renault Twizy es 1.94 veces el valor de la aceleración del Hyundai Atos en el caso de la segunda prueba*. Esto está directamente relacionado con la arquitectura del tren de potencia, ya que los vehículos eléctricos al no poseer relaciones de marchas, debido a la ausencia de una transmisión con velocidades variables, entregan el torque y la potencia máxima desde el momento en que se ejerce presión sobre el pedal de aceleración, mientras que el torque de los vehículos de combustión a gasolina y la potencia que estos desarrollan se encuentran directamente determinados por la velocidad rotacional del motor (*Número de revoluciones por minuto del motor*) a la cual el vehículo se está desplazando.



Gráfica 1: Aceleración de vehículo automotor eléctrico vs. aceleración de vehículo automotor a combustión. Valores calculados.

Los valores planteados anteriormente, son calculados mediante la siguiente ecuación:

$$A_{wot, test, j} = \frac{\left(\frac{V_{BB',j}}{3,6}\right)^2 - \left(\frac{V_{AA',j}}{3,6}\right)^2}{2(L_{20} + L_{ref})} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

- VBB': Corresponde a la velocidad en Km/h alcanzada en el punto final de la zona de aceleración.
- VAA': Corresponde a la velocidad en Km/h alcanzada en el punto inicial de la zona de aceleración.
- L₂₀: es una corrección de distancia igual a 20 metros.
- L_{ref}: Es una corrección de distancia acuerdo con la ubicación del motor en el automóvil. Para vehículos de motor delantero L_{ref} = 5 metros.

La anterior expresión se encuentra definida en los procedimientos de cálculo de la normativa ISO 362 -1 del 2015.

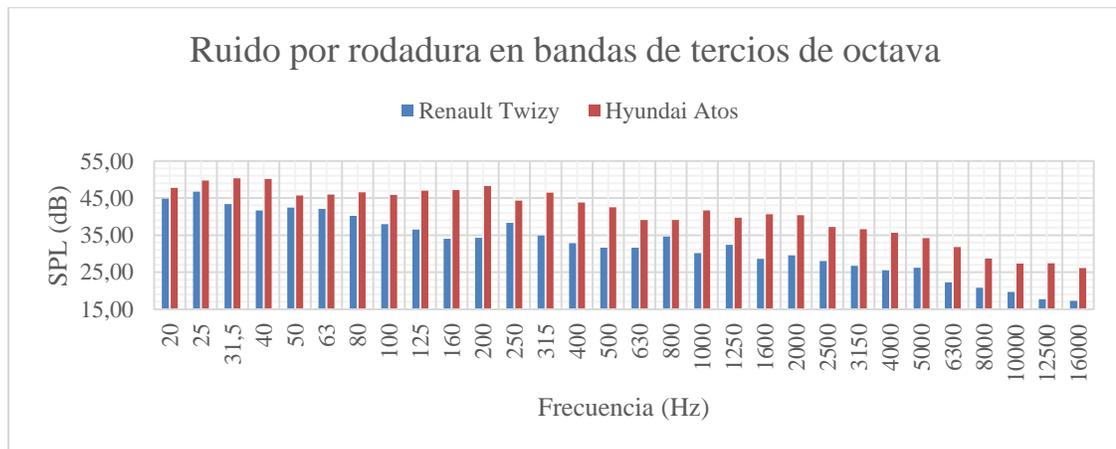
5.2 Caracterización de fuentes generadoras de ruido en vehículos automotores.

5.2.1 Ruido por rodadura.

En la *Tabla 11*, se encuentran plasmados los valores máximos y R.M.S. registrados durante la prueba que permite caracterizar el aporte de ruido por rodadura generado en la interacción entre el neumático o pavimento de los vehículos. Claramente existe un aporte de ruido mayor por parte del Hyundai Atos, con una diferencia de 4.89 dB para los valores R.M.S. y de 2.25 en cuanto al nivel máximo. Estas diferencias dan indicios de comprobación del planteamiento en el estudio, en cuanto a que existe una disminución de los niveles de ruido que resulta al sustituir un vehículo de combustión a gasolina por uno eléctrico.

Automotor	Nivel Máximo (dB)	Nivel R.M.S (dB)
Renault Twizy	73.03	58.28
Hyundai Atos	75.28	63.17

Tabla 11: Ruido por rodadura – Niveles máximos y R.M.S.



Gráfica 2: Ruido por rodadura Renault Twizy VS Hyundai Atos.

En la *Gráfica 2* se puede apreciar que no existe un aporte significativo en las bandas de tercio de octava de 1 KHz en adelante, esto se debe a que el ruido por rodadura se hace presente para velocidades iguales o mayores a 50 Km/h, umbral en el cual se puede discretizar en frecuencia los aportes de ruido por rodadura y los aportes provenientes del tren de potencia, por lo tanto, no es posible determinar estos mecanismos de generación de ruido como independiente en las pruebas realizadas a cada uno de los vehículos. Sin embargo, se evidencia claramente que los niveles de

presión sonora registrados para el Hyundai Atos son más elevados que los generados por el Renault Twizy en todo el rango de frecuencias bajo estudio; en especial en baja-media frecuencia, donde la mayor diferencia registrada se encuentra en la banda de 200 Hz con un valor de 14 dB y la menor diferencia registrada se encuentra en las bandas de 20 Hz y 25 Hz con un valor de 3 dB (*diferencias que pueden deberse al ruido proveniente del motor a combustión*), lo cual demuestra una reducción significativa de niveles de presión sonora entre el Renault Twizy y el Hyundai Atos.

Por otra parte, analizando los resultados entre las bandas de 50 Hz hasta 200 Hz, se puede notar dos comportamientos completamente distintos entre los niveles registrados de ambos vehículos. Para el caso del Renault Twizy se presenta claramente un decaimiento de niveles de 8.1 dB en este rango de frecuencias (*decaimiento de niveles entre la banda de 50 Hz y 200 Hz*), esto debido a que el tren de potencia que este incorpora no genera mayores aportes en estos rangos de frecuencia. No obstante, para el caso del Hyundai Atos, se puede notar un aumento de 2.6 dB en los niveles registrados en este rango de frecuencia, el cual ayuda a confirmar la hipótesis de que el tren de potencia es la principal fuente emisora de ruido de un vehículo automotor de combustión a gasolina cuando la velocidad está entre 20 y 45 km/h (Sandberg & Ejsmont, 2002) (*Rango de velocidades utilizados durante la prueba de paso de vehículo*). Además, el hecho de que la arquitectura del tren de potencia sea eléctrica reduce considerablemente las emisiones de ruido de un vehículo en estado dinámico. Asimismo, si se observan los rangos de frecuencia entre las bandas de 2000 Hz en adelante, notamos un comportamiento similar entre ambos vehículos, donde, para el caso del Renault Twizy se presenta un decaimiento de 12.3 dB y para el caso del Hyundai Atos se presenta un decaimiento de 14.3 dB (*decaimiento de niveles entre la banda de 2 KHz y la banda de 16 KHz para cada automóvil*), que es lo esperado por que en esos rangos de frecuencia la influencia del tren de potencia es mínima.

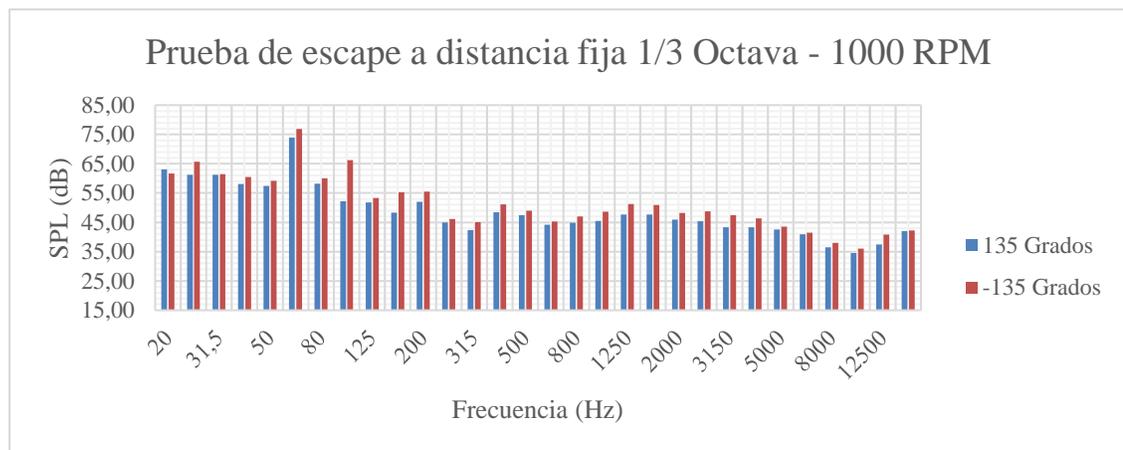
5.2.2 Ruido proveniente del sistema de escape.

En este apartado se analizará aisladamente el ruido proveniente del sistema de escape del Hyundai Atos. Como el Renault Twizy carece de este sistema y cuando se encuentra en reposo no genera ningún ruido debido a que es un vehículo eléctrico, este apartado está dedicado únicamente a la caracterización del vehículo automotor de combustión a gasolina y no presenta contenido de carácter comparativo contra el vehículo que posee tren de potencia eléctrico.

La literatura consultada plantea dos pruebas para la caracterización del sistema de escape de un vehículo automotor de combustión en estado estático (*reposo*). La primera de distancia fija de micrófono y ángulo de micrófono variable y la segunda de distancia variable de micrófono y ángulo fijo de micrófono. Sin embargo, como ya se expuso anteriormente, como el objetivo del estudio es de carácter comparativo y estas pruebas son únicamente válidas para el vehículo de combustión a gasolina; para el caso de la primera prueba que plantea la literatura, se decidió no tomar mediciones alrededor de toda la circunferencia entre -135 grados y 135 grados, sino que solo se registraron valores en los ángulos de -135 grados y 135 grados, debido a que estos representan el máximo y mínimo ángulo de medición que plantea el procedimiento, y mediante los cuales es posible realizar la caracterización del sistema de escape del Hyundai Atos en los puntos angulares más distantes del eje de simetría. Además de esto, no se realizan mediciones en el eje de simetría ya que estas son contempladas en la segunda prueba (*ángulo fijo de 45 grados*).

5.2.2.1 Método uno: Distancia fija y ángulo variable.

En la *Gráfica 3*, se encuentran plasmados los resultados a velocidad rotacional del motor de 1000 R.P.M. para la prueba a distancia fija de micrófono de 0.9 m y ángulos de 135 grados y -135 grados.



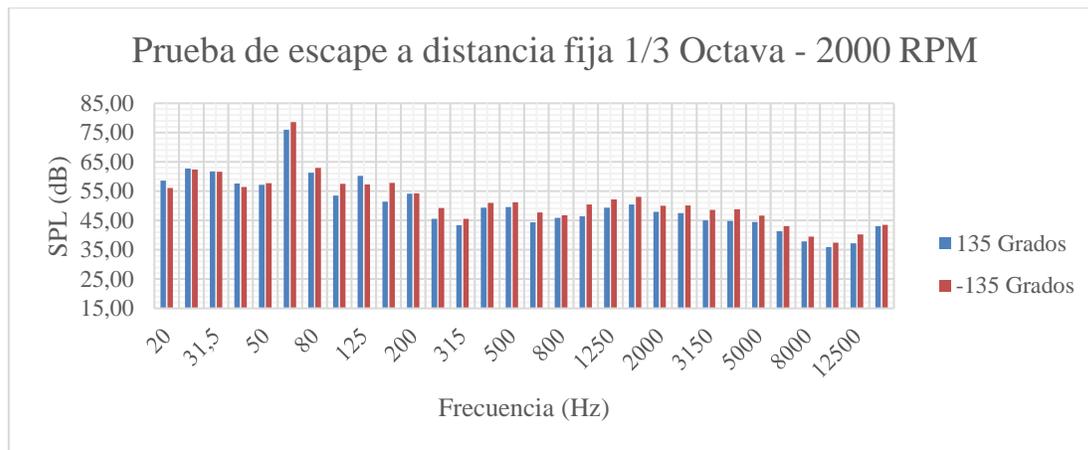
Gráfica 3: Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 1000 R.P.M.

Como se puede observar, los valores registrados para la prueba en -135 grados son superiores en la mayoría de las bandas de tercios de octava que los medidos en la posición de 135 grados (*Valores registrados a -135 grados superiores en el 96.7% de las bandas de tercios de octava, 29 bandas de 30*). Esto se debe a que el tubo de escape del Hyundai Atos posee una inclinación hacia al suelo en

la salida y en esta posición de medición, el micrófono se encuentra apuntando más cercano al orificio de escape, lo cual resulta inmediatamente en un incremento de niveles sobre este punto de registro de datos.

Por otra parte, para ambos puntos de medición, se puede evidenciar que el mayor aporte energético a 1000 R.P.M. se encuentra ubicado en la banda de tercio de octava de 63 Hz, con niveles de 76.9 dB para -135 grados y 73.9 dB para 135 grados, existiendo una diferencia entre los puntos de medición de exactamente 3 dB. Esta característica tonal, se debe a que el flujo de aire que atraviesa el tubo de escape, al estar condicionado por la velocidad rotacional del motor, no se comporta como un ruido completamente aleatorio, sino que posee una característica tonal dada por el número de revoluciones por minuto a las cuales está trabajando el motor, la cual es perceptible auditivamente y se evidencia en los resultados obtenidos.

De manera similar ocurre para 2000 R.P.M., *Gráfica 4*, donde los valores registrados en -135° son superiores en el 83.3% de las bandas de tercios de octava que los medidos en 135°.

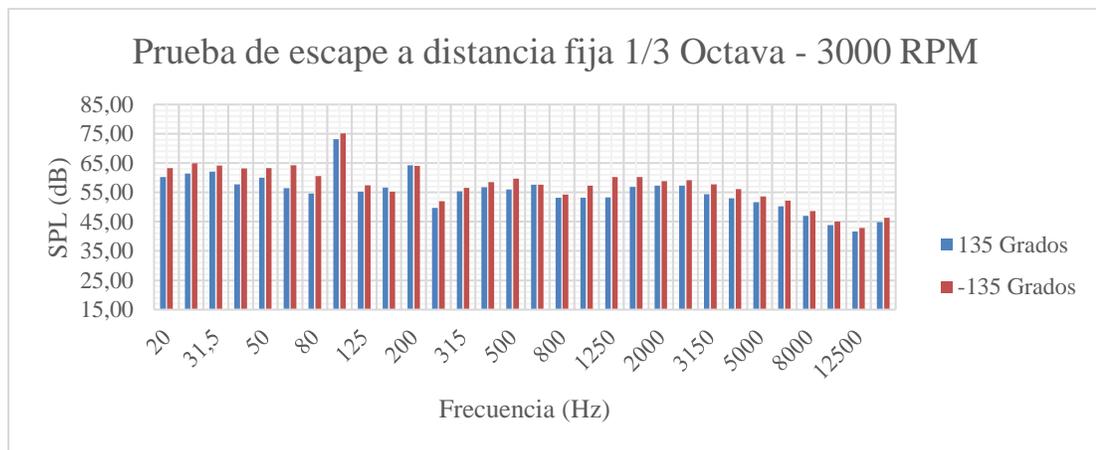


Gráfica 4: Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 2000 R.P.M.

