

## RAE

- 1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO.
- 2. TÍTULO:** Comparativa del manejo de un vehículo eléctrico con y sin sonido generado por un motor de combustión basado en la realimentación sonora al conductor.
- 3. AUTOR (ES):** Brian Steven Muñoz Lozada, Nicolás Rodríguez Parrado.
- 4. LUGAR:** Bogotá D.C
- 5. FECHA:** Julio de 2021
- 6. PALABRAS CLAVES:** Realimentación sonora, Caracterización, Captura, Vehículo Eléctrico, Vehículo a Combustión, Parámetros Psicoacústicos, Sound Quality, Aplicación, Mínimos cuadrados, Regresión lineal.
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo general del presente proyecto es, evaluar la importancia de la realimentación sonora al conductor durante el desplazamiento en un vehículo eléctrico con y sin sonido de combustión reproducido. Para ello se realiza una caracterización de tipo estadística de dos vehículos, uno de combustión y uno eléctrico que pertenezcan al mismo segmento hallando así, sus principales parámetros psicoacústicos y su relación con la velocidad. Posteriormente, se realiza una aplicación que obtenga los datos de velocidad de estos vehículos y se sincronicen con los audios capturados durante la caracterización para finalizar con una prueba de valoración subjetiva que permita analizar la importancia de la realimentación sonora y su relación con los parámetros psicoacústicos medidos.
- 8. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Acústica. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Ruido de tráfico rodado.
- 9. METODOLOGÍA:** Es de carácter experimental-análítico, con base en el análisis del sonido al interior de vehículos eléctricos y de combustión:
- 10. CONCLUSIONES:** Nivel Continuo Equivalente y sonoridad dan indicios del cambio de velocidad. El componente de tonalidad no sigue ninguna aproximación matemática por lo que puede alterar la realimentación sonora. La aplicación obtiene un desarrollo correcto demostrado en las pruebas subjetivas de semejanza de sonido reproducido. Dada la diferencia de 16% del puntaje de realimentación sonora se concluye que a velocidad constante no hay una diferencia significativa en los niveles de realimentación sonora entre vehículos.

**Comparativa del manejo de un vehículo eléctrico con y sin sonido  
generado por un motor de combustión basado en la realimentación  
sonora al conductor**

**Muñoz Lozada Brian Steven  
Rodríguez Parrado Nicolás**

**Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá.  
Facultad de Ingeniería.  
Programa de Ingeniería de Sonido  
Bogotá, Colombia  
2021**

**Comparativa del manejo de un vehículo eléctrico con y sin sonido  
generado por un motor de combustión basado en la realimentación  
sonora al conductor**

**Muñoz Lozada Brian Steven  
Rodríguez Parrado Nicolás**

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

**Ph.D. Marcelo Herrera Martínez  
Fís. Luis Jorge Herrera Fernández, MSc (PhD candidate)**

**Línea de Investigación: Acústica**

**Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería de Sonido  
Bogotá, Colombia  
2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Muñoz, B. (2021): *“Agradezco a mis hijos, María Fernanda Muñoz y Ángel Santiago Muñoz, quienes han sido mi fuerza y mi motor para luchar día a día y poder culminar este proyecto de grado. De igual manera agradezco al profesor Luis Jorge Herrera por su dedicación y conocimientos, los cuales, sin ellos hubiese sido imposible llevar esta investigación”*.

Rodríguez, N. (2021): *“Agradezco profundamente a la persona más importante de mi vida, mi papá José Manuel Rodríguez, quien día a día me brindó su apoyo para finalizar esta etapa, a mi mejor amigo Cristian Vargas, quien fue fundamental en este proceso. También mencionar a cada persona que participó en este trabajo, al Profesor Luis Jorge Herrera, con el que realizamos el planteamiento de este trabajo y que con su experiencia supo guiarnos, también al profesor Marcelo Herrera, quien nos acompañó en cada reunión”*.

# Contenido

INTRODUCCIÓN .....	27
Capítulo 1: Generalidades.....	29
1.1 Antecedentes del problema: .....	29
1.1.1 El modelo de inconformidad del ruido al interior de los micro-vehículos comerciales basados en análisis de calidad sonora “Sound Quality” .....	29
1.1.2 Políticas de control de ruido urbano y vehículos eléctricos .....	29
1.1.3 Método de síntesis del sonido de un motor artificial para la modificación de las características acústicas de un vehículo eléctrico.....	30
1.1.4 Evaluación del ruido interior de un vehículo eléctrico centrada en la identificación de la fuente sonora y el análisis de la ruta de transferencia “Transfer path analysis” .....	30
1.1.5 El sonido del silencio de los vehículos eléctricos – Problemas y respuestas .....	31
1.1.6 Prominencia de los tonos en el ruido interior de los vehículos eléctricos.....	32
1.1.7 Las dimensiones subjetivas de la calidad sonora “Sound Quality” de los vehículos eléctricos de producción estándar .....	32
1.1.8 Evaluación de la calidad sonora “Sound Quality” del ruido al interior de un vehículo eléctrico puro, basada en el modelo de red neuronal .....	33
1.1.9 Modelo de deportividad psicoacústica para el sonido al interior de un vehículo: Excluyendo la sonoridad “Loudness” .....	33
1.1.10 Análisis psicoacústico de los sonidos provenientes de las ventanas eléctricas: Correlación entre evaluaciones subjetivas y objetivas .....	33
1.1.11 Predicción de las evaluaciones de molestia del ruido de los vehículos eléctricos mediante el uso de redes neuronales artificiales .....	34
1.2 Planteamiento del problema. ....	34
1.3 Justificación.....	36
1.4 Objetivo General .....	37
1.5 Objetivos específicos.....	37

1.6 Alcances y Limitaciones.....	37
1.6.1 Alcances .....	37
1.6.2 Limitaciones.....	37
1.7 Marco Conceptual .....	37
1.7.1 Vehículo eléctrico .....	37
1.7.2 Vehículo de combustión interna.....	38
1.7.3 Calidad Sonora “Sound Quality” aplicado a la industria automovilística.....	39
1.7.4 Parámetros psicoacústicos objetivos .....	40
1.7.5 Protocolo OBDII.....	45
1.7.6 Interfaz ELM 327.....	47
1.7.7 Programación orientada a eventos .....	48
1.7.8 Transmisión de datos vía puerto serial en Windows.....	48
1.7.9 Estadística descriptiva.....	49
1.7.10 Método de mínimos cuadrados ordinarios. ....	50
1.7.11 Distribución Normal y prueba de distribución Shapiro Wilk.....	51
1.7.12 Regresión lineal múltiple. ....	52
1.7.13 Factor de Inflación de Varianza (FIV). ....	54
1.8 Marco conceptual .....	54
1.8.1 Realimentación sonora.....	54
1.8.2 Ruido de tráfico Rodado: .....	56
1.8.3 Caracterización de una fuente sonora. ....	57
1.9 Marco Normativo .....	58

1.9.1 Decreto 126 de (10 de mayo del 2020).....	58
1.9.2 Normativa ISO 15666- Evaluación de la molestia por ruido mediante encuestas sociales y socio-acústicas.....	58
1.10 Metodología.....	59
1.10.1 Metodología para la caracterización de fuentes sonoras.....	59
1.10.2 Desarrollo de aplicación que sincroniza velocidad y audio capturado. ....	64
1.10.3 Aplicación de pruebas subjetivas.....	64
1.10.4 Variables .....	65
Capítulo 2: Desarrollo de ingeniería.....	67
2.1 Caracterización del sonido al interior para vehículos eléctricos y a combustión pertenecientes al mismo segmento.....	67
2.1.1 Fuentes de sonido.....	68
2.1.2 Obtención de información acústica:.....	70
2.2 Aplicación que reproduce audio capturado al interior de un vehículo a combustión.....	86
2.2.1 Conexión vehículo con aplicación vía puerto serial.....	86
2.2.2 Diseño sonoro de la aplicación. ....	87
2.2.3 Diseño de la aplicación.....	88
Conexión Arduino Unreal Engine.....	88
Diseño visual de la aplicación.....	89
2.3 Aplicación de pruebas a conductores sobre realimentación sonora.....	89
2.3.1 Especificaciones de la encuesta.....	90

2.3.2 Preguntas Preliminares a la prueba. ....	90
2.3.3 Preguntas Posteriores a la prueba de manejo. ....	93
2.3.4 Pregunta comparativas. ....	95
2.3.5 Pregunta reflexiva ....	95
2.3.6 Preguntas relacionadas con la realimentación sonora. ....	97
Capítulo 3: Análisis de resultados. ....	101
3.1 Caracterización de vehículos eléctrico y de combustión. ....	101
3.1.1 Nivel continuo equivalente. ....	102
3.1.2 Sonoridad. ....	104
3.1.3 Nitidez. ....	107
3.1.4 Aspereza. ....	110
3.1.5 Tonalidad. ....	112
3.2 Análisis estadístico de pruebas subjetivas. ....	115
3.2.1 Análisis de realimentación sonora vehículo a combustión con sonido reproducido de motor eléctrico. ....	115
3.2.2 Análisis de realimentación sonora vehículo eléctrico con sonido de motor a combustión reproducido. ....	122
3.2.3 Análisis de diferencias de realimentación sonora obtenidas. ....	127
CONCLUSIONES .....	132
RECOMENDACIONES.....	134
REFERENCIAS .....	135

Anexo I. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono derecho en vehículo de combustión.....	142
Anexo II. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono izquierdo en vehículo de combustión.....	148
Anexo III. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono derecho en vehículo eléctrico.....	154
Anexo IV. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono izquierdo en vehículo eléctrico.....	160
Anexo V. Ficha técnica de equipos usados en la caracterización de vehículos y pruebas subjetivas.....	166
Anexo VI. Ficha técnica de vehículo a combustión y eléctrico.....	171

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Escalas verbales vs Escalas numéricas según la ISO15666.....	58
Tabla 2 Preguntas directas vs preguntas indirectas según la ISO15666. ....	59
Tabla 3. Aspectos técnicos micrófono Eartworks M30. ....	61
Tabla 4. Aspectos técnicos del preamplificador de la interfaz EVO 8. ....	61
Tabla 5. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática del Nivel Continuo equivalente para el vehículo a combustión.....	72
Tabla 6. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática del Nivel Continuo equivalente para el vehículo eléctrico. ....	73
Tabla 7. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la sonoridad para el vehículo a combustión. ....	75
Tabla 8. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la sonoridad para el vehículo eléctrico.....	76
Tabla 9. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la nitidez para el vehículo a combustión.....	78
Tabla 10. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la nitidez para el vehículo eléctrico.....	79
Tabla 11. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la aspereza para el vehículo a combustión. ....	81
Tabla 12. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la aspereza para el vehículo eléctrico.....	82
Tabla 13. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la tonalidad para el vehículo a combustión. ....	84
Tabla 14. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la tonalidad para el vehículo eléctrico.....	85

Tabla 15. Especificaciones de la encuesta (con base en la norma ISO 15666).....	90
Tabla 16. Parametros de estadística descriptiva de la semejanza del sonido de motor a combustión reproducido. ....	94
Tabla 17. Parametros de estadística descriptiva de la importancia de un sonido de motor para conductores. ....	97
Tabla 18. Realimentación sonora de motor a combustión en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo a combustión. ....	98
Tabla 19. Realimentación sonora de motor a combustión reproducido en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo eléctrico. ....	99
Tabla 20. Realimentación sonora del motor eléctrico reproducido en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo a combustión. ....	100
Tabla 21. Realimentación sonora del motor eléctrico en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas. ....	100
Tabla 22. Medidas de dispersión para variables medidas en el vehículo a combustión. ....	101
Tabla 23. Medidas de dispersión para variables medidas en el vehículo eléctrico.....	101
Tabla 24. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, del LeqA (dBA) tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a diferentes velocidades. ....	104
Tabla 25. Comparativa de la sonoridad en Sones del vehículo de combustión vs. el vehículo eléctrico, tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente, a distintas velocidades....	106
Tabla 26. Comparativa del vehículo de combustión vs. el vehículo eléctrico, de la nitidez en Acum tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades....	110
Tabla 27. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, de la nitidez en Asper tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades.....	112
Tabla 28. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, de la Tonalidad en tu, tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades.....	115
Tabla 29. Pruebas de normalidad de datos.....	116

Tabla 30. Realimentación obtenida vs realimentación calculada en lado izquierdo y lado derecho. .....	116
Tabla 31. Factor de inflación de varianza para las variables. ....	117
Tabla 32. Realimentación obtenida vs Realimentación calculada al lado derecho al lado izquierdo a distintas velocidades. ....	118
Tabla 33. Pruebas de normalidad para datos. ....	120
Tabla 34. Comparativa de realimentación obtenida y realimentación calculada. ....	120
Tabla 35. Factor de varianza para datos del vehículo eléctrico. ....	121
Tabla 36 Realimentación obtenida en las pruebas y realimentación calculada. ....	122
Tabla 37. Pruebas de normalidad de datos vehículo a combustión. ....	122
Tabla 38. Realimentación obtenida vs realimentación calculada en lado izquierdo y lado derecho. ....	123
Tabla 39. Factor de inflación de varianza para las variables. ....	124
Tabla 40 Pruebas de normalidad de datos vehículo eléctrico. ....	125
Tabla 41. Comparativa de realimentación obtenida y realimentación calculada. ....	126
Tabla 42 Factor de varianza para datos del vehículo eléctrico. ....	126
Tabla 43. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	127
Tabla 44. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	128
Tabla 45. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	128
Tabla 46. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	129
Tabla 47. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad del sonido del motor eléctrico reproducido y original. ....	129
Tabla 48. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	130

Tabla 49. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad del sonido del motor a combustión reproducido y original.....	130
Tabla 50. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad. ....	131
Tabla 51. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	142
Tabla 52. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	143
Tabla 53. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez (10) muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	143
Tabla 54. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	143
Tabla 55. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	144
Tabla 56. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	144
Tabla 57. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	145
Tabla 58. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	145
Tabla 59. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	146
Tabla 60. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	146
Tabla 61. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	147
Tabla 62. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión. ....	147

Tabla 63. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	148
Tabla 64. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	149
Tabla 65. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	149
Tabla 66. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	149
Tabla 67. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	150
Tabla 68. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	150
Tabla 69. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	151
Tabla 70. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	151
Tabla 71. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	152
Tabla 72. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	152
Tabla 73. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	153
Tabla 74. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión. ....	153
Tabla 75. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	154
Tabla 76. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	155

Tabla 77. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico. ....	155
Tabla 78. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	155
Tabla 79. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	156
Tabla 80. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	156
Tabla 81. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	157
Tabla 82. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	157
Tabla 83. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	158
Tabla 84. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	158
Tabla 85. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	159
Tabla 86. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.....	159
Tabla 87. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	160
Tabla 88. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	161
Tabla 89. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	161
Tabla 90. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	161

Tabla 91. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.....	162
Tabla 92. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	162
Tabla 93. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	163
Tabla 94. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	163
Tabla 95. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	164
Tabla 96. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	164
Tabla 97. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	165
Tabla 98. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico. ....	165
Tabla 99. Ficha técnica micrófono Earthworks M30.....	166
Tabla 100. Ficha técnica interfaz Audient Evo8.....	169
Tabla 101. Especificaciones técnicas audífonos Beyerdynamic DTX 910.....	170
Tabla 102. Ficha técnica vehículo a combustión Mazda CX7.....	172
Tabla 103. Ficha técnica vehículo eléctrico BYD e6.....	173

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. El conector OBDII (CSS Electronics, 2020). .....	46
Figura 2. Forma del envío de datos en el protocolo OBDII (CSS Electronics, 2020) .....	47
Figura 3. Ejemplo de curvas de distribución normal (Fuente: (Dagnino, 2014)) .....	52
Figura 4. Diagrama de la realimentación (fuente: (Jo, 2011)) .....	55
Figura 5. Resolución 0627 estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A) en el día y en la noche, por sectores [A, B, C, D] (Resolución 0627, 2006). .....	57
Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología a emplear. (Fuente: Propia). .....	60
Figura 7. Pista para la realización de la captura de audios (fuente: Google Maps). .....	62
Figura 8. Ilustración sobre el posicionamiento de los micrófonos para realizar la medición. ....	64
Figura 9. Diagrama de bloques fuente de sonido mecánico (Duran et al., 2014). .....	68
Figura 10. Diagrama de componentes internos del vehículo eléctrico, parte eléctrica y parte mecánica (Duran et al., 2014). .....	69
Figura 11. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión. (Fuente: Propia). .....	71
Figura 12. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia). .....	72
Figura 13 Sonoridad en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión. (Fuente: Propia). .....	74
Figura 14 Sonoridad en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia). ....	76
Figura 15 Nitidez en función de la variable de velocidad para vehículo de combustión. (Fuente: Propia). .....	77

Figura 16. Nitidez en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia). .....	79
Figura 17. Aspereza en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión. (Fuente: Propia). .....	80
Figura 18. Aspereza en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia). ....	81
Figura 19. Tonalidad en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión. (Fuente: Propia). .....	83
Figura 20. Tonalidad en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia). ...	85
Figura 21 Diagrama de flujo, obtención y envío de velocidad en tiempo real en el vehículo eléctrico a la aplicación. (Fuente: Propia) .....	86
Figura 22. Diagrama de conexión entre la salida OBDII y Arduino. (Fuente: Propia). .....	87
Figura 23. Diagrama de flujo FMOD Studio. (Fuente: Propia). .....	88
Figura 24 Interfaz gráfica de la aplicación que reproduce el sonido capturado al interior del vehículo. (Fuente: Propia).....	89
Figura 25 Histograma de experiencia de conductores en años, Eje Y frecuencia de respuestas, eje X intervalos de experiencia en años. (Fuente: Propia). .....	91
Figura 26. Diagrama de pastel, situaciones de importancia para conductores. (Fuente: Propia). .....	92
Figura 27. Escala verbal usada para preguntar acerca de semejanza del sonido. (Fuente: Propia). .....	93
Figura 28. Resultados, preferencia de conductor sobre realimentación sonora. (Fuente: Propia). .....	95
Figura 29. Escala verbal, importancia de sonido de motor en conductores. (Fuente: Propia). .....	96
Figura 30. Escala verbal para evaluar la realimentación sonora para el sonido del motor del vehículo. (Fuente: Propia).....	98
Figura 31. Escala verbal para evaluar la realimentación sonora del sonido reproducido. (Fuente: Propia). .....	99

Figura 32. Nivel continuo equivalente en función de la velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).....	102
Figura 33. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de eléctrico. (Fuente: Propia).....	103
Figura 34. Sonoridad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia). ....	105
Figura 35. Sonoridad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia). ....	105
Figura 36. Comparativa de nivel de presión sonora entre el motor base y las mejoras para la implementación del vehículo. Fuente: (Kudo, 2013).....	107
Figura 37. Nitidez en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia). ....	108
Figura 38. Nitidez en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia). ....	109
Figura 39. Aspereza en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia). ....	111
Figura 40. Aspereza en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia). ....	111
Figura 41. Tonalidad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia). ....	113
Figura 42. Tonalidad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia). ....	114
Figura 43. Gráfico de dispersión de los residuos estandarizados y pronosticados. (Fuente: Propia). ....	119
Figura 44. Patrón polar micrófono de medición Earthworks M30. (Fuente: Bproaudio).....	167
Figura 45. Respuesta en frecuencia micrófono de medición Earthworks M30. (Fuente: Bproaudio).....	167
Figura 46. Respuesta en frecuencia Beyerdynamic DTX 910 (Fuente: Personal Audio).....	170

## NOMENCLATURA

EV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo Eléctrico (Electric Vehicle).

CV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo de Combustión (Combustion Vehicle).

PHEV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo Híbrido Enchufable (Plug in Hybrid Electric Vehicle).

BEV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo Eléctrico de Batería (Battery Electric Vehicle).

FCEV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo Eléctrico Celular (Fuel Cell Electric Vehicle).

SQ: Iniciales en idioma inglés referente a Calidad Sonora (Sound Quality).

SPL: Nivel de presión sonora, en inglés Sound Pressure Level.

Tu: Unidad de Tonalidad.

Sones: Unidad de Sonoridad.

Asper: Unidades de aspereza.

Leq: Referente a Nivel continuo equivalente.

Km/h: Unidad de velocidad: Kilómetros por hora.

OBD: Iniciales en idioma inglés referente a Diagnostico A Bordo (On-Board Diagnostics).

CAN: Iniciales en idioma inglés referente a Área de Control de Red (Controller Area Network).

ECU: Iniciales en idioma inglés referente a Unidad de Control de Motor (Engine Controller Unit).

COM: Iniciales en idioma inglés referente a Puertos de comunicación (Communication Ports) para el sistema operativo Windows.

MCO: Método matemático de Mínimos Cuadrados Ordinarios.

SCR: En método de mínimos cuadrados, Suma de Residuos al Cuadrado.

SUV: Iniciales en idioma inglés referente a Vehículo Utilitario Deportivo (Sport Utility Vehicle).

RWTH: Referente a “Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen” Universidad pública en Alemania.

RPM: Revoluciones por minuto.

POE: Programación Orientada a Eventos.

RMCI: Realimentación Sonora Vehículo de Combustión en micrófono izquierdo.

RMCD: Realimentación Sonora Vehículo de Combustión en micrófono derecho.

RMEI: Realimentación Sonora Vehículo Eléctrico en micrófono izquierdo.

RMED: Realimentación Sonora Vehículo Eléctrico en micrófono derecho.

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, existe la necesidad de dar una solución de transporte que disminuya las emisiones de agentes contaminantes en el aire. En la actualidad existen diversas soluciones; sin embargo, el vehículo eléctrico se perfila como la solución hacia el futuro, debido a su funcionamiento, el cual, no requiere un proceso de explosión y escape propios del proceso de los vehículos tradicionales (los vehículos de combustión interna) dando como resultado una baja emisión de estos agentes contaminantes.

Colombia se encuentra en proceso de cambio, donde poco a poco se está dando paso a los vehículos eléctricos. Sin embargo, existe una costumbre que en ocasiones despierta todo tipo de atenciones, tales como: estado del vehículo, velocidad, e incluso, algún sentimiento asociado con *deportividad* dado por medio del sonido que generan los motores de combustión interna (Gahee Kwon, Hyeonho Jo, Yeon June Kang, 2018). Actualmente, Colombia está en un proceso de acercamiento a los vehículos eléctricos, en los cuales, claramente existe una diferencia con los vehículos tradicionales, la cual es la ausencia de sonido generado por el motor a combustión.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo pretende determinar, si ante la ausencia del sonido de un motor a combustión en un vehículo eléctrico existe y es importante la realimentación sonora y como esta puede afectar el manejo para el conductor; debido a esto, es necesario evaluar la importancia de la realimentación sonora al conductor durante el desplazamiento en un vehículo eléctrico con y sin sonido de combustión reproducido. Para esto se caracteriza de forma estadística el sonido al interior de dos vehículos, el Mazda CX7 (vehículo de combustión) y el BYD e6 (vehículo eléctrico) que pertenecen al mismo segmento para velocidades inferiores a 50 km/h puesto que este es el límite de velocidad en la ciudad de Bogotá. Lo anterior, para hallar los principales descriptores psicoacústicos (Nivel Continuo Equivalente, Sonoridad, Nitidez, Aspereza y Tonalidad) y cómo se relacionan con la velocidad del vehículo.

Posteriormente, se implementa una aplicación que reproduce el audio grabado de un vehículo de combustión al interior en el vehículo eléctrico sincronizado con velocidad, también reproduce el sonido del vehículo eléctrico en el vehículo a combustión con el fin de usar esta aplicación para aplicar una prueba de valoración tomando elementos de la ISO-15666 que permita la determinación de la importancia de la realimentación sonora en la conducción de un vehículo eléctrico por medio de la diferencia entre los valores de realimentación obtenidos. Además, por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios, se halla la relación de los principales descriptores psicoacústicos y la realimentación sonora, con el fin de encontrar la ecuación que describe la realimentación sonora en términos objetivos psicoacústicos.

Finalmente se encontró que, a diferentes velocidades, todas de forma constante, la realimentación sonora no es importante al encontrar que la diferencia entre la realimentación sonora que genera el vehículo eléctrico y de combustión tiene un porcentaje bajo, ya que la principal diferencia en el manejo es la constante aceleración y desaceleración a la hora de tener unas condiciones de manejo normales.

## **Capítulo 1: Generalidades.**

### **1.1 Antecedentes del problema:**

#### **1.1.1 El modelo de inconformidad del ruido al interior de los micro-vehículos comerciales basados en análisis de calidad sonora “Sound Quality” (Dou Li, Yu Huang, 2018)**

Es un artículo que habla de cómo ante la popularidad de los micro vehículos comerciales se crea la necesidad de desarrollar un modelo de ruido para la incomodidad para los vehículos micro comerciales teniendo en cuenta características acústicas del ruido interior, que son diferentes de los otros automóviles cuando circulan en varias condiciones de camino. Este estudio investigó la incomodidad producida por el ruido de 3 modelos de micro vehículos comerciales cuando con 4 tipos de condiciones de camino, asfalto, concreto, grava y malas condiciones. Se estudiaron setenta y cuatro estímulos de ruido con niveles de presión sonora que oscilaban entre 52 y 70 dB ponderación A con base en las muestras de ruido registradas para un experimento de evaluación subjetiva. Se sometieron a pruebas treinta personas para evaluar la incomodidad subjetiva de los estímulos de ruido utilizando el método de estimación de magnitud absoluta. Se analizó la relación entre las magnitudes subjetivas de incomodidad y algunos parámetros acústicos objetivos. Se obtuvo una ecuación con el método regresión lineal múltiple para predecir la incomodidad causada por el ruido de los micro-vehículos comerciales. Se aplicó el análisis de correlación parcial para determinar la contribución de cada parámetro psicoacústico a la incomodidad. Los resultados mostraron que el volumen y la nitidez fueron los factores influyentes de la incomodidad.

#### **1.1.2 Políticas de control de ruido urbano y vehículos eléctricos (Luigi Maffei, Massimiliano Masullo, 2014)**

En este artículo se realiza un control del confort acústico de nuevos vehículos, control del mercado de partes de reposición, y la inspección técnica periódica en el rendimiento acústico de vehículos en uso. La emisión de ruido de los vehículos es generada por la interacción de las llantas con la carretera, y el sistema de propulsión. Se ve como el ruido incrementa a medida que la velocidad incrementa. El ruido de las llantas con la carretera se incrementa más rápidamente que el ruido de propulsión y sobre los 50 Km/h es predominante en la emisión de ruido de los carros. La diferencia relevante entre los vehículos de combustión y los eléctricos está en las bajas velocidades. Se realizaron pruebas de realidad virtual con personas en un laboratorio, a velocidades de 30 Km/h, los choques cruzando la calle fueron más con los carros eléctricos que con los carros a combustión. En orden de reducir este problema, el gobierno de Japón, Estados Unidos y la Unión

Europea están promoviendo la adición de una alerta sonora que permita a los peatones y a los ciegos detectar estos vehículos.

### **1.1.3 Método de síntesis del sonido de un motor artificial para la modificación de las características acústicas de un vehículo eléctrico (Dongki Min, Buhm Park, Junhong Park)**

El artículo propone un método para generar artificialmente la reproducción de sonidos grabados de un motor de combustión de acuerdo con las revoluciones del motor. También se han usado sonidos de motor simulado de aviones, de trenes, se han usados sonidos simples en carros eléctricos para advertir a los peatones, también señales de barrido sinusoidal, sonidos de motores y orientado a futuro nuevos sonidos usando sonidos instrumentales. El método de síntesis tiene la ventaja de requerir poca memoria, pero tiene la desventaja de que está limitado a crear la variedad de sonidos en relación con la velocidad del vehículo. En este proyecto se desarrolla un generador sonoro del motor artificial basado en un algoritmo basado en muestreo. El método de integración numérica permite la construcción de un set de datos óptimo para la generación del sonido del motor. Para las mediciones de las características acústicas del sonido del motor se grabaron tanto el motor de gasolina como el de diésel, en donde el micrófono se puso a 1m del motor, los motores estaban equipados con 4 cilindros, el cuarto de máquinas tenía muros de vidrio y paneles porosos. Fueron mediciones de 10 segundos con velocidad del motor de 1000, 1500, 1800 y 2100 rpm, con condiciones ideales de 850 y de 820 rpm para los dos motores respectivamente. El sonido del motor diésel tiene mayor componente en altas frecuencias que el de gasolina. De las mediciones se pudo observar que: la frecuencia de resonancia del cárter y del bloque de cilindros están en el orden de los 200 a los 1000 Hz, el engranaje de sincronismo, están entre los 1kHz – 5kHz, los componentes de frecuencias se atenúan casi 10 dB después de los 1kHz para los motores de diésel, la contribución del ruido generado en el ancho de banda sobre los 1kHz es relativamente bajo comparado con el sonido mecánico de los componentes tonales. La región de baja frecuencia de los sonidos medidos fue enmascarada por el sonido mecánico. Los sonidos mecánicos y de combustión fueron separados con respecto a los 1KHz con base en estas características se desarrolló el algoritmo. Se usaron siete sonidos para el experimento, tres sintetizados y cuatro grabados, la velocidad fue incrementándose gradualmente, desde los 800 hasta las 3000 revoluciones por minuto, y descendiendo a condiciones ideales. Los sonidos fueron presentados a 23 participantes usando audífonos, a quienes se les pidió que evaluaran la *recognoscibilidad* del vehículo y la preferencia del sonido del motor.

### **1.1.4 Evaluación del ruido interior de un vehículo eléctrico centrada en la identificación de la fuente sonora y el análisis de la ruta de transferencia “Transfer path analysis”. (D. Fernández Comesana, M. Korbasiwicz. 2017)**

Se investiga un carro eléctrico en donde se usa PNCA para cuantificar el ruido y también el análisis de la ruta de transferencia, TPA por sus siglas en inglés (Transfer Path Analysis). El fin

de esta investigación es identificar y categorizar las fuentes sonoras dominantes percibidas desde la perspectiva del conductor del carro eléctrico. Dentro de los carros eléctricos se percibe un sonido de altas frecuencias el cual puede ser molesto para quienes van dentro del vehículo. El modelo de cuantificación tiene el propósito de determinar la influencia de excitaciones sobre un punto de referencia en el campo sonoro. En este artículo la PNCA utiliza una TPA basado en medidas de presión sonora y velocidades de partícula. Esta investigación se enfoca en el ruido de zumbido percibido en un carro eléctrico cuando se maneja a una velocidad constante. Para el método se requieren dos pasos de medición: primero la adquisición de excitación acústica se hace en condiciones operacionales mientras se captura en una sección del carro, segundo se introduce una fuente monopolo en la locación de referencia mientras que el vehículo se encuentra quieto. Se hicieron las mediciones en un Renault Zoe a una velocidad constante de 40Km/h. en donde se pusieron 11 probadores de intensidad en la cabina del carro y se reposicionan 16 veces, en total quedaron 176 puntos de medida. Se hizo una posición de micrófono en la silla del conductor y al adquirir los datos con el método PNCA se provee una información detallada sobre no solo la valoración de la estructura vibrante sino también del ambiente acústico, el enfoque está en el espectro sobre los 970 Hz que es la que causa molestia en un carro eléctrico.

#### **1.1.5 El sonido del silencio de los vehículos eléctricos – Problemas y respuestas. (Nicolas Misdariis, Louis-Ferdinand, 2017)**

La percepción de vehículos eléctricos depende de la velocidad, el ruido de propulsión, el contacto de las llantas con el tipo de suelo y los ruidos aerodinámicos o friccionales. Se encontró que a menos de 10 Km/h un carro eléctrico es difícil de detectar incluso si está a 5 metros como no pasa con un carro normal donde puede ser detectado hasta a 50 metros. En las zonas donde solo se puede andar a menos de 20Km/h y el ruido de fondo puede llegar a los 55 dB(A) se enmascara el sonido del carro eléctrico. Para solucionar este problema se puede ir por dos enfoques, el primero sería mirando al conductor, que tenga la habilidad de hacerse ver y sentir en la carretera, y el otro enfocado en los peatones para que puedan percibir el vehículo y puedan tomar las mejores decisiones. Si se centra en el conductor una solución sería entrenar a los conductores antes de que se suban y que sepan controlar todos los peligros que tiene manejar estos vehículos a bajas velocidades, hasta se podría adoptar una licencia para este tipo de vehículos. Otras opciones son los dispositivos de alerta urbanos y los sistemas de asistencia al conductor “Driver assistance” en su término en inglés. Si se centra en los peatones hay soluciones corporativas distributivas y también se puede adicionar sonidos a los vehículos. Según las regulaciones UN-ECE R138, FMVSS 141 donde hablan de bandas de frecuencia donde hay habilidad de detección. Para los métodos de medición se basa en la ISO 16254 donde describe el protocolo para medir el nivel sonoro mínimo en 1/3 octava y la variación sonora de acuerdo con la frecuencia, y para el método prueba del nivel de ruido se mide sobre una pista según la ISO 10844. Los micrófonos están a una altura de 1.2m del nivel del suelo. Para los carros eléctricos se mide en una cámara semi-anecoica.