Asimismo, se puede apreciar que sigue existiendo el componente tonal principal en la banda de tercio de octava de 63 Hz, sin embargo, esta vez los niveles de presión sonora medidos en esta banda son superiores a los registrados en la prueba de 1000 R.P.M., con valores de 76 dB registrados para 135 grados y de 78.6 dB para el punto de -135 grados, esta vez con una diferencia entre una posición y

otra de 2.6 dB (*una disminución de 0.4 dB respecto a la prueba de 1000 R.P.M.*). Este incremento de niveles en la banda de tercio de octava donde se encuentra presente el componente tonal fundamental del escape para 2000 R.P.M., puede explicarse debido que al incrementar la velocidad rotacional del motor en estado estático, se presenta un incremento de explosiones dentro de la cámara de combustión debido al mayor paso de combustible fósil (*en este caso gasolina*) hacia esta, y consecuente a esto, incrementa el flujo de gases que son expulsados por el tubo de escape, lo cual resulta en una mayor emisión de ruido por parte del sistema.

En la *Gráfica 5*, se aprecian los valores de nivel de presión sonora por bandas de tercios de octava para el punto de medición en -135 grados, los cuales resultan ser superiores a los valores medidos en 135 grados (*Valores registrados a -135 grados superiores en el 83.3% de las bandas de tercios de octava, 28 bandas de 30*) cuando el motor opera a 3000 R.P.M.



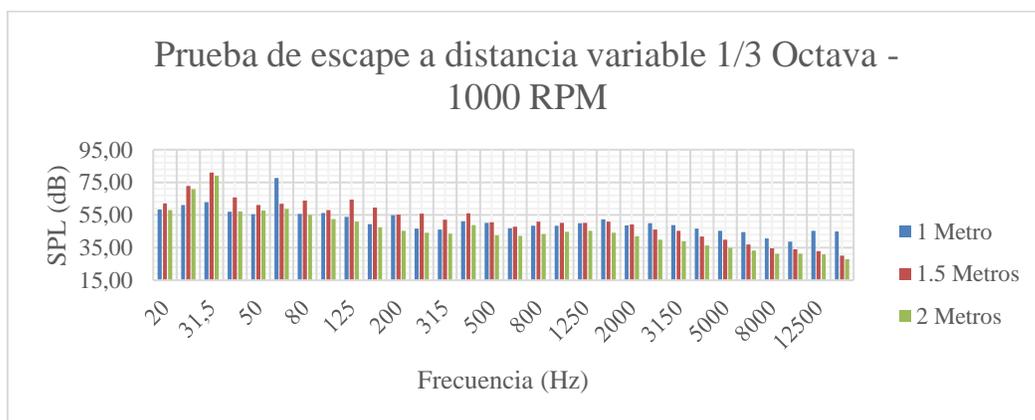
Gráfica 5: Prueba de escape a distancia fija 1/3 Octava a 3000 R.P.M.

Con base en lo anterior y los análisis de niveles de presión sonora realizados para 1000 R.P.M. y 2000 R.P.M., se puede determinar que la decisión del fabricante de dar esa curvatura al final de tubo ayuda a mitigar las emisiones producidas por el sistema de escape, ya que si bien se registran niveles de presión sonora elevados en las condiciones de medición, por lo menos para el caso de la banda de tercio de octava donde se encuentra el mayor aporte energético (*en la cual se encuentra presente el componente tonal fundamental*), podemos notar diferencias de hasta 3 dB entre ambas posiciones de medición, las cuales representan una disminución importante en la emisión de ruido por parte del sistema.

Por otra parte, para el caso de la banda de tercio de octava donde se encuentra el componente tonal fundamental, a diferencia de las mediciones registradas para 1000 R.P.M. y 2000 R.P.M., este ya no se encuentra situado en la banda de 63 Hz, sino que se ha desplazado hasta la banda de 100 Hz, con niveles de 73.2 dB registrados para 135 grados y de 75.1 dB registrados para -135 grados, dando como resultado una diferencia de niveles entre posiciones de 1.9 dB (*una disminución de 0.7 dB respecto a la prueba para 2000 R.P.M.*). Este desplazamiento en el espectro de frecuencia se debe a que el incremento de la velocidad rotacional a la cual se encuentra trabajando el motor, se comporta de manera análoga al incremento del número de oscilaciones por segundo de una onda, lo cual resulta en que el incremento de revoluciones por minuto genere emisiones de ruido a una frecuencia más elevada, y, por lo tanto, un desplazamiento en frecuencia como el que se puede observar. Asimismo, se puede apreciar la aparición de una banda armónica de la banda fundamental (*200 Hz primer armónico de 100 Hz*) en la cual se distribuye la energía que el sistema de escape genera, y de esta manera, no existe un incremento de niveles abrupto por concentrarse la energía en una sola banda de tercio de octava, sino que, por otra parte, la redistribución ayuda a que los niveles en dichas bandas disminuyan respecto a las mediciones a 1000 R.P.M y 2000 R.P.M.

5.2.2.2 Método dos: Distancia variable y ángulo fijo.

En la *Gráfica 6*, y de forma similar que, para la primera prueba de caracterización del sistema de escape, se puede observar una banda de tercio de octava con mayor concentración de energía que las demás para cada una de las pruebas realizadas.



Gráfica 6: Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 1000 R.P.M.

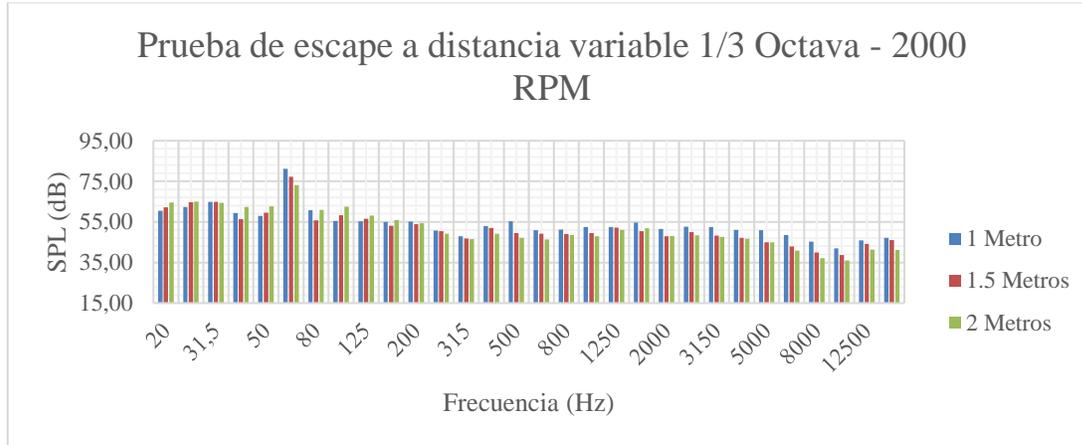
Para el caso de la prueba a 1 metro, la banda donde se encuentra el componente tonal es 63 Hz, el cual corresponde con los resultados obtenidos en la primera prueba. Sin embargo, como se aprecia en la gráfica, para los resultados a 1.5 metros y 2 metros de distancia, este máximo energético se encuentra en la banda de tercio de octava de 31.5 Hz, lo cual es posible que se deba a una resonancia propia del sistema de escape trabajando en Ralentí (*que para el caso del Hyundai Atos, la velocidad rotacional en Ralentí es de 1000 R.P.M.*) debido a su construcción y composición física, y que al ubicarse el micrófono en esa distancia es posible que coincidan con un punto máximo de la onda (*teniendo en cuenta que esta no es generada desde la salida del tubo de escape en la parte posterior del vehículo sino desde el sistema de escape de gases del tren de potencia ubicado en la parte frontal del automotor, no se puede asociar directamente a una coincidencia con una fracción de la longitud de onda en específico*) y se registre ese desplazamiento en frecuencia de la banda del componente tonal del escape que se observa en la gráfica.

Con base en lo anterior, no es posible realizar un análisis en la reducción de niveles de presión sonora en función de la distancia entre las tres mediciones para la banda de tercio de octava donde se encuentra el componente tonal, ya que existe un desplazamiento del mismo entre el punto a 1 metro y los puntos a 1.5 metros y a 2 metros. Por lo anterior, se analiza el decaimiento de niveles en función de la distancia para los puntos de medición distanciados a 1.5 metros y 2 metros.

Para la banda de tercio de octava de 31.5 Hz, donde se encuentra el componente tonal asociado a la resonancia del sistema de escape, a una distancia de 1.5 metros se registra un nivel de 81 dB y a una distancia de 2 metros se registra un nivel de 79.1 dB, esto resulta en un decaimiento de 1.9 dB al incrementar la distancia 0.5 metros, lo cual indica que el sistema de escape no posee un tratamiento de control de ruido en el rango de frecuencias que comprende la banda de tercio de 31.5 Hz (*banda en la cual se estima existe una resonancia propia de la construcción física del sistema de escape*) que permita mitigar las emisiones de una manera más eficiente al incrementar la distancia.

Ahora bien, como se muestra en la *Gráfica 7*, y a diferencia de la prueba realizada a 1000 R.P.M. ya no existe un desplazamiento en frecuencia debido a una posible resonancia del sistema, sino que, para las tres pruebas, la banda de tercio de octava donde se encuentra presente el componente tonal

fundamental es 63 Hz, la cual coincide con la banda registrada para la primera prueba a 2000 R.P.M. (*distancia fija y ángulo variable a 2000 R.P.M.*).

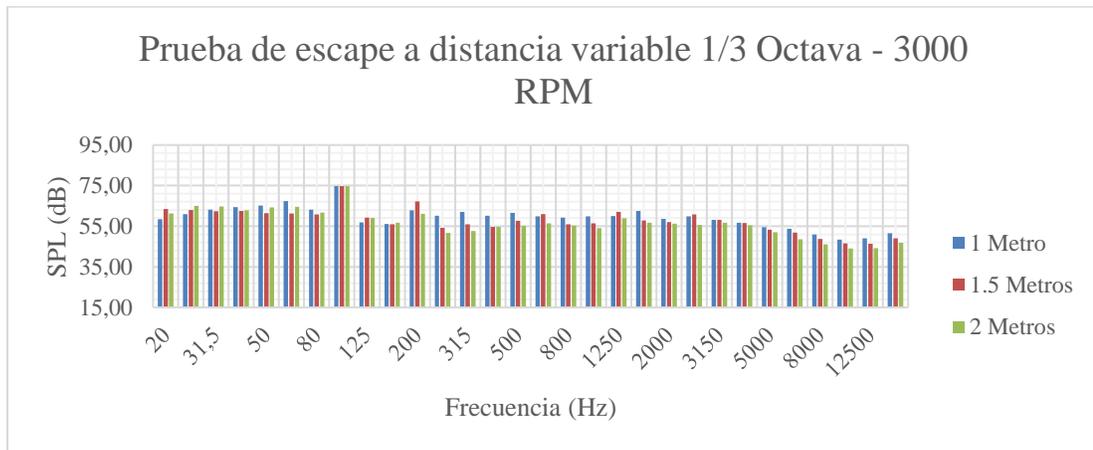


Gráfica 7: Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 2000 R.P.M.

Los valores registrados para la banda de tercio de octava de 63 Hz son: 81.2 dB a 1 metro de distancia, 77.3 dB a 1.5 metros de distancia y 73.2 dB a 2 metros de distancia. En primera instancia, es posible determinar que para el caso de la prueba a 1000 R.P.M. se registraron valores mucho más elevados en la banda donde se encontraba presente la resonancia (31.5 Hz) que los valores registrados para la banda de mayor aporte energético a 2000 R.P.M. (63 Hz) a las mismas distancias (1.5 metros y 2 metros), lo cual soporta la hipótesis de que este desplazamiento se debe a un fenómeno de resonancia propio del sistema de escape en Ralentí. Por otra parte, y como se evidencia en los resultados obtenidos, existe un valor de decaimiento de 3.9 dB al distanciar los primeros 0.5 metros y 4.1 dB al distanciar 0.5 metros más el micrófono, valores de reducción mucho más elevados que en la prueba a 1000 R.P.M. y, que posiblemente, el fabricante, al conocer la banda de tercio de octava donde se encuentra el mayor aporte energético, haya intentado controlar dicha banda con sistemas de control de ruido pasivos y de esta manera lograr un factor de atenuación tan drástico al realizar pequeños incrementos en la distancia (*decaimiento total de 8 dB al incrementar 1 metro de distancia de la fuente (el doble de la distancia del punto inicial de medición)*).

De igual forma que para las mediciones a 2000 R.P.M., y como se aprecia en la Gráfica 8, la banda de tercio de octava donde se encuentra el mayor aporte energético corresponde con la banda de

mayor aporte para la primera prueba realizada (100 Hz) y no existe un desplazamiento de dicha banda al incrementar la frecuencia, lo cual termina de confirmar que ese desplazamiento percibido para la prueba a 1000 R.P.M. se debe a un fenómeno de resonancia que se encuentra presente solo cuando el motor está trabajando en Ralentí (*sin oprimir el pedal de aceleración*) y no se aprecia a velocidades rotacionales superiores o iguales a 2000 R.P.M y menores o iguales a 3000 R.P.M.



Gráfica 8: Prueba de escape a distancia variable 1/3 Octava a 3000 R.P.M.

Por otra parte, el nivel registrado a 1 metro es 74.8 dB y a 1.5 metros y 2 metros es 74.1 dB, dando como resultado tan solo una disminución de niveles de 0.7 dB al incrementar la distancia en 0.5 metros y ningún decaimiento al volver a incrementarla en otros 0.5 metros, esto puede deberse a que el sistema de control de ruido que incorpora el vehículo no mitiga la emisión de ruido en la banda de tercios de octava de 100 Hz, y es por esto que la disminución de niveles a medida que incrementa la distancia es mínima, y más aún si esta se compara respecto a los resultados de la prueba a 2000 R.P.M. para la banda de 63 Hz, donde se estima que se encuentra trabajado el sistema de control de ruido del sistema de escape del Hyundai Atos.

Para el caso de la banda de tercio de octava de 200 Hz, la cual se había determinado antes como una banda armónica de la banda fundamental (100 Hz), se registran niveles de 62.9 dB para 1 metro, 67.2 dB para 1.5 metros y 61.1 dB para 2 metros. En primer lugar, se muestra que existe una reducción de niveles de 1.8 dB al duplicar la distancia, lo cual evidencia que el sistema de control tampoco trabaja en la banda de frecuencia de 200 Hz. Sin embargo, se puede notar un incremento de 4.3 dB al distanciar los primeros 0.5 metros (*posición de medición a 1.5 metros*), que, de igual manera que para el análisis a 1000 R.P.M., puede deberse a que esta distancia coincide con un máximo de la

onda emitida por el sistema de escape, y, por lo tanto, el aporte de ruido a esta distancia se incrementa significativamente respecto a los otros puntos de medición tomados para la misma banda de frecuencia.

5.2.3 Ruido proveniente del sistema de admisión.

Según (Braun, Walsh, Horner, & Chuter, 2013), en su revisión de la literatura correspondiente a la normativa ISO 362 – 1 del 2015, para pruebas por paso de vehículo realizadas en segunda marcha, los aportes energéticos para 450 Hz, 600 Hz y 820 Hz corresponden al sistema de admisión para un vehículo de combustión, razón por la cual se realiza el análisis en las bandas de tercios de octava de 400 Hz a 800 Hz para el caso del Hyundai Atos. Con base en lo anterior, y debido a que el enfoque general del estudio es de carácter comparativo, se decide realizar un análisis comparando los aportes energéticos en dichas bandas de frecuencia entre el Hyundai Atos y el Renault Twizy.

Como se puede observar en la *Tabla 12*, los aportes totales de las bandas de tercios de octava de 400 Hz a 800 Hz entre el Renault Twizy y el Hyundai Atos presentan una diferencia de 3.1 dB, que, aunque respecto a las diferencias de otros análisis, como el hecho al motor, es pequeña, no es una diferencia menor. Este comportamiento se puede atribuir a que los vehículos eléctricos presentan mayor aporte energético en media-alta frecuencia y aunque aquí poseen una mayor densidad espectral que en otros análisis, el Renault Twizy genera menos de la mitad de la energía sonora que genera el Hyundai Atos. Por otra parte, se puede notar que el mayor aporte energético para el sistema de admisión del Hyundai Atos se encuentra en la banda de 400 Hz y para el análisis correspondiente al Renault Twizy en la banda de 800 Hz, hecho que determina que los vehículos eléctricos tienden a generar mayores emisiones de ruido en frecuencias superiores en donde se encuentran los mayores aportes de ruido provenientes de los vehículos de combustión a gasolina (*para el caso puntual, el doble de la frecuencia*), posiblemente gracias a la diferencia de funcionamiento del tren de potencia de cada uno de los automotores.

Banda de frecuencia (Hz)	Renault Twizy	Hyundai Atos
	SPL (dB)	SPL (dB)
400	44,72	52,44
500	46,96	51,51
630	46,75	52,29
800	52,48	51,24
Aporte energético (total)	54.82	57.92

Tabla 12: Análisis para las bandas de tercios de octava 400 Hz a 800 Hz.

5.2.4 Ruido proveniente del motor.

De acuerdo con los antecedentes, para pruebas por paso de vehículo realizadas en segunda marcha, los aportes para 120 Hz corresponden al aporte energético por parte del motor para un vehículo de combustión, es por esto por lo que se realiza el análisis en las bandas de tercios de octava de 100 Hz y 125 Hz para el caso del Hyundai Atos. Con base en lo anterior, y de igual forma que para el ruido proveniente del sistema de admisión, se decide realizar un análisis comparando los aportes energéticos en dichas bandas de frecuencia entre el Hyundai Atos y el Renault Twizy.

Banda de frecuencia (Hz)	Renault Twizy	Hyundai Atos
	SPL (dB)	SPL (dB)
100	51.87	64.39
125	51.06	54.59
Aporte energético (total)	54.50	64.82

Tabla 13: Análisis para las bandas de tercios de octava 100 Hz y 125 Hz.

Como se muestra en la *Tabla 13*, los aportes totales entre las bandas de tercio de octava de 100 Hz y 125 Hz entre el Renault Twizy y el Hyundai Atos poseen una diferencia de 10.32 dB, una diferencia significativa que reafirma el hecho de que la mayor fuente emisora de ruido de un automotor es su tren de potencia, más específicamente en este caso, el tipo de motor que posee, siendo un motor eléctrico más eficiente en cuanto al aprovechamiento de la energía que este genera en estado dinámico (*como ya se vio anteriormente en el análisis de aceleraciones*) y a la baja emisión de ruido en componentes de baja frecuencia (*como se demuestra en este apartado*) corresponde. En este punto del trabajo, se da cumplimiento al objetivo específico número uno.

5.3 Aporte total de ruido de vehículos automotores.

En este apartado, se presentan el análisis comparativo correspondiente al aporte total de ruido del Renault Twizy y el Hyundai Atos. En primer lugar, se analizan los datos resultantes de las pruebas por paso de vehículo aplicadas a cada uno de los vehículos, con el fin de evidenciar las diferencias de aporte total de ruido por cada uno de los vehículos. En segundo lugar, se realiza un análisis de niveles de presión sonora en función de la distancia para cada uno de los automotores, con el fin de obtener ecuaciones que modelen el comportamiento de cada uno de los automotores en la zona de pruebas que estipula la normativa ISO 362 -1 2015. Por último, se establece un modelo matemático de simulación con el fin de evaluar el impacto en las emisiones de ruido al realizar la sustitución uno a uno de vehículos a combustión por vehículos eléctricos en la zona geográfica de estudio.

5.3.1 Prueba por paso de vehículo según ISO 362-1 2015.

En la *Tabla 14*, se presentan los resultados de aporte de ruido de las pruebas por paso del vehículo Renault Twizy aplicada según la normativa ISO 362 – 1 2015.

Prueba	Izquierda (dB(A))	Derecha (dB(A))	Diferencia (dB(A))
Primera	56,80	56,90	0,10
Segunda	56,50	57,60	1,10
Tercera	56,50	56,50	0,00
Cuarta	56,40	56,00	-0,40
Total, Leq (dB(A))	56,55	56,79	0,24

Tabla 14: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Renault Twizy. Izquierda y Derecha; Corresponden a las posiciones de medición del automotor desde la perspectiva del conductor.

Como se puede evidenciar, la diferencia mínima entre la emisión registrada para el lado derecho respecto al lado izquierdo del Renault Twizy es de -0.40 dB(A) correspondientes a la tercera prueba. Asimismo, se muestra que la diferencia de emisiones más alta es de 1.10 dB(A) correspondientes a la segunda prueba. Con base en lo anterior, se puede determinar que el vehículo genera casi las mismas emisiones de ruido hacia ambos lados, siendo demostrado de esta forma para la tercera prueba, y, teniendo un incremento de emisiones de apenas 0.24 dB(A) hacia el lado derecho del automotor en el promedio energético de las cuatro pruebas, el cual se atribuye a, que

independientemente de que el área de aceleración se encuentre demarcada en el centro, el piloto durante la prueba puede haberse desviado un poco hacia a alguno de los lados y ocasionar la variación de niveles que se presencia en los resultados, ya que esta no es lo suficientemente significativa para poder ser atribuida a una fuente de emisión aislada del automotor.

De igual manera, en la *Tabla 15*, se pueden evidenciar los resultados de aporte de ruido de las pruebas por paso del vehículo Hyundai Atos aplicada según la normativa ISO 362 – 1 2015.

Prueba	Izquierda (dB(A))	Derecha (dB(A))	Diferencia (dB(A))
Primera	61,30	61,30	0,00
Segunda	61,50	61,40	-0,10
Tercera	61,30	59,90	-1,40
Cuarta	61,30	61,30	0,00
Total, Leq (dB(A))	61,35	61,02	-0,33

Tabla 15: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 - Hyundai Atos. Izquierda y Derecha; Corresponden a las posiciones de medición del automotor desde la perspectiva del conductor.

Como se puede notar, de igual forma que para el Renault Twizy, la diferencia mínima entre las emisiones de ruido provenientes del lado derecho respecto al lado izquierdo del Hyundai Atos es de -1.40 dB(A), hecho que determina que independiente de que los automotores posean una arquitectura de tren de potencia distinta, los fabricantes intentan que la emisión de ruido de estos sea uniforme hacia ambos lados. Asimismo, la diferencia máxima registrada es de 0.00 dB(A), que corresponde a 1.10 dB(A) por debajo de la registrada para el Renault Twizy. Finalmente, la diferencia del aporte total de ruido entre el lado derecho y el lado izquierdo del promedio de las cuatro pruebas es de 0.33 dB(A) más hacia el lado izquierdo, la cual determina que el automotor a combustión, de igual forma que el eléctrico, genera casi la misma emisión de ruido hacia el lado derecho que hacia el lado izquierdo, y debido a que la diferencia sigue sin ser significativa, y el sistema de escape y el bloque de motor del Hyundai Atos se encuentran dispuestos hacia la derecha, siendo estas las principales fuentes emisoras de ruido, no se puede atribuir a una fuente propia del automotor que se encuentre dispuesta hacia uno de los lados.

Por último, en la *Tabla 16*, se presenta el aporte total de ruido de cada uno de los vehículos automotores obtenido al promediar energéticamente las cuatro pruebas para ambos lados. Como se puede evidenciar, la diferencia total de emisiones calculada para los valores registrados durante las pruebas es de 4.52 dB(A), esto implica que el Renault Twizy genera menos de la mitad de la energía que genera el Hyundai Atos al pasar por la zona de aceleración y, que al momento de realizar una sustitución de vehículos, se podría disminuir los niveles de presión sonora de dicha zona geográfica o incrementar el número de vehículos que podrían estar en la zona sin aumentar los niveles de presión sonora en esta.

Vehículo automotor	Emisión Total (dB(A))	Diferencia (dB(A))
Renault Twizy	56,67	4,52
Hyundai Atos	61,19	

Tabla 16: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 “SPL”.

5.3.2 Presión sonora vs. Distancia.

Como se evidencia en la *Imagen 27*, y según se plantea en el apartado de marcos normativos, la zona de pruebas se encuentra dividida en tres subzonas en las cuales el comportamiento del desplazamiento del vehículo es totalmente distinto. Para la primera subzona (*de 0 metros a 10 metros*) el vehículo se desplaza a velocidad constante, para la segunda subzona (*de 10 metros a 30 metros*) el vehículo se desplaza de forma acelerada y para la tercera subzona (*de 30 metros a 40 metros*) el vehículo se desplaza de forma desacelerada.

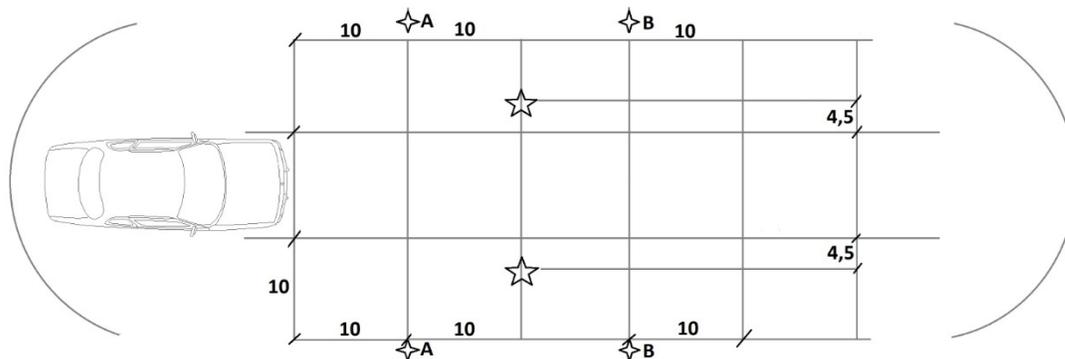


Imagen 27: Zona de pruebas 1.1. Fuente: ISO 362-1 del 2015.

Ya que en las mediciones de niveles de presión sonora que se registran con los sonómetros, la relación directa que se tiene es de tiempo con nivel de presión sonora y para el análisis se requiere relacionar los niveles de presión sonora con la distancia a la cual se desplaza el automóvil dentro de la zona de aceleración, mediante las ecuaciones analíticas que describen los movimientos de las dos primeras subzonas, se realiza una proyección de la distancia con base en el tiempo transcurrido. Para el primer caso, y considerando que el vehículo se desplaza con velocidad constante y en línea recta según lo estipula el procedimiento de la normativa ISO 362-1 2015, se utiliza la ecuación de movimiento rectilíneo uniforme (*M.R.U*) que define la posición en función de la velocidad de desplazamiento y el tiempo transcurrido. Ver la *Ecuación 11*.

$$x(m) = \frac{v\left(\frac{km}{h}\right)}{3.6} * t(s) \text{ Ecuación 11}$$

donde:

- x: Representa la posición en metros.
- v: Representa la velocidad de desplazamiento del automóvil en kilómetros por hora.
- t: Tiempo transcurrido donde se desea hallar la posición del automóvil en segundos.