### **1.1.6 Prominencia de los tonos en el ruido interior de los vehículos eléctricos (David Lennström, Thomas Lindbom, Arne Nykänen. 2018)**

Aquí se presenta un estudio de la relación entre la métrica psicoacústica PR (Prominence Ratio), el umbral de tonos detectados y también de molestias percibidas para velocidad y aceleración constantes en un carro eléctrico. Según las pruebas de escucha las molestias percibidas fueron sobre los 5KHz comparadas con frecuencias menores a 800 Hz. En este proyecto se investiga en cual nivel de PR los tonos de los motores eléctricos podrían ser detectados y también molestos relacionado al PR para distintas frecuencias. La teoría PR, es una métrica psicoacústica que tiene el fin de evaluar y detectar los tonos importantes en la emisión de ruido. Se define entre 89.1 Hz y 11220 Hz. Los anchos de banda son similares a los de 1/3 de octava, pero con la diferencia que no tienen límites de frecuencias fijadas, se usó un carro Volvo C30 PEV, una cabeza binaural en el asiento del copiloto, la frecuencia de muestreo fue 44.1kHz. Las mediciones se hicieron a velocidades constantes como 50 y 80Km/h, y de 0-100 Km/h en asfalto plano. Se fue variando la magnitud de los tonos del *e-motor*, luego se fue filtrando. En total 27 personas sin experiencia en sonido, de edad promedio de 33 años participaron. Se elaboró en un estudio, cada persona con audífonos. A medida que aparecían tonos la persona los califica como placenteros o molestos con números del 0 al 10. Por medio de la regresión logística binaria se derivó la detección de tonos diferentes niveles de PR para distintos órdenes de motor. Finalmente se reveló que para frecuencias mayores a 800 Hz era más difícil detectar y comparar frecuencias sobre los 2.5KHz. Se agruparon los sonidos en tres categorías para distintos niveles de PR: Bajo, medio y alto. Se pudo concluir que las frecuencias molestas están entre los 2.5KHz y los 5KHz. Finalmente, el estudio se limita porque solo se usó un tono puro y no un tono complejo.

### **1.1.7 Las dimensiones subjetivas de la calidad sonora “Sound Quality” de los vehículos eléctricos de producción estándar (Dj Swart, A. Bekker, J.Bienert, 2017)**

Se habla sobre cómo la percepción dentro del vehículo que tiene el público es insatisfactoria ya que es un sonido muy suave. Se plantea la pregunta sobre si ¿Puede el sonido del motor eléctrico ser modificado de tal manera que no solo satisfaga las legislaciones, sino que además ayude a mejorar la percepción del cliente? Se estudian los efectos de varios modificadores de sonido por medio de pruebas prueba en orden de evaluar la influencia en la satisfacción. Los resultados que tuvieron una mejora en el sonido fueron preferidos sobre la producción standard de sonidos de vehículos eléctricos. A continuación, se concluye que las cualidades sonoras de un vehículo eléctrico son muy complejas. El ruido del tren motriz de dos carros eléctricos estándar se evaluó subjetivamente y se compararon las tres mejoras. Finalmente, se concluye que los sonidos mejorados de los carros eléctricos se preferían mucho más que los sonidos de producción estándar en términos de satisfacción.

### **1.1.8 Evaluación de la calidad sonora “Sound Quality” del ruido al interior de un vehículo eléctrico puro, basada en el modelo de red neuronal. (Conggan Ma, Chaoyi Chen, Qinghe Liu, Haibo Gao, Qing Li, Hang Gao, Yue Shen, 2017)**

Se presenta un método para la evaluación cuantitativa de la calidad del sonido del ruido interior de un vehículo eléctrico puro por medio de *Deep Learning*. El método se divide en cuatro pasos. Primero, los ruidos interiores a diferentes velocidades de un carro eléctrico se recogen a través de la prueba de ruido interior del mismo. Segundo, se aplica nivel de presión de sonido ponderado A y tomando seis parámetros acústicos (sonoridad, fuerza de fluctuación, tonalidad, rugosidad, índice de articulación y nitidez) para describir las muestras de ruido para la evaluación objetiva de calidad sonora. En el tercer paso, se proponen cinco índices de evaluación semántica, a saber, "molesto o agradable", "áspero o dulce", "débil o potente", "promiscuo y puro" y "no observable o perceptible". Finalmente, se establece el modelo de red neuronal para la evaluación del ruido interior del vehículo, se evalúan las características de calidad sonora del ruido interior del carro y se revela el peso coeficiente de los factores que influyen.

### **1.1.9 Modelo de deportividad psicoacústica para el sonido al interior de un vehículo: Excluyendo la sonoridad “Loudness”. (Gahee Kwon, Hyeonho Jo, Yeon June Kang, 2018)**

Se habla sobre cómo la investigación sobre la mejora de la calidad del sonido interior del vehículo se puede aplicar al diseño del sonido interior del vehículo para lograr la imagen deseada. Sin embargo, para apuntar a la imagen deseada, la evaluación subjetiva de la calidad del sonido debe correlacionarse con los valores objetivos porque solo se pueden usar datos cuantitativos y medibles para el control del sonido interior del vehículo. En este estudio, se desarrolló un modelo de deportividad psicoacústica para el sonido interior del vehículo con el objetivo de enfocar la imagen "deportiva" de los vehículos. Los valores de sonoridad de todos los estímulos se ajustaron al mismo valor para excluir el impacto de la sonoridad en la deportividad. Con el fin de lograr evaluaciones subjetivas de la deportividad, se realizó una prueba del jurado, y la deportividad se cuantificó mediante análisis de regresión. Por lo tanto, el modelo de deportividad psicoacústica se determinó en función de la aspereza, la nitidez y la tonalidad. Al final se sugirió que el modelo deportivo propuesto en este documento es confiable y puede aplicarse prácticamente porque se excluyó el efecto de volumen.

### **1.1.10 Análisis psicoacústico de los sonidos provenientes de las ventanas eléctricas: Correlación entre evaluaciones subjetivas y objetivas. (Gaia Vollandri, Francesca Di Puccio, Paola Forte, Lorenza Mattei, 2018)**

En el presente estudio, la calidad del sonido de las ventanas eléctricas se investigó mediante análisis subjetivos y objetivos de sonidos grabados experimentalmente. En particular, se desarrolló

y presentó una prueba de jurado basada en técnicas de Estimación de Magnitud de Atributos Verbales y Comparación por Pares. La combinación de los dos métodos es un aspecto novedoso con respecto a la literatura y resultó en un medio útil y más simple para obtener juicios subjetivos coherentes. Para cuantificar la calidad del sonido de la ventana de potencia, se obtuvieron parámetros objetivos aplicando métricas acústicas y psicoacústicas, lo que resultó bien correlacionado con las evaluaciones subjetivas correspondientes. Además, se realizaron análisis de correlación entre juicios subjetivos generales (es decir, independientes) sobre la calidad del sonido y parámetros subjetivos dependientes u objetivos. Los análisis de regresión se aplicaron para desarrollar modelos de calidad percibida de componentes, poder y molestias. Se descubrió que las cantidades subjetivas y objetivas relacionadas con las características de volumen, nitidez y estabilidad del motor eléctrico eran prominentes en la evaluación de la calidad del sonido.

#### **1.1.11 Predicción de las evaluaciones de molestia del ruido de los vehículos eléctricos mediante el uso de redes neuronales artificiales. (Lisa Steinbach, M. Ercan Altinsoy, 2018)**

El objetivo de este trabajo es determinar la molestia de los diferentes sonidos de vehículos eléctricos para una situación de velocidad constante y un solo automóvil. Para este propósito, las diferencias en molestia se investigan con estudios de percepción. En este estudio también se investiga la correlación entre los parámetros físico-psicoacústicos y las estimaciones de molestias obtenidas de las pruebas del jurado. Además, una red neuronal artificial que se utiliza como herramienta de predicción de estimaciones molestas para evaluaciones posteriores de diferentes estímulos posibles. En general, se realizaron un total de 150 modelos con diferentes capas ocultas en esta investigación. Los modelos de mejor rendimiento se compararon con los modelos de regresión lineal basados en parámetros psicoacústicos.

### **1.2 Planteamiento del problema.**

El mundo automotriz avanza para entregar soluciones para la movilidad, entonces existen varias formas de movilidad como son los vehículos, que se clasifican según su tren de potencia, entre esos, están los *vehículos a combustión interna*, los cuales, funcionan por un proceso físico y químico para generar movimiento que se transmite hacia las ruedas (Duran et al., 2014). Este proceso químico y físico da lugar a la fase explosión la cual es la principal fuente de sonido en estos vehículos.

También se encuentran los *vehículos eléctricos*, que funcionan con una unidad de generación que básicamente es un convertidor de energía eléctrica a energía cinética y viceversa, la principal ventaja es su poca complejidad y alta eficiencia comparado con el motor a combustión que funcionan con combustibles de origen fósil. La principal diferencia es que acá no hay una explosión que da como lugar un sonido característico

como el de los vehículos a combustión. Por último, se encuentran los *vehículos híbridos* que como su nombre lo indica es una combinación de ambos tipos de motor.

Hoy en día, el parque automotriz eléctrico está en constante crecimiento, nacional e internacionalmente, debido a la necesidad de reducir los índices de polución causada por los vehículos de combustión y la disminución de niveles de ruido debido al tráfico urbano. En solo Colombia la venta de carros eléctricos aumentó 91.8% durante el año 2020 (Uribe, 2020).

La ausencia de sonido producido por un motor de combustión cambia por completo la percepción que se tiene alrededor de los automóviles tradicionales puesto que los vehículos eléctricos al no haber presencia de este tipo de sonido, se vuelven difíciles de percibir, lo cual genera riesgo para los peatones y ciclistas (Nicolas Misdariis, 2017). Por este motivo ya se han creado normativas y legislaciones internacionales para su seguridad como la NHTSA-2011-0100 del gobierno de Estados Unidos que reglamenta un mínimo requerido de emisión de ruido para vehículos eléctricos e híbridos.

Sin embargo, al interior de un vehículo, cambia las condiciones iniciales puesto que existen tres tipos de fuentes que inciden, las cuales son la fuente de sonido mecánica, cuyo principal protagonista es el motor en el caso del vehículo a combustión, sin embargo, existen otros agente como la suspensión, la transmisión, el sistema de escape, entre otros (Duran et al., 2014); en el caso del vehículo eléctrico, el motor eléctrico y la suspensión son los principales protagonistas. Otras de las fuentes que son comunes en ambos vehículos son las fuentes producidas por la fricción entre el viento y el chasis del vehículo y la fuente de sonido que genera la interacción llanta pavimento.

Con todo esto, es interesante como en el ámbito local aún no se han encontrado estudios o legislaciones acerca del sonido al *interior* de los vehículos eléctricos y sobre todo cómo este puede cambiar la percepción de los conductores con respecto al vehículo teniendo en cuenta la presencia del componente en alta frecuencia que existe en los vehículos eléctricos, que se genera a partir de 50 Km/h, (Bargende, Reuss y Wiedemann, 2018, p.422).

La realimentación sonora de manera general se puede definir como la cantidad de información que se puede sacar del sonido del vehículo al interior. Por lo anterior, es importante conocer cual es el nivel de realimentación sonora primeramente controlando la velocidad, ya que, esto puede tener diferentes implicaciones como en el ámbito de la seguridad, además, la realimentación sonora puede dar un indicio de la velocidad a la que el conductor está manejando, esto es importante para evitar accidentes en la vía. También es importante saber de qué depende esta realimentación sonora y cómo se puede relacionar con algunos de los parámetros psicoacústicos más usados tales como Sonoridad, Nitidez Aspereza y Tonalidad a fin de entender a nivel general como inciden las fuentes mencionadas al interior.

¿Cómo la ausencia del sonido generado por un vehículo de combustión al interior de un vehículo eléctrico altera el manejo del conductor en términos de realimentación sonora?

### **1.3 Justificación y pregunta problema.**

La investigación que cubre el presente trabajo es un precursor que abre otra línea investigación en el contexto académico local, al no haber una mirada importante a estudios dirigidos hacia el interior de vehículos eléctricos. Teniendo en cuenta el crecimiento de este sector automotriz, este trabajo apunta al futuro del planeta y las condiciones con las que muchas personas harán esta psicoacústica y al desarrollo de sistemas basados en programación para complementar posibles estudios futuros. Este trabajo también sirve como una plataforma para estudios de diversas metodologías y al desarrollo de nuevas ideas y planteamientos sobre cuáles deben ser las condiciones acústicas ideales por las que los conductores se deben someterse a la transición del vehículo de combustión al vehículo eléctrico.

No solamente el área de la acústica se ve beneficiada, también este trabajo pretende abrir a nuevas investigaciones sobre caracterizaciones de fuentes, formas nuevas de captura de estas fuentes; transmisiones de datos y desarrollo de software para diversas aplicaciones; estudio de materiales para el control de ruido y su relación con la realimentación; estudios sobre Sound Quality. Incluso, puede ser un área multidisciplinar en donde ingenieros mecánicos pueden estudiar la disposición de motores y su reacción en cuánto al sonido al interior para los conductores, por lo que este trabajo es un inicio a un campo que tiene aún mucho por estudiar.

Según lo descrito en la introducción y planteamiento del problema, el parque automotor colombiano está creciendo. Organizaciones tales como, la organización Colombiana De Vehículos Automotores “ANDEMOS”, la ANDI y FENALCO, expresan en su informe de enero del 2021 que el crecimiento del parque automotriz es del 77,7% con respecto al año pasado (FENALCO, 2021). Entendiendo lo rápido que crece el campo automotriz junto con los retos suponen la transición de un vehículo diferente al vehículo tradicional se propone entonces la siguiente pregunta problema:

¿Cómo la ausencia del sonido generado por un vehículo de combustión al interior de un vehículo eléctrico altera el manejo del conductor en términos de realimentación sonora?

## **1.4 Objetivo General**

Evaluar la importancia de la realimentación sonora al conductor durante el desplazamiento en un vehículo eléctrico con y sin sonido de combustión reproducido.

## **1.5 Objetivos específicos**

- Caracterizar el sonido de dos vehículos, uno eléctrico y otro de combustión interna, al interior de estos, que pertenezcan al mismo segmento para velocidades inferiores a 50 km/h.
- Implementar una aplicación que reproduce el audio grabado de un vehículo de combustión al interior en el vehículo eléctrico sincronizado con velocidad.
- Aplicar una prueba de valoración que permita la determinación de la importancia de la realimentación sonora en la conducción de un vehículo eléctrico.

## **1.6 Alcances y Limitaciones.**

### **1.6.1 Alcances**

- Evaluación subjetiva para saber la pertinencia del ruido del motor a combustión al interior de la cabina.
- Identificar la importancia de ruido de motor al interior de un vehículo y como la realimentación influye en el conductor.

### **1.6.2 Limitaciones**

- Solo se va a usar el audio de un vehículo de combustión, y uno solo eléctrico para la reproducción.
- Cantidad de conductores permiten realizar valoración, no una validación.
- Únicamente se realiza en la ciudad de Bogotá.
- No se tiene en cuenta el componente de vibraciones.
- Únicamente se reproduce el sonido al interior.
- Solo se evalúa una única cualidad subjetiva (Realimentación sonora).

## **1.7 Marco Conceptual**

### **1.7.1 Vehículo eléctrico**

El vehículo eléctrico fue desarrollado por primera vez en el año de 1832 por el británico Robert Anderson, pero hasta después de 1870 se volvieron prácticos. El primer auto eléctrico con

éxito elaborado en los Estados Unidos lo fabricó William Morrison en el año de 1890, el cual contaba con una velocidad de 14 millas por hora, haciendo que desde ese momento se empezara a generar un interés por esta clase de autos (Matulka, 2014). Una definición más completa dice que:

“Un vehículo eléctrico es un vehículo de combustible alternativo impulsado por uno o más motores eléctricos. La tracción puede ser proporcionada por ruedas o hélices impulsadas por motores rotativos, o en otros casos utiliza otro tipo de motores no rotativos, como los motores lineales.” (*El Vehículo Eléctrico*, [Electromovilidad], 2018).

Actualmente, existen varias clases de vehículos eléctricos, tales como enchufables eléctricos, o enchufables híbridos, los cuales tienen un motor a combustión acompañados de un motor eléctrico y estos pueden ser enchufables o no, depende de su desarrollo.

Complementando lo visto, la diferencia entre vehículos eléctricos y de combustión interna es que el motor eléctrico funciona como un generador eléctrico el cual recarga una batería, la cual al mismo tiempo alimenta el motor que se encarga de mover las ruedas. Existe otros tipos de vehículo eléctrico cuyo funcionamiento también proviene de agentes químicos como los FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) conocidos en español como Vehículos Movidos por Hidrógeno, su característica principal es que la energía que utilizan sus motores eléctricos no proviene de una batería sino de una reacción química que se produce en el interior de su pila de combustible, la cual se alimenta de hidrógeno: este se oxida perdiendo electrones que se capturan para generar la corriente eléctrica que mueve el motor eléctrico.

La tendencia actual hacia la utilización de vehículos eléctricos radica en la concienciación de los problemas del cambio climático, en parte por las emisiones de  $CO_2$  y otros gases contaminantes generados por los vehículos de combustión cuyo combustible proviene de fuentes no renovables, las cuales (las reservas de hidrocarburos) se encuentran en su última etapa de vida en todo el mundo. Los coches eléctricos ya son una realidad palpable y las grandes marcas se esfuerzan en producir nuevos modelos e incrementar sus prestaciones (Ecogestos, s. f.). Según (*El Vehículo Eléctrico*, 2018) las ventajas que tienen este tipo de vehículos es que se reduce la contaminación, permiten un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos, reducen la dependencia de combustibles de origen fósil y reducen la contaminación acústica. Por ende, estos representan una gran oportunidad para mejorar la creciente problemática de la movilidad urbana, cumplir con los objetivos de sostenibilidad que marcan las directrices europeas.

### **1.7.2 Vehículo de combustión interna**

Es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma, diferente a la combustión de por ejemplo

una máquina de vapor. Los principales tipos, según (Connor, 2020) son: Alternativos como el motor de explosión ciclo Otto (ciclo termodinámico aplicado en los motores de combustión interna de encendido provocado), el cual es el motor convencional de gasolina y el motor Diesel, la turbina de gas y el motor rotatorio. En el tipo alternativo pueden clasificarse según el tipo como: De dos tiempos (2T) y de cuatro tiempos (4T) (Giacosa, 1979). Hoy en día casi todos los autos se mueven por una versión del motor de combustión interna de cuatro tiempos patentado en 1876 por Nikolaus Otto (Moyer, 2012). Según Giacosa (1979), estos motores contienen los mismos elementos principales tales como: Bloque, cigüeñal, biela, pistón, culata, válvulas y el carburador. Además, poseen una cámara de combustión la cual es un cilindro fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón modificando el volumen existente entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por una biela al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón. Según Moyer (2012), en el momento hay personas quienes piensan que este ingenio es un anacronismo, un vestigio anticuado de un mundo que suponía que el petróleo era inagotable y el clima era estable. En la noticia del Parlamento Europeo (2019):

“las emisiones de  $CO_2$  han generado una desventaja en este tipo de autos, tanto que en Europa el transporte es responsable de más del 30 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono. Los coches son el principal contaminante con un 60,7% del total de las emisiones del transporte en carretera de Europa”.

Tanto así, que en Francia se aprobó la “ley de moviidades” en donde se prohíbe vender vehículos nuevos con motores de combustión interna (Hernández, 2019). En países como Colombia, en la ciudad de Medellín el 80 por ciento de la contaminación proviene de la movilidad con 1’400.000 automotores (López, 2018). En ciudades como Bogotá los vehículos de combustión con motor de Diésel contribuyen con un 90 por ciento de las emisiones del material particulado y los vehículos de gasolina contribuyen con un 50 por ciento de las emisiones de monóxidos de carbono y 40 por ciento de óxidos de nitrógeno (Rojas, Universidad Nacional de Colombia). Estas circunstancias han conllevado a bajar la popularidad de este tipo de vehículos dejando un nuevo paso a los vehículos eléctricos.

### **1.7.3 Calidad Sonora “Sound Quality” aplicado a la industria automovilística**

Los parámetros de calidad sonora vienen ligados a la rama de estudio de la psicoacústica, esto tiene varias aplicaciones en campos de investigación académicos o comerciales, entre estas aplicaciones, se puede obtener nivel de agrado o desagrado que un sonido puede tener para una persona al estar expuesta a un determinado sonido.

“Sobre los años recientes se han mejorado los modelos objetivos para la *calidad sonora*<sup>1</sup>, también conocido como (SQ), por su término en inglés, a tal punto que son muy útiles para mediciones estandarizadas... Los modelos (SQ) pueden predecir la calidad sonora correctamente para señales y degradaciones que no fueron utilizadas durante el desarrollo y entrenamiento de los distintos modelos” (Bramsløw, 2010, p.1).

Según los expertos de la industria automovilística los parámetros SQ más relevantes para predecir la comodidad de los sonidos generados por motores se seleccionan de un grupo de 9 parámetros divididos en grupos de 2. En el primer grupo los SPL en ponderación A (*A-weighted Sound Pressure Level*), los SPL ponderado B (*B-weighted Sound Pressure Level*) por sus siglas en inglés y la percepción humana del sonido (*Modelo de sonoridad de Zwicker*), se correlacionan con el nivel de presión sonora. El segundo y último grupo consiste en la Nitidez y la Rugosidad (*Roughness*).

Para realizar evaluaciones se habla de escalas unipolares de cinco grados las cuales deben usarse para la evaluación subjetiva de *calidad sonora*, de escalas CQS (*The Continuous Quality Scale*) recomendada por normas para la evaluación de calidad sonora que existen como las ITU-R BS.1534 (ITU-R BS.1534-3, 2015) e ITU-R BT.500 (ITU-R BT.500-14, 2019), y de los procedimientos a seguir en este tipo de pruebas (ITU-R BS.1284-2, 2019). Blauert y Jekosch (2012), dicen que “la evaluación y valoración de SQ abarcan procesos en donde los conceptos están inherentemente implicados... Se han identificado cuatro capas de calidad diferentes tales como lo son: Calidad auditiva y la calidad acústica, cada una con sus propios métodos de medición...” (p.5).

#### **1.7.4 Parámetros psicoacústicos objetivos.**

##### ***Sonoridad***

Ya que las personas no escuchan de una manera lineal, debido a la complejidad del sistema auditivo humano, es muy difícil describir completamente la percepción auditiva utilizando

---

<sup>1</sup> Calidad Sonora, lo que en inglés es *Sound Quality*, o también SQ para reducir el término.

únicamente el SPL ponderado A. Es por esta razón, que nace la *Sonoridad*<sup>2</sup>. Según la ISO 532-1, 2017, la *Sonoridad* y el *nivel de sonoridad* son dos atributos perceptuales del sonido, los cuales pueden describir la percepción de la fuerza sonora dentro de condiciones de escucha específicas.

“Se describe el *nivel de sonoridad* como el nivel de presión sonora de una onda progresiva plana sinusoidal de incidencia frontal, presentada en la frecuencia de 1000 Hz que es juzgado por personas otológicamente normales acerca de qué tan fuerte perceptualmente se percibe dicho sonido...este se expresa en fonios<sup>3</sup> ... Mientras que la *sonoridad* es la magnitud percibida de un sonido, el cual depende de propiedades sonoras acústicas y de las condiciones de escucha específicas de personas otológicamente normales; esta se expresa en *sonios*<sup>3</sup>, siendo un *sonio* la *sonoridad* de un sonido con un *nivel de sonoridad* de 40 fonios<sup>4</sup>” (ISO 532-1, 2017).

La relación entonces entre el *Sonio*  $S$  y el *Fonio*  $P$  se da con la siguiente expresión (Bies y Hansen, 2009):

$$S = 2^{(P-40)/10} \quad (1)$$

La *sonoridad* no depende únicamente del SPL, sino también de la frecuencia, la forma de onda, el ancho de banda y la duración del sonido. Un sonido que se percibe como el doble de fuerte que otro sonido se caracteriza por duplicar el número de *sonios* (ISO 532-1, 2017). De manera general se define la sonoridad como:

---

<sup>2</sup> Sonoridad, parámetro subjetivo que en inglés es “*Loudness*”.

<sup>3</sup> Sonios, que en inglés se conoce como “*Sones*”

<sup>4</sup> Fonios, que en inglés se conoce como “*Phons*”. Corresponde al nivel SPL de un tono de 1kHz igualmente sonoro. En cada caso, la escala del fonio se escoge de modo que el número de fonios sea igual al nivel SPL del tono de referencia a 1kHz. (Bies y Hansen, 2009)

$$N' = 0.08 \left(\frac{E_{rQ}}{E_0}\right)^{0.23} \left[ \left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{rQ}}\right)^{0.23} - 1 \right] \quad (2)$$

Siendo la variable  $N'$  es la *sonoridad específica*,  $E_{rQ}$  la excitación sonora bajo condiciones tranquilas y  $E_0$  Es la excitación del sonido de referencia.

La *sonoridad* total se calcula por la sumatoria de las *sonoridades específicas* (Gahee et al., 2018, p.19). Lo anterior se observa en la siguiente ecuación:

$$N = \int_0^{24} N' dz. \quad (3)$$

En donde  $N$  es la *sonoridad total* y  $z$  es la tasa de banda crítica.

### ***Tonalidad***

Este parámetro mide, en unidades de  $tu$ , la proporción de tonos puros en un sonido determinado. Según Burkhard y Genuit (1992):

“La *tonalidad*<sup>5</sup> es una medida del “tono puro” contenido en el sonido. Se debe usar la *tonalidad* para distinguir un sonido de un ruido... Si se usa el procedimiento expuesto por Terhardt (1982), el espectro se escanea de los niveles máximos locales ( $L_i$ ).

$$L_{i-1} < L_i < L_{i+1} \quad (4)$$

Se dice que un componente tonal debe satisfacer que:

$$L_i - L_{i+j} \geq 7dB; \quad j = -3, -2, +2, +3. \quad (5)$$

---

<sup>5</sup> Tonalidad, parámetro subjetivo que en inglés se conoce como “*Tonality*”

Los 7 componentes que satisfacen ese criterio se restan para poder obtener el espectro del ruido subyacente. Los valores relativos del espectro tonal es la medida de la *tonalidad*. (K).

$$K = C W_T^{0.29} W_{GR}^{0.79}, \quad (6)$$

En donde  $W_T$ , es una función de ponderación para el ruido, componentes de banda estrecha y componentes tonales ausentes.  $W_{GR}$ , es la función de ponderación para el ruido y componentes tonales removidos. Finalmente, C es una constante de tonalidad escogida =1 para ondas sinusoidales de 1 kHz a un nivel de 60dB SPL” (p.108 -110).

Hay varios métodos para calcular la tonalidad, y el algoritmo se va mejorando constantemente incluyendo mejoras en bajas frecuencias e identificando los componentes tonales en una resolución frecuencial más alta, como es el caso del algoritmo descrito en el estándar ECMA-74 (2019). La *tonalidad* es una característica que puede incrementar el impacto adverso de una fuente de ruido dada, y la evaluación de tonalidad es un método objetivo para valorar la incomodidad del ruido (Liu et al., 2012, p.711).

Los ruidos pueden ser considerados como tonales si frecuencias simples o bandas estrechas del espectro frecuencial son dominantes en comparación con el nivel de fondo. Señales de ruido con un nivel de ruido de fondo alto tienen baja *tonalidad* en comparación con ruidos de tono (Geradts et al., 2019).

En resumen, la *tonalidad* mide la proporción de tonos puros en el espectro sonoro. Los análisis de *tonalidad* se usan para determinar los componentes tonales de un ruido, y para determinar el ajuste tonal para un área de evaluación de ruido. De acuerdo con DIN 45681, existen cuatro métodos principales para analizar la *tonalidad*, los cuales son: Tone-to-Noise Ratio y Prominence Ratio (ANSI S1.13-2005); “Análisis de banda de 1/3 de octava (ISO, 1996-2), y Aures' and Terhardt' Tonalness metric” (Francis, 2014, p.8). La unidad de Tonality según Aures (1985) es el Tu, en donde 1 tu se define como 1 tono sinusoidal de 1kHz a 60dB SPL (Park, et al., 2019), tal como se vio anteriormente con la constante C.

***Nitidez:***

La *nitidez*<sup>6</sup> indica la proporción del componente de alta frecuencia en la banda de frecuencia sonora y refleja el grado de dureza de la señal sonora (Conggan et al, 2017). Por otra parte, la *nitidez* se muestra como la medida de lo que se conoce como el timbre sonoro de un determinado sonido y es lo que distingue a una fuente de otra (Burkhard, 1992).

Otros autores tales como Gahee et al., (2018), aseguran que:

“Los parámetros que tienen mayor influencia en la *nitidez* son los componentes espectrales y las frecuencias centrales de los sonidos de banda estrecha... La unidad de la *nitidez* es el acum, y 1 acum es la *nitidez* de un ruido de banda estrecha de 1kHz a 60dB SPL con un ancho de banda menor a 150Hz... El modelo para calcular la *nitidez* se define como:

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N' z g(z) z dz}{\int_0^{24} N' z dz} \quad (7)$$

En donde  $N'$  es loudness específico en Sones,  $S$  es la *nitidez* y  $g(z)$  es el factor que depende de la tasa de banda crítica” (p.19).

La *nitidez* es un valor de sensación ocasionado por los componentes en alta frecuencia de un ruido dado. Este es un parámetro psicoacústico importante debido a su influencia en el nivel de desagrado de los sonidos (Segura et al., 2012)

***Aspereza:***

Burkhard y Genuit (1992) afirman que “los tonos de amplitud o de frecuencia modulada producen una distintiva sensación. Las fluctuaciones envolventes con frecuencias entre los 20 y los 300Hz son percibidas como una alteración del tono o del timbre, el cuál suena áspero” (p.108). Para otros autores:

---

<sup>6</sup> Nitidez, parámetro subjetivo que en inglés se conoce como “Sharpness”.

“La *aspereza*<sup>7</sup> se da cuando se generan cambios rápidos en la amplitud o en la fase debido a las frecuencias de modulación entre 15Hz a 300 Hz. La unidad en que se mide la *aspereza* es el *Asper*. Un *Asper* se define cuando un tono de 1kHz y de 60 dB SPL está en una modulación de amplitud del 100% a la frecuencia de modulación de 70Hz...Este parámetro se relaciona con la molestia y la potencia del sonido al interior del vehículo” (Gahee et al., 2018, p.19).

Con una *aspereza* mayor, los sonidos se perciben como más perceptibles, agresivos y molestos, incluso si el nivel de *sonoridad* permanece constante (Segura et al., 2012). “La *aspereza*  $R$  se relaciona con el grado de modulación  $m$  por la ley de potencia:

$$R = mP \quad (8)$$

En donde  $1.5 \leq P \leq 2$ ” (Burkhard y Genuit, 1992, p108)

Otra expresión que se puede encontrar de la *aspereza* es la descrita por Zwicker (Fastl y Zwicker, 2007):

$$R = 0.3 \frac{f_{mod}}{kHz} \int_0^{24Bark} \frac{\Delta L_E(z) dz}{dB/Bark} \text{asper} \quad (9)$$

En donde  $f_{mod}$  es la frecuencia de modulación y  $\Delta L_E(z) dz$  es la excitación diferencial en cada banda de frecuencia. En los carros eléctricos puros, la *aspereza* aumenta gradualmente cuando la velocidad asciende, lo que indica que el componente en alta frecuencia se incrementa cuando aumenta la velocidad, esto debido al ruido electromagnético de los vehículos eléctricos (Congnann et al., 2017).

### 1.7.5 Protocolo OBDII

El protocolo OBDII es el sistema de autodiagnóstico integrado del vehículo (CSS Electronics, 2020). Su nombre viene de las palabras en inglés (The On-Board Diagnostics II). Este

---

<sup>7</sup> Aspereza, que en inglés se conoce como Roughness.

es usado para acceder al computador del vehículo para tareas tales como: Prueba de emisión y diagnósticos (Verizon, s.f.). Este se originó en California en el año de 1991 con propósitos de control de emisión. El estándar OBDII fue recomendada por la SAE (Society of Automotive Engineers). El conector OBDII permite acceder a los datos del carro fácilmente (CSS Electronics, 2020).

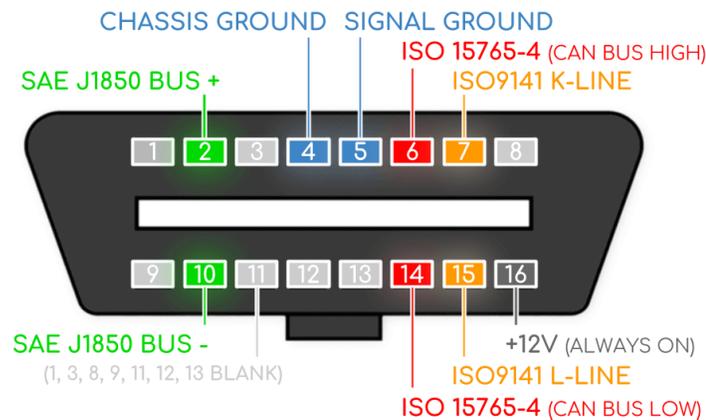


Figura 1. El conector OBDII (CSS Electronics, 2020).

En la imagen anterior se ilustra un ejemplo de un conector OBDII también conocido como conector de enlace de datos, o por sus siglas en inglés DLC (Data Link Connector). El conector puede situarse cerca del volante o también escondido en la guantera del carro. El pin número 16 suministra energía a través de la batería del automóvil, a menudo también cuando el coche está apagado. Los pines 6 (CAN-H) y 14(CAN-L) son los más relevantes, tal como informa CSS Electronics (2020). Mientras que OBDII es un protocolo, el bus CAN es un método de comunicación. El conector puede funcionar con una configuración de cinco protocolos. Desde el año de 2008 el bus CAN (ISO 15765) ha sido el protocolo preceptivo para OBDII en todos los carros vendidos en Estados Unidos. Los datos OBDII se registran de la siguiente manera:

- Se conecta un registrador al conector OBDII
- Usando la herramienta, se envían cuadros por segundo solicitados “*requested frames*”, vía CAN.
- La unidad de control electrónico que regula el motor envía cuadros por segundo de respuesta “*response frames*” vía CAN.

Los parámetros estándar de identificación OBDII varían en los automóviles según el modelo y el año de este, así que hay que buscar la guía de registrador de datos OBDII del carro que se va a manipular. La estructura de mensaje de datos que usa el protocolo está compuesta por un

identificador (ID) y los datos (data). Los datos se dividen en Mode, PID y los data bytes (A, B, C, D)

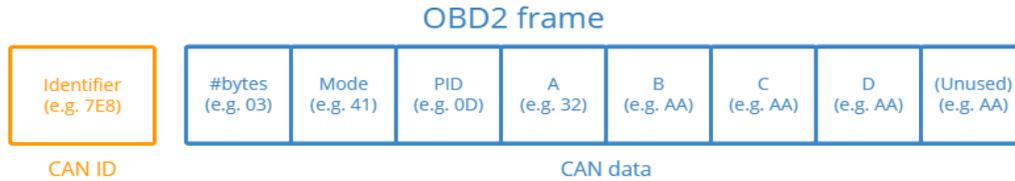


Figura 2. Forma del envío de datos en el protocolo OBDII (CSS Electronics, 2020)

A través de esa estructura se pueden sacar datos como de RPM, la velocidad del vehículo, la carga del motor, etc. (OBD Solutions, 2014).

### 1.7.6 Interfaz ELM 327

Es un dispositivo que permite conectar el carro con el PC. Se conecta con el computador del carro a través del protocolo OBDII. Aunque por medio de este protocolo hay una gran variedad de sets de chips, el más común de todos en la industria automovilística es la solución fabricada por *ELM Electronics*, quienes son los creadores de la interfaz ELM 327. Esta solución fue fabricada por simplicidad. Por lo general, se encuentra actualizado con opciones portátiles de nivel de entrada, así como opciones específicas de marca.

La solución de software más actualizada se puede encontrar con Smartphones y tabletas, en donde se permite usar una variedad de puntos de conexión para transmitir información desde el vehículo a cualquier escáner que desee utilizar. Unos de los grandes beneficios de utilizar la interfaz ELM327, es que nos puede ayudar para verificar que está pasando con el vehículo. Si hay problemas en el vehículo, con el uso de un escáner OBDII y esta interfaz simplificada se pueden obtener códigos para ayudar a arreglarlos (Auto Learning Center, 2019).

El ELM327 provee soporte para comunicaciones de alta velocidad, y un modo de suspensión de bajo consumo. Además, es personalizable permitiendo que se altere más de cerca a las necesidades. Se comunica con el PC por medio de la conexión serial RS232. Aunque varios computadores no dispongan de una conexión serial existen varias maneras en donde se puede crear un puerto serial virtual. Los dispositivos más comunes son adaptadores de USB a RS232, pero también se utilizan tarjetas PC, dispositivos ethernet, o adaptadores de Bluetooth a serial. Para usar un programa de terminal hay que asegurarse primeramente que el programa se ajuste para usar el puerto 'COM' y la velocidad de datos adecuada. Igualmente hay que establecer la conexión para 8

bits de datos, sin bits de paridad y un bit de stop y además del modo “line end” adecuado (ELM Electronics, s.f.).

Según Mundo automotriz (s.f.) esta interfaz ELM327 y el *ScanMaster* son la opción más económica del 2019, básicamente hay dos modelos para esta interfaz, una con conexión WI-FI y otra con Bluetooth, que dependiendo de la aplicación es más útil una que la otra. El ELM327 se conecta por medio de Bluetooth con la aplicación *ScanMaster*, el cual es un programa que corre a partir del sistema operativo Windows 7 y haciendo las respectivas conFiguraciones del programa, el *ScanMaster* comienza a comunicarse con la unidad de control del vehículo (ECU).

En conclusión, la interfaz ELM327 junto con el *ScanMaster*, son una herramienta útil para extraer de la ECU muchos datos relevantes para el diagnóstico automotriz. Pero al ser genérico no brinda una información propia del fabricante del vehículo.

### **1.7.7 Programación orientada a eventos**

La programación orientada a eventos, o por su término en inglés *Event-driven programming*, “son programas los cuales contienen un ciclo, el cual espera por eventos. Cuando se desencadena un evento el programa se ejecuta” (Aghamohammadi et al., 2020, p.1). Varias aplicaciones están basadas en este tipo de programación. A diferencia de los programas tradicionales, los orientados a eventos no tienen una secuencia predefinida de ejecución (Fan et al., 2019). Según Fan et al. (2019):

“La ejecución de una aplicación orientada a eventos se logra mediante un bucle infinito (conocido como bucle de eventos) con detectores de eventos asociados. Cuando ocurre un evento registrado, el oyente (*listener*) activa la función de devolución de llamada (*Callback*) implementada por los programadores. Debido a esta gran diferencia, el "rendimiento" es mejor al de los programas tradicionales” (p. 59).

### **1.7.8 Transmisión de datos vía puerto serial en Windows.**

A través del puerto serial se puede establecer una comunicación entre dos dispositivos digitales, esto se puede lograr otros sistemas operativos. Sin embargo, para este trabajo se trabaja con envíos de datos en Windows, el cual cuenta con los COM (“Communication Ports”), los cuales son puertos bidireccionales, es decir que envían y transfieren datos por medio de pines en las entradas de un computador, lo cual hace que la información sea “full dúplex” que es el término que indica que son bidireccionales. Los puertos seriales se tratan como un fichero de entrada o de salida con la singularidad de que esta comunicación es asíncrona, lo que quiere decir que no existe una señal de reloj, por lo que el envío de información no es continuo. (Chico Gómez, 2012)

Sobre la lectura y envío de datos Chico Gómez (2012) afirma:

“Los datos que se reciben por uno de estos canales hay que leerlos cuando llegan, casi nunca sabremos cuándo el dispositivo que tenemos conectado al otro extremo del cable va a decidir enviarnos datos. En cuanto a la escritura, pasa algo parecido, no podemos prever con precisión si el dispositivo al que enviamos los datos los va a procesar con la velocidad a la que se los enviamos, o si está o no preparado para recibirlos. Aunque el sistema operativo dispone de un buffer para almacenar los datos que se reciben, ese *buffer* es finito, y si nuestro programa no retira los datos con cierta frecuencia, los perderá.” (p. 7).

### 1.7.9 Estadística descriptiva

La estadística descriptiva es una rama esencial para todo proceso investigativo; esta nos permite por medio de varios métodos poder analizar, resumir, y presentar de forma clara para el lector u otros investigadores, datos que son obtenidos dentro de una determinada investigación. Estos datos pueden ser cualitativos o cuantitativos, con la finalidad de validar o no una hipótesis, objetivo de toda investigación.

De manera general, lo primero que debe realizar un investigador es resumir los datos y su distribución; esto se debe realizar teniendo en cuenta la escala de medición que se tiene y cómo se realiza la recolección de dichos datos (Rendón-Macías, 2016). Por lo anterior, el investigador debe tener en cuenta la escala a estudiar. Para el caso de este trabajo, se debe apoyar en medidas de variables cuantitativas como las presentadas a continuación:

*Promedio o media aritmética:* Suma de valores obtenidos para una variable dividida entre la cantidad de datos obtenidos, esta representa el punto de equilibrio de los datos.

*Mediana:* Valor que divide la muestra de datos en dos mitades; es decir, el dato donde el 50% de los datos restantes están por encima o por debajo de él.

*Moda:* El valor cuya frecuencia de aparición es mayor.

*Rango:* Es el intervalo entre el valor máximo y el valor mínimo.

*Máximo:* El dato con el mayor valor de todos.

*Mínimo:* El dato con el menor valor de todos.

*Varianza:* Medida que representa que tanto varían los datos con respecto a la media.

Estas medidas mencionadas anteriormente, dan una idea general de cómo es el comportamiento de las variables obtenidas, para resumirlas y poder realizar un análisis más profundo de dicho comportamiento. Para realizar este análisis se recurren a ciertas herramientas tales como:

*Desviación estándar o Desviación típica:* Esta medida permite tener un conocimiento general de cómo se alejan los datos del promedio y la distribución dentro de los límites medidos (Rendón-Macías, 2016). De forma matemática la desviación estándar se puede definir como la raíz cuadrada de la varianza de una población o de una variable aleatoria que la representa (Espejo, 2017). Las ecuaciones 10 y 11 describen la varianza y la desviación estándar que se aplica para población.

$$Var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n} \quad (10)$$

Donde X es la variable por la que se calcula la varianza,  $x_i$  es la observación de número  $i$  en la que se sitúa la variable  $x$  que puede tomar valores entre 1 y  $n$ , a su vez  $n$  es el número de observaciones, finalmente  $\bar{X}$  es la media de X.

Continuando, la desviación estándar está dada por la siguiente expresión matemática:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (11)$$

Como se observa, la desviación estándar es simplemente la raíz cuadrada de la varianza.

*Asimetría:* este método permite tomar medida acerca de la simetría que presenta la distribución de una variable con respecto a su media. Una asimetría negativa indica que los datos están por debajo de la media, así como una asimetría positiva indica que los valores en general son superiores a la media. Finalmente, un conjunto de datos simétrico presenta la misma cantidad de datos mayores y menores a la media siguiendo una distribución normal.

*Curtosis:* Este método indica cuál es la cantidad de datos que se concentra en un vecindario cercano a la media. De forma gráfica, se representa la forma en que será la curva de distribución según el coeficiente de curtosis; es decir, entre mayor sea el coeficiente de curtosis, la curva de distribución alrededor de la media será más estrecha. Por el contrario, entre menor sea el coeficiente de curtosis la curva de distribución será más ancha con respecto a la media.

### 1.7.10 Método de mínimos cuadrados ordinarios.

El método de los mínimos cuadrados ordinarios es el modelo matemático por el cual generalmente se basan los modelos de regresión lineal para los análisis estadísticos. Este método

básicamente consiste en la obtención de un hiperplano de forma que se minimice la suma de los cuadrados de las distancias entre cada una de las observaciones de la variable y dicho hiperplano (residuos). (Gonzalez, 2015).

El objetivo es encontrar en una gráfica la recta que mejor se ajuste a los datos en un hiperplano para el caso de varias variables y que tenga el menor error vertical medido de manera vertical posible. La forma de medir este ajuste es haciendo una suma de los cuadrados de los residuos de los datos para obtener el SCR (Suma de Residuos al Cuadrado), un alto número de SCR indica que los datos están muy lejos a la recta, mientras que uno muy pequeño indica que los valores están muy cercanos a la recta (Gonzalez, 2015).

El SCR está dado por la siguiente ecuación

$$SCR = \sum_{j=1}^n e_j^2 = \sum_{j=1}^n (Y_j - \hat{Y}_j)^2 = \sum_{j=1}^n (Y_j - (b_0 + b_1X_{1j} + b_2X_{2j} + \dots + b_kX_{kj}))^2 \quad (12)$$

Siendo  $Y_j$  los valores que estima el modelo de la variable explicada,  $\hat{Y}_j$  la media de la variable,  $b$  Los coeficientes de las variables analizadas, y  $X$  los diferentes descriptores del modelo. Al derivar parcialmente respecto a cada  $b$  e igualar a cero (condición de mínimo), se obtiene el resto de las ecuaciones necesarias para estimar los parámetros del modelo y finalmente la expresión de los estimadores  $b$  (Gonzalez, 2015).

### 1.7.11 Distribución Normal y prueba de distribución Shapiro Wilk.

En estudios estadísticos es importante analizar relación entre la muestra y la población para estimar la incertidumbre que se da en torno a la muestra y/o variable de interés. Es por eso por lo que se torna imprescindible saber sobre distribuciones de probabilidades y así poder analizar una variable aleatoria en detalle (Dagnino, 2014).

Entre las características de la distribución normal se encuentran que es simétrica. Tiene una forma de campana cuyo ancho lo determina la desviación estándar y que alcanza su máximo en la media, que así mismo también es la moda y la mediana; también es asintótica en el eje X, por lo que puede haber valores infinitos positivos o negativos (Dagnino, 2014). La Figura 3 muestra de manera gráfica la representación de las curvas de distribución normal.

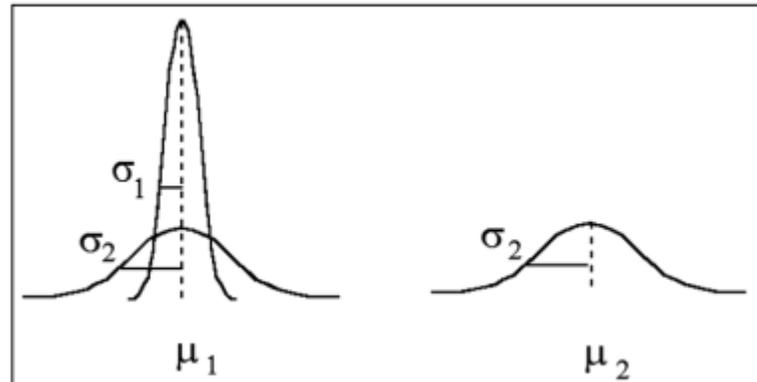


Figura 3. Ejemplo de curvas de distribución normal (Fuente: (Dagnino, 2014))

Existen varios métodos para comprobar la normalidad de los datos, según la cantidad de muestras recogidas, una de ellas son las pruebas de normalidad de Shapiro Wilk. Esta prueba se realiza cuándo las muestras son menores de 50 y se construye con base a la siguiente ecuación:

$$W = \sum_{i=1}^{[n/2]} a_{i,n} (Z_{(n-i+1):n} - Z_{i:n}) \quad (13)$$

Para esta ecuación,  $Z_{i:n}$  representa la muestra ordenada de los datos y  $a_{i,n}$  las constantes que involucran la ecuación. Este método consiste en calcular las distancias entre los datos, con respecto a la mediana lo cuál se explica en los términos  $Z_{i:n}$  y  $Z_{(n-i+1):n}$ . El objetivo final, es comparar las distancias que hay en una muestra de observaciones normales. (Sanchez Sellero, 2010).

### 1.7.12 Regresión lineal múltiple.

La regresión lineal múltiple es el proceso por el cual se busca ajustar un modelo lineal, que se puede linealizar entre una variable, que es dependiente de más de una variable independiente. La ecuación 10 muestra cómo es el modelo general de la regresión lineal múltiple.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_k \cdot x_k + u \quad (14)$$

Donde los  $b$  son los productos de los coeficientes dados por el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) por el cual se basa este modelo,  $X$  Las variables independientes analizadas dentro

del modelo de regresión lineal y  $u$  es la constante de la ecuación. La regresión lineal múltiple tiene una serie de condiciones con la cual se puede o no aplicar cualquier metodología que existe para hallar un modelo matemático, estas condiciones son:

- Normalidad: Los datos adquiridos y los datos con los que se va a realizar el modelo de regresión lineal múltiple debe cumplir con el criterio de que dichos datos deben seguir una distribución normal, lo que quiere decir que una variable aleatoria se puede aproximar a una función que depende de la media estadística y la desviación estándar de la muestra de datos.
- Multicolinealidad: Se puede definir de forma simple como la relación lineal entre variables que conforman el modelo de regresión lineal múltiple. El criterio de Gauss Markov establece que no debe existir multicolinealidad entre variables ya que de manera estadística no se puede obtener el estimador de mínimos cuadrados ordinarios.

La solución para el problema de multicolinealidad es eliminar aquellas variables que pueden tener una relación lineal con otras para que el criterio cumpla y así establecer el modelo de regresión lineal válido para los propósitos de una investigación.

- Homocedasticidad: Es un término que implica que en las variables independientes la varianza en términos del error no observado debe ser constante. Si la varianza es constante, se debe distribuir aleatoriamente con una misma dispersión y sin ningún patrón específico.

Bajo estos criterios, existen varios métodos para hallar un modelo de regresión lineal múltiple, para este trabajo se usaron dos métodos, el método de *entrada forzada* y el método *hacia adelante*.

#### ***Método de entrada forzada.***

Este método se basa en la inclusión de todas las variables seleccionadas por el investigador dentro de la regresión lineal, es el método más recomendado si se tiene una base teórica previamente fundamentada y desarrollada dentro de la literatura con el fin de aplicar ese mismo modelo ya sabiendo su jerarquía en la significancia estadística que cada variable tiene dentro de la ecuación y cómo afecta a la variable dependiente.

#### ***Método hacia adelante.***

Este método evalúa una por una las variables entre sí, buscando cuál es el primer predictor que tiene el mayor porcentaje de la varianza, a partir de ahí busca el segundo que tiene el mayor

porcentaje de predicción de lo que resta de porcentaje de varianza de la variable independiente y así hasta obtener las variables que son estadísticamente más significativas, descartando así las demás que tengan problemas de multicolinealidad o que no aportan nada a la ecuación final. El método hacia adelante es el más recomendado para realizar modelos experimentales cuando no se tiene claro la incidencia ni la jerarquía de las variables y como estas afectan a la variable dependiente.

### **1.7.13 Factor de Inflación de Varianza (FIV).**

El Factor de Inflación de Varianza, mide como es el aumento de la varianza producto a la colinealidad, de manera más simple es, cuántas veces la varianza se infla por la colinealidad entre variables, también se habla del Factor de Inflación de Varianza como el elemento diagonal de la inversa de la matriz de correlación de las variables. (Ferré, 2009). De manera general el Factor de inflación de Varianza se calcula de la siguiente manera:

$$VIF_k = (1 - R_k^2)^{-1} \quad (15)$$

En esta ecuación  $R_k^2$  es el coeficiente de determinación de cada  $X_k$ , es decir de cada variable independiente dentro de la regresión múltiple. El Factor de Inflación de Varianza va desde 1 hasta infinito.

Cuando el FIV es igual a 1 se habla de una correlación perfecta entre un descriptor y su variable dependiente, así mismo, un FIV mayor a 1 indica que en dicha variable existe colinealidad, aunque de manera general para efectos de medir la multicolinealidad, un FIV mayor a 10 se interpreta como un indicador de que la correlación entre las variables es tan alta que el error estándar del coeficiente de regresión está excesivamente inflado y por tanto existe redundancias entre las variables descriptoras. (Ferré, 2009).

El FIV, se usa como una medida de diagnóstico general de colinealidad y son una manera más simple y mejor que estudiar valores de correlación simples. Dentro de los beneficios de medir la colinealidad por medio del FIV se puede ver exactamente qué descriptores son los que presentan problemas de multicolinealidad. Sin embargo, con el FIV se puede ver cuáles son los descriptores que están involucrados en las dependencias entre variables.

## **1.8 Marco conceptual**

### **1.8.1 Realimentación sonora.**

El término realimentación es un término que deriva de la teoría general de los sistemas, específicamente de la Cibernética (Wiener, 1848) y tiene implicaciones en diferentes campos de las ciencias exactas. Realimentación se usa en la Teoría General de Sistemas para explicar el comportamiento que describen a los sistemas dinámicos, cómo se comportan, cuál su interacción con otros sistemas y/o consigo mismo con la característica en particular que tienen unas dinámicas de sistemas acopladas siguiendo el razonamiento causal; este razonamiento causal se puede explicar de manera simple como la influencia que tiene un sistema con otro o en sí mismo a razón de un principio de argumento circular.

La realimentación tiene la propiedad de ser comúnmente de lazo cerrado o “Closed Loop”, es decir que la salida o parte de la salida se devuelve a su origen de entrada. Teniendo en cuenta esto se puede intuir que con esta propiedad se eliminan las dependencias de influencias externas sobre un sistema o una cadena de sistemas; también se puede usar para crear un comportamiento lineal de un sistema cuando un sistema tenga componentes no lineales que lo conformen, haciendo de esta forma, que el sistema también sea ajeno a las variaciones de sus elementos individuales. Es por estas razones que el estudio de los sistemas de realimentación se basa en desarrollar y comprender la dinámica y el dominio de distintas técnicas para aplicar en sistemas dinámicos.

La realimentación en un sistema tiene la particularidad de usarse en diferentes ocasiones como un método de control de un sistema por medio de la respuesta a la salida de este. Esto es imprescindible para el correcto funcionamiento de un sistema, o para llevar a cabo tareas con precisión dado que se puede convertir un sistema que en principio podría ser inestable en un sistema estable mediante la realimentación basada en sistemas de medición en la salida, esto último acompaña la característica de ofrecer a un sistema, el control para añadir grados de libertad al diseño y uso de un sistema realimentado para cumplir tareas y obtener información de dichas tareas. La Figura 4 ilustra la teoría de sistemas para realimentación o Feedforward.

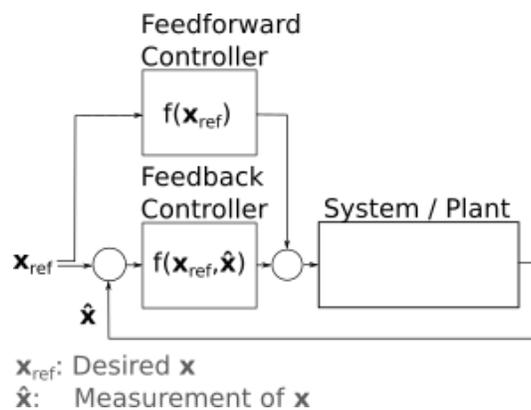


Figura 4. Diagrama de la realimentación (fuente: (Jo, 2011))

En el caso del trabajo la realimentación sonora en vehículos se caracteriza de igual manera por tener una medida de control que en este caso es la velocidad y el sonido del motor de un vehículo, el cual permite que el conductor obtenga información del vehículo, usándolo para posibles tomas de decisión en determinados momentos dentro de la conducción de acuerdo con el comportamiento del vehículo. Es importante entonces analizar las variables que influyen en el sonido del motor y ver como se relacionan con la realimentación sonora y la perspectiva del conductor en cuánto a la exposición a la fuente que es el motor ya sea de un vehículo de combustión o eléctrico.

### **1.8.2 Ruido de tráfico Rodado:**

En los ambientes urbanos de hoy en día los habitantes de las ciudades están expuestos constantemente a ruidos principalmente a ruidos por tráfico rodado. Por años este tipo de ruido ha sido una de las fuentes de ruido más prominentes en las áreas urbanas (Park et al., 2019). En Europa este tipo de ruido es el causante del 80% de la contaminación acústica en países como lo son Madrid y Barcelona (Martin L, 2017). Según Martínez (2005):

“Dentro del ruido urbano originado por los vehículos automotores hay tres tipos de ruido diferenciados, tales como: el ruido de propulsión (el motor, la transmisión y el sistema de escape asociado), el ruido de rodadura entre las cubiertas y la calzada, y el ruido aerodinámico”.

Cuando los carros van a velocidades superiores a los 80 km/h el ruido de origen aerodinámico supera al ruido de propulsión y al de rodadura. Entre 50 y 80 km/h el que predomina es el ruido de rodadura. Por debajo de 50 km/h en general predomina el ruido del motor. En las ciudades donde transitan un enorme flujo de automóviles, en general se mantiene el ruido de rodadura y el de motor (Conggan et al., 2017). En el ámbito colombiano la normativa que rige en cuanto a emisión de ruido y ruido ambiental se refiere, es la Resolución 0627 del 7 de abril del 2006 en su capítulo 3 de ruido ambiental. Allí se definen los procesos para medición y respectivos mapas de ruido en las zonas rurales y urbanas. En esta resolución se muestran los estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A). La Figura 5, muestra los estándares permitidos de niveles de ruido según la resolución 0627.

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A)	
		Día	Noche
<b>Sector A. Tranquilidad y Silencio</b>	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatorios, hogares geriátricos.	55	45
<b>Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado</b>	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	50
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación		
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre		
<b>Sector C. Ruido Intermedio Restringido</b>	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	50
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.	80	70
	<b>Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado</b>	Residencial suburbana.	55
Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.			
Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.			

Figura 5. Resolución 0627 estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A) en el día y en la noche, por sectores [A, B, C, D] (Resolución 0627, 2006).

### 1.8.3 Caracterización de una fuente sonora.

Una caracterización acústica, consiste en realizar un análisis de una o más fuentes sonoras, por medio de la realización de una captura de muestras, con el fin de realizar una comparativa entre las fuentes y evaluar sus características en el dominio de la frecuencia, análisis en el dominio del tiempo, así como la evaluación de otros aspectos tales como la obtención de parámetros psicoacústicos como Tonality, Loudness, Sharpness, Roughness. Esta es importante para obtener información de las fuentes de sonido que hay al interior de los vehículos a trabajar y su comportamiento, analizando cuál es la influencia de la fuente sonora, que en este caso es un motor, en el interior de un vehículo.

## 1.9 Marco Normativo

### 1.9.1 Decreto 126 de (10 de mayo del 2020).

En este decreto la alcaldía mayor de Bogotá establece que el límite máximo de velocidad para la ciudad de Bogotá es de 50 Km/h para la circulación de todos los vehículos. Con las excepciones de los carriles para el uso exclusivo del transporte público en donde la velocidad permitida es de 60 Km/h, las zonas con límites de 30 km/h, los corredores con límites de velocidad inferior, y ciertas autopistas principales de la ciudad. El incumplimiento de este decreto al exceder los límites de velocidad sanciona con multas establecidas en la Ley 1383 de 2010. Esto se tendrá en cuenta para establecer el límite de velocidad con el que se va a trabajar en el proyecto.

### 1.9.2 Normativa ISO 15666- Evaluación de la molestia por ruido mediante encuestas sociales y socio-acústicas

De acuerdo con la búsqueda realizada, al no encontrar una normativa para evaluar la molestia por ruido al interior de vehículos eléctricos, se remite a la ISO 15666, no para aplicarla en su totalidad, ya que estas pruebas se limitan al hogar, sino para obtener algunos aspectos para tener en cuenta para la realización de las pruebas subjetivas. Esta norma habla de entrevistas socio-acústicas y sociales con preguntas para valorar el grado de molestia o perturbación del ruido. Muestra ejemplos de formulación de preguntas que se deben hacer, escalas de respuestas tanto cualitativas como cualitativas, aspectos claves de la realización de la encuesta y el reporte de resultados.

#### *Especificación de la formulación y el escalamiento de las preguntas de molestia:*

Esta norma menciona dos tipos de escalas para la clasificación de las preguntas: la verbal y la numérica. En el siguiente cuadro comparativo (Tabla 1) se muestran las características de cada una de las escalas.

ESCALAS VERBALES	ESCALAS NUMÉRICAS
Es necesaria para la más transparente y clara comunicación.	Es necesaria para dar un control de consistencia en la respuesta de los entrevistados
Puede ser más fácil de realizar para los entrevistados de cualquier grado de sofisticación y de cultura	En sociedades multirraciales y en trabajos internacionales es muy útil, ya que sus preguntas no están sujetas a la elección de palabras.

*Tabla 1 Escalas verbales vs Escalas numéricas según la ISO15666.*

Al igual que hay dos tipos de escalas, en la **ISO15666** también se mencionan dos tipos de preguntas: las preguntas directas y las indirectas. En la Tabla 2 se pueden observar las características de cada una:

<b>PREGUNTAS DIRECTAS</b>	<b>PREGUNTAS INDIRECTAS</b>
Medición primaria de la relación entre el ruido y la reacción de los residentes.	Tratan de acertar el impacto subyacente del ruido en la gente, pero no pueden suplantar las preguntas directas como indicador primario.
Se nombra la fuente de ruido	Preguntas abiertas en donde no se menciona la fuente de ruido
Se pregunta por la actitud hacia el ruido	Los entrevistados reportan más acciones de queja que una actitud
Se presentan un limitado número de respuestas	Los entrevistados reportan reacciones de conducta en vez de una actitud.

*Tabla 2 Preguntas directas vs preguntas indirectas según la ISO15666.*

## **1.10 Metodología.**

### **1.10.1 Metodología para la caracterización de fuentes sonoras.**

A lo largo de este proyecto se realizaron varios procesos con el fin de analizar y obtener información sobre el funcionamiento del sonido producido por los motores de vehículos eléctricos y de combustión y cómo este afectan a la realimentación sonora del conductor a la hora de manejar, la siguiente Figura expresa el diagrama de flujo que se realizó para completar el trabajo.

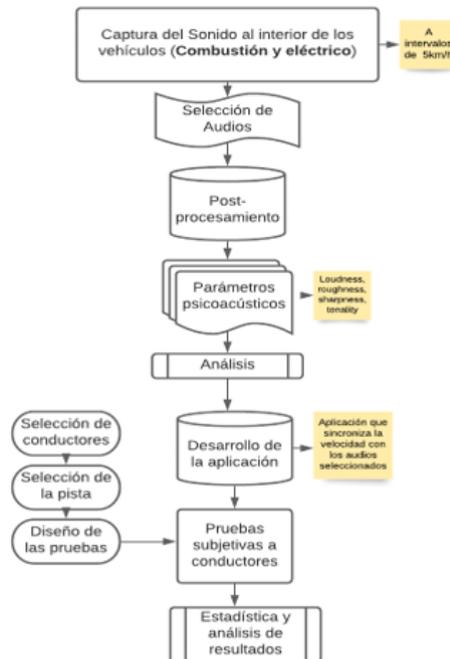


Figura 6. Diagrama de flujo de la metodología a emplear. (Fuente: Propia).

### ***Equipos implementados para la captura del sonido.***

Durante la captura del sonido al interior de los vehículos de combustión y eléctricos, se tuvo en cuenta los siguientes equipos:

- Interfaz de audio de cuatro canales Audient EVO 8.
- Computador portátil marca Asus.
- 2 cables XLR
- 2 micrófonos Earthworks M30
- DAW ProTools 12
- Controlador ELM 327

A continuación, en las Tablas 3 y 4, se muestran aspectos importantes técnicos de los equipos que se usaron para la caracterización tanto del micrófono Earthworks M30 y la interfaz de audio Audient EVO 8.

<b>Earthworks M30</b>	
<b>Respuesta en frecuencia</b>	3Hz -30kHz $\pm 1/-3$ dB
<b>Patrón polar</b>	Omnidireccional
<b>Sensibilidad</b>	34mV/Pa (-29dBV/Pa)
<b>Requerimiento de poder</b>	24-48V Phantom, 10mA
<b>Máxima entrada acústica</b>	140dB SPL
<b>Salida</b>	XLR (pin 2+)

*Tabla 3. Aspectos técnicos micrófono Earthworks M30.*

<b>Interfaz Audient Evo 8</b>	
Preamplificador del micrófono.	
<b>Rango de ganancia del micrófono:</b>	58dB
<b>Rango de ganancia de línea:</b>	58dB (-10dB pad)
<b>Alimentación Phantom:</b>	48V +/-4V @ 10mA/Canal (solo 2 canales disponibles en ordenadores con host USB-A)
<b>EIN Micro:</b>	<-128dBu
<b>CMRR:</b>	>85dB @ 1kHz
<b>Nivel máximo de entrada:</b>	16 dBu
<b>Impedancia de entrada (Micro):</b>	>3k $\Omega$ Balanceado
<b>Impedancia de entrada (Línea):</b>	>10k $\Omega$ Balanceado
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	" $\pm 0.5$ dB 10Hz a 40kHz"

*Tabla 4. Aspectos técnicos del preamplificador de la interfaz EVO 8.*

Lo anterior corresponden a los aspectos principales de los equipos de medición usados para la caracterización, sin embargo, en el Anexo V de este documento se muestra la ficha técnica completa

de los equipos usados durante la caracterización y pruebas subjetivas, juntos con sus gráficas de respuesta en frecuencia y patrón polar en el caso del micrófono de medición correspondiente.

### *Características de la medición*

La medición se realizó el viernes 16 de octubre del 2020 en horas de la noche. Fue realizada en el barrio *Gran Granada* de la ciudad de Bogotá en la calle 78B entre las carreras 119 y 129 como se puede observar trazada en la Figura 6. En total fueron 486m de pista. La Figura 7 muestra el mapa de la pista y una foto del lugar para observar las condiciones de la pista.



*Figura 7. Pista para la realización de la captura de audios (fuente: Google Maps).*

En cuanto a generalidades de la pista, se encuentra una zona con una vía de asfalto, de buenas condiciones, sin desniveles considerables gracias a la poca afluencia de vehículos de la zona que beneficia no solo las condiciones de la vía, sino que también a las condiciones de la medición, donde no interfieren otro tipo de fuentes tales como vehículo o motos circulando, obteniéndose así, una captura limpia de fuentes de tráfico externas para la posterior obtención de datos. En la vía como se puede observar en la Figura no hay ninguna señalización de velocidad máxima permitida, por tanto, se tomó la velocidad máxima permitida en la ciudad de Bogotá de 50 Km/h.