Por otra parte, una vez se llega a la posición de 10 metros mediante esta ecuación, donde este modelo matemático pierde su efectividad debido a que el fenómeno físico cambia, se procede a analizar el comportamiento de la distancia en función del tiempo para la segunda subzona. Para este segundo caso, debido a que el pedal del acelerador es presionado completamente durante toda la zona, se plantea un modelo de análisis utilizando ecuaciones de movimiento rectilíneo uniformemente variado (*M.R.U.V*), hallando en un inicio la aceleración media del desplazamiento total a través de la zona (*Ecuación 12, planteada en el procedimiento de análisis de la normativa ISO 362-1 2015*) y posteriormente con esa aceleración la posición de desplazamiento del automóvil:

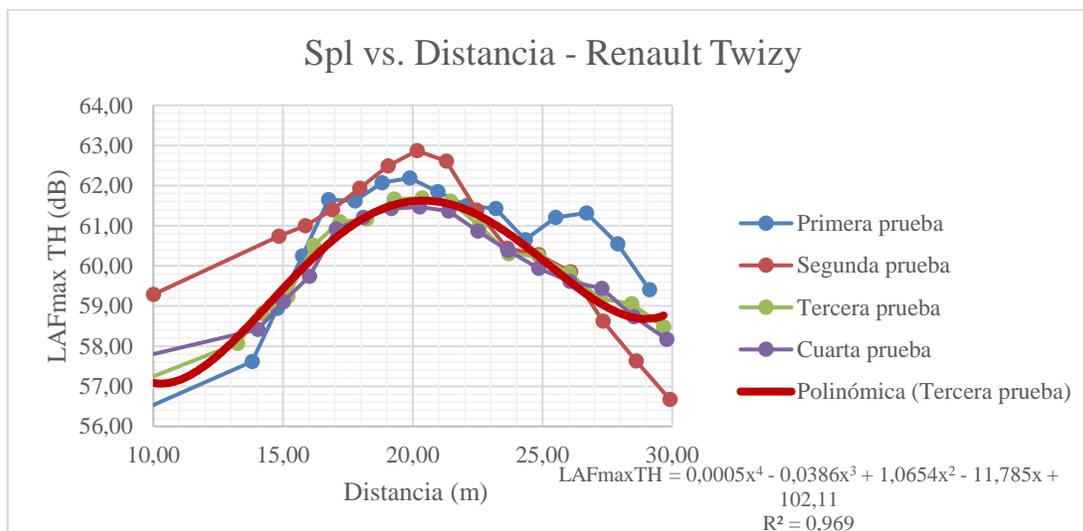
$$x(m) = \frac{Vaa\left(\frac{km}{h}\right)}{3.6} + \frac{1}{2} * a \left(\frac{m}{s^2}\right) * t^2(s) \text{ Ecuación 12}$$

donde:

- x: Representa la posición en metros.
- *Vaa*: Velocidad de ingreso del automóvil a la zona de aceleración (*velocidad en el punto AA*), dada en km/h.
- t: Tiempo transcurrido donde se desea hallar la posición del automóvil en segundos.
- *a*: Aceleración media del automóvil durante el desplazamiento dentro de la segunda subzona, expresada en m/s² y calculada con la “*Ecuación 10*”

Una vez obtenida las distancias para los distintos instantes de tiempo, tanto para la primera subzona como para la segunda subzona, se ubica el máximo nivel de presión sonora registrado por el sonómetro en la posición más cercana a 20 metros, esto debido a que es el punto donde el automóvil cruza enfrente del sistema de registro y por lo tanto donde se registra la mayor emisión de ruido. Con base en esto, se comienzan a ubicar los resultados de niveles de presión sonora tanto por encima como por debajo del punto máximo, teniendo en cuenta la relación de tiempo del sistema de registro (*buffer o logger step*) con el fin de que la relación de distancia y niveles de presión sonora sea la adecuada, esto quiere decir, que los cálculos de posiciones para las dos subzonas deben utilizar el mismo paso de tiempo que utiliza el sistema de registro, que para el caso puntual es de 100 ms.

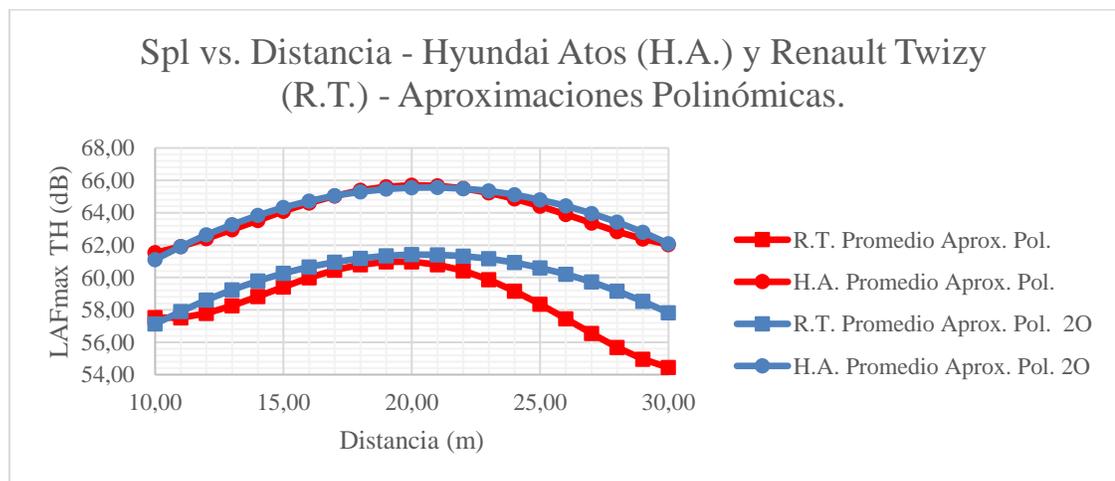
En la *Gráfica 9*, se pueden evidenciar los resultados correspondientes a cada una de las pruebas de paso de vehículo según el procedimiento estipulado en la normativa ISO 362 – 1 2015 para el Renault Twizy, obteniendo como resultado el nivel de presión sonora en función de la distancia dentro de la zona de aceleración, 10 metros a 20 metros, ya que de 0 a 10 metros es la distancia de aproximación a la zona y se desarrolla a velocidad constante y de 30 metros a 40 metros es la zona de desaceleración del vehículo.



Gráfica 9: Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Renault Twizy.

Como se puede observar, los resultados obtenidos, tienden a presentar el mismo comportamiento, ajustando su punto máximo de emisión de ruido en el punto de 20 metros y sus puntos mínimos de emisión en las distancias de ingreso y salida de la zona de aceleración. Sin embargo, aunque los comportamientos son evidentemente similares, estos no pueden ser promediados punto a punto, debido a que no existe correspondencia entre los puntos de distancia que se encuentran relacionados a los niveles de presión sonora por la extrapolación que se realiza utilizando la ecuación de movimiento rectilíneo uniforme variado (MRUV).

Gracias a esto, se propone realizar una aproximación polinómica a cada una de las curvas, con el fin de promediar los coeficientes de cada una de estas y obtener una aproximación promedio del comportamiento del Renault Twizy dentro de la zona de aceleración. En primer lugar, se realiza un análisis por inspección del comportamiento de las gráficas, donde inmediatamente se asocia este a un comportamiento parabólico y por lo tanto se descartan las aproximaciones polinómicas de grado impar. Seguido a esto, se realiza la aproximación polinómica de segundo orden para cada una de las curvas de los datos medidos, y se nota que los coeficientes de correlación de las cuatro curvas poseen un valor de ajuste fiable, oscilando un valor aproximado de 0.92 ± 0.025 , sin embargo, se decide realizar una aproximación de cuarto orden. Para este caso, los coeficientes de correlación tienen un valor promedio de 0.96 ± 0.02 , un valor de ajuste adecuado y mejor que el obtenido con el ajuste de segundo orden y que evidencia que las curvas de aproximación representan de manera deseada las curvas de medición. En la *Gráfica 10*, se encuentran expuestas las aproximaciones polinómicas de segundo y cuarto orden tanto para el *Renault Twizy* como para el *Hyundai Atos*.



Gráfica 10: Spl vs. Distancia - Hyundai Atos y Renault Twizy - Aproximaciones polinómicas de 2do y 4to orden.

Como se puede observar, ambas aproximaciones polinómicas muestran el comportamiento del nivel de presión sonora en función de la distancia de manera adecuada para ambos vehículos, sin embargo, la aproximación de cuarto orden presenta un suavizado en el aumento inicial y el decaimiento final de la curva, el cual determina mejor el comportamiento según los resultados observados en las mediciones, mientras que, la aproximación de segundo orden representa un movimiento parabólico estrictamente, que si bien se ajusta al comportamiento del paso del vehículo, en los extremos de la curva tiende a caer abruptamente con relación a la aproximación de cuarto orden.

Aunque, se pudiese seguir incrementando el grado del polinomio con el fin de obtener un mayor índice de correlación, se decide implementar la aproximación polinómica de cuarto orden, debido a que esta permite modelar analíticamente el fenómeno físico de manera apropiada y el incrementar el grado del polinomio implica no solo el tratamiento de un mayor número de coeficientes asociados a cada una de las potencias de las ecuaciones que modelan las curvas de aproximación, sino que, además, el incremento de las desviaciones estándar entre estos.

Con base en lo anterior, se traza la curva de aproximación polinómica de cuarto orden para la tercera prueba, obteniendo la ecuación y el coeficiente de correlación de dicha curva (*Representada en la parte inferior derecha de la gráfica 9*), como se puede evidenciar, el coeficiente de determinación es de 0.969, lo cual indica que la curva representa efectivamente el comportamiento del fenómeno físico. Basado en esto, se procede a realizar la misma aproximación para todas las pruebas y se encuentra que los coeficientes de correlación para cada una de las pruebas son:

Prueba	x^4	x^3	x^2	X	C	R
Primera	0,0004	-0,0354	0,9682	-10,3940	94,3770	0,9398
Segunda	0,0004	-0,0339	0,9643	-11,0630	103,2400	0,9829
Tercera	0,0005	-0,0386	1,0654	-11,7850	102,1100	0,9844
Cuarta	0,0005	-0,0386	1,0933	-12,5470	107,6500	0,9767
Promedio	0,00045	-0,03663	1,02280	-11,44725	101,84425	-
Desviación estándar	0,0000577	0,0023613	0,0663034	0,9274533	5,5222368	-

Tabla 17: Aproximación polinómica de cuarto orden para promedio del comportamiento del Renault Twizy dentro de la zona de aceleración.

Como se muestra en la *Tabla 17*, el coeficiente de correlación más bajo obtenido es de 0.9398, que, sin embargo, continúa representando de manera adecuada el comportamiento de la curva del fenómeno físico en análisis. Por lo tanto, se procede a realizar el promedio de los coeficientes de cada una de las potencias de las ecuaciones obtenidas para cada una de las pruebas (*el promedio de todos los coeficientes asociados a la variable x^n entre todas las pruebas, con n variando entre 0 y 4*), obteniendo como resultado, la media aritmética de cada uno de los coeficientes que son implementados en el modelo analítico para el Renault Twizy.

Asimismo, se presentan los valores de desviación estándar correspondientes a los coeficientes de cada una de las potencias de la variable x . Como se puede evidenciar, la desviación estándar del valor de los coeficientes “ x^4 , x^3 , x^2 , y x ” entre las cuatro pruebas se encuentra por debajo de 1 y muestra que la dispersión de los valores no es elevada. Por otra parte, para el caso del intercepto de la función en el eje vertical (*coeficiente constante “ c ”*), se presenta una desviación estándar más elevada y es en este parámetro donde los datos tienden a tener una mayor variación entre cada una de las pruebas. Sin embargo, teniendo en cuenta la desviación estándar de los otros coeficientes se determina viable el uso de los valores de la media aritmética de los coeficientes de cada una de las pruebas para representar el fenómeno físico analíticamente

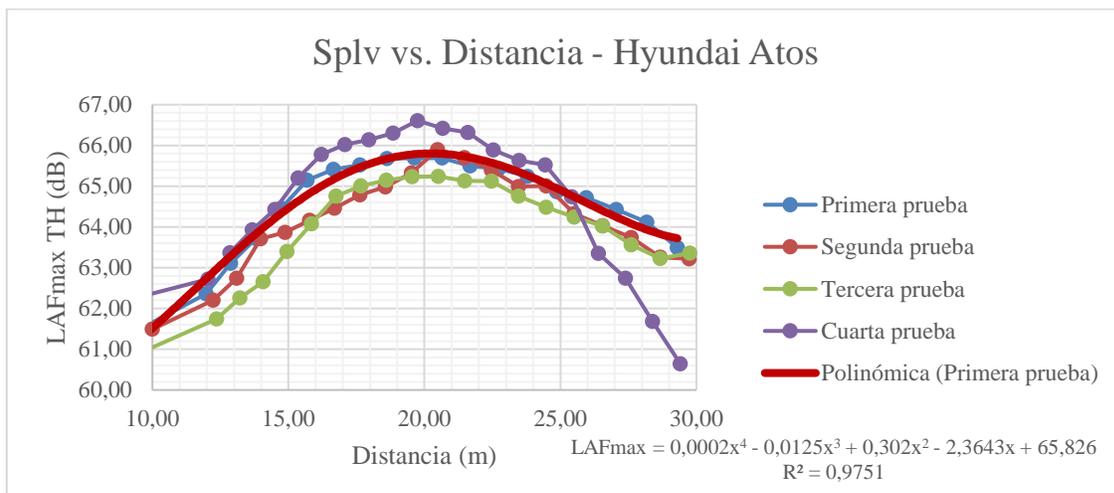
Con base en lo anterior, dichos coeficientes promedio son implementados en la *Ecuación 13 VRH 1* “*Votteler-Ríos-Herrera 1*”, ecuación analítica polinómica de cuarto orden que modela los niveles de presión sonora emitidos por el Renault Twizy en una zona de aceleración de 20 metros en función de la distancia.

$$LAFmax TH_{RenaultTwizy}(dB) = 0.00045x^4 - 0.03663x^3 + 1.02280x^2 - 11.44725x + 101.84425 \text{ Ecuación 13 VRH 1}$$

la *Ecuación 13 VRH 1*, modela los niveles de presión sonora emitidos por el Renault Twizy en una zona de aceleración de 20 metros en función de la distancia, donde:

- LAFmaxTH (dB): Representa el nivel de presión sonora máximo en ponderación temporal “fast” y ponderación frecuencial “A” dado en decibeles.
- x : Representa la distancia para cual se desea obtener el nivel de presión sonora, teniendo en cuenta que el modelo se encuentra diseñado para trabajar en distancias de 10 metros a 30 metros, siendo 10 metros el ingreso a la zona de aceleración y 30 metros la salida del vehículo de esta.

De igual forma que para el Renault Twizy, en la *Gráfica 11*, se pueden evidenciar los resultados obtenidos de nivel de presión sonora en función de la distancia de cada una de las pruebas por paso realizadas para el Hyundai Atos.



Gráfica 11: Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Hyundai Atos.

En primer lugar, se puede notar que el comportamiento de las curvas de las tres primeras pruebas es esencialmente el mismo (*con algunas variaciones en ciertos puntos*), sin embargo, la cuarta prueba, presenta un decaimiento abrupto que no presentan las demás pruebas en el distanciamiento del sistema de registro (*20 metros a 30 metros*), esto se debe a que en dicha prueba la aceleración fue de $1.14 \frac{m}{s^2}$, la mínima registrada para este vehículo, por lo tanto, y según lo plantean las ecuaciones analíticas que se utilizan para el cálculo de la aceleración, no se alcanza una velocidad de

desplazamiento tan alta como en las demás pruebas, considerando que para todas las pruebas se pretende ingresar a la misma velocidad ($20 \pm 5 \text{ Km/h}$), lo que implica que la velocidad rotacional del motor es menor a la de las demás pruebas y al distanciarse del sistema de registro los niveles de presión sonora son menores que para las demás curvas, hecho que continua soportando que el mayor aporte de ruido de un vehículo automotor a las velocidades tratadas durante la prueba (20 Km/h a 45 km/h) es proveniente del tren de potencia, especialmente del motor.

Por otra parte, para el caso de la aproximación polinómica de cuarto orden, se sigue el mismo procedimiento que para el Renault Twizy. Asimismo, como se muestra en la esquina inferior derecha de la *Gráfica 10*, el coeficiente de determinación para la aproximación polinómica de la primera prueba es de 0.9751, valor que indica que el fenómeno bajo estudio se describe de forma satisfactoria con esta ecuación. Basado en esto, se procede a realizar la misma aproximación para todas las pruebas y se encuentra que los coeficientes de correlación para cada una de las pruebas son:

Prueba	x^4	x^3	x^2	x	C	R
Primera	0,0002	-0,0125	0,3020	-2,3643	65,8260	0,9875
Segunda	0,0002	-0,0192	0,5212	-5,3957	80,1250	0,9872
Tercera	0,0004	-0,0275	0,7443	-7,8649	89,1760	0,9931
Cuarta	0,0002	-0,0211	0,5950	-6,3603	84,9290	0,9941
Promedio	0,00025	-0,02008	0,54063	-5,49630	80,01400	-
Desviación estándar	0,0001000	0,0061733	0,1841733	2,3220900	10,1556410	-

Tabla 18: Aproximación polinómica de cuarto orden aproximación para promedio del comportamiento del Hyundai Atos dentro de la zona de aceleración.

Como se muestra en la *Tabla 18*, el coeficiente de correlación más bajo obtenido es de 0.9872, que está 0.0474 por encima del coeficiente de correlación mínimo registrado para el Renault Twizy, lo cual determina no solo que el ajuste de las curvas de aproximación es elevado y que estas representan adecuadamente el fenómeno físico en cada una de las pruebas, sino que además, muestran que el modelo de aproximación es más preciso para el comportamiento del Hyundai Atos que para el comportamiento del Renault Twizy, sin que esto signifique que el modelo no represente de manera adecuada los valores medidos. Con base en lo anterior, se procede a realizar el promedio de los coeficientes de cada una de las potencias de la distancia de las ecuaciones obtenidas para cada una de las pruebas (*el promedio de todos los coeficientes asociados con la variable x^n de todas las*

pruebas, con n variando entre 0 y 4), obteniendo como resultado, la media aritmética de cada uno los coeficientes que son utilizados en el modelo analítico para el Hyundai Atos.

Asimismo, se presentan los valores de desviación estándar correspondientes a los coeficientes de cada una de las potencias de la variable x . Como se puede notar, los valores de desviación estándar son mucho más elevados que para el Renault Twizy, y estos presentan el mismo comportamiento de aumento a medida que decrece la potencia a la cual se encuentra elevada la variable, obteniendo un valor de desviación estándar mucho más elevado para el coeficiente constante “c”. Aunque las desviaciones son más elevadas que para el Renault Twizy, tienden a representar valores de dispersión no muy altos y es por esto por lo que se decide emplear los valores de la media aritmética de los coeficientes para representar la ecuación analítica del fenómeno mediante la relación de las variables de nivel de presión sonora y distancia.

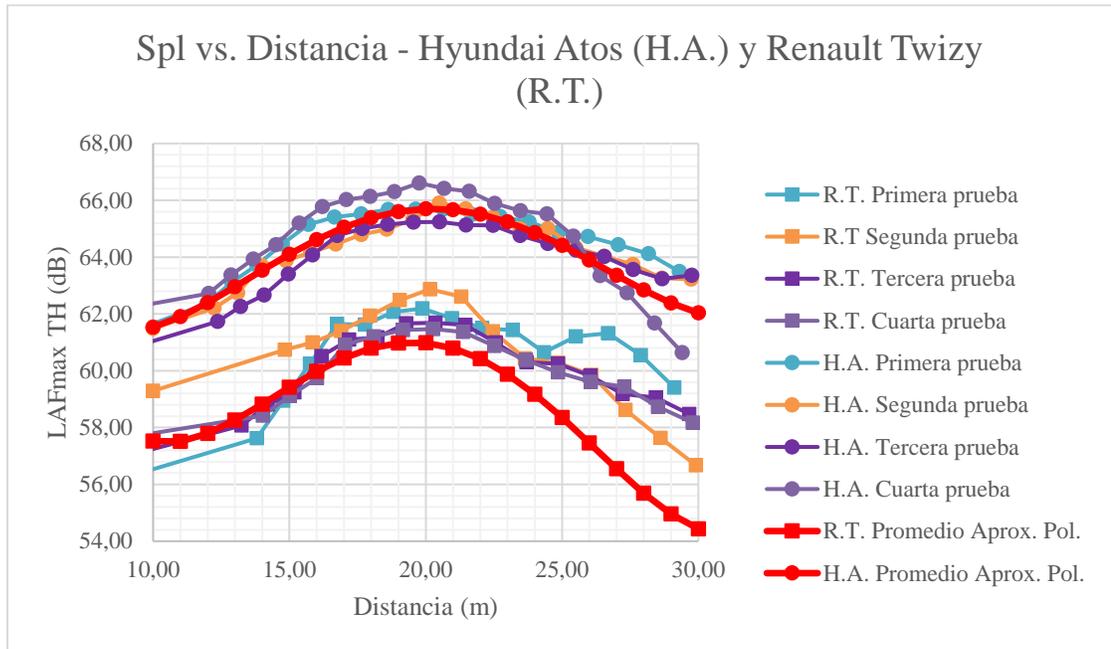
Con base en lo anterior, dichos coeficientes promedio son implementados en la *Ecuación 14 VRH 2* “*Votteler-Ríos-Herrera 2*”, ecuación analítica polinómica de cuarto orden que modela los niveles de presión sonora emitidos por el Hyundai Atos en una zona de aceleración de 20 metros en función de la distancia.

$$LAFmax TH_{HyundaiAtos}(dB) = 0.00025x^4 - 0.02008x^3 + 0.54063x^2 - 5.49630x + 80.01400 \text{ Ecuación 14 VRH 2}$$

la *Ecuación 14 VRH 2*, modela los niveles de presión sonora emitidos por el Hyundai Atos en una zona de aceleración de 20 metros en función de la distancia, donde:

- LAFmaxTH (dB): Representa el nivel de presión sonora máximo en ponderación temporal “fast” y ponderación frecuencial “A” dado en decibeles.

- x : Representa la distancia para cual se desea obtener el nivel de presión sonora, teniendo en cuenta que el modelo se encuentra diseñado para trabajar en distancias de 10 metros a 30 metros, siendo 10 metros el ingreso a la zona de aceleración y 30 metros la salida del vehículo de esta.



Gráfica 12: Nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia dentro de la zona de aceleración para Hyundai Atos y Renault Twizy.

Como se encuentra plasmado en la *Gráfica 12*, los valores registrados para el Hyundai Atos en todas las pruebas son superiores a los registrados en las pruebas del Renault Twizy, encontrando la mayor diferencia de niveles en 5.14 dB (*diferencia de niveles máximos entre la cuarta prueba del Hyundai Atos y la cuarta prueba del Renault Twizy*) y la menor diferencia de niveles en 2.36 dB (*diferencia de niveles máximos entre la tercera prueba del Hyundai Atos y la segunda prueba del Renault Twizy*), esto evidencia una reducción de niveles importante entre los dos vehículos y soporta el planteamiento de que efectivamente el reemplazo de vehículos de motor de combustión a gasolina por vehículos eléctricos generaría una reducción de niveles de presión sonora en las mismas condiciones de operación. Asimismo, la diferencia de niveles máximos entre el Hyundai Atos y el Renault Twizy resultantes de la aproximación polinómica de cuarto orden es de 4.72 dB y la diferencia de niveles a 10 metros es de 4.01 dB, diferencias que se encuentran dentro de los valores de diferencia máximo y mínimo reportados anteriormente, y que permiten determinar que la

aproximación polinómica de cuarto orden modela de manera adecuada los niveles de presión sonora en la zona de aproximación del automotor al sistema de registro (*de 10 a 20 metros*).

Por otra parte, se evidencia que los máximos niveles energéticos registrados para ambos vehículos se encuentran justo en el punto donde se coloca el sistema de registro (*20 metros*). Sin embargo, el comportamiento al aproximarse y alejarse de dicho punto varía en ambos vehículos, mientras que para el Hyundai Atos los niveles tienden a elevarse con una pendiente no tan pronunciada, debido al aporte de ruido que genera el tren de potencia de combustión a gasolina al aumentar la velocidad rotacional del motor, el cual comienza a percibirse a una mayor distancia, para el Renault Twizy, gracias a que su tren de potencia es eléctrico y no produce grandes emisiones de ruido, la pendiente tiende a ser más pronunciada al aproximarse y alejarse del punto de medición, ya que a mayores distancias el aporte de ruido no es tan significativo como el del Hyundai Atos.

Asimismo, se puede notar que la función resultante de la aproximación polinómica del comportamiento del SPL generado por el Hyundai Atos, reporta un valor máximo de 65.7 dB a 20 metros, un valor de 61.53 dB a 10 metros y un valor de 62.03 dB a 30 metros, dando como resultado una diferencia de 4.17 dB entre el punto de aproximación y el punto donde se registra el nivel máximo y una diferencia de 3.67 dB entre el punto donde se registra el nivel máximo y el punto de distanciamiento máximo de la zona de aceleración, esta diferencia de 0.5 dB entre un decaimiento y otro representa claramente el fenómeno de que en el punto inicial de aproximación el vehículo se encuentra a una velocidad rotacional menor que en el punto de distanciamiento máximo de la zona, y, por lo tanto, a 10 metros el vehículo tiende a tener un menor aporte de ruido que a 30 metros. Sin embargo, para el caso del Renault Twizy esta presenta un comportamiento adecuado en la zona de aproximación (*de 10 metros a 20 metros*), reportando un nivel a 10 metros de 57.52 dB y un nivel máximo de 60.98 dB en los 20 metros, tal como sucede con el fenómeno en la realidad, pero, en la zona de distanciamiento del punto de medición (*de 20 metros a 30 metros*) presenta un decaimiento que se encuentra por fuera de los valores de la prueba, reportando un nivel de 54.44 dB a 30 metros, que resulta en una diferencia de 3.08 dB entre el punto inicial de la zona y el punto de distanciamiento máximo de esta. Este comportamiento anormal de la curva para las distancias superiores a 20 metros

puede deberse a las diferencias que existen en las curvas de cada una de las pruebas, especialmente en esta zona de 20 metros a 30 metros, las cuales no permiten encontrar una función que describa adecuadamente el comportamiento del fenómeno físico en toda la zona de aceleración.

Esto último pone en evidencia el hecho de que, aunque los valores de desviación estándar de los coeficientes de la aproximación para el Hyundai Atos son más elevados que para el Renault Twizy, la aproximación polinómica de cuarto orden del Hyundai Atos (*Ecuación VRH 2*) representa mejor el comportamiento del SPL en función de la distancia que la aproximación del Renault Twizy (*Ecuación 13 VRH 1*). Esto se debe a que el coeficiente de correlación de cada una de las curvas que componen el promedio de la ecuación del Hyundai Atos es más cercano a 1 que las del Renault Twizy. Por lo tanto, para este tipo de métodos donde se implementan medias aritméticas entre aproximaciones polinómicas, pesa más poseer un mejor ajuste con base en el coeficiente de correlación de las curvas que la desviación estándar de los datos a promediar. En este punto del trabajo, se da cumplimiento al objetivo específico número dos.

En el siguiente apartado, se plantea el cálculo del factor de sustitución 1:1 de vehículos de características *Hyundai Atos* por vehículos de características *Renault Twizy*. Además de esto, se plantea la evaluación de dicho factor respecto a la frecuencia de vehículos en las calles de la zona geográfica de estudio.

5.4 Cálculo del factor de sustitución de automóviles.

Se propone el diseño de un cálculo matemático, el cual permita mediante los resultados del aporte total de ruido obtenidos a través de la normativa ISO 362 – 1 2015 para cada uno de los vehículos automotores (*Renault Twizy* y *Hyundai Atos*), predecir los niveles de presión sonora en función del número de carros y viceversa en la zona geográfica de estudio de acuerdo con el tipo de vehículo deseado, eléctrico o de combustión a gasolina.

En principio, se procede a determinar el número de automóviles que circulan por cada una de las calles en un periodo de tiempo de 15 minutos. En la *Tabla 19*, se presentan los resultados del conteo total realizado para cada una de las calles promediado entre los días de medición y segmentado para

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

automóviles, motocicletas y vehículos de tráfico pesado, con la finalidad que el modelo tome en cuenta un comportamiento promedio en la zona geográfica a través de los días y permita evaluar el impacto de la sustitución uno a uno de manera acertada, teniendo en cuenta las variaciones en el flujo de automóviles que ocurren en los distintos días de medición (*los resultados del conteo general de los días se encuentran expuestos en el apartado de resultados en la Tabla 1*).

Calle	# Automóviles	# Motocicletas	# Tráfico Pesado	% Automóviles
Calle 144	39	6	2	82,95
Calle 145	48	7	2	84,27
Calle 145a	42	8	1	82,71
Calle 146	47	10	0	82,02
Carrera 13	88	12	2	85,64

Tabla 19: Número de vehículos entre puntos y días (T=15 minutos).

Debido a que la caracterización de los vehículos es realizada solamente para automóviles, que representan en promedio el 83.52 % del tránsito total de vehículos en la zona geográfica de estudio, se decide trabajar con el número de automóviles descartando los aportes provenientes de motocicletas y vehículos de tráfico pesado debido a su baja frecuencia estadística durante las mediciones.

Una vez definido el número de vehículos por calle para un periodo de 15 minutos, se procede a calcular el valor de emisión de ruido en función de estos. En primer lugar, se realiza la suposición de que todos los vehículos son iguales y, por lo tanto, generan el mismo nivel de presión sonora (*este es tomado de los resultados de la prueba por paso de vehículo de la normativa ISO 362 – 1 2015 en la Tabla 16*).

Vehículo automotor	Tiempo Cronometrado (s)
Renault Twizy	4.84
Hyundai Atos	5.57

Tabla 20: Prueba por paso según ISO 362 - 1 2015 "Tiempos".

Por otra parte, se realiza la suposición de que ya que el periodo total de conteo es de 15 minutos y el mayor número de vehículos registrados en una calle es de 88 vehículos (*Carrera 13*), los vehículos son modelados como si estuviesen pasando uno tras otro y no al mismo tiempo enfrente del sistema de registro, es decir, ya que la frecuencia mínima de paso de un vehículo es de cada 10.22 segundos y el tiempo que más demora uno de los vehículos en cruzar la zona es de 5.57 segundos (*Tabla 20 - Hyundai Atos*), se supone que estos no pasan simultáneamente y puede modelarse como un promedio energético de fuentes a través del tiempo. Cabe aclarar que también se realiza el análisis para vehículos que cruzan el sistema de registro al mismo tiempo, vehículos paralelos, caso en el cual la energía se duplica, pero la frecuencia de paso de vehículos disminuye a la mitad y por lo tanto el tiempo de separación entre paso de parejas de vehículos se duplica compensando de esta manera el aumento de energía. Con base en lo anterior, las situaciones de cruce de vehículos en paralelo o en serie en frente del sistema de registro resultan en lo mismo y es por esto por lo que se descarta el análisis de vehículos simultáneos frente al sistema de registro.