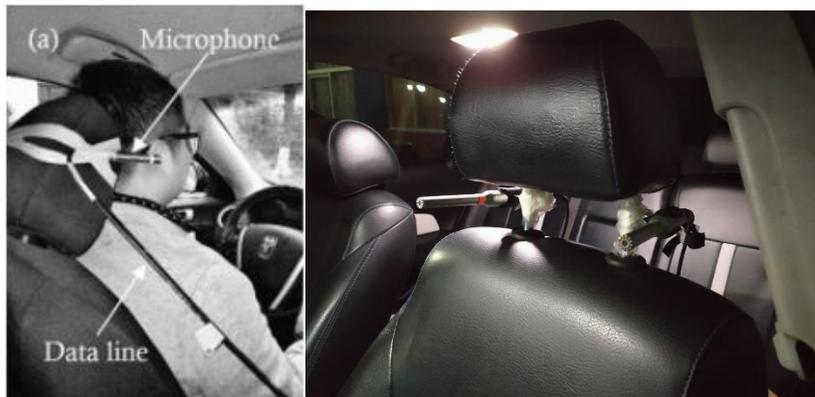
### ***Caracterización de los vehículos.***

Para el desarrollo de esta primera fase se planeó primero determinar la pista en donde se captura el audio al interior de los dos vehículos; posteriormente, se seleccionaron dos vehículos que en dimensiones sean similares y que pertenezcan al mismo segmento, en este caso dos SUV's, que son el Mazda CX7 y el BYD e6, en el Anexo V se muestra la ficha técnica de cada uno de los vehículos seleccionados. De cada vehículo, se debe tener un registro de velocidad, por lo tanto, usando el protocolo OBDII se obtuvieron los datos en tiempo real de velocidad para tener control de precisión sobre a qué velocidad se está capturando; enseguida, se procede a realizar la captura de ambos tipos de auto para distintas velocidades, inferiores a 50 Km/h, el cual es el máximo de velocidad permitido en los corredores viales de la ciudad de Bogotá.

Una vez realizado el proceso de captura, se entra a realizar el proceso de análisis de los audios, que previamente se escuchan y seleccionan; de allí, se entra a realizar un análisis estadístico de los audios, para así realizar la caracterización de ambos tipos de sonido al tiempo que se realiza el cálculo del nivel de presión sonora ponderado A, y los parámetros psicoacústicos objetivos.

### ***Captura del sonido producido por el motor de combustión interna y motor eléctrico al interior de los vehículos.***

Haciendo uso del puerto OBD II, ubicado al interior de los vehículos, se procedió a hacer la conexión vía bluetooth por medio de la aplicación móvil llamada "Car Scanner", la cual, conecta el vehículo de combustión con el dispositivo móvil, esto con el fin de realizar la medición de velocidad. Una vez hecha la instalación, se procedió a calibrar los micrófonos con un pistófono a 94 dB SPL, seguidamente se establece que los 94 dB SPL lleguen a -26dBFS para asegurar que el rango dinámico sea correcto y que el audio no tenga ruido de piso. En cuanto al montaje, se situaron dos micrófonos en la cabecera del asiento del conductor ubicados a los lados derecha e izquierda de la cabeza del conductor a la altura de los oídos, sostenido con una malla y adhesivos de baja adherencia para ayudarlos a mantener fijos los micrófonos. Como se puede observar en la Figura 8.



*Figura 8. Ilustración sobre el posicionamiento de los micrófonos para realizar la medición.*

El conductor maneja en línea recta por la pista con velocidad constante en intervalos de 10 Km/h para realizar diez capturas de 5 segundos en el trayecto. Las capturas empiezan en el momento en que se logre la velocidad constante, no debe haber frenadas o cambios de velocidad mayores a 2 Km/h en lo que se realice la captura.

### **1.10.2 Desarrollo de aplicación que sincroniza velocidad y audio capturado.**

Para la segunda fase, primero se realiza el diseño de la aplicación, dentro del diseño se tiene en cuenta qué parámetros se van a medir en tiempo real, cómo va a ser la interfaz, cómo se lleva a cabo el proceso de los datos dentro de la aplicación, bajo qué sistema operativo funcionará y demás cosas a considerar en el diseño, en seguida se procede al desarrollo de la misma donde la finalidad es que la aplicación realice la sincronía de la velocidad del vehículo y así realizar la reproducción de los audios según sea la velocidad en la cual el vehículo se desplaza.

### **1.10.3 Aplicación de pruebas subjetivas.**

Para esta última fase, fue necesario realizar un estudio previo detallado sobre cómo realizar unas pruebas de validación subjetivas que sirva para realizar un análisis crítico y serio que permita de alguna forma medir esa realimentación sonora hacia los conductores; dicho lo anterior, se consulta la norma ISO 15666 con la cual se evalúa parámetros de molestia al interior de casas, de aquí es donde se van a tomar ciertos aspectos para realizar las pruebas subjetivas al no haber una norma específica que evalúe cualidades sonoras subjetivas al interior de vehículos.

Posteriormente se debe realizar un análisis de tipo estadístico, para concluir con la acción de establecer la relación entre los parámetros objetivos medidos y el parámetro objetivo a estudiar el

cual es la realimentación sonora, concluyendo con la realización de un modelo estadístico experimental que explique esa relación y así sacar conclusiones del estudio realizado.

Para llevar a cabo este análisis se hicieron dos pruebas con los mismos participantes, donde la primera prueba constó de manejar el vehículo de combustión a velocidades constantes en intervalos de 10 Km/h escuchando el sonido natural de la fuente (Motor a combustión al interior) y posteriormente se reproduce el audio capturado del vehículo eléctrico con audífonos de estudio (Beyerdynamic DTX910) para no alterar el campo estéreo de la captura realizada. En la segunda prueba se cambia el vehículo, para el caso, el participante maneja el vehículo eléctrico en los mismos intervalos con el sonido de la fuente, que ese caso es el motor eléctrico al interior y en los audífonos se reproduce el sonido capturado del vehículo de combustión, en ambos casos, una vez el conductor maneja a cierta velocidad con ambos estímulos se le pregunta por la realimentación sonora que previamente se le da una inducción al conductor sobre lo que es realimentación sonora.

***Aspectos adicionales de la norma ISO 15666:***

Para las preguntas se hacen de tipo directas, las escalas son unipolares y se utilizan escalas verbales. Además, es importante tener en cuenta las recomendaciones que hace la norma acerca de cómo formular las preguntas.

**1.10.4 Variables**

***Variables dependientes***

Dentro de las variables dependientes se tiene:

- Duración de la prueba subjetiva.
- Intensidad sonora de la reproducción.
- Tamaño de la muestra.
- Realimentación sonora.
- Sonoridad, Nivel continuo equivalente en dB(A), Tonalidad, Nitidez, Aspereza.
- Parámetros subjetivos relacionados a realimentación sonora.

***Variables independientes***

Dentro de las variables independientes se tiene:

- Aislamiento de ambos vehículos.
- Condiciones de la pista.
- Velocidad de la prueba subjetiva.

- Disposición mecánica de los vehículos.
- Cantidad de participantes de la prueba.

## Capítulo 2: Desarrollo de ingeniería

### 2.1 Caracterización del sonido al interior para vehículos eléctricos y a combustión pertenecientes al mismo segmento.

Realizar una caracterización de los vehículos eléctrico y de combustión es importante porque muestran un comportamiento inicial del sonido provocado por las distintas fuentes de sonido que pueden incidir al interior del vehículo. Por tanto, se procede a realizar una caracterización de tipo estadística, recordando que se toman 10 muestras para cada velocidad en intervalos de 10 Km/h desde los 0 Km/h hasta los 50 Km/h y que además solo se cuenta con un vehículo por categoría pertenecientes al mismo segmento (SUV medianas) por lo que los casos expuesto pueden tener un sesgo, al solo tener un vehículo ya que el comportamiento modal, materiales, disposición de los vehículos, varían entre los diferentes vehículos existentes en el mercado.

Para realizar la caracterización del sonido del motor tanto en un vehículo eléctrico o de combustión, es necesario grabar sonidos de muestra para su posterior análisis. El sonido del motor puede registrarse con el vehículo montado en un dinamómetro dentro de una cámara anecoica. Sin embargo, debido a la falta de un espacio similar para la sesión de grabación, todos los sonidos del motor se registraron en una pista a campo abierto. Se capturaron diez audios de motor por cada velocidad de 0 Km/h hasta 50 Km/h en intervalos de 10 Km/h para ambos tipos de vehículo, teniendo en cuenta la velocidad máxima permitida en la ciudad de Bogotá que es de 50 Km/h.

Las velocidades seleccionadas, debido a la falta de una normativa para este tipo de medición se realizaron de manera experimental buscando el sonido cuando el vehículo está detenido, una velocidad intermedia entre las marchas de un vehículo a combustión donde las RPM son bajas y una velocidad cercana al cambio de marcha donde las RPM son altas. Para el caso del vehículo eléctrico al no haber una transmisión en él, se opta por realizar en las mismas condiciones de velocidad del vehículo a combustión.

Se utilizó un par de micrófonos de medición (Earthworks M30) al interior junto con la interfaz (EVO 8) para determinar las características de los sonidos de dichos motores para su posterior reproducción, las muestras de sonido capturadas se sometieron a una posterior selección de los audios, para concluir con la obtención de los valores asociados a los parámetros psicoacústicos objetivos y hacer una caracterización de tipo estadístico.

### 2.1.1 Fuentes de sonido.

Al interior de un vehículo se encuentran diferentes tipos de sonidos que intervienen todos al tiempo cuando el vehículo está en marcha especialmente, por lo que es importante identificarlas y saber el proceder del sonido generado por dichas fuentes.

#### *Fuente de sonido mecánico:*

#### *Vehículo a combustión:*

En un vehículo a combustión la fuente de sonido mecánico hace referencia a la interacción del motor con sus piezas móviles que hacen parte de su funcionamiento, esta fuente de sonido tiene una relación directa entre la cantidad de revoluciones por minuto (RPM) a la que el motor se someta durante su funcionamiento y la frecuencia, ya que entre más aumenta las revoluciones por minuto en el motor, se puede observar como la frecuencia aumenta. Entre los agentes móviles que intervienen en la fuente de sonido mecánico se encuentran el cigüeñal y el pistón que de acuerdo con sus configuraciones intervienen en el funcionamiento del motor y por tanto en el sonido característico de un motor.

También existen elementos no mecánicos y auxiliares que intervienen en la fuente de sonidos mecánicos tales como la disposición del número de cilindros que tiene el motor y su configuración, si es un motor en línea o en “V”. Como elementos auxiliares tenemos la presencia de turbo-cargadores y/o súper-cargadores que intervienen en el funcionamiento del motor, tal como se puede observar en la Figura 9.

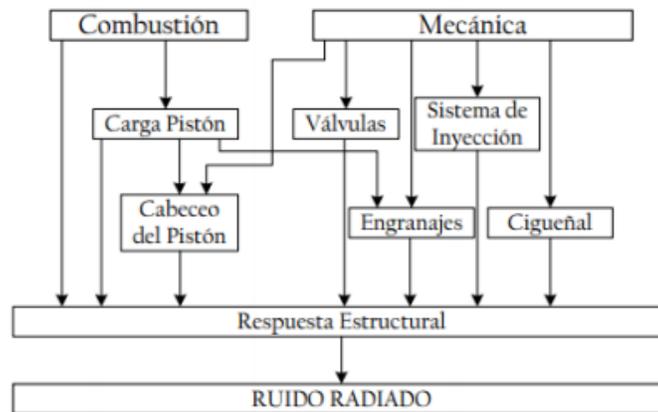
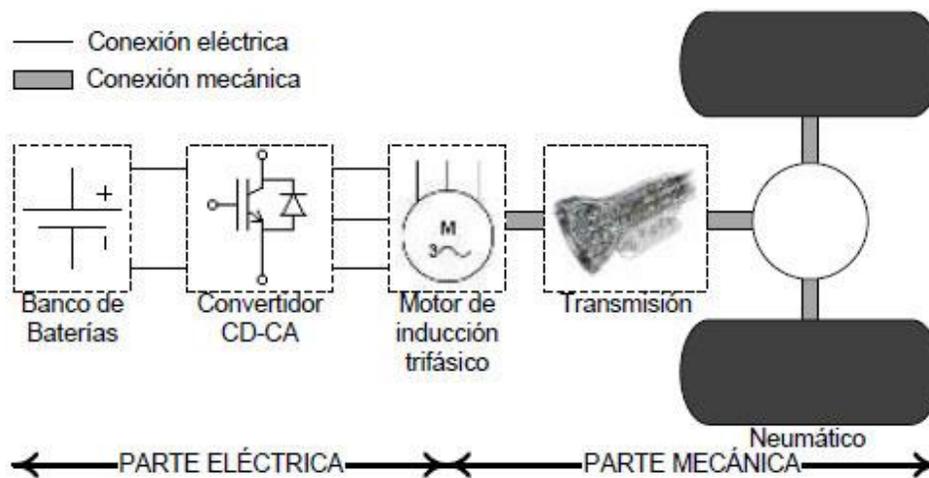


Figura 9. Diagrama de bloques fuente de sonido mecánico (Duran et al., 2014).

### ***Vehículo eléctrico:***

En un vehículo eléctrico por su composición tiene considerablemente menos piezas móviles que un motor a combustión. Desde su funcionamiento básico principalmente consta de dos etapas, aceleración y desaceleración, donde hay una conversión de energía cinética a energía eléctrica para cargar baterías y viceversa en su fase de aceleración para generar movimiento. Dado estas circunstancias tenemos que la mayor parte del sonido proviene del movimiento del tren de potencia del automóvil, ya que es la única parte móvil, cuya función es el movimiento de las ruedas una vez este tiene la energía cinética que entrega el convertidor del motor eléctrico. La Figura 10 muestra el esquema general de un vehículo eléctrico.



*Figura 10. Diagrama de componentes internos del vehículo eléctrico, parte eléctrica y parte mecánica (Duran et al., 2014).*

### ***Fuente de sonido de rodadura:***

Los neumáticos también participan dentro de las fuentes de sonido que genera un vehículo y que puede considerarse, esta fuente se basa principalmente en la interacción del neumático con diferentes superficies cuando el carro está en movimiento y de diversos factores como también de la composición y características de la misma llanta. Principalmente se han hecho diversos estudios de esta fuente para medir niveles de confort, también para estudios a nivel de seguridad.

### ***Fuente de sonido friccional o aerodinámico:***

El ruido friccional es otro componente que se puede tener en cuenta a la hora de realizar la caracterización del sonido que se produce al interior de un vehículo. El ruido friccional o aerodinámico es el que se produce cuando el vehículo interactúa con el aire y se produce gracias a ciertos fenómenos tales como la excitación aerodinámica con ciertas partes de un vehículo, tales como el vidrio y el panel del techo que provocan un ruido hacia el interior; también por el flujo de aire sobre la parte inferior del vehículo lo cual puede provocar la transmisión de sonido aéreo al interior.

### **2.1.2 Obtención de información acústica:**

Para el análisis, se utiliza el software Matlab, junto con la ITA-Toolbox, librería de acceso libre desarrollada por la RWTH Aachen University (RWTH AACHEN UNIVERSITY, s.f.). Esta es un código que procesa el audio capturado con su respectivo postprocesado indicando propiedades y características como el nivel continuo equivalente ponderado A (LeqA), el pico de la señal, el nivel máximo de la señal y sus parámetros objetivos psicoacústicos.

Así mismo, se realiza la toma de diez (10) muestras para las velocidades a las que se realizaron las capturas, para tener la mayor cantidad de datos posibles y realizar un ajuste válido para cada variable objetiva asociada al sonido al interior de los vehículos a combustión y eléctrico, con su respectivo valor de desviación estándar (Ver Anexo I - IV). Se halló la media estadística de estos datos para cada velocidad y al final se realizó un análisis cuyos resultados se muestran a continuación.

### ***Nivel continuo equivalente ponderado A:***

Primero, se realiza el análisis de cómo es la relación entre la velocidad (Km/h) y el nivel continuo equivalente (dBA) el cual nos da información del nivel del sonido producto de las fuentes mencionadas en el apartado anterior (sonido mecánico, rodadura y friccional) al interior del vehículo de combustión y el eléctrico al que se expone un conductor cuando está manejando.

### ***Vehículo a combustión:***

Para el vehículo a combustión se encontró una relación entre la velocidad y el nivel continuo equivalente. En este caso, la curva de ajuste de datos cumple con una función cúbica para ambos micrófonos, tanto como el que está a la izquierda del conductor como el que está a la derecha del conductor tal cual se expresa en la Figura 11.

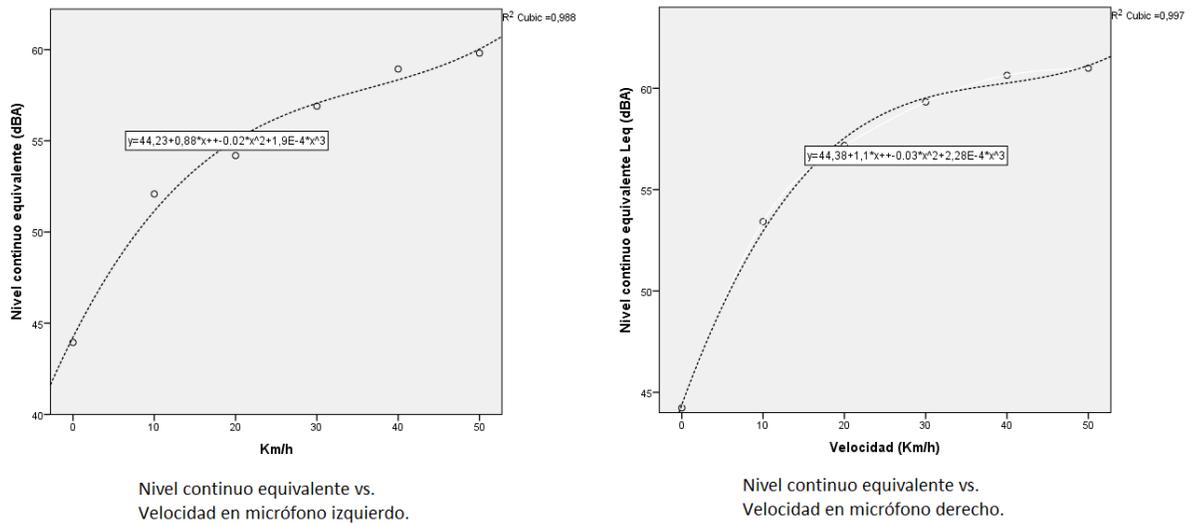


Figura 11. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión. (Fuente: Propia).

En este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.988 y su ecuación es:

$$y = 44.23 + 0.88x - 0.02x^2 + (1.90 * 10^{-4})x^3 \quad (15)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.997 y su ecuación es:

$$y = 44.38 + 1.10x - 0.03x^2 + (2.28 * 10^{-4})x^3 \quad (16)$$

Para el caso de las ecuaciones 15 y 16, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir el nivel continuo equivalente (Leq).

En la Tabla 5 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

Nivel continuo equivalente		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.880	0.811
Cuadrática	0.974	0.981
Cúbica	0.988	0.997
Exponencial	0.850	0.781

Tabla 5. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática del Nivel Continuo equivalente para el vehículo a combustión.

#### Vehículo eléctrico:

Para el vehículo eléctrico se encontró una relación que cumple con una función cúbica entre la velocidad y el nivel continuo equivalente para el lado derecho del conductor. Sin embargo, en el lado izquierdo del conductor dentro del vehículo eléctrico la curva de ajuste de datos cumple con una función cuadrática, la siguiente gráfica expresa la relación entre la curva de ajuste y los datos obtenidos.

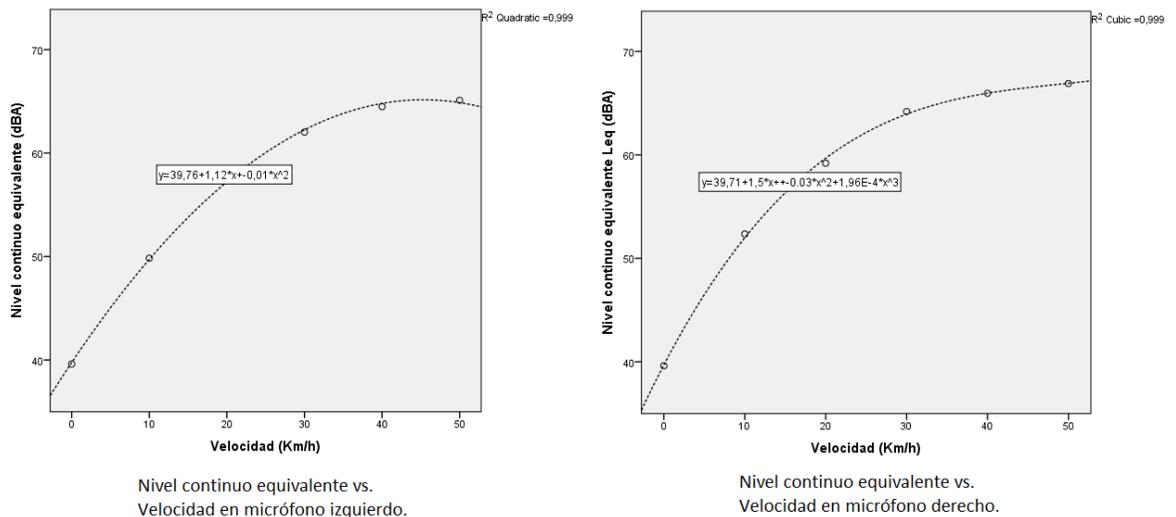


Figura 12. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia).

En este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.999 y su ecuación es:

$$y = 39.76 + 1.12X - 0.01x^2 \quad (17)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.999 y su ecuación es:

$$y = 39.71 + 1.50x - 0.03x^2 + (1.96 * 10^{-4})x^3 \quad (18)$$

Para el caso de las ecuaciones 17 y 18, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir el nivel continuo equivalente (Leq).

En la Tabla 6 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

Nivel continuo equivalente		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.885	0.859
Cuadrática	0.999	0.995
Cúbica	0.997	0.999
Exponencial	0.848	0.814

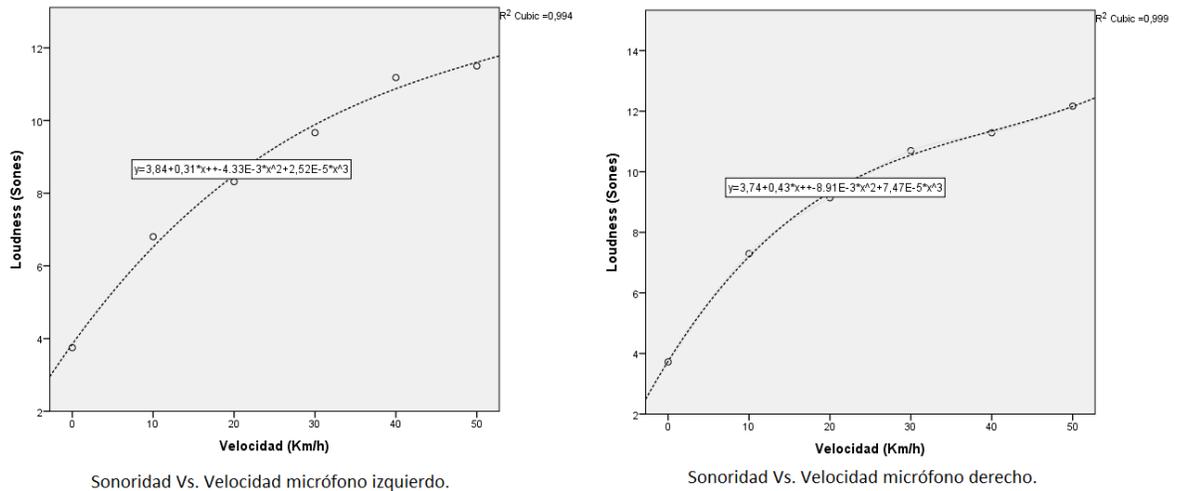
*Tabla 6. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática del Nivel Continuo equivalente para el vehículo eléctrico.*

### ***Sonoridad***

La sonoridad es un componente psicoacústico importante ya que tiene que ver con la percepción del sonido al interior del vehículo de combustión y el eléctrico, debido a la curva de audición que presenta el ser humano, el hecho de observar cómo se comporta esta variable con respecto a la velocidad es importante para ver si existe alguna relación perceptual entre ambas.

### ***Vehículo a combustión:***

Para el vehículo a combustión se encontró una relación entre la velocidad y la sonoridad. En este caso, la curva de ajuste cumple con una función cúbica para ambos micrófonos, tanto como el que está a la izquierda del conductor como el que está a la derecha del conductor como se expresa en la Figura 13.



*Figura 13 Sonoridad en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión.*

*(Fuente: Propia).*

Para el caso de la sonoridad, el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.994 y su ecuación es:

$$y = 3.84 + 0.31x - (4.33 * 10^{-3})x^2 + (2.52 * 10^{-5})x^3 \quad (19)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.999 y su ecuación es:

$$y = 3.74 + 0.43x - (8.91 * 10^{-3})x^2 + (7.47 * 10^{-5})x^3 \quad (20)$$

Para el caso de las ecuaciones 19 y 20, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la aproximación a variable de estudio, es decir, la sonoridad.

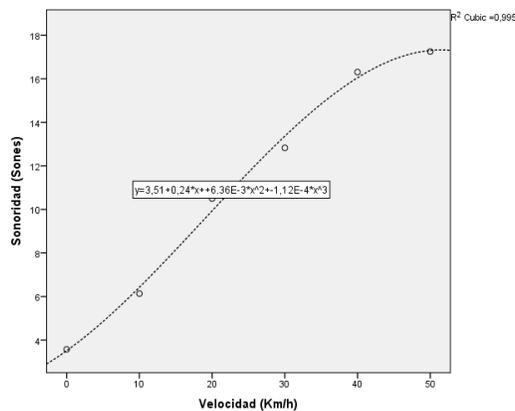
En la Tabla 7 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

Sonoridad		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.941	0.908
Cuadrática	0.993	0.991
Cúbica	0.994	0.999
Exponencial	0.851	0.802

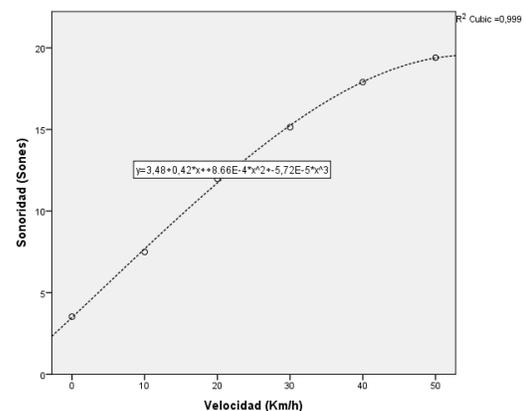
Tabla 7. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la sonoridad para el vehículo a combustión.

#### Vehículo eléctrico:

Para el vehículo eléctrico se encontró una relación entre la velocidad y la sonoridad para el lado derecho del conductor. En cuanto al micrófono ubicado en el lado izquierdo del conductor dentro del vehículo eléctrico la curva de ajuste de datos cumple con una función cúbica al igual que en el lado derecho. Lo dicho anteriormente se puede observar en la Figura 14.



Sonoridad Vs. Velocidad micrófono izquierdo.



Sonoridad Vs. Velocidad micrófono derecho.

*Figura 14 Sonoridad en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia).*

En este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.995 y su ecuación es:

$$y = 3.51 + 0.24x - (6.36 * 10^{-3})x^2 - (1.12 * 10^{-4})x^3 \quad (21)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.999 y su ecuación es:

$$y = 3.48 + 0.42x - (8.66 * 10^{-4})x^2 - (5.72 * 10^{-5})x^3 \quad (22)$$

Para el caso de las ecuaciones 21 y 22, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la sonoridad en el vehículo eléctrico.

En la Tabla 8 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

<b>Sonoridad</b>		
<b>Aproximación</b>	<b>Coefficiente Izquierdo</b>	<b>Coefficiente Derecho</b>
Lineal	0.979	0.975
Cuadrática	0.989	0.994
Cúbica	0.995	0.999
Exponencial	0.914	0.876

*Tabla 8. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la sonoridad para el vehículo eléctrico.*

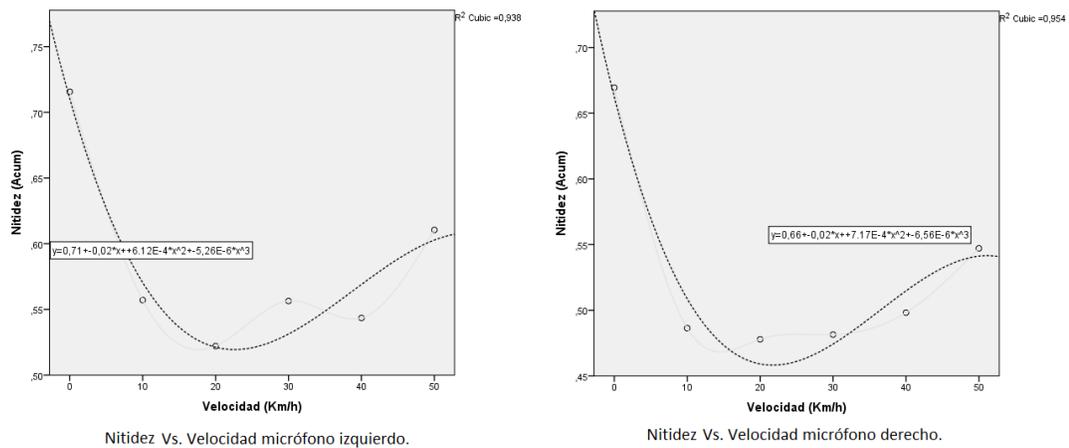
### **Nitidez perceptual:**

La nitidez es otro parámetro psicoacústico a analizar, ya que, se puede obtener información sobre la percepción del contenido en alta frecuencia al interior de vehículos tanto eléctricos como

de combustión, e igualmente la manera por la cual el conductor percibe este contenido en alta frecuencia.

### ***Vehículo a combustión:***

Para el vehículo a combustión se encontró una relación entre la velocidad y la nitidez. En este caso, la curva de ajuste cumple con una función cúbica para ambos micrófonos, con tendencia a disminuir una vez el vehículo está en marcha, pero parece aumentar después de 50 Km/h como se expresa en la Figura 15.



*Figura 15 Nitidez en función de la variable de velocidad para vehículo de combustión.*

*(Fuente: Propia).*

Para el caso de la sonoridad, el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.938 y su ecuación es:

$$y = 0.71 - 0.02x + (6.12 * 10^{-4})x^2 - (5.26 * 10^{-6})x^3 \quad (23)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.954 y su ecuación es:

$$y = 0.66 - 0.02x + (7.17 * 10^{-4})x^2 - (6.56 * 10^{-6})x^3 \quad (24)$$

Para el caso de las ecuaciones 23 y 24, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la nitidez perceptual.

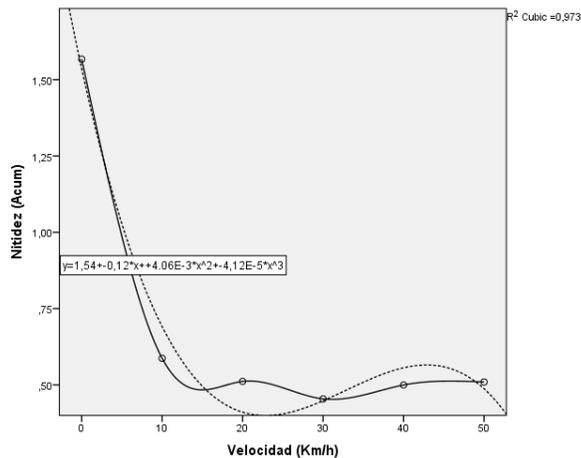
En la Tabla 9 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

Nitidez		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.162	0.169
Cuadrática	0.866	0.854
Cúbica	0.938	0.954
Exponencial	0.142	0.144

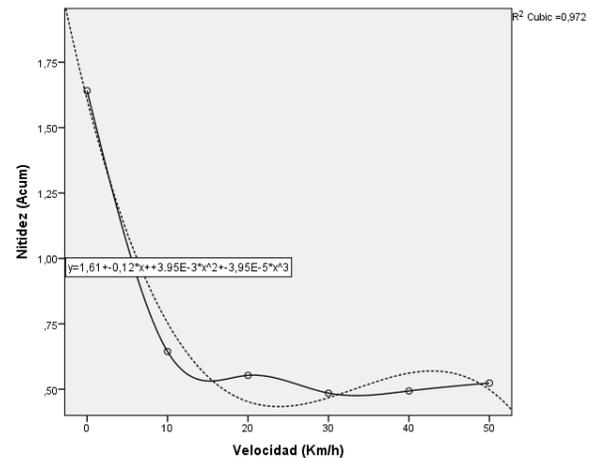
Tabla 9. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la nitidez para el vehículo a combustión.

#### Vehículo eléctrico:

Para el vehículo eléctrico se encontró una relación entre la velocidad y la nitidez perceptual para el lado derecho del conductor. En cuanto al micrófono ubicado en el lado izquierdo del conductor dentro del vehículo eléctrico la curva de ajuste cumple con una función cúbica al igual que en el lado derecho. Lo dicho anteriormente se puede observar en la siguiente Figura.



Nitidez Vs. Velocidad micrófono izquierdo.



Nitidez Vs. Velocidad micrófono derecho.

Figura 16. Nitidez en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia).

En este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.973 y su ecuación es:

$$y = 1.54 - 0.12x + (4.06 * 10^{-3})x^2 - (4.12 * 10^{-5})x^3 \quad (25)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.972 y su ecuación es:

$$y = 1.61 - 0.12x + (3.95 * 10^{-3})x^2 - (3.95 * 10^{-5})x^3 \quad (26)$$

Para el caso de las ecuaciones 25 y 26, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la nitidez en el vehículo eléctrico.

En la Tabla 10 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

<b>Nitidez</b>		
<b>Aproximación</b>	<b>Coefficiente Izquierdo</b>	<b>Coefficiente Derecho</b>
Lineal	0.480	0.519
Cuadrática	0.855	0.874
Cúbica	0.973	0.972
Exponencial	0.511	0.577

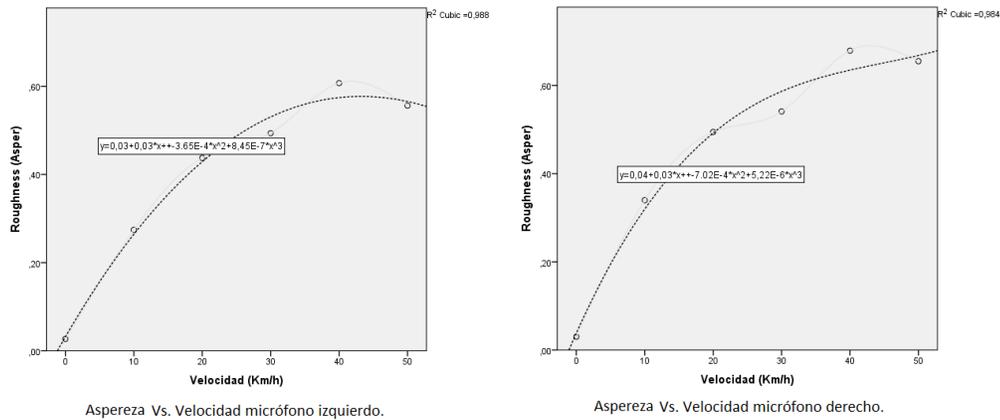
Tabla 10. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la nitidez para el vehículo eléctrico.

### **Aspereza**

La aspereza como parámetro psicoacústico describe la manera con la que el conductor percibe cambios en la modulación en baja frecuencia debido al funcionamiento propio de un motor, ya sea eléctrico o a combustión.

### ***Vehículo a combustión:***

Para el vehículo a combustión se encontró una relación entre la velocidad y la aspereza, lo que indica que la curva de ajuste de datos cumple con una función cúbica para ambos micrófonos, con tendencia a aumentar como se expresa en la Figura 17.



*Figura 17. Aspereza en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión.*

*(Fuente: Propia).*

Para el caso de la sonoridad, el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.988 y su ecuación es:

$$y = 0.03 - 0.03x - (3.65 * 10^{-4})x^2 - (8.46 * 10^{-7})x^3 \quad (27)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.984 y su ecuación es:

$$y = 0.04 - 0.03x - (7.02 * 10^{-4})x^2 + (5.22 * 10^{-6})x^3 \quad (28)$$

Para el caso de las ecuaciones 27 y 28, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la aspereza.

En la Tabla 11 se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

Aspereza		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.842	0.856
Cuadrática	0.980	0.978
Cúbica	0.988	0.984
Exponencial	0.629	0.618

Tabla 11. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la aspereza para el vehículo a combustión.

### Vehículo eléctrico:

Para el vehículo eléctrico se encontró una relación entre la velocidad y la nitidez perceptual para el lado derecho del conductor. En cuanto al micrófono ubicado en el lado izquierdo del conductor dentro del vehículo eléctrico la curva de ajuste de datos cumple con una función cúbica al igual que en el lado derecho. Esto se observa en la Figura 18.

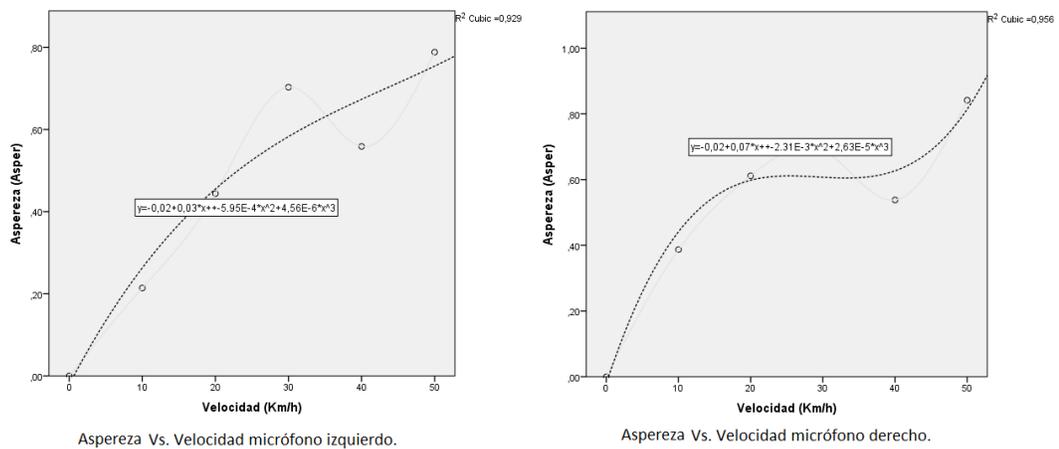


Figura 18. Aspereza en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente:

Propia).

En este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.929 y su ecuación es:

$$y = 0.02 - 0.03x - (5.95 * 10^{-4})x^2 - (4.56 * 10^{-6})x^3 \quad (29)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.956 y su ecuación es:

$$y = 0.02 + 0.07x - (2.31 * 10^{-3})x^2 + (2.63 * 10^{-5})x^3 \quad (30)$$

Para el caso de las ecuaciones 29 y 30, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la aspereza para el vehículo eléctrico.

En la Tabla 12, se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

<b>Aspereza</b>		
<b>Aproximación</b>	<b>Coefficiente Izquierdo</b>	<b>Coefficiente Derecho</b>
Lineal	0.873	0.749
Cuadrática	0.926	0.851
Cúbica	0.929	0.956
Exponencial	No aplica.	No aplica.

*Tabla 12. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la aspereza para el vehículo eléctrico.*

En el caso de la aproximación exponencial, no se puede realizar una aproximación exponencial para el vehículo eléctrico, al existir valores de cero (0), cuando el vehículo está detenido, es decir, cuando la velocidad es de 0 Km/h.

### **Tonalidad:**

La tonalidad es otro parámetro para tener en cuenta dentro del manejo en un vehículo. Esta que nos indica cómo es el componente tonal con respecto al ruido aleatorio producto de la interacción de las demás fuentes: esto es importante, ya que en procesos psicoacústicos se relaciona la tonalidad con procesos de ubicación de fuentes y de atención a alertas, en el caso de los vehículos esto es importante para determinar información que se le puede suministrar al conductor por medio de la tonalidad de un motor.

Al ser esta una caracterización de forma estadística, lo que se hace es obtener los valores de tonalidad en  $tu$ , por lo cual, no se lleva a cabo un análisis espectral, ya que para realizar un análisis de este tipo se necesita realizar la caracterización de cada tipo de fuente (sonido mecánico, sonido friccional, sonido de rodadura) para que cuando se aplique procesamiento digital de señales, se pueda primero identificar la región en el espectro en las que cada fuente de sonido interviene y así ver cuál es el porcentaje de incidencia de cada fuente en las distintas bandas de frecuencia.

### ***Vehículo a combustión:***

Para el vehículo a combustión se encontró una relación cúbica entre la velocidad y la tonalidad. En este caso, la curva de ajuste de datos cumple con una función cúbica para ambos micrófonos, con tendencia a disminuir como se expresa en la Figura 19.

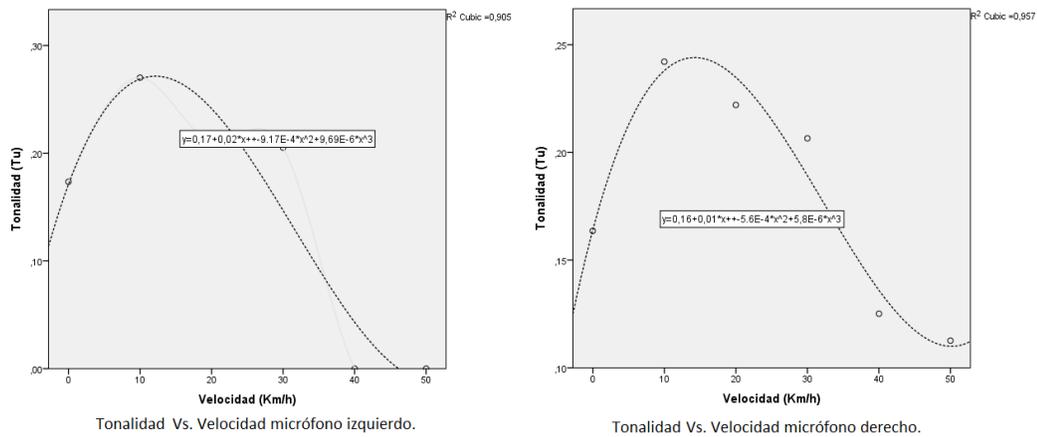


Figura 19. Tonalidad en función de la variable de velocidad para vehículo a combustión.

(Fuente: Propia).

Para el caso de la tonalidad, el coeficiente de determinación  $R^2$  para el lado izquierdo fue de 0.905 y su ecuación es:

$$y = 0.17 - 0.02x - (9.17 * 10^{-4})x^2 + (9.69 * 10^{-6})x^3 \quad (31)$$

Mientras para el lado derecho  $R^2$  fue de 0.957 y su ecuación es:

$$y = 0.16 - 0.01x - (5.60 * 10^{-4})x^2 + (5.80 * 10^{-6})x^3 \quad (32)$$

Para el caso de las ecuaciones 31 y 32, la letra  $x$  hace referencia a la variable de velocidad y la letra  $y$  hace referencia a la variable de estudio, es decir, la aspereza para el vehículo eléctrico.

En la Tabla 13, se muestra los coeficientes de determinación  $R^2$  para los tipos de aproximación lineal, cuadrática, cúbica y exponencial por los que se seleccionó la función matemática que mejor se ajustó a los datos.

<b>Tonalidad</b>		
<b>Aproximación</b>	<b>Coefficiente Izquierdo</b>	<b>Coefficiente Derecho</b>
Lineal	0.609	0.390
Cuadrática	0.813	0.803
Cúbica	0.906	0.957
Exponencial	No Aplica	0.440

*Tabla 13. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la tonalidad para el vehículo a combustión.*

En el caso de la aproximación exponencial para el micrófono izquierdo, no se puede realizar una aproximación exponencial para el vehículo eléctrico, al existir valores de cero (0).

***Vehículo eléctrico:***

Para el vehículo eléctrico no se encontró una función que pudiese relacionar la variable de velocidad con la tonalidad. Esto se puede evidenciar en la Figura 20, donde el comportamiento de los puntos en la gráfica no sigue ninguna función matemática, ya sea lineal, cuadrática, cúbica o exponencial. Se observa que el valor de tonalidad sube y baja conforme la velocidad aumenta y oscila entre 0.30 y 0.1 en el valor de tonalidad.

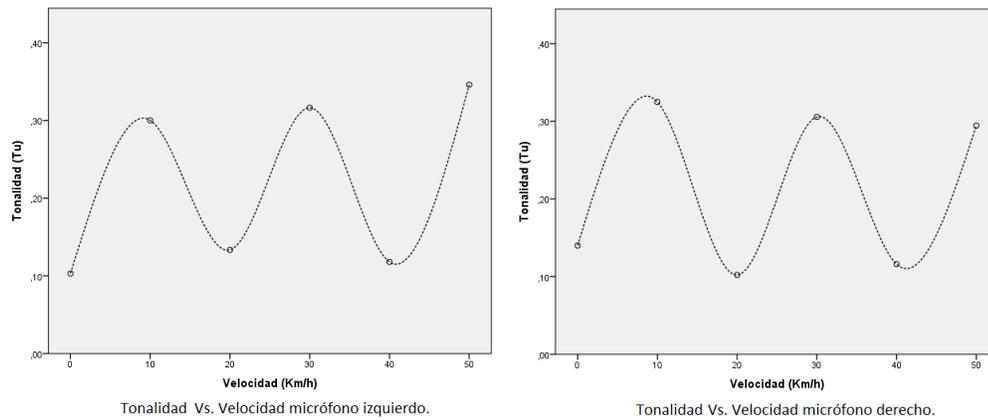


Figura 20. Tonalidad en función de la variable de velocidad para vehículo eléctrico. (Fuente: Propia).

Para la sonoridad en el vehículo de combustión, en la Tabla 14 se puede observar como los coeficientes de determinación, tienen valores considerablemente menores a 0.9, por lo que ninguna aproximación fue elegida para el caso al no encontrar una función matemática que se ajuste a los datos obtenidos para la tonalidad durante el proceso de caracterización del vehículo eléctrico.

Tonalidad		
Aproximación	Coefficiente Izquierdo	Coefficiente Derecho
Lineal	0.164	0.032
Cuadrática	0.164	0.034
Cúbica	0.436	0.239
Exponencial	0.156	0.030

Tabla 14. Diferencias del coeficiente de determinación para cada aproximación matemática de la tonalidad para el vehículo eléctrico.

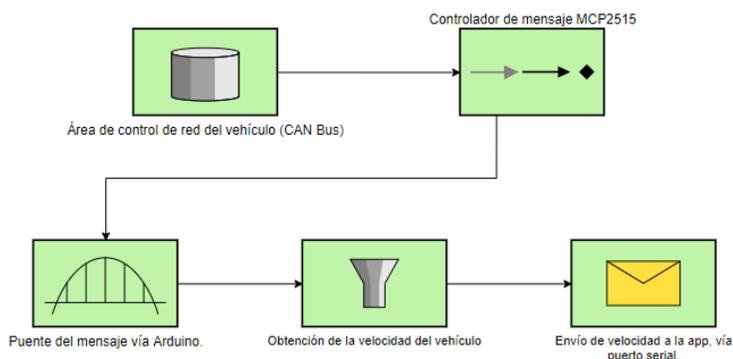
## 2.2 Aplicación que reproduce audio capturado al interior de un vehículo a combustión.

Para realizar pruebas de valoración sobre la importancia de la realimentación sonora al conductor a la hora de manejar, se desarrolla una aplicación que sincroniza el audio capturado en el vehículo de combustión y la reproduce en el vehículo eléctrico sincronizado con la velocidad. Esta aplicación consta de tres partes, las cuales son: La conexión entre vehículo y aplicación vía puerto serial, el diseño sonoro de la aplicación y por supuesto la reproducción de este junto con la velocidad, estos pasos se procederán a explicar a continuación a lo largo del capítulo.

### 2.2.1 Conexión vehículo con aplicación vía puerto serial.

Para sincronizar la velocidad del vehículo eléctrico con los sonidos capturados en el vehículo a combustión, es importante ver la forma como se conecta el vehículo con la aplicación y como se obtienen esos datos en tiempo real para ser enviados vía puerto serial. La siguiente Figura expresa la conexión entre vehículo y aplicación. La Figura 21 expresa el diagrama de flujo a seguir.

**Diagrama de flujo, obtención y envío de velocidad en tiempo real en vehículo eléctrico a la aplicación.**



*Figura 21 Diagrama de flujo, obtención y envío de velocidad en tiempo real en el vehículo eléctrico a la aplicación. (Fuente: Propia)*

Como se expresa, lo primero que se debe hacer es realizar la conexión de los datos que ofrece el área de control de los vehículos; para ello se usó el circuito integrado MCP2515. Este se encarga de ser el puente entre el área de control de los vehículos y el dispositivo Arduino, para posteriormente enviar únicamente el dato de velocidad en tiempo real, vía puerto serial a la aplicación para que esta lo pueda sincronizar con los sonidos capturados. La Figura 22 muestra el diagrama de conexión realizado para obtener los datos de velocidad del vehículo.

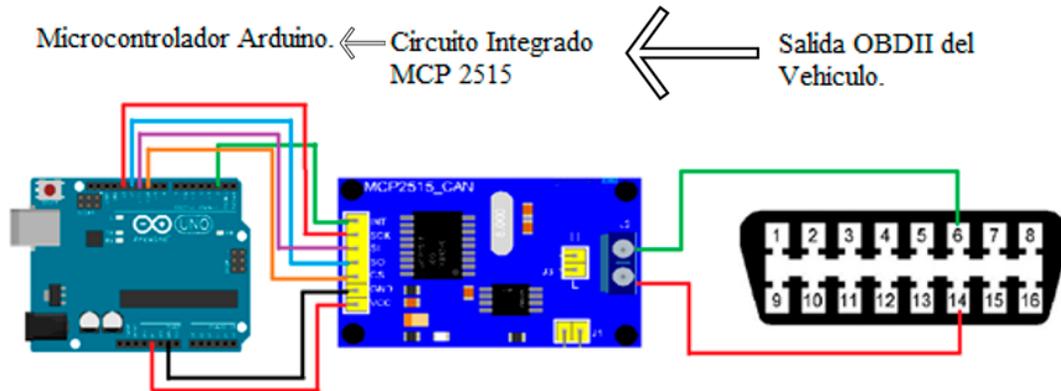


Figura 22. Diagrama de conexión entre la salida OBDII y Arduino. (Fuente: Propia).

En el IDE Arduino, por medio de la librería “mcp\_can” se logra la traducción de los datos, se ubica el dato de velocidad y se envía a la aplicación desarrollada gracias al puerto serial donde se conecta el Arduino a un computador. El circuito integrado MCP2515, trabaja con el protocolo SPI de datos, con una entrada proveniente del conector OBD2 del vehículo devuelve todos los datos del vehículo, por lo cual es necesario esta librería “mcp\_can” para ubicar y enviar únicamente la velocidad.

### 2.2.2 Diseño sonoro de la aplicación.

Para el diseño sonoro de la aplicación que reproduce el sonido capturado de un vehículo a combustión en un vehículo eléctrico, se usó el software FMOD Studio (versión 2.01.8), la cual es un DAW que se usa en la industria de videojuegos para reproducir sonidos, teniendo en cuenta la programación orientada a eventos (POE). Este proceso se realizó creando una línea de tiempo de 0 hasta el valor de 50 la cual representa los valores de velocidad, esta línea de tiempo se le asocia a la variable “Velocidad” y esta se reproduce según sea una estancia de aceleración o desaceleración, la Figura 21 muestra el diagrama de flujo de cómo funciona el DAW FMOD Studio.

### Diagrama de flujo FMOD Studio

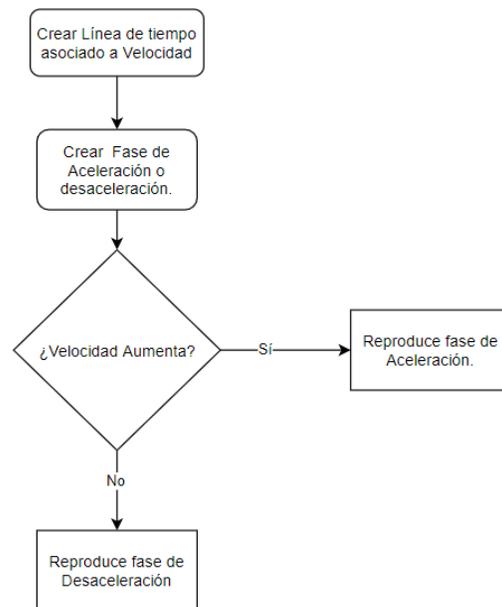


Figura 23. Diagrama de flujo FMOD Studio. (Fuente: Propia).

Una vez creada la línea de tiempo se realiza la asociación, con la aplicación creando un constructor dentro del Software Unreal Engine, el cual es el software de creación de la aplicación, por medio del plugin nativo de FMOD Studio para Unreal Engine 4.

#### 2.2.3 Diseño de la aplicación.

Una vez realizado el diseño sonoro de la aplicación y el protocolo de conexión con esta, se realiza la unión de estos elementos en la aplicación realizada con el Software Unreal Engine en su versión 4.26, esta aplicación debe conectar el puerto serial y el FMOD Studio por lo que se procede a explicar cómo es esta conexión.

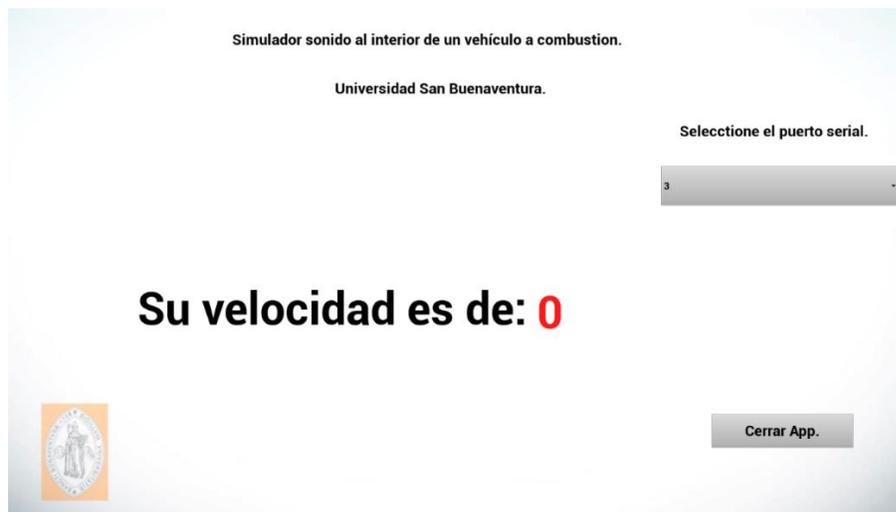
#### Conexión Arduino Unreal Engine.

Para la conexión entre Arduino se usó el plugin “UE4Duino” con la que se abre la aplicación para poder leer los datos que se envíen por el puerto serial al que esté conectado el Arduino, el cual se puede seleccionar dentro de la aplicación. Una vez se seleccione el puerto serial la aplicación

comienza a importar esos datos que se envían a una frecuencia de 115.200 Baudios y se imprime en pantalla.

### **Diseño visual de la aplicación.**

La aplicación es diseñada a partir de una simple interfaz donde está un botón para cerrar la aplicación, un menú desplegable en donde el usuario final selecciona el puerto serial donde quiere leer los datos y un velocímetro que le indica al conductor a qué velocidad está circulando como se aprecia en la Figura 24.



*Figura 24 Interfaz gráfica de la aplicación que reproduce el sonido capturado al interior del vehículo. (Fuente: Propia).*

### **2.3 Aplicación de pruebas a conductores sobre realimentación sonora.**

Una vez realizada la caracterización y desarrollo de la aplicación que sincroniza el sonido capturado con la velocidad del vehículo, se procede a tratar el criterio subjetivo de una población específica de conductores, ya que son los principales protagonistas del estudio en cuestión. En total fueron 15 conductores de un rango amplio de años de experiencia manejando, para así, comprobar las impresiones que los conductores tienen (Ver Anexo VII) ante un estímulo sonoro como lo es un motor a combustión. Con el fin de recoger de forma completa esta información requerida se realizaron preguntas de identificación de experiencia, que son preguntas preliminares que nos indican información del conductor sometido a la prueba, también preguntas postprueba que nos da la información requerida sobre realimentación sonora y sobre otros ítems de evaluación del sonido

reproducido y unas preguntas de orden reflexivas y comparativas para tener un punto de comparación de sonidos con base en la experiencia de la prueba y así preguntar por la importancia de un sonido al interior para un conductor que vehículo eléctrico.

### 2.3.1 Especificaciones de la encuesta.

A continuación, se muestra información pertinente en la Tabla 15, tomando elementos del modelo propuesto en la norma ISO-15666.

<i>Área temática</i>	<i>Ítem</i>	<i>Tema</i>	<i>Información Requerida</i>
<i>Diseño Global.</i>	1	Datos de la encuesta	Encuesta realizada el día 14 de mayo del 2021
	2	Sitio de ubicación	Bogotá D.C, Colombia.
	3	Selección del sitio.	Carrera 103 entre Calles 77 y 73.
	4	Propósito del estudio.	Evaluar la importancia de la realimentación sonora al conductor en el interior de un vehículo.
	5	Tamaño del sitio.	1.92 Km.
<i>Muestra de encuesta.</i>	6	Selección de la muestra.	Conductores de vehículos, mayores de 18 años con al menos un año de experiencia.
	7	Tamaño de la muestra.	15 conductores
<i>Colección de datos de la encuesta.</i>	8	Método de encuesta	Cara a cara después de realizar la prueba con aplicación.
	9	Precisión de la muestra estimada	15 encuestados que no tienen experiencia previa en manejo de vehículos eléctricos.
<i>Condiciones acústicas</i>	10	Fuente de ruido.	Aplicación sincronizada a la velocidad que reproduce sonido de motor a combustión, y sonido propio del tren de potencia de un vehículo eléctrico.
	11	Medidas de ruido.	Entre 58 y 75 dBA
	12	Periodo de tiempo.	20 minutos Aprox.
	13	Posición de referencia.	Motor eléctrico y de combustión ubicado en el centro del vehículo y sonido reproducido en auriculares DTX910.

*Tabla 15. Especificaciones de la encuesta (con base en la norma ISO 15666).*

Es importante para el desarrollo, añadir que la velocidad máxima permitida en la vía de la prueba es de 50 Km/h, como lo establece el código nacional de tránsito y el Decreto 126 para la ciudad de Bogotá.

### 2.3.2 Preguntas Preliminares a la prueba.

A los conductores se le realizaron unas preguntas previas a la realización de la prueba, dichas preguntas son con el objetivo de identificar la experiencia previa del conductor, cuánto tiempo lleva conduciendo y de si tiene experiencia con vehículos eléctricos o no.

Pregunta 1: *¿De cuánto tiempo es su experiencia manejando vehículos en años?*

En este caso los encuestados tenían un rango de experiencia variado, el rango de este tiempo de experiencia está entre el año y los 45 años experiencia, la moda en cuanto a tiempo de experiencia se encuentra en los rangos de 0 a 10 años y 10 a 20 años. La Figura 25 expresa los datos de los entrevistados, siendo el eje Y, la frecuencia de respuestas en intervalos de 10 años y el eje X la cantidad de años de experiencia manejando.

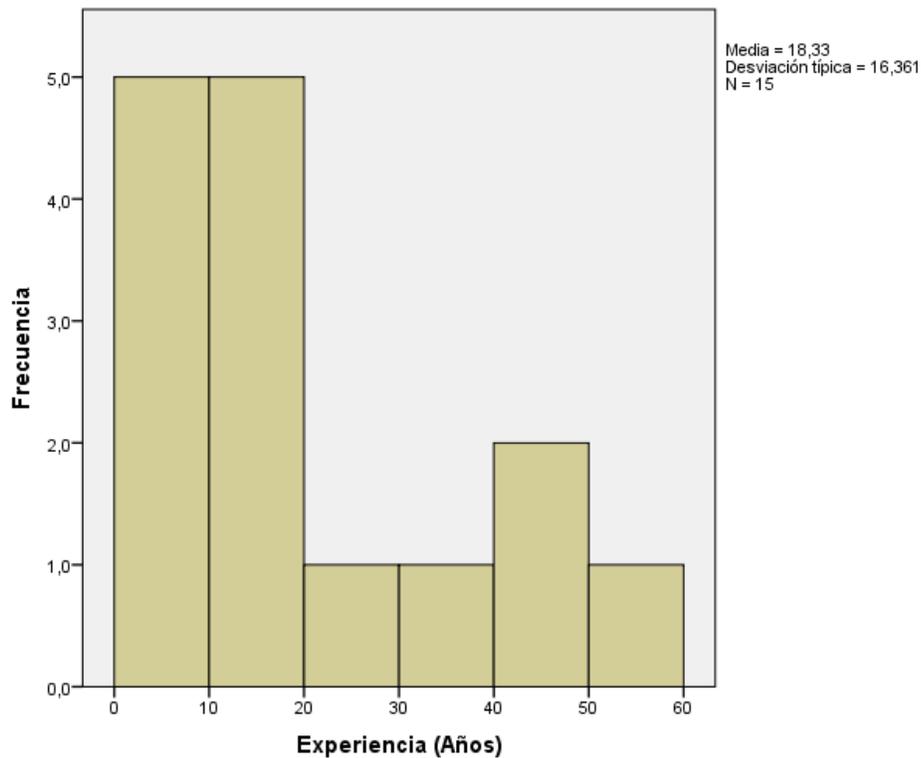


Figura 25 Histograma de experiencia de conductores en años, Eje Y frecuencia de respuestas, eje X intervalos de experiencia en años. (Fuente: Propia).

La media de experiencia es de 18.33 años, con una desviación estándar de 10,36, por lo que la población es variada y en general es gente con bastante experiencia por lo que existe un criterio de los conductores sobre cómo es la forma de manejar y que se necesita para tener toda la información posible a la hora de conducir.

Pregunta 2: *Seleccione una o varias: ¿En qué situaciones considera que el sonido de un motor a combustión al interior del vehículo le brinda información como conductor?*

El objetivo de esta pregunta es identificar en qué situaciones se tiene en cuenta el sonido del motor a combustión. Es importante saber esto para determinar las situaciones donde el sonido específicamente produce una realimentación sonora al conductor.

Se presentaron las siguientes situaciones a escoger:

- Estado de encendido o apagado del vehículo.
- Información sobre cuándo hay que meter la siguiente marcha, en el caso de un vehículo manual o automático secuencial.
- Información acerca de, a qué velocidad el vehículo está circulando.
- Problemas de fallos mecánicos del vehículo.
- Información de aceleración y desaceleración.
- Ninguna de las anteriores.
- Otras.

Los resultados se presentan en la Figura 26.

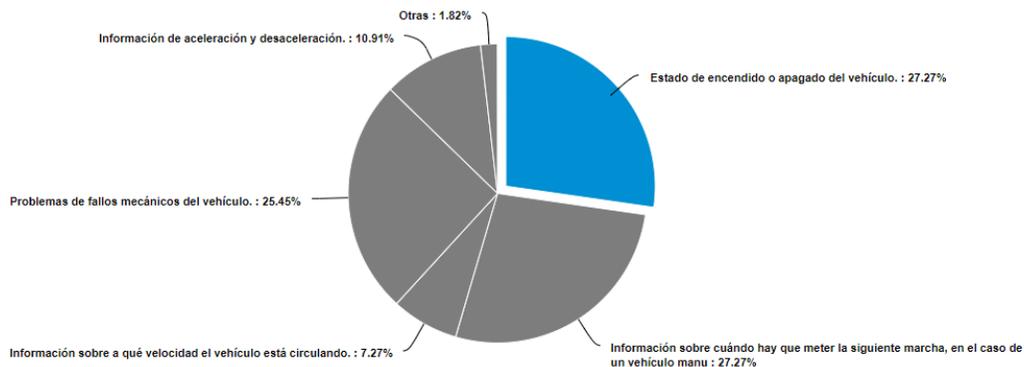


Figura 26. Diagrama de pastel, situaciones de importancia para conductores. (Fuente: Propia).

De los resultados se puede observar, que para todos los conductores el sonido del motor les da información del estado de encendido del vehículo, información sobre cuándo se debe meter la siguiente marcha y sobre posibles problemas mecánicos, información de velocidad y aceleración no son ítems de los cuales no se tienen los conductores saquen mucha información por medio del sonido del motor. En cuanto a otros, se reportó que el sonido del motor le da información de si el carro está forzado o le falta potencia, a la hora de ir de subida.

### 2.3.3 Preguntas Posteriores a la prueba de manejo.

Pregunta 1: *¿Qué tan semejante es el sonido reproducido al sonido de un motor a combustión interna al interior de un vehículo?*

El objetivo de esta pregunta tiene que ver con la identificación del sonido reproducido únicamente se usó en el vehículo eléctrico puesto que el sonido reproducido era el sonido del motor a combustión y no había ningún participante con experiencia en vehículo eléctrico que pudiera asemejarlo en el caso de la prueba para el vehículo a combustión con sonido de motor eléctrico reproducido. El objetivo es ver si este sonido de motor a combustión reproducido se asemeja al que se percibe en un vehículo a combustión al manejarlo cotidianamente, esta pregunta se evaluó en una escala continua como se aprecia en la Figura 27.