Basado en lo anterior, se procede a plantear la ecuación mediante la cual se predicen los niveles de presión sonora en función del número de vehículos para cada tipo de tren de potencia durante un periodo de 15 minutos. En un principio, se parte de la ecuación de L_{eq} propuesta por la resolución 0627 expuesta a continuación.

$$LEQ (dB(A)) = 10 \log \left[\frac{1}{T} * \left(\sum t_i * 10^{\frac{Li}{10}} \right) \right] \text{ Ecuación 15}$$

donde:

- LEQ dB(A): Corresponde al nivel de presión sonora equivalente.
- T: Tiempo de integración.
- t_i : Intervalos de tiempo i .
- L_i : Niveles de presión sonora para los intervalos de tiempo t_i .

Para llegar a la expresión a utilizar se tienen en cuenta los siguientes criterios: La sumatoria es reemplazada por el producto del tiempo que toma en cruzar un vehículo enfrente del sistema de registro por el número total de vehículos que cruzan, ya que se considera que todos los vehículos emiten el mismo nivel de presión sonora. Además de esto, el nivel L_i es reemplazado por el nivel

L_{ta} , el cual corresponde al nivel de presión sonora que emite cada tipo de automóvil. Con base en lo anterior, se replantea la ecuación, dando como resultado la siguiente expresión.

$$LEQ_{emisión} (dB(A)) = 10 \log \left[\frac{1}{T} * \left(t_{paso} * N * 10^{\frac{L_{ta}}{10}} \right) \right] \text{Ecuación 16}$$

donde:

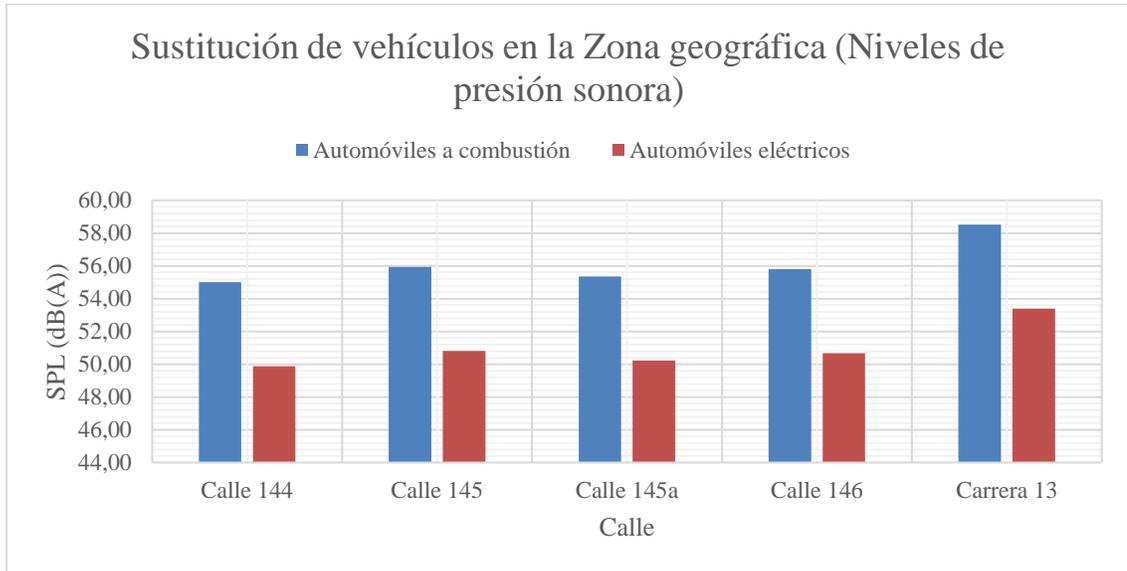
- $LEQ_{emisión} (dB(A))$: Corresponde al valor de emisión de ruido promedio en un periodo T proveniente de una cantidad de vehículos N de tipo ta (*Tipo de vehículo Hyundai Atos o Renault Twizy*).
- T: Corresponde al periodo de tiempo de medición en segundos.
- t_{paso} : Corresponde al tiempo en segundos que demora en cruzar un solo vehículo la zona de aceleración estipulada en la normativa ISO 362 – 1 2015.
- N: Corresponde al número de vehículos que cruzan la zona geográfica en un periodo de tiempo T.
- L_{ta} : Corresponde al nivel de presión sonora promedio que emite un vehículo durante la prueba por paso de vehículo de la normativa ISO 362-1 2015.

Implementando la *Ecuación 16*, se calculan los niveles de presión sonora promedio para el número de vehículos del conteo de cada calle, utilizando los resultados de niveles de presión sonora promedio y tiempos registrados mediante cronómetro del Hyundai Atos y el Renault Twizy durante las pruebas de la normativa ISO 362 – 1 2015 para un periodo de 15 minutos.

A continuación, se procede con la comparación entre los niveles de presión sonora simulados para vehículos de características Hyundai Atos y Renault Twizy.

Como se puede evidenciar en la *Gráfica 13*, efectivamente existe un decremento en los niveles de presión sonora en las calles al utilizar vehículos eléctricos en lugar de vehículos de combustión a

gasolina (*sustitución uno a uno*), con una diferencia de 5.13 dB(A) en cada calle, por tanto, se demuestra que los vehículos eléctricos son una alternativa para reducir los niveles de presión sonora en las calles urbanas.



Gráfica 13: Sustitución de vehículos en la Zona geográfica en términos de SPL.

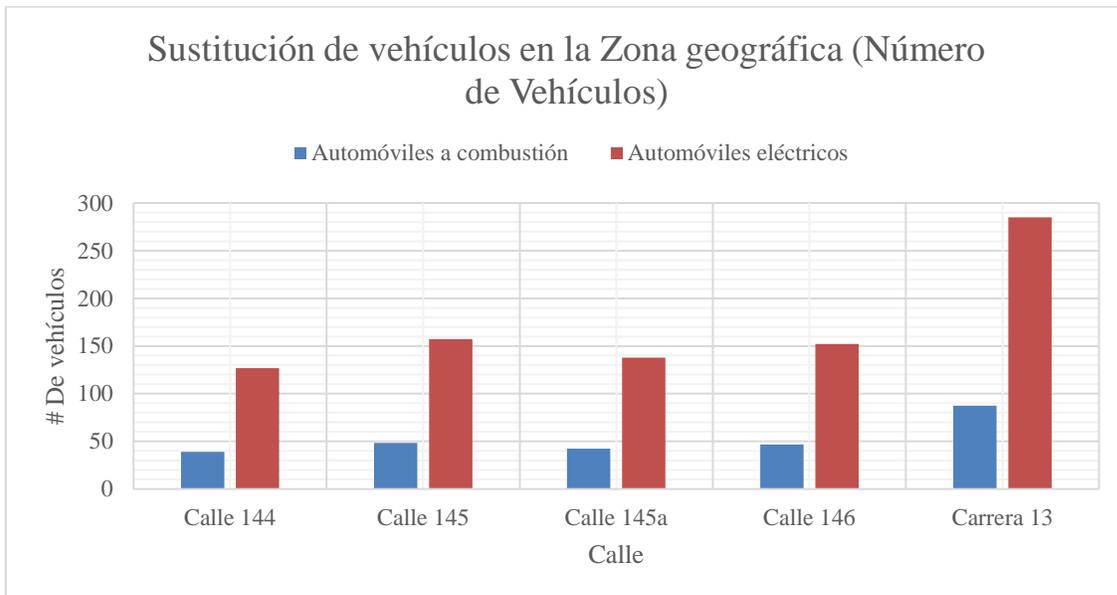
Asimismo, en la *Tabla 22*, se muestran los resultados correspondientes a la cantidad de vehículos eléctricos necesarios si se quisiera igualar los niveles de presión sonora generados por los vehículos de combustión a gasolina.

Calle	# de EVs para igualar emisiones	Factor de sustitución
Calle 144	127	3,3
Calle 145	157	
Calle 145 ^a	138	
Calle 146	152	
Carrera 13	285	

Tabla 21: Número de Vehículos eléctricos (EVs) para igualar emisiones en 15 Minutos.

Como se puede notar, el factor de sustitución es de 3,3, lo cual quiere decir, que por cada cuatro (4) vehículos de características Hyundai Atos, se pueden introducir hasta trece (13) automotores de características Renault Twizy sin incrementar los niveles de aporte de ruido en dicha zona geográfica.

En la *Gráfica 14*, se muestran el número de vehículos eléctricos en cada zona necesarios para igualar las emisiones de ruido producidas por los vehículos de combustión a gasolina del conteo realizado en la zona geográfica.



Gráfica 14: Sustitución de vehículos automotores eléctricos en Zona Geográfica en función del número (Cantidad de vehículos automotores).

Como se puede evidenciar, la cantidad de vehículos eléctricos necesaria para un periodo de 15 minutos es demasiado elevada con respecto al conteo que se hizo durante los procesos metrológicos de la zona, y con esto, se asegura que las emisiones de ruido disminuirían si se realizara una sustitución 1:1 de vehículos automotores con características Hyundai Atos (*Automotor de combustión a gasolina*) por automotores con características Renault Twizy (*Automotor eléctrico*). En este punto del trabajo, se da cumplimiento al objetivo general del estudio.

5.5 Aplicación del modelo inglés para el cálculo de ruido por tráfico rodado.

En este apartado se analizan los resultados correspondientes a la aplicación del modelo inglés, teniendo en cuenta la cantidad de automóviles total registrados para después implementar el modelo con el factor de sustitución de vehículos hallado en el apartado anterior, y, de esta manera, evidenciar

cual sería el impacto de una sustitución 1:1 de vehículos de características *Hyundai Atos* por vehículos de características *Renault Twizy*.

En la *Tabla 22*, se encuentran los parámetros generales para la aplicación del modelo.

Parámetro	Valor
Velocidad promedio (Km/h)	50
Distancia del receptor relativo a la fuente (m)	1
Altura del receptor relativo a la fuente (m)	1,272
Ángulo de fachada opuesta (°)	180
Ángulo de vista (°)	180

Tabla 22: Parámetros generales para la aplicación del modelo inglés.

Como se puede notar, la velocidad promedio se establece como 50 Km/h, esto debido a que la velocidad máxima de tránsito de todas las vías de la zona es de 60 Km/h y se pretende que los vehículos automotores circulan por debajo de esta. Por otra parte, la altura del receptor tiene en cuenta tanto la elevación de la acera peatonal donde se ubica el receptor (7.2 cm), como la altura del receptor relativa al suelo (1.2 m). Por último, todos los puntos de recepción tienen fachadas al otro lado de la vía a 180° y se encuentran distanciados de fachadas cercanas a más de 1 metro de distancia.

Con base en lo anterior, en la *Tabla 23*, se desarrolla el cálculo del nivel de presión sonora básico.

Corrección	Calle 144	Calle 145	Calle 145a	Calle 146	Carrera 13
Número de vehículos	58,91	59,78	59,28	59,76	62,29
% de tráfico pesado (C_{use})	-1,50	-1,66	-2,20	-2,49	-1,89
Condición del asfalto (C_{cond})	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
SPL básico (dB(A))	56,41	57,12	56,09	56,27	59,41

Tabla 23: Aplicación del modelo inglés - Correcciones para hallar el nivel de presión sonora básico.

Como se muestra, es necesario realizar tanto la corrección por porcentaje de vehículos de tráfico pesado “Ecuación 2”, la cual se basa en el conteo de vehículos automotores realizado para la zona geográfica, como la corrección por condición de la superficie de tránsito “C_{cond}”, la cual está construida en asfalto impermeabilizado.

Asimismo, en la *Tabla 24*, se encuentra el cálculo de la predicción del nivel L₁₀ para un periodo de 1 hora, teniendo en cuenta las correcciones que aplican para las vías.

Corrección	Calle 144	Calle 145	Calle 145a	Calle 146	Carrera 13
Nivel de presión sonora básico	56,41	57,12	56,09	56,27	59,41
Propagación (C _{dis})	4,60	4,60	4,60	4,60	4,60
Fachadas (Reflexiones)	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
L ₁₀ (dB(A))	62,52	63,22	62,19	62,37	65,51

Tabla 24: Aplicación del modelo inglés - Cálculo del L₁₀ aplicando las correcciones restantes.

Como se evidencia, para el caso de propagación se realiza la corrección por distancia “Ecuación 5”, siguiendo las ecuaciones planteadas en los procedimientos y las distancias de la medición real utilizando la Resolución 0627. De igual manera, ya que en todos los puntos de medición existen fachadas al otro lado de la vía, es necesario realizar la corrección por reflexiones en fachadas “Ecuación 7”. Finalmente, se realiza el cálculo del percentil L₁₀ utilizando la ecuación planteada en el apartado de procedimientos “Ecuación 9”.

Una vez calculado el nivel L₁₀ utilizando el modelo, se procede a aplicar el modelo de nuevo, pero esta segunda vez, se aplica el factor de sustitución de vehículos hallado en el apartado anterior (≈ 3.3 vehículos ligeros menos), con el fin de analizar el impacto de la sustitución 1:1 de vehículos automotores de características *Hyundai Atos* por vehículos de características *Renault Twizy*.

En la *Tabla 25*, se encuentran, para cada una de las vías de la zona de estudio, los valores Leq medidos implementando la resolución 0627, el nivel percentil L₁₀ aplicando el modelo, el nivel percentil L₁₀ aplicando el modelo con el factor de sustitución, las diferencias existentes entre los valores medidos y los valores calculados y el impacto de la sustitución 1:1.

Calle	LEQ Medido (dB(A))	L₁₀ Modelo (dB(A))	L₁₀ Factor de sustitución (dB(A))	Diferencias Medición/Modelo (dB(A))	Impacto de la sustitución (dB(A))
Calle 144	63,02	62,52	60,20	0,51	-2,32
Calle 145	66,46	63,22	60,71	3,24	-2,51
Calle 145a	62,18	62,19	59,21	-0,01	-2,98
Calle 146	62,94	62,37	59,10	0,57	-3,27
Cra 13	67,51	65,51	62,72	2,00	-2,79

Tabla 25: Promedio entre días y puntos - Aplicación del modelo inglés para la evaluación del impacto que conlleva la sustitución de vehículos de características Hyundai Atos por vehículos Renault Twizy.

En un principio, se puede evidenciar que las diferencias entre el modelo y las mediciones no son tan elevadas, reportando una máxima diferencia de 3.24 dB(A) y una mínima diferencia de -0.01 dB(A), correspondientes a la calle 145 y la calle 145^a respectivamente, y al poseer una diferencia de menos de 1 dB en tres (3) de las cinco (5) calles se considera que el modelo ajusta a las mediciones. Por otra parte, se puede notar que existe una reducción de niveles en la zona geográfica al realizar la sustitución 1:1, reportando una reducción de hasta 3.27 dB(A), lo cual determina que los niveles de presión sonora pueden llegar a reducirse aproximadamente a la mitad de la energía (*ya que una reducción de 3dB corresponde a una disminución a la mitad de la energía inicial*) y confirma el planteamiento de que los vehículos con tren de potencia eléctricos pueden llegar a ser una alternativa para la reducción de niveles de presión sonora en las zonas urbanas.