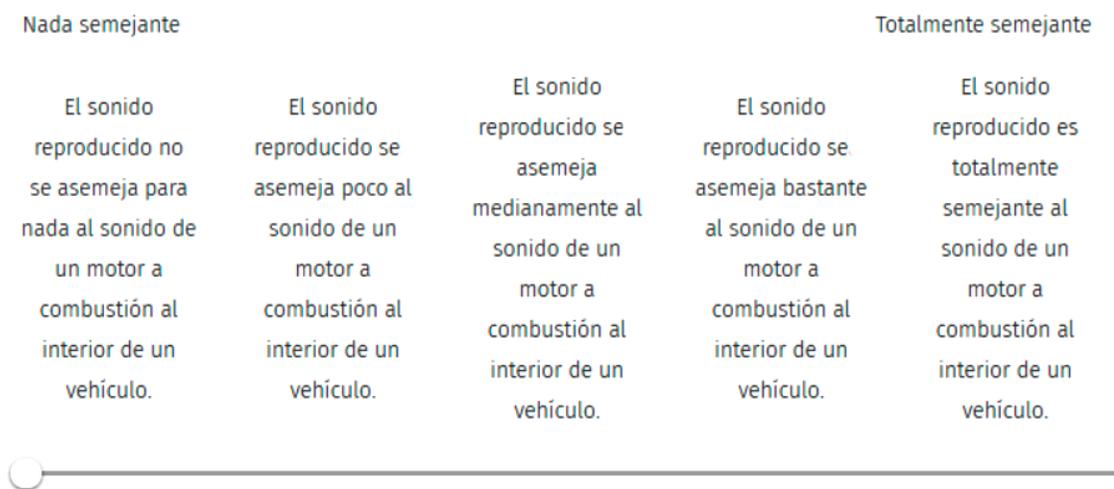


Figura 27. Escala verbal usada para preguntar acerca de semejanza del sonido. (Fuente: Propia).

A continuación, se asocia cada criterio a una escala de valoración numérica continua de 1 a 5, siendo 1: nada semejante y 5: totalmente semejante, obteniendo así un valor promedio de 4.253. A continuación, se muestra los resultados de los descriptores estadísticos sobre la pregunta de semejanza del sonido del motor a combustión para los participantes.

<b>Descriptivos</b>		Estadístico	Error típ.
	Media	4,253	0,0524
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior Límite superior	4,141 4,366
	Media recortada al 5%	4,254	
	Mediana	4,300	
	Varianza	0,041	
Semejanza	Desv. típ.	0,2031	
	Mínimo	3,8	
	Máximo	4,7	
	Rango	0,9	
	Amplitud intercuartil	0,1	
	Asimetría	-,085	0,580
	Curtosis	2,077	1,121

*Tabla 16. Parametros de estadística descriptiva de la semejanza del sonido de motor a combustión reproducido.*

Como se puede observar en la Tabla 16 hay varios datos importantes a analizar, la primera es que la media que es de 4,253 con lo que significa que, de manera general, la votación de los participantes indica que el nivel de semejanza del sonido reproducido es bastante. Lo anterior está respaldado con el valor mínimo que fue de 3.8 y la máxima de 4.7 con lo cual los datos obtenidos se encuentran en un rango menor a 1; es decir, que todos los datos están cerca al criterio de semejanza en el cual está la media.

También, se puede evidenciar que el valor de desviación estándar es de 0.20, que es un valor que muestra que los datos no están muy dispersos con respecto a la media, igualmente el valor del coeficiente de Curtosis es positivo lo cual indica que hay una concentración de los datos muy cerca de la media, con lo cual se concluye que las respuestas en su mayoría dan un indicio de unanimidad sobre el criterio de semejanza que representa la media.

### 2.3.4 Pregunta comparativas.

Se realizó una pregunta comparativa con respecto a la experiencia de la aplicación de la prueba en donde se le pidió al encuestado que realice una comparación para ver qué sonido le proporciona mayor realimentación sonora.

Pregunta 1: *Comparando el sonido reproducido y el sonido del vehículo eléctrico. ¿Qué sonido le proporcionó más realimentación sonora a usted como conductor?*

Los resultados fueron contundentes al observar que el 73,33% de las respuestas afirman que del motor a combustión les dio mayor realimentación como conductor debido a que este sonido es mayormente perceptible y en varias ocasiones se manifestó la costumbre del sonido a la hora del manejo. El 26.67% restante eligió el motor eléctrico debido a que sienten que se siente mejor la velocidad ya que predomina el ruido “del viento”, es decir el ruido friccional, y el de rodadura. La Figura 28 nos muestra los resultados de esta pregunta.

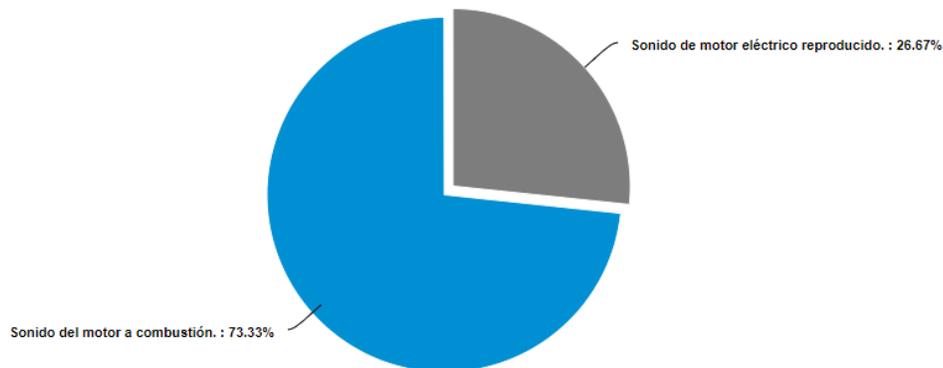


Figura 28. Resultados, preferencia de conductor sobre realimentación sonora. (Fuente: Propia).

### 2.3.5 Pregunta reflexiva

Se realizó una pregunta cuyo objetivo es saber la posición de los conductores en cuanto a la necesidad de tener un sonido al interior que brinden dicha realimentación sonora.

Pregunta 1: *¿Es importante para usted como conductor tener un sonido al interior que le brinde realimentación sonora acerca de diferente información del vehículo (Aceleración y/o velocidad) a la hora de manejar?*

Para esta pregunta la mayoría de las respuestas están a favor de colocar un sonido que brinde información sobre el estado de manejo a la hora de abordar un vehículo eléctrico. Esta pregunta se evaluó en una escala continua presentada como se observa en la Figura 29.

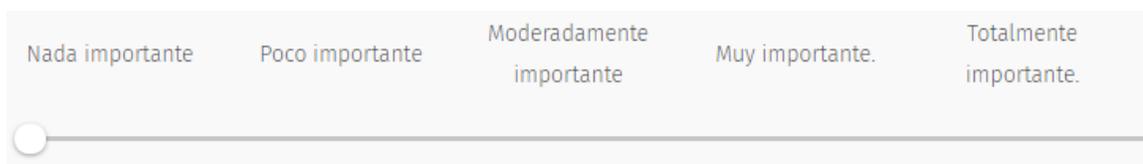


Figura 29. Escala verbal, importancia de sonido de motor en conductores. (Fuente: Propia).

A continuación, se asemejó cada criterio a una escala de valoración numérica continua de 1 a 5, siendo 1: nada importante y 5: totalmente importante para obtener así un valor promedio de 3.33. La Tabla 17 muestra los componentes descriptivos de la pregunta.

Descriptivos		Estadístico	Error típ.	
Importancia	Media	3,3333	,17826	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	2,9510	
		Límite superior	3,7157	
	Media recortada al 5%	3,3537		
	Mediana	3,5000		
	Varianza	,477		
	Desv. típ.	,69041		
	Mínimo	1,90		
	Máximo	4,40		
	Rango	2,50		
	Amplitud intercuartil	1,00		
	Asimetría	-,467	,580	
	Curtosis	-,389	1,121	

*Tabla 17. Parametros de estadística descriptiva de la importancia de un sonido de motor para conductores.*

Como se puede observar en la Tabla 17 hay varios datos importantes a analizar, la primera es que la media que es de 3.333 con lo que significa que, de manera general, la votación de los participantes indica que el nivel de importancia de un sonido es moderadamente importante, es decir que no es importante del todo. Para este caso en particular se observa un rango de 2.50 con un valor mínimo de 1.90 y un valor máximo de 4,40. Además, se puede ver que en este caso existe una dispersión de los datos observando el valor de desviación estándar es mayor y el valor de curtosis es negativo por lo que significa que los valores dados no giran en torno a la media, por lo anterior, se puede considerar que existe una diferencia considerable de opiniones por parte de los participantes.

Se coloca a disposición de los entrevistados, una zona de observaciones donde ellos pueden justificar su respuesta. Entre las respuestas se encontró, que la mayoría de gente piensa que la importancia es cuestión de costumbre, y, que, al no haber cambios en un vehículo eléctrico, esta realimentación sonora se necesite bastante menos. Sin embargo, factores como saber si el vehículo está apagado, o saber qué tanto hay que aplicar el acelerador para dar potencia al vehículo son factores en los que sí debería haber un sonido que entregue esta información.

### **2.3.6 Preguntas relacionadas con la realimentación sonora.**

Una vez explicado el término realimentación sonora a los conductores se les hizo una pregunta sobre su percepción de este término en lo que fue su experiencia de manejo durante la prueba, el objetivo de esta pregunta es claramente preguntar por la percepción de una variable subjetiva, la cual es la variable que finalmente se debe asociar a las variables psicoacústicas objetivas anteriormente descritas en los vehículos eléctricos y de combustión. Esta pregunta se realizó para cada rango de velocidad entre 10 y 50 Km/h a velocidad constante, una vez el conductor realizó sus dos recorridos por cada velocidad se realizaron las siguientes preguntas:

*Pregunta 1: ¿Qué tanta realimentación como conductor le proporciona el motor a combustión al interior del vehículo?*

Con esta pregunta se indujo al conductor a la variable subjetiva importante para el desarrollo de este estudio. Se les pidió a los encuestados que asemejaran su experiencia a uno de los criterios presentados en la Figura 30.

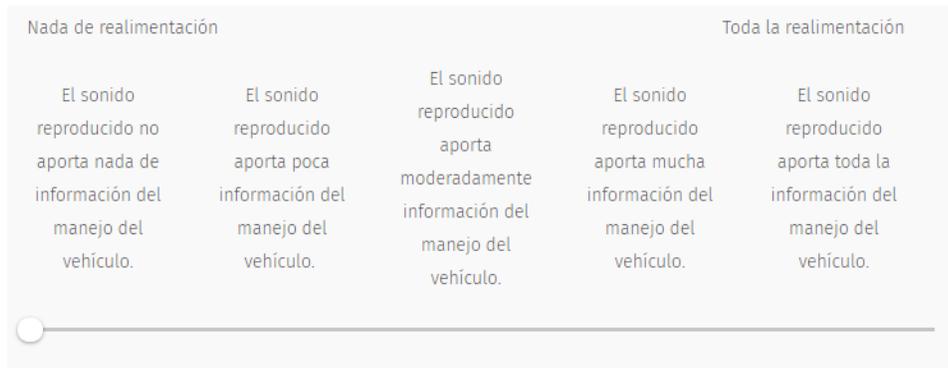


Figura 30. Escala verbal para evaluar la realimentación sonora para el sonido del motor del vehículo. (Fuente: Propia).

A continuación, se asocia cada criterio a una escala de valoración numérica continua de 1 a 5, siendo 1: que el sonido no aporta nada de realimentación y 5: aporta toda la realimentación. La Tabla 18 es la Tabla de la media de la realimentación sonora por velocidad que se obtuvo para el análisis estadístico.

Velocidad (Km/h)	Media de realimentación sonora para el motor a combustión.
10	2.77
20	2.85
30	3.06
40	3.13
50	3.29

Tabla 18. Realimentación sonora de motor a combustión en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo a combustión.

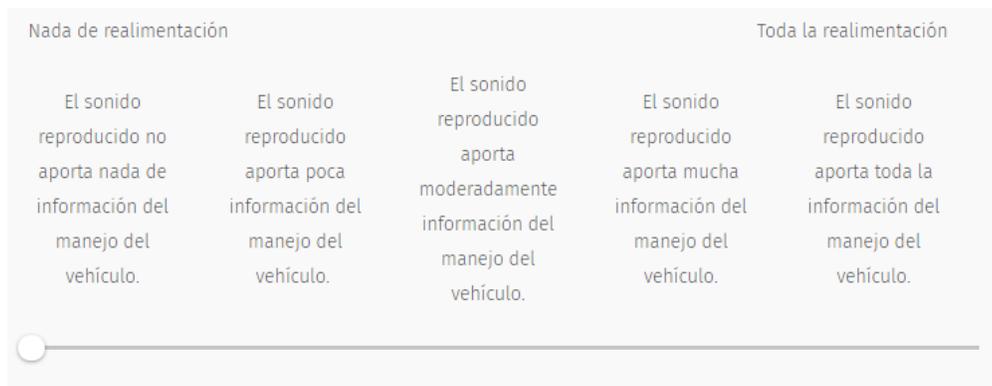
La Tabla 18 muestra los valores de la media de realimentación sonora por cada velocidad, para los conductores manejando el vehículo a combustión, lo cual corresponde a la primera prueba. Para la segunda prueba se reproduce el sonido del motor a combustión a través de auriculares de estudio, en el vehículo eléctrico. La Tabla 19 muestra los puntajes de realimentación sonora del sonido de motor a combustión reproducido en vehículo eléctrico.

Velocidad (Km/h)	Media de realimentación sonora obtenida para el motor a combustión reproducido en EV.
10	3.23
20	2.98
30	3.30
40	3.14
50	3.23

*Tabla 19. Realimentación sonora de motor a combustión reproducido en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo eléctrico.*

*Pregunta 1: ¿Qué tanta realimentación como conductor le proporciona el sonido del motor eléctrico al interior del vehículo?*

Con esta pregunta se indujo al conductor a la variable subjetiva importante para el desarrollo de este estudio. Se les pidió a los encuestados que asemejaran su experiencia a uno de los criterios presentados en la Figura 31.



*Figura 31. Escala verbal para evaluar la realimentación sonora del sonido reproducido.*

*(Fuente: Propia).*

A continuación, al igual que la pregunta anterior, se asemejó cada criterio a una escala de valoración numérica continua de 1 a 5, siendo 1: que el sonido no aporta nada de realimentación y

5: aporta toda la realimentación. La Tabla 20 es la Tabla de la media por velocidad que se obtuvo para el análisis estadístico.

Velocidad (Km/h)	Media de realimentación sonora obtenida para el motor a eléctrico reproducido en CV.
10	2.31
20	2.45
30	2.63
40	2.82
50	2.97

*Tabla 20. Realimentación sonora del motor eléctrico reproducido en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas en vehículo a combustión.*

La Tabla 20, muestra los valores de la media de realimentación sonora del sonido de motor eléctrico reproducido por cada velocidad para los conductores manejando el vehículo a combustión. Para la segunda prueba el motor a eléctrico fue el sonido propio del vehículo. La Tabla 21, muestra los puntajes de realimentación sonora del sonido de motor eléctrico.

Velocidad (Km/h)	Media de realimentación sonora para el motor eléctrico.
10	2.72
20	2.64
30	3.26
40	3.00
50	3.08

*Tabla 21. Realimentación sonora del motor eléctrico en función de la variable velocidad obtenido en las pruebas subjetivas.*

## Capítulo 3: Análisis de resultados.

### 3.1 Caracterización de vehículos eléctrico y de combustión.

A continuación, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos durante la caracterización de los vehículos eléctricos y de combustión. Se recuerda que se tomaron, 10 muestras de 5 segundos para cada velocidad en intervalos de 10 Km/h en el rango de velocidades de 0 a 50 Km/h.

Primeramente, se tomaron los datos de las medidas de dispersión, de la varianza y la desviación estándar, para cada variable medida, que se presentan en la Tabla 22 para el vehículo a combustión y la Tabla 23 para el vehículo eléctrico.

Variable	Desviación estándar		Varianza	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Leq	5.843	6.389	34.145	40.813
Sonoridad	2.933	3.127	8.604	9.779
Nitidez	0.707	0.074	0.005	0.006
Aspereza	0.216	0.242	0.046	0.059
Tonalidad	0.115	0.053	0.013	0.003

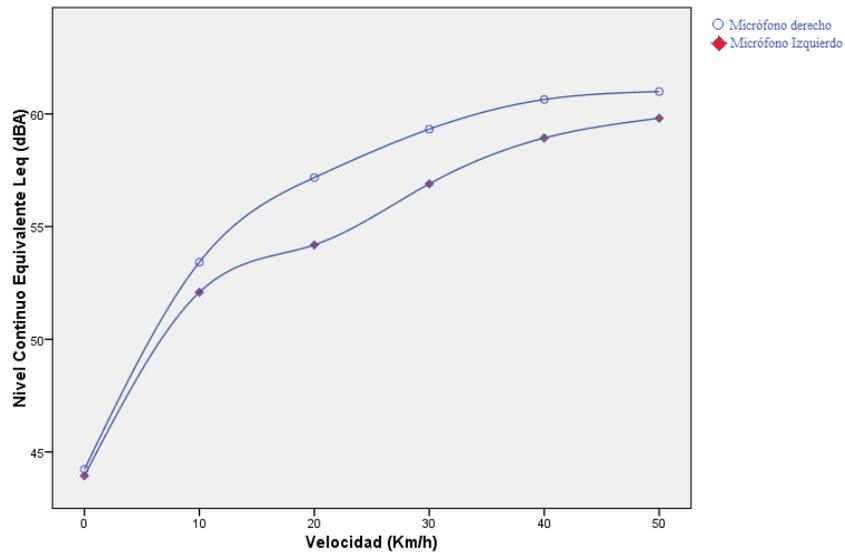
Tabla 22. Medidas de dispersión para variables medidas en el vehículo a combustión.

Variable	Desviación estándar		Varianza	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Leq	5.843	6.389	34.145	40.813
Sonoridad	2.933	3.127	8.604	9.779
Nitidez	0.707	0.074	0.005	0.006
Aspereza	0.216	0.242	0.046	0.059
Tonalidad	0.115	0.053	0.013	0.003

Tabla 23. Medidas de dispersión para variables medidas en el vehículo eléctrico.

### 3.1.1 Nivel continuo equivalente.

Para el nivel continuo equivalente, primero se puede ver qué pasó en el lado derecho del vehículo a combustión con respecto al lado izquierdo del mismo. Comparando ambos micrófonos se puede determinar cómo en el micrófono derecho existe un mayor nivel comparado con el micrófono izquierdo, la Figura 32 expresa la comparativa entre los lados derecho e izquierdo del conductor.



*Figura 32. Nivel continuo equivalente en función de la velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).*

Para el vehículo eléctrico se encontró igualmente que en el micrófono derecho existe un mayor nivel comparado con el micrófono izquierdo ya que el tren de potencia eléctrico del vehículo se encuentra en el centro delantero del vehículo y a la derecha del conductor, la Figura 33 expresa la comparativa entre los lados derecho e izquierdo del conductor.

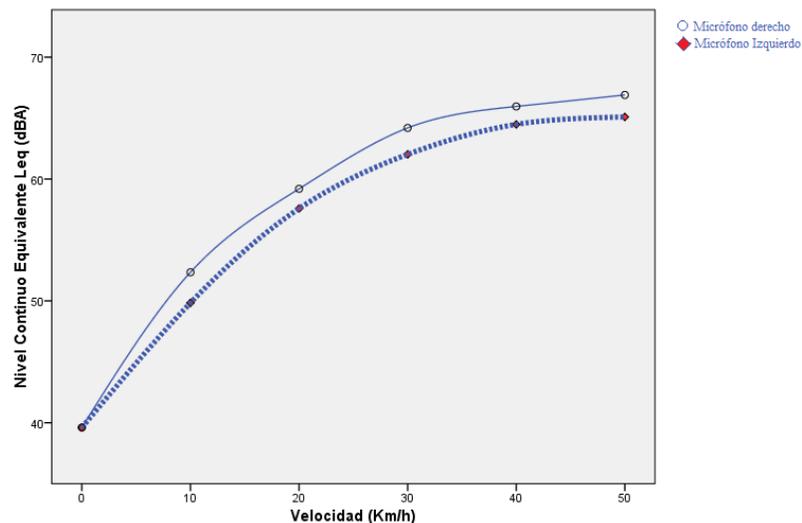


Figura 33. Nivel continuo equivalente en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de eléctrico. (Fuente: Propia).

Continuando con la comparativa, se comparan los niveles tanto en el vehículo eléctrico como en el de combustión, la Tabla 24 muestra los resultados para cada velocidad en cuanto a nivel continuo equivalente se refiere.

	Vehículo a combustión		Vehículo eléctrico.	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Velocidad (Km/h)	LeqA (dBA)	LeqA (dBA)	LeqA (dBA)	LeqA (dBA)
0	43.94	44.23	39.61	39.61
10	52.09	53.42	49.84	52.35
20	54.19	57.18	57.58	59.20
30	56.90	59.33	62.03	64.19
40	58.93	60.64	64.48	65.96
50	59.81	60.99	65.09	66.90

*Tabla 24. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, del LeqA (dBA) tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a diferentes velocidades.*

En cuanto a velocidades bajas, en los primeros 10 Km/h el nivel continuo es mayor en el vehículo a combustión, sin embargo, a medida que la velocidad aumenta e intervienen las demás fuentes de sonido la diferencia se inclina a favor del vehículo eléctrico que muestra un incremento en el nivel continuo equivalente mayor en el vehículo eléctrico. Entre los motivos por los cuales se puede explicar este fenómeno puede ser que el motor puede enmascarar las demás fuentes de sonido presentes, además la construcción de otros vehículos puede influir en el nivel continuo equivalentes en términos de calidad de materiales al interior, forma del vehículo, entre otros.

### 3.1.2 Sonoridad.

Tal como se realiza para el nivel continuo equivalente, en cuanto a sonoridad primero se compara lado izquierdo contra lado derecho de los vehículos caracterizados. Comparando los valores obtenidos en ambos micrófonos se observa como en el micrófono derecho existe una mayor sonoridad perceptual comparado con el micrófono izquierdo, lo cual es consecuente con lo observado en el nivel continuo equivalente; es decir, la sonoridad aumenta a medida que aumenta la velocidad y es mayor en el lado derecho que en el lado izquierdo del conductor. La Figura 34 muestra los cambios de sonoridad.

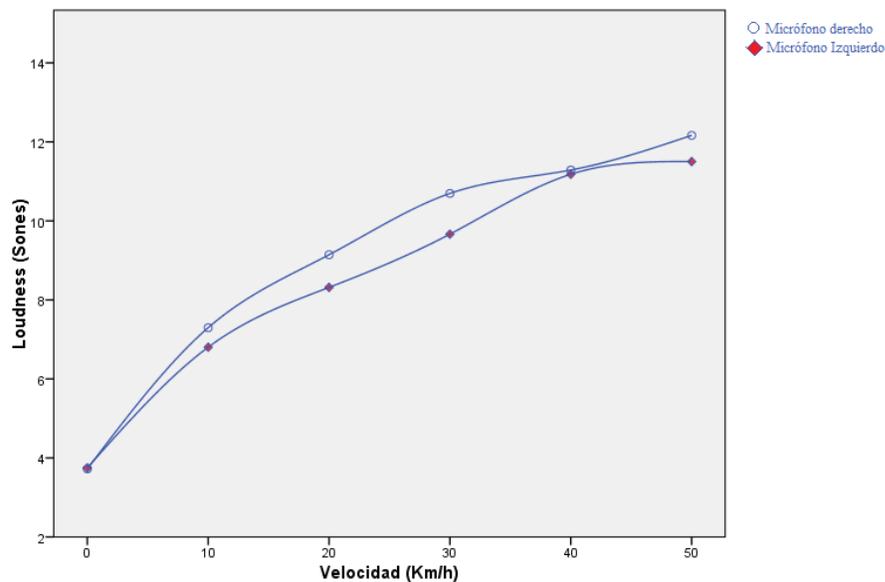


Figura 34. Sonoridad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).

A 40 Km/h existe una ligera coincidencia entre izquierda y derecha esto puede ser debido a que en 40 Km/h la transmisión inserta la segunda marcha por lo que las revoluciones por minuto del vehículo están bajas y se asemeja a lo que ocurre en velocidades inferiores a 10 Km/h.

Para el vehículo eléctrico se puede determinar cómo en el micrófono derecho se percibe un mayor nivel de sonoridad comparado con el micrófono izquierdo, se puede observar un comportamiento parecido al del nivel continuo donde también el lado dominante es el lado derecho del conductor como se muestra en la Figura 35.

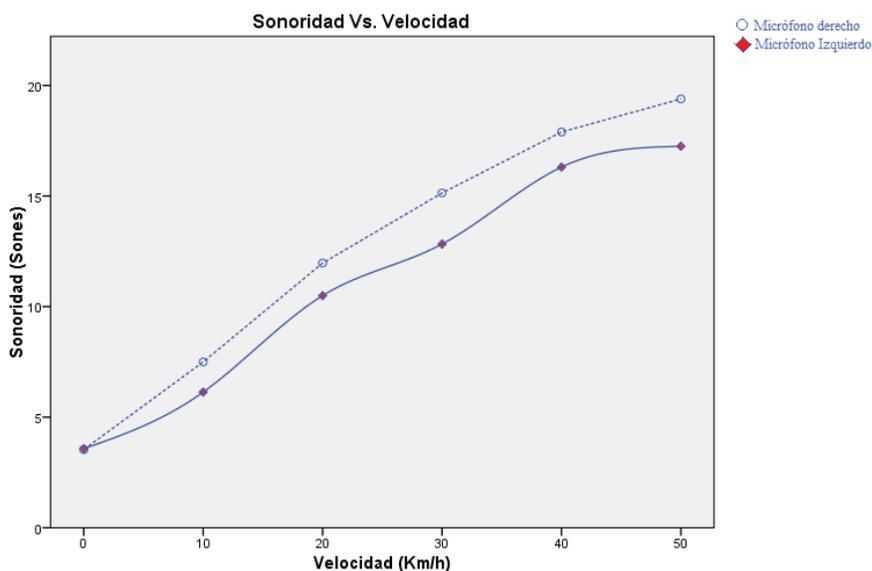


Figura 35. Sonoridad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia).

Se puede observar en la gráfica que no existe un punto en donde los valores capturados por los dos micrófonos sean similares, como sí ocurre en el vehículo a combustión, y se observa un crecimiento más homogéneo entre el par de micrófonos; esto puede ser debido a la ausencia de una transmisión de marchas, ya que el motor es lineal en cuanto al funcionamiento y su funcionamiento depende de la cantidad de aceleración que se aplique. La comparación de ambos vehículos es consecuente con lo visto anteriormente en el nivel continuo equivalente, ya que al ser mayor en el

vehículo eléctrico se esperaba que la sonoridad también fuera mayor, la Tabla 25, muestra cómo fue la comparación entre ambos vehículos.

	Vehículo a combustión		Vehículo eléctrico	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Velocidad	Sonoridad (Sones)	Sonoridad (Sones)	Sonoridad (Sones)	Sonoridad (Sones)
0	3.7500	3.7217	3.5726	3.5362
10	6.8025	7.2963	6.1350	7.4994
20	8.3171	9.1430	10.4959	11.9699
30	9.6652	10.6954	12.8279	15.1386
40	11.1802	11.2880	16.3077	17.8975
50	11.5016	12.1651	17.2511	19.3924

*Tabla 25. Comparativa de la sonoridad en Sones del vehículo de combustión vs. el vehículo eléctrico, tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente, a distintas velocidades.*

Como se puede observar en la Tabla 25 el nivel de sonoridad es mayor en el vehículo eléctrico con un rango de 13.71 en el micrófono izquierdo y de 15.86 en el micrófono derecho, comparado respectivamente con el valor de rango en el vehículo a combustión de 7.75 para el micrófono izquierdo y 8,45 para el micrófono derecho.

Al tener solamente dos vehículos para realizar esta comparativa, está claro que existe un sesgo, lo que ahora hay que analizar para dar una hipótesis, es el porqué de esta diferencia teniendo en cuenta que en el vehículo eléctrico no existe un motor de combustión, ni una transmisión, ni un escape de gases que comúnmente se relacionan como el sonido del motor.

Lo primero que hay que destacar es la optimización dada la gama del vehículo a combustión, que en el caso particular se recuerda que es el Mazda CX-7. Una de las mejoras que conllevan a los resultados previamente mostrados es la disposición de la mejora del motor que tiene la tecnología Skyactive, el cuál conlleva una mejora sustancial en el motor, el recorrido de los pistones, y vibración logrando unas mejoras a nivel de control de ruido al interior (Kudo, 2013). En la Figura 36 se observa el nivel de mejora en los motores implementados comparado con los motores base desarrollados, al interior del vehículo.

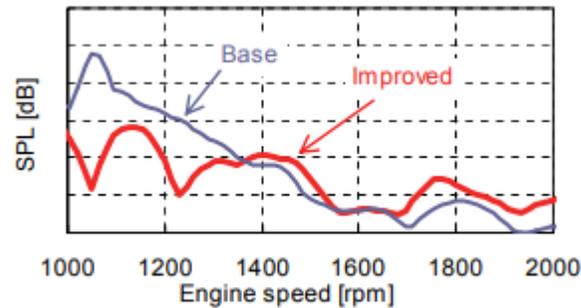


Figura 36. Comparativa de nivel de presión sonora entre el motor base y las mejoras para la implementación del vehículo. Fuente: (Kudo, 2013).

Otra de las mejoras está en la disminución del coeficiente de arrastre del vehículo, el cual es de 0.34, con lo cual disminuye la incidencia del ruido friccional o aerodinámico del vehículo, sobre todo en alta frecuencia. Entre otros ítems también se encuentra la calidad de materiales al interior del vehículo, la disposición de la suspensión del vehículo, la rigidez estructural del chasis y las llantas, que a pesar de tener el mismo tamaño que las del vehículo eléctrico, el perfil y el recubrimiento pueden ser distinto al estar orientado a una gama más alta comparado con el vehículo eléctrico BYD.

### 3.1.3 Nitidez.

En términos de nitidez perceptual, en el micrófono derecho existe un mayor nivel de nitidez comparado con el micrófono izquierdo, como se observa en la Figura 37.

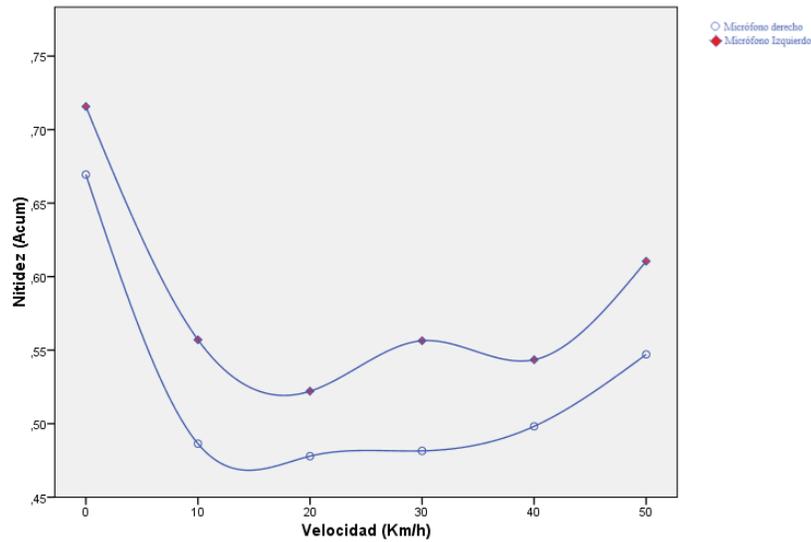


Figura 37. Nitidez en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).

En este caso se evidencia que en el vehículo a combustión el aporte de nitidez perceptual viene dado por parte del micrófono izquierdo, el cual está más expuesto a otras fuentes sobre todo en frecuencias altas como lo son el ruido de rodadura producto de la interacción llanta y pavimento, así mismo el ruido friccional o aerodinámico. El otro motivo que afecta es la presencia en mayor medida de contenido en baja frecuencia del motor y la transmisión: el lado derecho se encuentra más expuesto a estas dos últimas fuentes sonoras mencionadas. En cuanto al vehículo eléctrico, en ambos micrófonos se puede determinar cómo en el micrófono derecho se aprecia ligeramente una mayor nitidez comparado con el micrófono izquierdo, como se observa en la Figura 38.

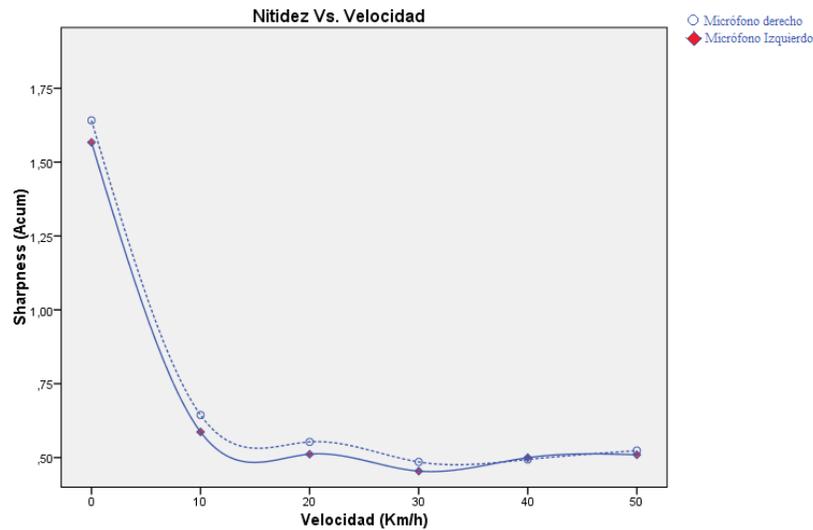


Figura 38. Nitidez en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia).

Viendo la gráfica se evidencia un comportamiento contrario al reportado en el vehículo a combustión, esto puede ser debido a que en un vehículo eléctrico el aporte del motor eléctrico es mayor en alta frecuencia, ya que este se ubica en el rango de frecuencias entre 600 y 840 Hz y podemos encontrar armónicos hasta los 12 KHz, por lo que el aporte de ruido aerodinámico, por interacción llanta pavimento y el tren de potencia equilibran la percepción de nitidez de ambos entre los micrófonos izquierdo y derecho.

Observando los datos de ambos vehículos, se observa que los valores son similares entre sí, con diferencias en el punto correspondiente a 0 Km/h, donde la influencia a fuentes externas es mayor en el vehículo eléctrico ante la ausencia de algún sonido: no existe diferencia entre el vehículo encendido o apagado; es decir, no existe una fuente como en el vehículo a combustión que es el motor, por lo que el valor de nitidez se hace mayor en el vehículo eléctrico que en el de combustión en dicha velocidad. A partir de ahí, los valores son similares entre ambos vehículos como se ve en la Tabla 26.

	Vehículo a combustión		Vehículo eléctrico.	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho

Velocidad	Nitidez (Acum)	Nitidez (Acum)	Nitidez (Acum)	Nitidez (Acum)
0	0.7157	0.6694	1.5672	1.6412
10	0.5571	0.4864	0.5869	0.6442
20	0.5221	0.4779	0.5115	0.5531
30	0.5564	0.4815	0.4541	0.4852
40	0.5435	0.4982	0.4996	0.4935
50	0.6105	0.5471	0.5094	0.5237

Tabla 26. Comparativa del vehículo de combustión vs. el vehículo eléctrico, de la nitidez en Acum tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades.

### 3.1.4 Aspereza.

Comparando ambos micrófonos se observa como en el micrófono izquierdo existe una mayor aspereza perceptual comparado con el micrófono izquierdo. Lo anterior se puede explicar con la como se observa en la Figura 39.

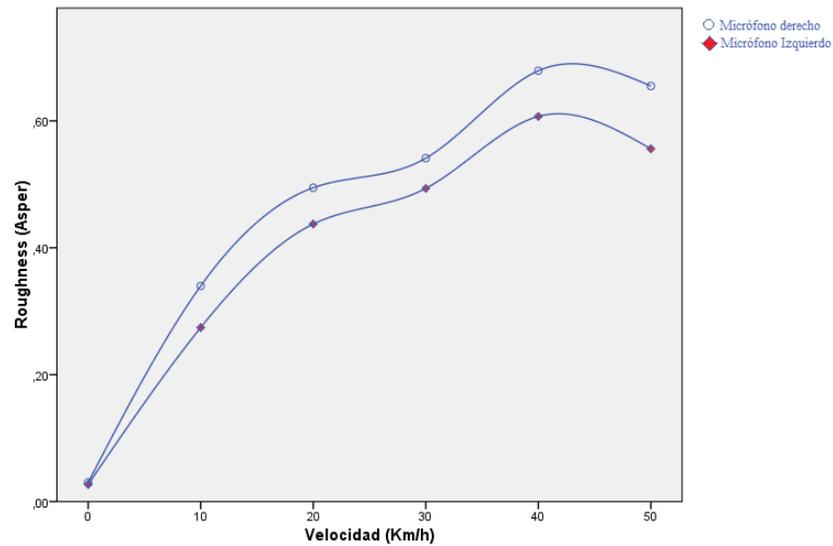


Figura 39. Aspereza en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).

Observando los datos se puede realizar la hipótesis de que el micrófono derecho percibe un mayor nivel de aspereza perceptual en cuanto a la construcción del vehículo con su motor central, este motor presenta a medida que aumenta la velocidad una mayor fluctuación en la banda de 20 a 300 Hz. Sin embargo, en 50 Km/h, parece haber un descenso lo cual sería recomendable ver qué pasa con la aspereza a altas velocidades y como la interacción llanta y pavimento interviene en esa sensación de aspereza.

Realizando la comparación del vehículo eléctrico se puede ver como ambos micrófonos se puede determinar como en el micrófono derecho se aprecia ligeramente una mayor aspereza comparado con el micrófono izquierdo, excepto a los 30 y 40 Km/h como se observa en la Figura 39.

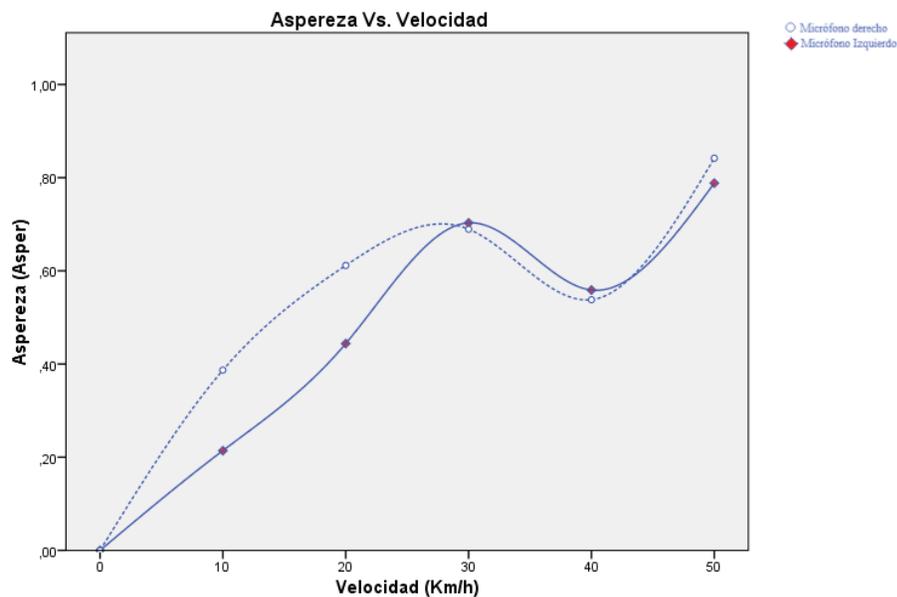


Figura 40. Aspereza en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia).

En cuanto a la comparación entre vehículos, a 0 Km/h se evidencia que la fuente principal del sonido mecánico está dada mayoritariamente por el motor, con un sonido que no es fluctuante o áspero. En esta velocidad, sin embargo, en el vehículo a combustión hay un valor; pero este valor sigue siendo muy pequeño, por lo que se puede deducir, que las otras fuentes son las que intervienen en mayor medida en este valor de aspereza perceptual como se puede ver en la Tabla 27.

	Vehículo a combustión		Vehículo eléctrico.	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Velocidad	Aspereza (Asper)	Aspereza (Asper)	Aspereza (Asper)	Aspereza (Asper)
0	0.0270	0.0301	0.0000	0.0000
10	0.2743	0.3398	0.2142	0.3869
20	0.4374	0.4946	0.4439	0.6115
30	0.4936	0.5412	0.7030	0.6894
40	0.6070	0.6790	0.5588	0.5380
50	0.5560	0.6550	0.7882	0.8416

*Tabla 27. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, de la nitidez en Asper tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades.*

### **3.1.5 Tonalidad.**

Comparando ambos micrófonos en el vehículo a combustión, se observa que en el micrófono izquierdo existe una captura con mayor percepción de tonalidad en el lado derecho del conductor, comparado con el micrófono izquierdo. Sin embargo, en general a medida que avanza la velocidad, la tonalidad disminuye como se ve en la Figura 41.

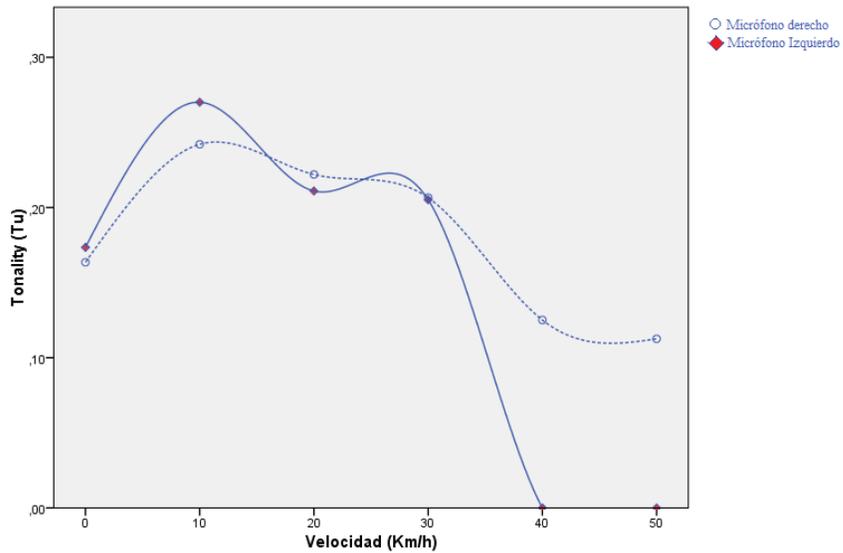


Figura 41. Tonalidad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor de combustión. (Fuente: Propia).

Una posible explicación al fenómeno observado es que a medida que la velocidad aumenta, las demás fuentes sonoras generan ruido aleatorio, como por es el caso del ruido aerodinámico o un ruido sin ningún componente tonal (ruido producido por las llantas), donde se enmascara el componente tonal principal del motor. Sin embargo, en 40 y 50 Km/h es donde más se ve este fenómeno, ya que el micrófono izquierdo es el menos expuesto al motor y en cambio sí está expuesto a las otras dos fuentes de sonido restantes.

Para el vehículo eléctrico en ambos micrófonos antes de los 10 Km/h la tonalidad tienen valores mayores en el micrófono derecho; a partir de esa velocidad, es mayor la percepción de tonalidad en el micrófono izquierdo, como se muestra en la Figura 42.

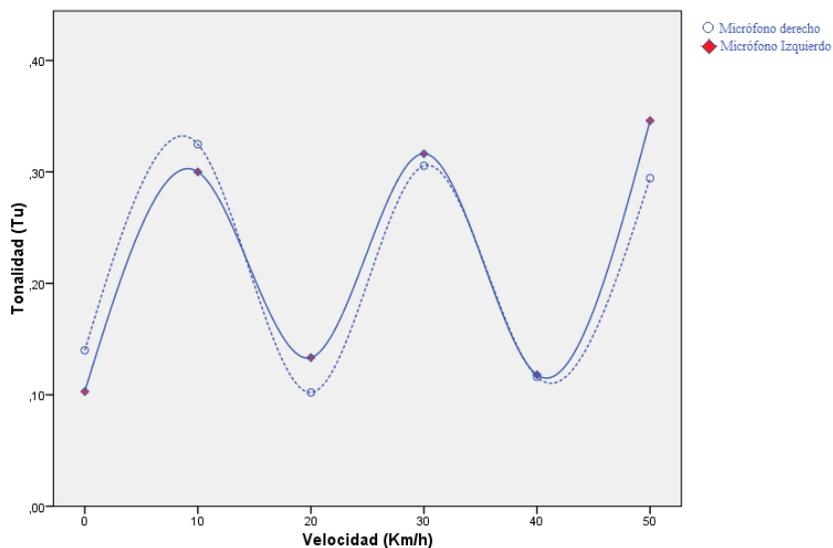


Figura 42. Tonalidad en función de la variable de velocidad para micrófonos derecho e izquierdo del motor eléctrico. (Fuente: Propia).

A continuación, se procede a mostrar en la Tabla 28, las diferencias anteriormente mostradas, donde para las velocidades de 0 Km/h y 10 Km/h se muestra una diferencia en el valor de tonalidad en  $tu$  de 0.04 y 0.02, respectivamente.

	Vehículo a combustión		Vehículo eléctrico.	
	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho	Micrófono Izquierdo	Micrófono Derecho
Velocidad	Tonalidad (tu)	Tonalidad (tu)	Tonalidad (tu)	Tonalidad (tu)
0	0.1735	0.1636	0.1030	0.1400
10	0.2701	0.2421	0.3000	0.3248
20	0.2110	0.2220	0.1334	0.1021
30	0.2051	0.2065	0.3163	0.3055
40	0.0000	0.1251	0.1180	0.1161
50	0.0000	0.1126	0.3460	0.2944

*Tabla 28. Comparativa del Vehículo de combustión vs el Vehículo eléctrico, de la Tonalidad en tu, tanto del micrófono derecho como del micrófono izquierdo respectivamente a distintas velocidades.*

Para este comportamiento tan particular es difícil de formular con claridad una hipótesis; lo recomendable es ver cómo el estado de la batería, la regeneración de energía y la conducción afectan el parámetro de tonalidad; o, si, por el contrario, esto sucede debido a la disposición o configuración propia del vehículo.

### **3.2 Análisis estadístico de pruebas subjetivas.**

#### **3.2.1 Análisis de realimentación sonora vehículo a combustión con sonido reproducido de motor eléctrico.**

##### *Análisis del sonido del motor a combustión.*

Primero se realizó una prueba en donde el conductor maneja el vehículo con motor a combustión interna y por medio de auriculares de estudio que se usan para no cambiar la perspectiva del campo estéreo, se reproduce el sonido capturado para la caracterización del vehículo eléctrico y así proceder a aplicar la encuesta para la realimentación sonora en este vehículo.

El primer paso realizado es observar si los datos obtenidos en la caracterización y las pruebas siguen una distribución normal para aplicar una regresión lineal. Para esto, se hace uso del software SPSS. Las pruebas de Shapiro-Wilk sirven para determinar si los datos siguen una distribución normal cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 como en este caso. La Tabla 29 muestra las pruebas de normalidad realizadas a los datos, el coeficiente a evaluar es el de significancia, que debe ser mayor a 0.05 para que este cumpla con el criterio de distribución normal en los datos.

**Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Realimentación_Combustión	,190	5	,200*	,959	5	,802
Km/h	,136	5	,200*	,987	5	,967
dBA	,185	5	,200*	,943	5	,690
Sones	,204	5	,200*	,937	5	,642
Acum	,310	5	,131	,904	5	,431
Asper	,189	5	,200*	,945	5	,700
Tu	,302	5	,152	,812	5	,102

Tabla 29. Pruebas de normalidad de datos.

Una vez realizada la prueba verificando que los datos de todos los micrófonos de todos los vehículos siguieran este mismo parámetro, se procede a realizar las regresiones lineales múltiples a fin de ver el comportamiento de la variable dependiente que en este caso es la realimentación en función de las demás.

### **Método de ingreso forzado**

Con el método de ingreso forzado, se tiene en cuenta todo el conjunto de variables con las cuales se trabaja la ecuación final aplicando el método de mínimos cuadrados para obtener así los coeficientes de cada ítem dentro de esta ecuación. Por tanto, las ecuaciones obtenidas para cada micrófono en el vehículo a combustión son:

$$RMCI = (-0.006 * Velocidad) + (4.731 * Nitidez) + (1.917 * Roughness) + (0.132 * Tonalidad) - 0.368 \quad (33)$$

$$RMCD = (0.142 * LeqA) + (-0.744 * Sharpness) + (-3.598 * Roughness) + (-4.809 * Tonalidad) - 2.078 \quad (34)$$

Siendo RMCI la realimentación en un vehículo a combustión en el lado izquierdo y RMCD en el lado derecho tenemos una ecuación que describe la media obtenida por los datos a diferentes velocidades como se puede observar en la Tabla 30.

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas	Realimentación calculada lado izquierdo	Realimentación calculada lado derecho
10	2,77	2,77	2,76
20	2,85	2,85	2,84
30	3,06	3,06	3,05
40	3,13	3,13	3,12
50	3,29	3,29	3,28

Tabla 30. Realimentación obtenida vs realimentación calculada en lado izquierdo y lado derecho.

Las ecuaciones obtenidas, describen el comportamiento de la realimentación sonora; sin embargo, obtuvo un coeficiente de determinación de 1 para ambos tipos de ecuaciones al igual que en el vehículo a combustión, por lo que se revisa la multicolinealidad que presenta la ecuación.

Revisando los parámetros estadísticos del modelo, la multicolinealidad se explica con el factor FIV (Factor de Inflación de Varianza), el cual indica si existen problemas de multicolinealidad entre variables, es decir si una o más variable dependen de sí mismas o son redundantes en la expresión matemática, por lo que su significancia estadística puede no ser alta. La Tabla 31 describe el FIV en función de las variables para el lado derecho e izquierdo.

VARIABLES	FIV Lado izquierdo	FIV Lado derecho
Velocidad	340.996	-
Nivel continuo equivalente	-	70.135
Sonoridad	-	-
Nitidez	57.750	13.173
Aspereza	180.250	190.613
Tonalidad.	10.508	77.622

*Tabla 31. Factor de inflación de varianza para las variables.*

Como se observa, para el lado derecho e izquierdo del conductor, debido a que los valores de FIV son mayores que 10, existe una redundancia en los valores. Debido a que existen variables con valores no-existentes (dentro de la Tabla 31), el algoritmo de reducción de variables saca de la ecuación variables que no representan una significancia estadística, por lo que se excluyeron de la ecuación de realimentación.

Sin embargo, a pesar de hallar una ecuación que describe de manera cercana los valores obtenidos, no se cumple con la condición de multicolinealidad, por lo que se procede a realizar el método hacia adelante, un método recomendado para experimentación como es el caso.

#### ***Método hacia adelante de regresión lineal.***

Con el método hacia adelante se busca ver cuáles son los descriptores que más influyen en la variable dependiente, estudiando los principales descriptores del cambio de la varianza en la variable dependiente. En este caso, se realizó la búsqueda de esas variables por lo que las ecuaciones de realimentación sonora para cada lado se muestran a continuación.

$$RMCI = (0.013 * Velocidad) + 2.624 \quad (35)$$

$$RMCD = (0.013 * Velocidad) + 2.624 \quad (36)$$

Para el caso del RMCI su coeficiente de determinación es de 0.979 con un FIV de 1 y para el RMCD su coeficiente de determinación es de 0.979 con un FIV con un valor de 1, por lo que esta

ecuación se ajusta al criterio de no existencia de multicolinealidad en una regresión lineal válida estadísticamente hablando. Sin embargo, se evidencia que la ecuación para ambos lados (izquierdo y derecho) es la misma, generándose una única expresión matemática para la realimentación sonora en el vehículo a combustión interna sin importar el lado a evaluar, ya que la variable que explica el mayor porcentaje de la varianza es la *velocidad*. Esto se debe a que la velocidad es la variable de control durante la prueba y se obtienen los mismos valores que explican en su mayoría el cambio de la varianza. La Tabla 32 muestra la representación de la media de datos obtenidos en cada velocidad y sus respectivos cálculos para cada lado:

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas	Realimentación calculada lado izquierdo	Realimentación calculada lado derecho
10	2,77	2,75	2,75
20	2,85	2,88	2,88
30	3,06	3,01	3,01
40	3,13	3,14	3,14
50	3,29	3,27	3,27

*Tabla 32. Realimentación obtenida vs Realimentación calculada al lado derecho al lado izquierdo a distintas velocidades.*

Ahora bien, dado que el número de intervalos de velocidad analizados es reducido y limitado, al analizar la homocedasticidad del modelo se encuentra que el análisis de residuos genera un gráfico muy disperso, lo cual indica que el sistema no cumple con el supuesto de la homocedasticidad de la regresión lineal. Sin embargo, este problema se puede solucionar, realizando este proceso con intervalos más pequeños de velocidad y observando si los residuos tienen un comportamiento con menos dispersión. Esta limitante de homocedasticidad, por lo tanto, es un factor que se evidencia en todos los modelos de regresión lineal (de la relación entre la realimentación sonora y las variables objetivas medidas) hacia adelante en este trabajo. La Figura 43 evidencia el gráfico de dispersión de la realimentación sonora.

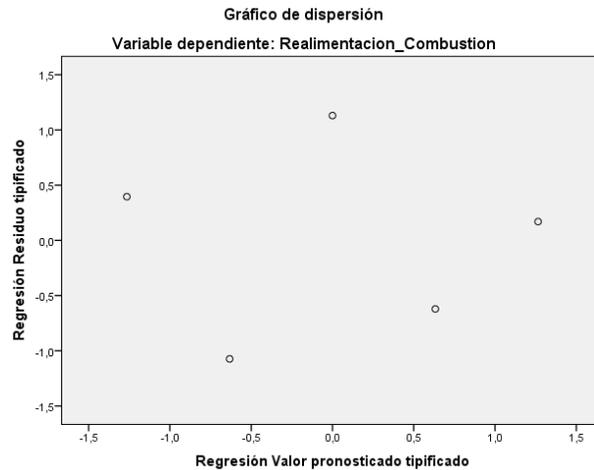


Figura 43. Gráfico de dispersión de los residuos estandarizados y pronosticados. (Fuente: Propia).

#### **Análisis del sonido del motor eléctrico reproducido.**

Para hallar la expresión matemática que relaciona los valores de realimentación sonora y las variables psicoacústicas medidas, se implementa el análisis con el método de mínimos cuadrados, al igual que en el punto anterior. El primer paso realizado es observar si los datos recogidos en la caracterización y las pruebas siguen una distribución normal para aplicar una regresión lineal. Para esto se hace uso del software SPSS. Las pruebas de Shapiro-Wilk sirven para determinar si los datos siguen una distribución normal cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 como en este caso. La Tabla 33 muestra las pruebas de normalidad realizadas a los datos, el coeficiente a evaluar es el de significancia que debe ser mayor a 0.05 para que este cumpla con el criterio de distribución normal en los datos.

#### **Pruebas de normalidad**

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Realimentación_Eléctrico	,157	5	,200*	,974	5	,898
Km/h	,136	5	,200*	,987	5	,967
dBA	,238	5	,200*	,876	5	,292
Sones	,194	5	,200*	,946	5	,712
Acum	,307	5	,140	,910	5	,470
Asper	,163	5	,200*	,967	5	,856
Tu	,302	5	,155	,817	5	,111

*Tabla 33. Pruebas de normalidad para datos.*

Una vez realizada la prueba verificando que los datos de todos los micrófonos de todos los vehículos siguieran este mismo parámetro, se procede a realizar las regresiones lineales múltiples a fin de ver el comportamiento de la variable dependiente que en este caso es la realimentación en función de las demás.

***Método de ingreso forzado.***

Con el método de ingreso forzado, se tiene en cuenta todo el paquete de variables con las cuales se trabaja la ecuación final; las ecuaciones para cada micrófono en el vehículo a combustión son:

$$RMEI = (0.069 * Sonoridad) + (0.581 * Nitidez) + (-0.151 * Aspereza) + (0.499 * Tonalidad) + 1.427 \quad (37)$$

$$RMED = (0.018 * Velocidad) + (0.002 * Nitidez) + (-0.128 * Aspereza) + (0.050 * Tonalidad) + 2.162 \quad (38)$$

Siendo RMEI la realimentación en un vehículo a combustión en el lado izquierdo y RMED en el lado derecho tenemos una ecuación que describe la media obtenida por los datos a diferentes velocidades como se puede observar en la Tabla 19.

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas.	Realimentación calculada lado izquierdo.	Realimentación calculada lado derecho.
10	2,31	2,31	2,31
20	2,45	2,45	2,45
30	2,63	2,63	2,63
40	2,82	2,82	2,82
50	2,97	2,97	2,97

*Tabla 34. Comparativa de realimentación obtenida y realimentación calculada.*

Las ecuaciones obtenidas, describen el comportamiento de la realimentación sonora; sin embargo, obtuvo un coeficiente de determinación de 1 para ambos tipos de ecuaciones al igual que en el vehículo a combustión, por lo que se revisa la multicolinealidad que presenta la ecuación. Revisando los parámetros estadísticos del modelo, la multicolinealidad se explica con el factor FIV (Factor de Inflación de Varianza), el cual indica si existen problemas de multicolinealidad entre variables, es decir si una o más variable dependen de sí mismas o son redundantes en la expresión

matemática, por lo que su significancia estadística puede no ser alta. La Tabla 35 describe el FIV en función de las variables para el lado derecho e izquierdo.

VARIABLES	FIV Lado izquierdo	FIV Lado derecho
Velocidad	-	3.397
Nivel continuo equivalente	-	-
Sonoridad	20.300	-
Nitidez	10.737	2.773
Aspereza	48.855	2.954
Tonalidad.	6.623	1.309

*Tabla 35. Factor de varianza para datos del vehículo eléctrico.*

Como se observa para el lado izquierdo del conductor, debido a que los valores del FIV son mayores que 10, existe una redundancia en los valores. A pesar de hallarse una ecuación que describe de manera cercana los valores obtenidos, no se puede establecer un modelo de regresión línea válido estadísticamente por lo que se procede a realizar el método hacia adelante, un método recomendado para experimentación como es el caso.

Sin embargo, en el lado derecho vemos como existe un modelo de regresión lineal que no presenta problemas de multicolinealidad, sin embargo, hay que recordar que por los intervalos de velocidad estudiados no se puede determinar la homocedasticidad del sistema por lo que es un modelo teórico que representa la realimentación sonora en el lado derecho del conductor, por lo tanto, no se realiza el método hacia adelante en este caso particular.

#### ***Método hacia adelante de regresión lineal.***

Con el método hacia adelante se busca ver cuáles son los descriptores que más influyen en la variable dependiente, estudiando los principales descriptores del cambio de la varianza en la variable dependiente. En este caso se realizó la búsqueda de esas variables, por lo que la ecuación 39 muestra la realimentación sonora para el lado izquierdo.

$$RMEI = (0.017 * Velocidad) + 2.129 \quad (39)$$

Para el caso del RMEI su coeficiente de determinación es de 0.944 con un FIV de 1 y por lo que esta ecuación se ajusta al criterio que indica que no debe existir multicolinealidad en una regresión lineal válida estadísticamente hablando. La Tabla 36 muestra la representación de la media de datos obtenidos en cada velocidad y sus respectivos cálculos para cada lado:

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas	Realimentación calculada lado izquierdo
10	2,31	2,30
20	2,45	2,47
30	2,63	2,64
40	2,82	2,81
50	2,97	2,98

*Tabla 36 Realimentación obtenida en las pruebas y realimentación calculada.*

### 3.2.2 Análisis de realimentación sonora vehículo eléctrico con sonido de motor a combustión reproducido.

#### *Análisis del sonido de motor a combustión reproducido.*

Esta prueba consiste en que cada conductor maneja el vehículo eléctrico y en los auriculares de estudio se reproduce el sonido de las capturas del motor a combustión para ver cuál es la diferencia entre tener una realimentación sonora de un vehículo a combustión al manejar un vehículo eléctrico. Se requiere evaluar qué tan importante o determinante es el sonido de un motor a la hora de analizar la realimentación sonora.

En un primer paso, se observa si los datos recogidos en la caracterización y las pruebas siguen una distribución normal para aplicar una regresión lineal. Las pruebas de Shapiro-Wilk sirven para determinar si los datos siguen una distribución normal cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 como en todos los casos. La Tabla 37 muestra las pruebas de normalidad realizadas a los datos, recordando que el coeficiente a evaluar (de significancia de Shapiro-Wilk) debe ser mayor a 0.05 para que se cumpla con el criterio de distribución normal en los datos

#### Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Km/h	,136	5	,200*	,987	5	,967
dBA	,185	5	,200*	,943	5	,690
Sones	,204	5	,200*	,937	5	,642
Acum	,310	5	,131	,904	5	,431
Asper	,189	5	,200*	,945	5	,700
Tu	,302	5	,152	,812	5	,102
Realimentación_Combustión	,236	5	,200*	,904	5	,433

*Tabla 37. Pruebas de normalidad de datos vehículo a combustión.*

Una vez realizada la prueba verificando que los datos de todos los micrófonos de todos los vehículos siguieran la condición de distribución normal, se procede a realizar las regresiones lineales múltiples con el fin de ver el comportamiento de la variable dependiente que en este caso es la realimentación en función de todas las demás.

***Método de ingreso forzado.***

Con el método de ingreso forzado, se tiene en cuenta todo el paquete de variables con las cuales se trabaja la ecuación final; las ecuaciones para cada micrófono en el vehículo a combustión son:

$$RMCI = (-0.094 * Velocidad) + (22.158 * Nitidez) + (8.889 * Roughness) + (-0.288 * Tonalidad) - 10.533 \quad (40)$$

$$RMCD = (0.311 * LeqA) + (-9.839 * Sharpness) + (-11.603 * Roughness) + (-14.678 * Tonalidad) - 1.098 \quad (41)$$

Siendo RMCI la realimentación en un vehículo a combustión en el lado izquierdo y RMCD en el lado derecho tenemos una ecuación que describe la media obtenida por los datos a diferentes velocidades como se puede observar en la Tabla 38.

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas	Realimentación calculada lado izquierdo	Realimentación calculada lado derecho
10	3,23	3,23	3,23
20	2,98	2,98	2,98
30	3,30	3,30	3,30
40	3,14	3,15	3,14
50	3,23	3,24	3,23

*Tabla 38. Realimentación obtenida vs realimentación calculada en lado izquierdo y lado derecho.*

Las ecuaciones obtenidas, describen el comportamiento de la realimentación sonora; sin embargo, obtuvo un coeficiente de determinación de 1 para ambos tipos de ecuaciones, por lo que se revisa la multicolinealidad que presenta la ecuación. Revisando los parámetros estadísticos del modelo, la multicolinealidad se explica con el factor FIV (Factor de Inflación de Varianza), el cual

indica si existen problemas de multicolinealidad entre variables, es decir si una o más variable dependen de sí mismas o son redundantes en la expresión matemática, por lo que su significancia estadística puede no ser alta. La Tabla 39 describe el FIV en función de las variables para el lado derecho e izquierdo.

VARIABLES	FIV Lado izquierdo	FIV Lado derecho
Velocidad	340.996	-
Nivel continuo equivalente	-	70.135
Sonoridad	-	-
Nitidez	57.750	13.173
Aspereza	180.250	190.613
Tonalidad.	10.508	77.622

*Tabla 39. Factor de inflación de varianza para las variables.*

Como se observa, para el lado derecho e izquierdo del conductor, debido a que los valores de FIV son mayores que 10, existe una redundancia en los valores. Así mismo, existen variables que no contienen valores ya que el algoritmo de reducción de variables saca de la ecuación variables que no representan una significancia estadística por lo que se excluyeron de la ecuación de realimentación.

A pesar de hallar una ecuación que describe de manera cercana los valores obtenidos, no se puede establecer un modelo de regresión lineal válido estadísticamente. Sin embargo, al ver que los valores de realimentación sonora no crecen de manera lineal junto con la variable de velocidad, no se puede realizar el proceso de regresión lineal hacia adelante.

#### ***Análisis del sonido del motor eléctrico del vehículo.***

Para hallar la expresión matemática que relaciona los valores de realimentación sonora y las variables psicoacústicas medidas, se implementa el análisis con el método de mínimos cuadrados, como se ha hecho hasta ahora. En un primer paso, se observa si los datos recogidos en la caracterización y las pruebas siguen una distribución normal para aplicar una regresión lineal. Las pruebas de Shapiro-Wilk sirven para determinar si los datos siguen una distribución normal cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 como en todos los casos. La Tabla 40 muestra las pruebas de normalidad realizadas a los datos, recordando que el coeficiente a evaluar (de significancia de Shapiro-Wilk) debe ser mayor a 0.05 para que se cumpla con el criterio de distribución normal en los datos

## Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Realimentación_Elctrico	,257	5	,200*	,945	5	,702
d	,136	5	,200*	,987	5	,967
dBA	,238	5	,200*	,876	5	,292
Sones	,194	5	,200*	,946	5	,712
Acum	,307	5	,140	,910	5	,470
Asper	,163	5	,200*	,967	5	,856
Tu	,302	5	,155	,817	5	,111

Tabla 40 Pruebas de normalidad de datos vehículo eléctrico.

Una vez realizada la prueba verificando que los datos de todos los micrófonos de todos los vehículos siguieran la condición de distribución normal, se procede a realizar las regresiones lineales múltiples con el fin de ver el comportamiento de la variable dependiente que en este caso es la realimentación en función de todas las demás.

**Método de ingreso forzado.**

Con el método de ingreso forzado, se tiene en cuenta todo el paquete de variables con las cuales se trabaja la ecuación final; las ecuaciones para cada micrófono en el vehículo a combustión son:

$$RMEI = (0.113 * Sonoridad) + (-9.351 * Nitidez) + (-3.097 * Aspereza) + (3.401 * Tonalidad) + 7.158 \quad (42)$$

$$RMED = (0.003 * Velocidad) + (-4.052 * Nitidez) + (-0.441 * Aspereza) + (1.712 * Tonalidad) + 4.914 \quad (43)$$

Siendo RMEI la realimentación en un vehículo a combustión en el lado izquierdo y RMED en el lado derecho tenemos una ecuación que describe la media obtenida por los datos a diferentes velocidades como se puede observar en la Tabla 41.

Velocidad (Km/h)	Realimentación obtenida en las pruebas	Realimentación calculada lado izquierdo	Realimentación calculada lado derecho
10	2,72	2,72	2,72
20	2,64	2,64	2,64

30	3,26	3,26	3,26
40	3,00	3,00	3,00
50	3,08	3,08	3,08

*Tabla 41. Comparativa de realimentación obtenida y realimentación calculada.*

Las ecuaciones obtenidas, describen el comportamiento de la realimentación sonora; sin embargo, se obtuvo un coeficiente de determinación de 1 para ambos tipos de ecuaciones al igual que en el vehículo a combustión, por lo que se revisa la multicolinealidad que presenta la ecuación. Revisando los parámetros estadísticos del modelo, la multicolinealidad se explica con el factor FIV (Factor de Inflación de Varianza), el cual indica si existen problemas de multicolinealidad entre variables, es decir si una o más variable dependen de sí mismas o son redundantes en la expresión matemática, por lo que su significancia estadística puede no ser alta. La Tabla 42 describe el FIV en función de las variables para el lado derecho e izquierdo.