5.6 Discusión.

Con base en todo lo expuesto en el apartado de análisis de resultados, se demuestra que efectivamente los vehículos eléctricos pueden ser una alternativa a la contaminación por emisiones de ruido por tráfico vehicular en las zonas urbanas. Además de esto, y sin pretender ser expertos en la materia, la sustitución 1:1 que plantea el estudio no solo puede llegar a tener implicaciones en cuanto a las emisiones de ruido corresponde, sino que, puede llegar a generar un impacto positivo en la movilidad basado principalmente en el tamaño de los vehículos; puesto que el Renault Twizy (*con 2.5 metros aproximadamente de longitud y 1.2 metros de ancho*) posee una longitud de aproximadamente 2 metros menos y un ancho de 0.6 metros menor que el Hyundai Atos (*con 4.5 metros aproximadamente de longitud y 1.8 metros de ancho*), y es esta diferencia de dimensiones la cual permitiría que la infraestructura actual de las calles de la zona de estudio, con carriles de doble sentido de 3.5 metros aproximadamente cada uno (*dimensión de los carriles de la zona urbana de estudio en la ciudad de Bogotá*), pudiese albergar de manera segura tres carriles con la misma infraestructura permitiendo una reorganización vial eficiente y generando un impacto positivo en la movilidad en las zonas urbanas de la ciudad. Por otra parte, aunque la capacidad de transporte del Renault Twizy es de solo dos ocupantes, durante las mediciones realizadas a la zona geográfica se visualizó que la mayoría de los propietarios de vehículos automotores viajan solos o con un acompañante en su vehículo, y es por esto, por lo que se determina que aunque la capacidad de ocupantes posibles en el vehículo se ve reducida, esta se ajusta a los requerimientos de la mayoría de los propietarios de vehículos particulares en la zona urbana de estudio de la ciudad de Bogotá. Por último, y sin ser menos importante, la sustitución 1:1 propuesta puede llegar a tener un impacto positivo en la reducción de emisiones de gases nocivos producidos por los motores que utilizan combustibles fósiles, ya que bien es sabido, que las zonas urbanas de las grandes ciudades suelen poseer mayores índices de polución que las zonas rurales o de bajo tráfico vehicular, generando los vehículos eléctricos, posiblemente un gran cambio no solo en el estilo de vida que llevan los usuarios (*teniendo éstos, beneficios como la ausencia de pico y placa y la reducción de gastos operacionales ya que no utilizan combustibles fósiles sino energía eléctrica que suele ser mucho más económica*) sino en la calidad de vida de las grandes ciudades, mitigando no solo las afectaciones por los grandes atascos vehiculares que se presentan, sino que además, reduciendo las patologías de problemas ocasionados por la contaminación de gases que los vehículos de combustión generan hacia la atmósfera.

6. Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones.

6.1 Conclusiones

- 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 la zona geográfica de estudio genera una reducción de niveles de presión sonora de 5.13 dB(A) según el factor de sustitución calculado y de hasta 3.27 dB(A) en la mayor reducción al aplicar el modelo inglés, gracias a esto, se demuestra que los vehículos eléctricos son una alternativa adecuada para reducir los niveles de presión sonora en las calles urbanas.
- Para igualar los niveles de presión sonora actuales de la zona geográfica utilizando solo vehículos eléctricos, se debe incrementar en 3.3 veces el número de automóviles que circulan las vías, es decir, por cada cuatro (4) vehículos de características *Hyundai Atos* es posible introducir trece (13) vehículos de características *Renault Twizy* sin incrementar los niveles de presión sonora en la zona urbana. Además de esto, y como se planteó en la discusión final del análisis de resultados, la sustitución 1:1 propuesta por el estudio puede llegar a generar un impacto positivo en la movilidad de la zona urbana de estudio y la calidad de vida de los residentes y transeúntes (*mitigando las emisiones de gases contaminantes*).
- A las velocidades que se desarrolló la prueba por paso de vehículo para la caracterización de fuentes de los automóviles (*entre 20 Km/h y 45 Km/h*), no es posible determinar una banda de tercio de octava como aporte independiente del ruido por rodadura del resto de fuentes emisoras de ruido de los automotores como lo indica la revisión de la literatura de la norma ISO 362 – 1 del 2015, la cual determina que para velocidades mayores o iguales a 50 Km/h, es posible asociar a las bandas de tercio de octava superiores a 1000 Hz, donde se

encuentre la mayor concentración de energía, al aporte de ruido por la interacción entre los neumáticos y el pavimento.

- Las ecuaciones polinómicas de cuarto orden VRH 1 (*Ecuación 4*) y VRH 2 (*Ecuación 5*), representan adecuadamente el comportamiento físico de los vehículos *Renault Twizy* y *Hyundai Atos* respectivamente al transitar a través de una zona de aceleración de 20 metros (*entre 10 metros a 30 metros*) para un punto de medición situado en la mitad de dicha zona (*20 metros*), permitiendo evidenciar una posible simetría (*forma de campana*) que caracteriza al paso del vehículo enfrente del sistema de registro, punto en el cual se registra el nivel máximo de presión sonora y se reporta una diferencia de 4.72 dB(A) entre el *Hyundai Atos* y el *Renault Twizy*, cuando se realiza el proceso de simulación del fenómeno mediante la aproximación polinómica.
- El incremento de la frecuencia fundamental (*componente tonal del ruido generado*) que genera el sistema de escape de un automóvil de combustión a gasolina se encuentra directamente relacionado con el incremento de la velocidad rotacional del motor de este (*R.P.M.*), como se evidencia en el análisis respectivo al sistema de escape del *Hyundai Atos*, donde para las pruebas a 1 metro, a 1000 R.P.M. la banda de tercio de octava de mayor aporte se encuentra en 63 Hz, y, para 3000 R.P.M. esta se encuentra en 100 Hz, demostrando un desplazamiento positivo de la banda de tercio de octava a la cual se encuentra asociada la emisión de ruido proveniente del sistema de escape.
- Tanto el *Hyundai Atos* como el *Renault Twizy* generan casi las mismas emisiones hacia ambos lados (*0.24 dB(A)* y *-0.33 dB(A)* *lado derecho relativo a lado izquierdo respectivamente*), esto se puede deber a que los fabricantes de automóviles tienden a disponer los sistemas que los componen de manera tal que el automóvil genere los mismos niveles de presión sonora para el lado derecho que para el lado izquierdo.

6.2 Recomendaciones.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones para futuros trabajos que busquen expandir los conocimientos en estudios concernientes a la mitigación del impacto del ruido por tráfico vehicular mediante el uso de vehículos eléctricos u otras tecnologías presentes en el país:

- Debido a que la normativa ISO 362 – 1 del 2015 está indicada para vehículos de motor a combustión, no es posible realizar varios de los análisis que esta propone en vehículos eléctricos (*Análisis ASEP y velocidad constante*). Sin embargo, es posible aplicar la prueba de paso de vehículo sin ningún inconveniente, pudiendo caracterizar la emisión de ruido total proveniente del automotor.
- Para futuros trabajos, y considerando que en la ciudad de Bogotá existe presencia de vehículos de combustión a Diesel y motocicletas, y, que perceptualmente estos tienden a generar mayores emisiones que el vehículo a combustión utilizado para este estudio (*Hyundai Atos*), es posible plantear un modelo matemático de simulación que tome en cuenta ya no solo todos los vehículos como si se comportaran de igual manera, sino que, se aproxime mucho más al caso real, tomando en cuenta diferentes tipos de vehículos y que sucedería con la sustitución 1:1 para este caso.
- Analizar el impacto que tiene en la emisión de ruido de un vehículo el uso de diferentes tipos de neumáticos y el efecto que el desgaste de estos tiene en la misma.
- Realizar un banco de datos del comportamiento acústico de diferentes vehículos eléctricos que se encuentren en Colombia a través de la normativa ISO 362 – 1 del 2015, con el fin de poder realizar un modelado numérico más adecuado de acuerdo con la presencia en el parque automotor colombiano de dichos vehículos actualmente y poder plantear proyecciones a futuro del impacto que estos vehículos tienen en las diferentes ciudades del país.
- Caracterizar todas las fuentes de ruido independientes (*aludidos a sistemas de operación del vehículo*) que posee un vehículo eléctrico en función de la frecuencia, con el fin de determinar el impacto de estas en la emisión total de ruido del automotor y poder realizar análisis comparativos contra el espectro en frecuencia de un vehículo automotor de combustión.

- Realizar las pruebas por paso de vehículo para las velocidades límites en carreteras colombianas, con el fin de determinar la diferencia de impacto del ruido aerodinámico por parte de un vehículo eléctrico y un vehículo automotor (*estas deben ser realizadas en un ambiente controlado debido al riesgo que supone incrementar la velocidad y la necesidad de espacio para alcanzarla de manera segura y poder detener el vehículo sin inconvenientes.*)
- Realizar trabajos comparativos entre los diferentes modelos de predicción de ruido por tráfico rodado (*modelo inglés, modelo nórdico, modelo francés, modelo alemán, etc.*) y evaluar cuál de estos se ajusta mejor a resultados metrológicos registrados en diferentes situaciones y condiciones de las vías de Colombia.

7. Capítulo 7: Anexos.

A. Especificaciones técnicas: Sonómetro Svantek 977.



Imagen 28: Sonómetro Svantek 977 Tipo 1. Fuente: https://svantek.com/lang-es/product/2/svan_977_analizador_de_ruido_y_vibraciones.html#about

Este sonómetro es un medidor, analizador de ruido y vibraciones clase 1. “El SVAN 977 proporciona resultados de banda ancha con todos los filtros de ponderación estándar y también ofrece una

capacidad de registro de historial de tiempo con resultados increíbles de banda ancha y espectros con los pasos de registro ajustables.” (Svantek , 2018) Este instrumento, *Imagen 28*, también puede realizar registros de grabaciones de audio simultáneamente con el registro de historial de tiempo. Este registro, tiene la posibilidad de generar un archivo de onda por separado o un evento de audio dentro de los archivos.

Para los resultados de medición, es posible que su registro sea en tres perfiles acústicos o de vibración, los cuales permiten que las mediciones se realicen con 3 filtros diferentes (A, C, Z) y también 3 constantes de tiempo (rápido, lento o impulsivo). Los datos de medición son almacenados en una tarjeta microSD en donde se podrán extraer fácilmente utilizando el software SvanPc++ (Svantek , 2018). Utiliza pilas extraíbles tipo AA. y la duración aproximada haciendo uso de este es de 9 horas.

B. Especificaciones técnicas: Sonómetro Svantek 943.



Imagen 29: Sonómetro Svantek 943 Tipo 2. Fuente: https://svantek.com/support/336/943_-_user_manual.pdf

El sonómetro Svantek modelo SVAN 943, *Imagen 30*, es un medidor y analizador de sonido, el cual tiene la capacidad de analizar en términos de 1/1 y 1/3 de octava en tiempo real. Este instrumento de medición es dedicado a las mediciones y análisis de nivel de presión sonora con la precisión de Tipo 2 en el rango frecuencial de 20Hz hasta 20Khz. Utiliza una batería interna recargable la cual es capaz de durar más de 8 horas. La extracción de los datos almacenados dentro del sonómetro se puede realizar con el software SvanPC++ (Svantek, 2018)

C. Especificaciones técnicas: Brüel 2250-1.



Imagen 30: Sonómetro Brüel modelo 2250-1 tipo 1. Fuente: <https://www.bksv.com/en/products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters-and-vibration-meters/Type-2250-1>

El sonómetro Brüel modelo 2250-1, *Imagen 30*, es un sonómetro tipo 1, el cual posee distintos aplicativos para las mediciones de ruido ambiental, análisis FFT (**F**ast **F**ourier **T**ransformation “*Transformada rápida de Fourier*”), análisis de vibraciones y demás aplicativos. También cuenta con una pantalla táctil, comunicación de tipo USB, LAN e incluso la capacidad de conexión vía Wi-Fi o red 4G. (Brüel & Kjær, 2018)

D. Especificaciones técnicas: Micrófono Earthworks M30.

Description

Earthworks M30 is an omnidirectional (pressure) microphone designed and calibrated for measurement purposes. It is a prepolarized condenser microphone directly coupled to a wideband, low output impedance preamplifier. The M30 requires a standard 48V phantom power supply. It features a linear free-field frequency response from 5Hz to 30kHz (please see the enclosed individual calibration chart), very low handling noise, uniform polar pattern, and very high SPL handling capabilities. Its unique circuitry excludes the transconductance of the input FET from the overall gain structure. This means the sensitivity remains very stable when the microphone is subjected to variations in ambient temperature. The M30 meets or exceeds ANSI Type 1 requirements.

Each microphone is delivered with its own calibration chart providing its individually measured open-circuit sensitivity and the frequency response curve. A computer file containing the frequency response data for importing directly into measurement software is available from Earthworks, Inc. upon request at an extra cost. A mounting clip and a calibrator adapter are included with the microphone.

Applications

Earthworks M30 is ideally suited for acoustical measurements including loudspeaker design and quality control, sound system setup and troubleshooting, room acoustics, or any application where an accurate free-field measurement microphone is required. Many test systems manufacturers, such as EAW Smaart™ and DEQX™, are recommending M30 microphones. The wide linear minimum-phase response and fast well-damped impulse response (Fig. 2) make the M30 an excellent

microphone for loudspeaker design, especially for time domain measurements.

The M30 is simple to operate. Connect the microphone to a microphone preamplifier supplying 48V phantom power using a standard XLR microphone cable. *Please allow up to one minute for the microphone to settle.* Plugging in the microphone "hot" (phantom power already present at the input) will not damage the microphone, and is actually preferred for faster settling. For optimum results we recommend pointing the M30 toward the sound source.

This microphone has no removable parts.

Calibration

The microphone is calibrated at the factory at 1 kHz (therefore independent of any frequency weighting). The sensitivity in mV/Pa is provided on the calibration chart. If on-site calibration is required, use the enclosed 1/2" adapter.

Specifications

Frequency response: 5Hz to 30kHz +1/-3dB
 Polar Pattern: Omnidirectional
 Sensitivity: 30mV/Pa (Typical)
 Power Requirements: 48V Phantom, 10mA
 Peak Acoustic Input: 142dB SPL
 Output: XLR (Fig. 1)
 Output Impedance: 100Ω, balanced
 (50Ω ea. pin 2 & 3)
 Minimum Load: 600Ω btw. pins 2 & 3
 Noise: 22dB, A equivalent
 Dimensions L x D: 229 x 22 mm
 (9 x .860 in.)
 Weight: 225g (.5lb)

CE Compliant

Specifications are subject to change without notice.

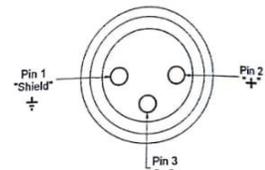


Fig. 1. XLR Output Connector Assignment of M30

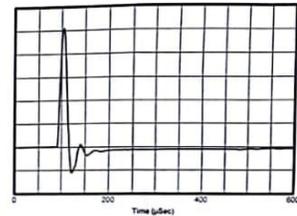


Fig. 2. Impulse Response (Typical) of M30

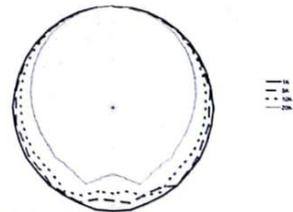


Fig. 3. Polar Response (Typical) of M30, 1dB/div.

Imagen 31: Especificaciones técnicas micrófono Earthworks M30 1. Fuente: Información por el fabricante.

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

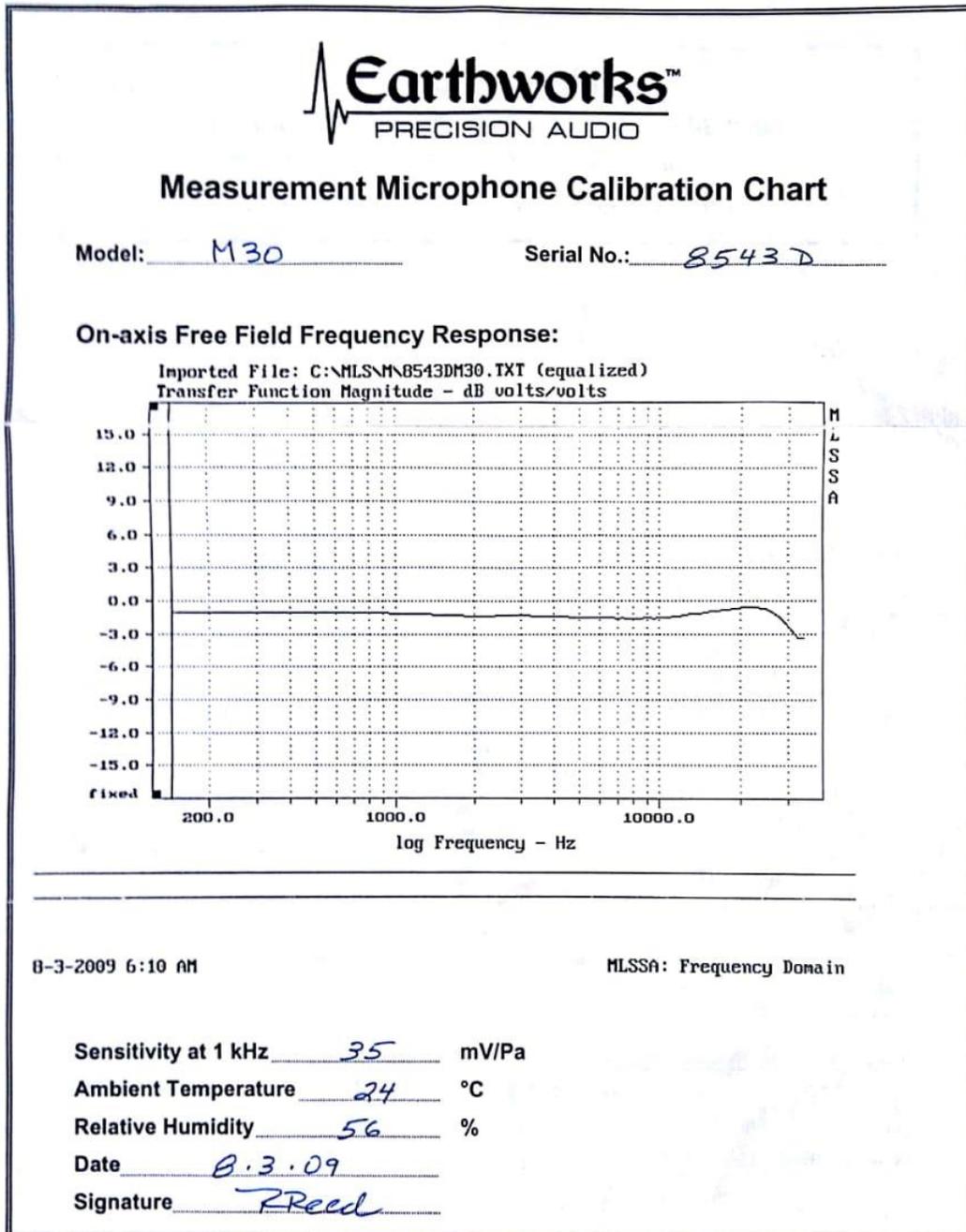


Imagen 32: Especificaciones técnicas micrófono Earthworks M30 1.1. Fuente: Información por el fabricante.

E. Especificaciones técnicas: Grabadora portátil Zoom H6.



Imagen 33: Grabadora portátil Zoom H6. Fuente: <https://www.zoom-na.com/es/zoom-h6-handly-recorder>

La Zoom H6 es una grabadora portátil, *Imagen 33*, que cuenta con 4 entradas de línea principales de ¼ de pulgada en donde también, estando combinadas, se encuentran entradas balanceadas XLR (Línea de Retorno Externa) o “External Line Return” y dos entradas adicionales en donde se pueden acoplar las dos cápsulas estéreo (X/Y, MS [Mid.Side]) que vienen con la unidad en su caja. Además, también existen otros dos tipos de cápsulas que se pueden integrar en la unidad las cuales son (“Shotgun y Dual XLR/TRS combo”) pero estas se venden por separado. (Zoom, 2018)

Las cuatro entradas principales tienen un knob de control de ganancia independiente con la posibilidad de un Pad de atenuación de -20dB, el cual permite prevenir distorsiones cuando ingresan señales de alto nivel. Incluso, tiene la posibilidad de ofrecer alimentación Phantom, en caso de que se estén usando micrófonos de condensador con (+12,24 ó inclusive +48 voltios) Esta grabadora cuenta también con una pantalla LCD a todo color de 2 pulgadas con resolución de (230x240 pixeles) (Zoom, 2018)

F. Especificaciones técnicas: Estación meteorológica Davis Vantage Vue.



Imagen 34: Estación meteorológica Davis Vantage Vue. Fuente: <https://www.raig.com/tienda/meteorologia/estaciones-meteorologicas/estaciones-meteorologicas-digitales/estaciones-meteorologicas-digitales-profesionales/est-meteo-profesional-davis-vantage>

Este instrumento de medición, *Imagen 34*, es una estación meteorológica la cual permite monitorear en tiempo real las condiciones climáticas. Dentro de sus variables se encuentran el Termohigrómetro (mide temperatura y humedad relativa), Anemómetro (mide la velocidad de viento), Pluviómetro (mide la cantidad de lluvia que se sitúa en un lugar y en un espacio de tiempo determinado) y el Barómetro (el cual mide la presión atmosférica). (Davis Instruments, 2018) Con su consola de monitorización, la cual viene incluida posee una pantalla LCD de 11x8cm con retroiluminación donde se pueden evidenciar las lecturas en tiempo real de las variables mencionadas.

8. Capítulo 8: Referencias.

U.S Department Of Energy. (27 de 08 de 2017). *www.fueleconomy.gov the Oficial U.S government source for fuel econony information*. Obtenido de *www.fueleconomy.gov the Oficial U.S government source for fuel econony information*:
<https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>

Arana, M., Martinez de Vírgala, A., Aleixandre, A., San Martín, M., & Vela, A. (2000). *MODELOS DE PREDICCIÓN DEL RUIDO DE TRÁFICO RODADO. COMPARACION DE DIFERENTES STANDARDS EUROPEOS. Universidad Pública de Navarra, Acústica 2000, 1-7.*

Asociación Colombiana de Vehículos Automotores. (2017). *Informe Vehículos Híbridos y Eléctricos*. RUNT, Datos procesados por ANDEMOS. Obtenido de <http://www.andemos.org/wp-content/uploads/2017/08/Informe-H%C3%ADbrididos-y-Eléctricos-2017-7.pdf>

Braun, M., Walsh, S. J., Horner, J. L., & Chuter, R. (Noviembre de 2013). *Noise source characteristics in the ISO 362 vehicle pass-by noise test: literature review. Applied Acoustics.*

Brüel & Kjær. (Junio de 2015). *Pass by Noise Regulation as ECE R41 and ECE R51 - Vehicle Exterior Noise Engineering -. Pass by Noise Regulation as ECE R41 and ECE R51 - Vehicle Exterior Noise Engineering -. Obtenido de http://www.thaiauto.or.th/2012/Automotive-Summit/doc/ppt/2015/25-6-15/203_AM/03.1015%20-%201045%20Bruel%20Kjer-Vehicle%20Exterior%20Noise%20Engineering%202015.pdf*

- Brüel & Kjær. (16 de Noviembre de 2018). *Brüel & Kjær Beyond Measure*. Obtenido de Brüel & Kjær Beyond Measure: <https://www.bksv.com/en/products/sound-and-vibration-meters/sound-level-meters-and-vibration-meters/Type-2250-l>
- Campello Vicente, H., Peral Orts, R., Campillo Davo, N., & Velasco Sánchez, E. (15 de Enero de 2017). The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*.
- Davis Instruments. (7 de Noviembre de 2018). *Davis* . Obtenido de Davis Instruments: <https://www.davisinstruments.com/solution/vantage-vue/>
- Department Of Transport Welsh Office. (1998). Calculation of Road Traffic Noise. Londres, Reino Unido.
- Earthworks INC. (5 de Noviembre de 2018). *Earthworks High Definition Microphones*. Obtenido de Earthworks High Definition Microphones: <https://earthworksaudio.com/products/microphones/measurement-series/m30/>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2006). *Metodología de la investigación 4ta edición*. México D.F, México: McGRAWHILL/INTERAMERICANA EDITORES, SA DE C.V.
- International Organization for Standardization. (Septiembre de 2015). ISO 362-1:2015 . *ISO 362-1:2015 - Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles -- Engineering method -- Part 1: M and N categories*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/59760.html>
- Kean, D. S. (2008). Acoustics and Sustainability: How should acoustics adapt to meet the future demands? Is CoRTN and Leq or L10 procedure? *Research and Development, Based Acoustics*.
- Kuppusamy, S., Magazine, M. J., & Rao, U. (1 de Octubre de 2017). Electric vehicle adoption decisions in a fleet environment. *European Journal of Operational Research*, págs. 123-135. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.039>
- Ley 769 del 6 de agosto de 2002. (2002). *Ley*. Colombia. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/listados/tematica2.jsp?subtema=28538>

- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (07 de abril de 2006). Resolución número 0627 del 07 de abril de 2006. Bogotá, Colombia.
- Quiñones Bolaños, E. E., Bustillo Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2016). *A traffic noise model for road intersections in the city of Cartagena de Indias, Colombia*. Cartagena.
- Ramírez Gonzáles, A., Dominguez Calle, E. A., & Borrero Marulanda, I. (17 de 11 de 2011). El Ruido Vehicular Urbano y Su Relación Con Medidas de Restricción de Flujo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12385909>
- Ramírez González, A., Dominguez Calle, E. A., & Borrero Marulanda, I. (2011). EL RUIDO VEHICULAR URBANO Y SU RELACIÓN CON MEDIDAS DE RESTRICCIÓN DEL FLUJO DE AUTOMÓVILES. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.
- Redondo, L. N. (2008). ANALISIS DEL APORTE AL RUIDO AMBIENTAL EMITIDO POR LOS VEHÍCULOS PARTICULARES EN BOGOTÁ. *Universidad de San Buenaventura - Bogotá D.C Colombia*. Bogotá.
- Requia, W., Mohamed, M., Higgins, C., Arain, A., & Ferguson, M. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health. *Atmospheric Environment*.
- Riesz, J., Sotiriadis, C., Ambach, D., & Donovan, S. (2016). Quantifying the costs of a rapid transition to electric vehicles. *Atmospheric Environment*.
- Sandberg, U., & Ejsmont, J. A. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*. Sweden: Kisa, Sweden ; Harg, Sweden : INFORMEX, 2002.
- Secretaría Distrital de ambiente. (s.f.). *Secretaría Distrital de ambiente*. Obtenido de Secretaría Distrital de ambiente: <http://ambientebogota.gov.co/ruido>
- Secretaría General de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (12 de Abril de 2006). Resolución 0627 de 2006 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución 0627 de*

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

2006 *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. Bogotá: Diario Oficial 46239 de Abril 12 de 2006.

Servicio Nacional de Aprendizaje. (2002). *Gas Natural Comprimido Vehicular GNCV: preconversión de vehículos*. Bogotá: Bogotá: SENA; Bogotá: Ecopetrol; Bogotá: Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas Colombia.

SIMUR. (2016). *MOVILIDAD EN CIFRAS 2016*. Obtenido de MOVILIDAD EN CIFRAS 2016: <http://www.simur.gov.co/SimurVisorBoletinWA/2016.html#PDF/22-23>

SISTEMA DE INFORMACION SOBRE COMERCIO EXTERIOR. (15 de 11 de 2018). *SICE*. Obtenido de SICE: <http://www.sice.oas.org/Trade/MRCSRS/Resolutions/AN3594.asp>

Svantek . (5 de Noviembre de 2018). *Svantek Sound and Vibration Measurement Solutions*. Obtenido de Svantek Sound and Vibration Measurement Solutions: https://svantek.com/lang-es/product/2/svan_977_analizador_de_ruido_y_vibraciones.html#about

Svantek. (5 de Noviembre de 2018). *Svantek Sound And vibration Measurement Solutions*. Obtenido de Svantek Sound And vibration Measurement Solutions: https://svantek.com/support/336/943_-_user_manual.pdf

UNICEF. (2012). Definiciones. *Definiciones*. Colombia. Obtenido de <https://www.unicef.org/spanish/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-Definiciones.pdf>

Zoom. (5 de Noviembre de 2018). *ZOOM NORTH AMERICA*. Obtenido de ZOOM NORTH AMERICA: <https://www.zoom-na.com/es/products/field-video-recording/field-recording/h6-handy-recorder/specs>

Zoom. (5 de Noviembre de 2018). *ZOOM NORTH AMERICA*. Obtenido de ZOOM NORTH AMERICA: <https://www.zoom-na.com/es/products/field-video-recording/field-recording/h6-handy-recorder/features>

Zuluaga Echeverry, C. (2009). Un aporte a la gestión del ruido urbano en Colombia, caso de estudio: Municipio de Envigado. *Un aporte a la gestión del ruido urbano en Colombia*,

caso de estudio: Municipio de Envigado. Medellín, Colombia: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.