Variabes	FIV Lado izquierdo	FIV Lado derecho
Velocidad	-	2.297
Nivel continuo equivalente	-	-
Sonoridad	20.000	-
Nitidez	13.237	2.973
Aspereza	45.755	2.944
Tonalidad.	8.623	1.319

*Tabla 42 Factor de varianza para datos del vehículo eléctrico.*

Como se observa en el lado izquierdo, los valores del FIV al ser mayores que 10 indican que existe una redundancia en los valores a pesar de que se halla una ecuación que describe de manera cercana los valores obtenidos no se puede establecer un modelo de regresión línea valido estadísticamente. Así mismo, existen variables que no contienen valores ya que el algoritmo de reducción de variables saca de la ecuación variables que no representan una significancia estadística por lo que se excluyeron de la ecuación de realimentación.

Sin embargo, en el lado derecho se observa que existe un modelo de regresión lineal que no presenta problemas de multicolinealidad, sin embargo, recordando que este modelo por la cantidad de datos no cumple con el supuesto de la homocedasticidad, por lo que no se puede tomar como un modelo de regresión lineal que sigue todos los supuestos indicados para el caso. Así mismo, al ver que los valores de realimentación sonora no crecen de manera lineal junto con la variable de velocidad, no se puede realizar el proceso de regresión lineal hacía adelante.

### 3.2.3 Análisis de diferencias de realimentación sonora obtenidas.

A continuación, se procede a realizar la comparativa entre los distintos valores obtenidos en las pruebas subjetivas y cuál es el porcentaje de variación entre ellos para determinar si existe alguna diferencia significativa que permita evaluar la importancia del sonido del motor al interior de un vehículo.

Primero, se asoció a las categorías de las escalas (presentadas de manera verbal), un valor numérico continuo según el criterio entre 1 y 5. Al tomar dos decimales se puede analizar ese intervalo en 400 puntos, donde el factor de diferencia es de 0.25; este valor se multiplica por la diferencia entre los valores obtenidos y así se determina el porcentaje de variación de los valores de realimentación sonora.

#### *Prueba número 1, vehículo a combustión con sonido de motor eléctrico reproducido:*

Para esta prueba, la Tabla 43 muestra los valores obtenidos en la prueba para cada velocidad de realimentación sonora.

Velocidad (Km/h)	Vehículo Eléctrico reproducido	Vehículo de combustión
10	2.31	2.77
20	2.45	2.85
30	2.63	3.06
40	2.82	3.13
50	2.97	3.29

*Tabla 43. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

Ahora, se procede a calcular la diferencia para cada velocidad entre las distintas fuentes y multiplicar por el factor de diferencia, para así obtener el porcentaje de variación. La Tabla 44 muestra la variación de los datos.

Velocidad (Km/h)	Diferencia de realimentación	Porcentaje de variación
10	0.46	11.50%
20	0.40	10.00%
30	0.43	10.67%

40	0.31	7.83%
50	0.33	8.17%

*Tabla 44. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

De esta Tabla se puede evidenciar que la diferencia de la realimentación sonora entre la fuente original del vehículo (Motor a combustión) y la fuente reproducida (Motor eléctrico) varía entre el 8.17% y el 11.5% según la velocidad, lo cual representa un porcentaje de variación bastante bajo a lo esperado para velocidad constante.

***Prueba número 2, vehículo eléctrico con sonido de motor a combustión reproducido:***

Para esta prueba la Tabla 45 nos muestra los valores obtenidos en la prueba para cada velocidad de realimentación sonora.

Velocidad (Km/h)	Vehículo Eléctrico	Vehículo de combustión reproducido
10	2.72	3.23
20	2.64	2.98
30	3.26	3.30
40	3.00	3.14
50	3.08	3.23

*Tabla 45. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

Ahora, se procede a calcular la diferencia para cada velocidad entre las distintas fuentes y multiplicar por el factor de diferencia, para así obtener el porcentaje de variación. La Tabla 46 muestra la variación de los datos.

Velocidad (Km/h)	Diferencia de realimentación	Porcentaje de variación
10	0.50	12.56%
20	0.33	8.35%
30	0.04	1.01%
40	0.14	3.61%

50	0.14	3.57%
----	------	-------

*Tabla 46. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

De esta Tabla se puede evidenciar que la diferencia de la realimentación sonora entre la fuente original del vehículo (motor eléctrico) y la fuente reproducida (motor a combustión) varía entre el 1.01% y el 3.61% para velocidades entre 30 y 50 Km/h. La región donde existe el mayor porcentaje de variación se encuentra en bajas velocidades, donde oscila entre el 8.35% y el 12.56% en las velocidades de 10 y 20 Km/h, lo cual indica que a medida que aumenta la velocidad, para velocidad constante la realimentación sonora es similar; a altas velocidades la fuente del motor apenas tiene efecto en el conductor.

***Variación del motor eléctrico reproducido (vehículo a combustión) y como fuente original (eléctrico) del vehículo:***

Para este análisis, ahora se va a observar cuál es la variación que presenta el sonido de motor eléctrico reproducido en el vehículo a combustión en comparación con el sonido del motor eléctrico original en el vehículo de la segunda prueba (vehículo eléctrico). La Tabla 47 muestra los valores de realimentación sonora obtenida.

Velocidad (Km/h)	Vehículo eléctrico reproducido	Vehículo eléctrico original
10	2.31	2.72
20	2.45	2.64
30	2.63	3.26
40	2.82	3.00
50	2.97	3.08

*Tabla 47. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad del sonido del motor eléctrico reproducido y original.*

Ahora, se procede a calcular la diferencia para cada velocidad entre las distintas fuentes y multiplicar por el factor de diferencia, para así obtener el porcentaje de variación. La Tabla 48 muestra la variación de los datos.

Velocidad (Km/h)	Diferencia de realimentación	Porcentaje de variación
10	0.42	10.41%
20	0.20	4.91%
30	0.63	15.78%
40	0.18	4.49%
50	0.12	2.90%

*Tabla 48. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

De esta Tabla se puede observar que los valores de diferencia no superan el 16% de variación, por lo tanto, la diferencia es baja comparando el nivel de realimentación sonora que se dio para el motor eléctrico en ambas pruebas. El mayor porcentaje de variación se encuentra en 30 Km/h, donde los valores bajos de RPM del motor a combustión tras estar en segunda marcha en la primera prueba pueden ser los causales de la diferencia de la percepción entre el sonido del motor eléctrico reproducido y el sonido original.

***Variación del motor a combustión reproducido y como fuente original (a combustión) del vehículo (a combustión):***

Para este análisis, ahora se observa cuál es la variación que presento el sonido de motor a combustión reproducido en el vehículo eléctrico en comparación al sonido del motor eléctrico original en el vehículo de la segunda prueba. La Tabla 49 nos muestra los valores de realimentación sonora obtenida.

Velocidad (Km/h)	Vehículo de combustión reproducido	Vehículo de combustión
10	3.23	2.77
20	2.98	2.85
30	3.30	3.06
40	3.14	3.13
50	3.23	3.29

*Tabla 49. Valores de realimentación sonora para la variable de velocidad del sonido del motor a combustión reproducido y original.*

Ahora, se procede a calcular la diferencia para cada velocidad entre las distintas fuentes y multiplicar por el factor de diferencia, para así obtener el porcentaje de variación. La Tabla 50 muestra la variación de los datos.

Velocidad (Km/h)	Diferencia de realimentación	Porcentaje de variación
10	0.46	11.47%
20	0.13	3.26%
30	0.24	6.12%
40	0.01	0.28%
50	0.07	1.70%

*Tabla 50. Porcentaje de variación de realimentación sonora para la variable de velocidad.*

De esta Tabla se puede observar que los valores de diferencia no superan el 12% de variación, por lo tanto, la diferencia es aún más baja comparando el nivel de realimentación sonora que se dio para el motor eléctrico en ambas pruebas. Donde existe el mayor porcentaje de variación es en 10 Km/h debido a la diferencia entre los puntajes obtenidos a baja velocidad en el vehículo eléctrico. En el resto de las velocidades la variación fue muy pequeña por lo que el sonido del motor a combustión reproducido en el vehículo eléctrico genera una realimentación similar con el motor en un vehículo a combustión.

## CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que la diferencia del nivel de presión sonora entre el valor mínimo y máximo de la velocidad (es decir entre 0 Km/h y 50 Km/h) es de 17 dB para un vehículo a combustión y 25 dB para el vehículo eléctrico, se puede concluir que el nivel de presión sonora (medido a través del valor de nivel continuo equivalente) es un indicador de aumento en la velocidad que el conductor puede percibir; por lo tanto, él puede basarse en esta información para tomar decisiones a la hora de conducir un vehículo. De forma similar, el parámetro psicoacústico de sonoridad, también cuenta con una diferencia de 8 Sones en el caso del vehículo a combustión y 14 Sones en el caso del vehículo eléctrico, lo cual conlleva a concluir de manera muy similar a lo anteriormente dicho, debido a la gama del vehículo, y disposición desde el desarrollo del vehículo como su manufactura y prestaciones.

El componente de tonalidad en un vehículo de combustión difiere con respecto al vehículo eléctrico en cuanto a que existe una función que se aproxima a encontrar una relación entre la tonalidad y la velocidad con un coeficiente de determinación de 0.90. En contraparte, en un vehículo eléctrico esta percepción varía y no responde a una función matemática específica. Esto puede ser un motivo por el cual se ve afectada la percepción de realimentación sonora en un vehículo eléctrico, siendo ligeramente menor a la del vehículo de combustión.

Al ver los resultados de las pruebas aplicadas a conductores, en el ítem de preguntas posteriores a la prueba, la calificación media obtenida en cuanto a semejanza en la identificación del sonido de un motor al interior de un vehículo eléctrico (4.2), al estar por encima del criterio mínimo de semejanza, se puede concluir que el desarrollo de la aplicación fue apropiado y cumplió con los mínimos requerimientos de diseño para el desarrollo del objetivo de la evaluación de la importancia de la realimentación en conductores por medio de la aplicación de una prueba.

Una vez analizada la diferencia entre los valores obtenidos de realimentación sonora se evidencia que el porcentaje de diferencia entre la realimentación generada por los motores como fuente y como sonido reproducido es bajo al no superar nunca el 16%. De lo anterior, se puede concluir que el sonido de los motores a velocidad constante en los intervalos medidos en esta valoración no es importante en el proceso de obtención de información para la toma de decisiones a la hora de conducir un vehículo.

La obtención de una ecuación con el método de entrada forzada que explica la realimentación sonora obtenida no sigue de forma teórica un modelo de regresión lineal gracias a los altos niveles superiores a un valor de 10 del Factor de Inflación de Varianza (FIV); por lo que esta expresión matemática es simplemente una ecuación obtenida de manera experimental por el método de

mínimos cuadrados. Así mismo, con la cantidad de datos de esta investigación no se puede formular un modelo estadístico que cumpla con todos los supuestos; es decir, que cumpla con todos los requerimientos de una regresión lineal, tales como la homocedasticidad: esto se debe a que este estudio cuenta con una muestra reducida, tanto de personas como de intervalos de velocidad.

Al ver los valores del Factor de Inflación de Varianza (FIV) que se observaron en el método de regresión lineal, se puede concluir que existió multicolinealidad entre las variables a tener en cuenta para describir la realimentación sonora. Por lo tanto, se puede evidenciar que en trabajos futuros se puede investigar acerca de dependencias entre las variables psicoacústicas medidas en este trabajo. (Nivel continuo equivalente, Sonoridad, Nitidez, Aspereza y Tonalidad).

## RECOMENDACIONES

*Se recomienda realizar estudios que midan el nivel de realimentación sonora y su importancia a lo largo del tiempo. En el caso de la conducción de vehículos eléctricos, los conductores reportaron tanto de manera formal como informal, que existe una curva de aprendizaje y costumbre, que los encamina a que la realimentación sonora en estos vehículos no sea necesaria. Entonces, la recomendación es, analizar cuidadosamente en tiempos prolongados, qué sucede con esta curva de aprendizaje. Por ejemplo, durante las pruebas, los conductores expresaron que el sonido se hace innecesario a medida que pasa el tiempo debido a que no se necesita meter cambios y se empieza a entender como está avanzando el vehículo sin necesidad de escuchar un motor.*

*También se recomienda un estudio de caracterización acústica, con separación de fuentes, con sistemas de medición apropiados, y no necesariamente de carácter estadístico, con el fin de separar las fuentes de ruido que conviven en el interior del vehículo y así poder obtener un porcentaje de influencia en los parámetros objetivos que se tuvieron en cuenta a lo largo de este trabajo.*

## REFERENCIAS

Aghamohammadi, A. Izadi, M, Heydarnoori, A. (2020). Generating summaries for methods of event-driven programs: An Android case study - *Journal of Systems and Software*. Volúmen 170, 110800. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121220302065>

Aures, W. (1985). Procedure for calculating the sensory euphony of arbitrary sound signals – *Acustica*. Volúmen 59, páginas 130–141. De Ballou, G., 2015. Handbook for Sound Engineers.

Auto Learning Center. (2019, 3 marzo). *What Is an ELM327 Interface?* Recuperado el 20 de septiembre del 2020, de <https://www.totalcardiagnostics.com/learn/what-is-an-elm327-interface/>

Bargende, M., Reuss Hans-C., Wiedemann, J (2018). *Internationales Stuttgarter Symposium- Automobil- und Motorentechnik*. Alemania: Springer Vieweg.

Bies, D. Hansen, C. (2009). The Human Hear. En Tylor & Francis group, *Engineering Noise Control - Theory and practice* (Fourth Edition., pp. 56-90). Spon Press.

Blauert, J. Jekosch, U. (2012, enero). A Layer Model of Sound Quality - *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 60 Issue 1/2 pp. 4-12. Recuperado el 15 de noviembre del 2020, de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=16160>

Bramsløw, L. Holmberg, M. (2010 junio). Validation of Objective Sound Quality Models for Hearing Aids - *38th International Conference: Sound Quality Evaluation*. Paper 3-1. Recuperado de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=15479>

Burkhard, M. Genuit, K. (1992). Merging Subjective and Objective Acoustical Measurements - *AES Conference: 11th International Conference: Test & Measurement*. Paper 11-015. Recuperado de <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6281>.

Chico Gómez, M. J. (2012). *CICA Centro Informatico Cientifico de Andalucia*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11531/fichero/15.+Anexo.pdf>

Chirivella González, V. (2015). Hipótesis en el modelo de regresión lineal por Mínimos Cuadrados Ordinarios.

Conggan, M. Chayoi, C. Qinghe, L. Haibo, G. Qing, L. Hang, G. Yue, S. (2017, 12 septiembre). *Sound Quality Evaluation of the Interior Noise of Pure Electric Vehicle Based on Neural Network Model* – IEEE Transactions on industrial electronics. Volúmen 64, No 12.

Connor, N. (10 de enero de 2020). *Qué es el ciclo de Otto- Motor de Otto- Definición*. Thermal Engineering. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-ciclo-de-otto-motor-de-otto-definicion/>

CSS Electronics (2020). *OBD2 Explained - A Simple Intro (2020)*. Recuperado el 15 de septiembre del 2020, de [https://www.csselectronics.com/screen/page/simple-intro-obd2-explained/language/en#:~:text=OBD2%20is%20a%20'higher%20layer,communication%20\(li%20like%20a%20telephone\).&text=Note%20here%20that%20ISO%2015765,like%20%22CAN%20for%20cars%22](https://www.csselectronics.com/screen/page/simple-intro-obd2-explained/language/en#:~:text=OBD2%20is%20a%20'higher%20layer,communication%20(li%20like%20a%20telephone).&text=Note%20here%20that%20ISO%2015765,like%20%22CAN%20for%20cars%22)

Dagnino, J. (2014). La distribución normal. *Rev. Chil. Anest.*, 43, 116-121.

Durán, Miguel A, Gudiño, Jorge, Charre, Saida M, & Alcalá, Janeth A. (2014). Modelado y Diseño del Controlador para un Sistema de Tracción de un Vehículo Eléctrico. *Información tecnológica*, 25(6), 101-108. Recuperado de [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642014000600013&hcb=1](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642014000600013&hcb=1)

Ecogestos. (s. f.). Los coches eléctricos y su impacto positivo en el medio ambiente. ecogestos. Recuperado el 5 de septiembre del 2020, de <https://www.ecogestos.com/los-coches-electricos-y-su-impacto-positivo-en-el-medio-ambiente/#:~:text=Los%20coches%20el%C3%A9ctricos%20no%20son,que%20los%20tradicionales%20de%20combusti%C3%B3n.>

ELM Electronics. (s.f.). *ELM327 OBD to RS232 Interpreter*. Recuperado el 18 de octubre del 2020, de <https://www.elmelectronics.com/wp-content/uploads/2017/01/ELM327DS.pdf>

El Vehículo Eléctrico. (2018, 30 julio). Electromovilidad. Recuperado el 21 de agosto, del 2020, de <http://electromovilidad.net/el-vehiculo-electrico/>

Espejo, M. R. (2017). Estimación de la desviación estándar. *Estadística española*, 37-44.

Fan, X. Sinnen, O. Giacaman, N. (2019). Supporting asynchronization in OpenMP for event-driven programming - *Parallel Computing*. Volume 82, páginas 57-74. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167819118300838>

Fastl, H. Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and Models*. New York, NY, USA-*Springer*. pp. 3–264.

FENALCO. (2021). *INFORME DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS A ENERO 2021*. Bogotá.

Fernandez, D. F. Daniel. (2015, noviembre). Evaluation of electric vehicle interior noise focused on sound source identification and transfer path analysis. Recuperado el 8 noviembre de 2019, de [https://www.researchgate.net/publication/284452260\\_Evaluation\\_of\\_electric\\_vehicle\\_interior\\_noise\\_focused\\_on\\_sound\\_source\\_identification\\_and\\_transfer\\_path\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/284452260_Evaluation_of_electric_vehicle_interior_noise_focused_on_sound_source_identification_and_transfer_path_analysis)

Ferré, J. (2009). 3.02 - Regression Diagnostics. En J. Ferré, *3.02 - Regression Diagnostics* (págs. Pages 33-89). *Comprehensive Chemometrics*.

Francis, J. (2014). Determining Thresholds of Annoyance to Tones in Noise – *University of Nebraska-Lincoln*. Recuperado de <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=archengdiss>

Gahee, K. Hyeonho, J. Yeon, J. (2018). Model of psychoacoustic sportiness for vehicle interior sound: Excluding loudness - *Applied Acoustics*. Volúmen 136, páginas 16-25. Recuperado el 20 de noviembre del 2020, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X17307624>

García, G. (2018, 26 diciembre). *Tipos de vehículos eléctricos: funcionamiento y características de cada tecnología*. Híbridos y Eléctricos. Recuperado 5 de septiembre del 2020, de <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/asi-funcionan-diferentes-tecnologias-vehiculos-electricos/20180921183150021994.html>

Geradts, P. Brecher, C. Löpenhaus, C. Kasten, M. (2019). Reduction of the tonality of gear noise by application of topography scattering - *Applied Acoustics*. Volumen 148, Páginas 344-359. Recuperado de [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X18306911](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X18306911).

Giacosa, D. (1970). *Motores de combustión interna*. Ed. Hoepli: Madrid.

Gonzalez, C. (2015). *Hipótesis en el modelo de regresión lineal por Mínimos Cuadrados Ordinarios*.

Hernández, L. (2019, 10 junio). *Los vehículos con motores de combustión «no van más» en Francia*. Autocosmos. Recuperado el 15 de septiembre del 2020, de

<https://noticias.autocosmos.com.co/2019/06/10/los-vehiculos-con-motores-de-combustion-no-van-mas-en-francia>

ISO/TS 15666: 2003 Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. Edición 1, páginas 15.

ISO 532-1:2017 Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method. Recuperado el 18 de noviembre del 2020, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:532:-1:ed-1:v2:en>

Jo, Sungho. (2011). A Computational Neuromusculoskeletal Model of Human Arm Movements. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 9. 913-923. 10.1007/s12555-011-0512-9.

Kudo, K. T. (2013). モデルベースによる SKYACTIV-DRIVE の NVH 開発.

Kwon, G. K. Gahee. (2018, 1 julio). Model of psychoacoustic sportiness for vehicle interior sound: Excluding loudness – *Applied Acoustics*, volumen 136 páginas 16-25. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17307624>

Lennström, David, L. D. (1970, 1 enero). Prominence of tones in electric vehicle interior noise. *Internoise 2013: Noise Control for Quality of Life*, 1, 508–515. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-37567>.

Li, D. L. Dou, & Huang, Y. H. Yu. (2018, 1 marzo). The discomfort model of the micro commercial vehicles interior noise based on the sound quality analyses – *Applied Acoustics*, volumen 132 páginas 223-231. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17304796>

Liu, X. Bo, L. Veidt, M. (2012). Tonality evaluation of wind turbine noise by filter-segmentation – *Measurement*. Volumen 45, Páginas 711-718. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111004568>.

López L, N. A. (2018, 8 noviembre). *Solo 3.500 carros aportan la mitad de la contaminación en Medellín*. El Tiempo. Recuperado el 15 de septiembre del 2020, de <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/solo-3-500-carros-aportan-la-mitad-de-la-contaminacion-en-medellin-291088>.

Ma, C. M. Congnan. (2017, 1 diciembre). Sound Quality Evaluation of the Interior Noise of Pure Electric Vehicle Based on Neural Network Model - *IEEE Journals & Magazine*. Recuperado el 8 noviembre de 2019, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7938342>

Martín, L. (2017, 21 agosto). *Contaminación acústica: La amenaza invisible*. Compromiso Empresarial. Recuperado el 20 de noviembre del 2020, de <https://www.compromisoempresarial.com/rsc/2017/08/contaminacion-acustica-la-amenaza-invisible/>

Martínez, A. (2005). Ruido por tráfico urbano: conceptos, medidas descriptivas y valoración económica. Universidad Autónoma de Occidente – *Revista de Economía y administración*. Madrid España.

Matulka, R. (2014, 15 septiembre). *The History of the Electric Car*. Energy.gov. Recuperado 15 noviembre, 2020, de <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car#:~:text=First%20Crude%20Electric%20Vehicle%20Is,an%20English%20inventor%20in%201884.>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (07 de abril de 2006). Resolución número 0627 del 07 de abril de 2006. Bogotá, Colombia.

Min, Dongki, M. D. Min. (1970, 1 enero). Artificial Engine Sound Synthesis Method for Modification of the Acoustic Characteristics of Electric Vehicles. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://www.hindawi.com/journals/sv/2018/5209207/>

Moyer, M. *El motor de combustión interna*. (2012, julio). Investigación y Ciencia. Recuperado el 13 septiembre de 2020, de <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/la-unificacin-de-las-fuerzas-554/el-motor-de-combustin-interna-9302>

Mundoautomotriz. (s.f.). *ELM327 y ScanMaster como escáner OBD2*. Recuperado el 18 de octubre del 2020, de <https://www.mundoautomotriz.tech/destacados/interfaz-elm327-y-scanmaster/>

Nicolas Misdariis, N. M. (2017, 27 agosto). The sound of silence of electric vehicles – Issues and answers – *InterNoise*. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01708883>

OBD Solutions. (2014, 11 junio). *Reading Real-Time Data*. Recuperado el 15 de septiembre del 2020, de <https://www.obdsol.com/knowledgebase/obd-software-development/reading-real-time-data/>.

Ochoa, C. Molina, M. (2018). Estadística. Tipos de Variables. Escalas de medida. Recuperado el 05 de marzo del 2021, de [https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13363-RUTA/Fundamentos\\_29.pdf](https://evidenciasenpediatria.es/files/41-13363-RUTA/Fundamentos_29.pdf)

Park, D. Park, S. Kim, W. Rhiu, I. Yun, M. (2019). A comparative study on subjective feeling of engine acceleration sound by automobile types – *International Journal of Industrial Ergonomics*, volumen 74. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17307624>

Parlamento europeo (2019, 18 abril). *Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras / Noticias | Parlamento Europeo*. Emisiones de CO2 de los coches. Recuperado el 13 de septiembre del 2020, de <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

Recommendation ITU-R BS.1284-2 del 2019. (2019 enero). General Methods of the Subjective assessments of Sound Quality. Recuperado el 20 de noviembre del 2020, de [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-I!!PDF-E.pdf).

Recommendation ITU-R BS.1534-3 del 2015. (2015 enero). Method for the subjective assessment of intermediate quality level of audio systems. Recuperado el 28 de Junio del 2021, de [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1534-3-201510-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1534-3-201510-I!!PDF-E.pdf)

Recommendation ITU-R BT.500-14 del 2019. (2019 octubre). Methodologies for the subjective assessment of the quality of television images. Recuperado el 28 de Junio del 2021, de [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-14-201910-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-14-201910-I!!PDF-E.pdf)

Rendón-Macías, M. E., Villasís-Keeve, M. Á., & Miranda-Novales, M. G. (2016). Estadística descriptiva. *Revista Alergia México*, 63(4), 397-407.

Rojas, N. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. (s.f). *Aire y problemas ambientales de Bogotá*. Aire y problemas ambientales de Bogotá. Recuperado el 15 septiembre de 2020, de [https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/aire\\_y\\_problemas\\_ambientales\\_de\\_bogota.pdf](https://bogota.gov.co/sites/default/files/inline-files/aire_y_problemas_ambientales_de_bogota.pdf)

RWTH AACHEN UNIVERSITY. (s.f.). *Gitlab*. Obtenido de <https://git.rwth-aachen.de/ita/toolbox>

Sanchez Sellero, C. (2010). Contraste de la normalidad multivariante. En *Análisis Multivariante - Máster en técnicas estadísticas* (pág. 7).

Segura, J. Cerdá, S. Montell, R. Romero, J. Cibrián, R. Barba, A. Giménez A. (2012). Los Parámetros Psicoacústicos como Herramienta para la Evaluación Subjetiva de Diferentes Entornos y Actividades –*Acústica 2012*. Portugal. Recuperado de <http://www.upv.es/contenidos/ACUSVIRT/info/U0643747.pdf>

Standard ECMA-74. (2019, diciembre). *Measurement of Airbone Noise emitted by information technology and telecommunication Equipment*. 17<sup>th</sup> Edition. Recuperado de [https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-74\\_17th\\_edition\\_december\\_2019.pdf](https://www.ecma-international.org/wp-content/uploads/ECMA-74_17th_edition_december_2019.pdf)

Steinbach, L. S. Lisa. (2019a, 1 febrero). Prediction of annoyance evaluations of electric vehicle noise by using artificial neural networks - *Applied Acoustics*, volúmen 145 páginas 149-158. Recuperado el 8 de noviembre, 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X18304328>

Swart, D. S. Dj. (2018, 1 enero). The subjective dimensions of sound quality of standard production electric vehicles – *Applied Acoustics*, volúmen 129 páginas 354-364. Recuperado el 8 noviembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17304711>

Terhardt, E. (1982). Algorithm for extraction of pitch and conversation is underway across a conference table, salience from complex tonal signals. Volúmen 71, pp 679-688.

Uribe, F. V. (7 de enero de 2020). *VEC*. Obtenido de <https://www.vehiculoselectricos.co/ventas-de-carros-hibridos-y-electricos-aumentaron-91-8-en-colombia-durante-2020/>

Volandri, G. V. Gaia. (2018, 1 mayo). Psychoacoustic analysis of power windows sounds: Correlation between subjective and objective evaluations– *Applied Acoustics*, volúmen 134 páginas 160-170. Recuperado el 8 de noviembre de 2019, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X17308629>

Verizon. (s.f.). *Hum by Verizon - Locate the OBD-II Port*. Recuperado el 15 de septiembre del 2020, de <https://www.verizon.com/support/knowledge-base-210135/#:~:text=The%20On%2DBoard%20Diagnostics%20II,communicate%20with%20the%20vehicle%20directly.>

## Anexo I. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono derecho en vehículo de combustión.

A continuación, se muestra las Tablas de cada muestra por velocidad donde se observan los parámetros objetivos con sus valores y su desviación estándar.

Para velocidad de 0 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	44.2201	44.8906	56.5162	3.6110	0.6539	0.0270	0.1620
2	43.9480	44.2178	57.0024	3.8117	0.6761	0.0309	0.1608
3	44.7379	44.8443	56.9334	3.9064	0.7032	0.0286	0.1635
4	44.5938	45.4166	56.3574	3.7264	0.7311	0.0270	0.1646
5	43.4879	45.3358	57.1849	3.6151	0.6314	0.0315	0.1606
6	44.4103	44.1062	56.1601	3.7452	0.6924	0.0212	0.1672
7	43.9950	44.9881	57.1533	3.5839	0.6117	0.0324	0.1625
8	44.4262	45.4433	55.7224	3.9993	0.6604	0.0324	0.1658
9	44.4525	45.0823	56.7288	3.6614	0.6047	0.0368	0.1644
10	44.0239	45.5739	57.2516	3.5566	0.7289	0.0332	0.1640

*Tabla 51. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,3710131	,5016653	,5044207	,1465724	,0451468	,0043251	,0021213

*Tabla 52. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 10 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	53.4398	55.1116	64.9820	7.3883	0.5033	0.3350	0.2842
2	54.1616	55.4425	65.4969	7.4724	0.5819	0.4257	0.2303
3	53.5211	54.8201	65.1768	7.0563	0.5551	0.2776	0.4739
4	53.0889	55.1682	64.4200	7.0198	0.4426	0.3807	0.3680
5	53.6325	55.8765	64.7227	7.0503	0.4435	0.3410	0.4135
6	53.8303	55.1799	65.5854	7.1152	0.4813	0.3431	0.4374
7	52.8137	54.8107	65.1736	7.4598	0.4843	0.2682	0.4468
8	53.0493	55.5752	64.2805	7.1091	0.4435	0.4187	0.4411
9	52.7425	55.7353	64.4272	7.7261	0.4142	0.2478	0.3471
10	53.9260	55.4702	64.3709	7.5657	0.5145	0.3601	0.6173

*Tabla 53. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez (10) muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4834794	,3621293	,4853538	,2551516	,0534973	,0607213	,1074016

*Tabla 54 Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 20 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	57.2350	58.4490	69.4783	8.9869	0.4747	0.5050	0.2993
2	56.8102	57.7482	69.0001	9.2633	0.4903	0.4338	0.2454
3	57.6217	58.3162	69.1350	9.2652	0.5199	0.5762	0.2157
4	56.5940	59.1332	69.2621	9.2616	0.4633	0.4713	0.1450
5	57.3629	58.0463	69.0026	9.0482	0.4267	0.5572	0.3386
6	56.4788	58.2121	68.9870	9.3537	0.4981	0.4298	0.3838
7	57.0758	59.2452	69.7510	9.0663	0.4486	0.5740	0.2970
8	57.8384	58.4506	69.5299	9.1009	0.4797	0.4826	0.2506
9	57.1788	57.9734	69.0169	8.6974	0.5474	0.5091	0.2866
10	57.5603	58.6423	69.5776	9.3862	0.4303	0.4067	0.2275

*Tabla 55. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4462422	,4813398	,2874285	,2072520	,0381930	,0610183	,0673875

*Tabla 56. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 30 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	59.4350	60.9018	71.5240	10.7038	0.5063	0.5560	0.2628
2	59.2792	60.8238	72.2968	10.3821	0.4771	0.5924	0.2420
3	58.7841	61.6700	71.6685	10.9328	0.5742	0.4813	0.2104
4	60.1460	61.5400	72.0489	10.5324	0.5610	0.5224	0.2070
5	59.4044	60.6050	72.3012	10.9405	0.4357	0.4879	0.2054
6	58.9790	61.4806	71.8569	10.5762	0.4172	0.5816	0.2064
7	60.0340	60.2408	71.1581	10.5481	0.4139	0.5911	0.2526
8	58.8615	60.6171	70.7354	10.9573	0.5107	0.5867	0.2254
9	58.9773	61.1677	70.8534	10.8464	0.4734	0.5258	0.2017
10	59.3594	61.1219	71.0192	10.5341	0.4455	0.4871	0.2050

*Tabla 57. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

**Estadísticos**

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4650465	,4632404	,5834606	,2093762	,0563364	,0459217	,0225880

*Tabla 58. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 40 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	60.4750	62.5573	74.9238	11.3296	0.5062	0.6810	0.1379
2	60.2905	62.5495	74.9418	10.9625	0.4308	0.5812	0.1202

3	61.0408	61.9756	74.8278	11.2697	0.4960	0.6068	0.1678
4	60.7274	63.2460	74.8084	11.5568	0.5243	0.7525	0.1099
5	60.5196	62.1333	75.0636	11.2556	0.4546	0.6417	0.1229
6	61.0350	62.9785	74.1743	11.3048	0.4097	0.7132	0.1249
7	61.0821	61.8318	75.0410	11.4037	0.5339	0.6845	0.1281
8	60.8171	62.3783	74.2309	11.1406	0.6057	0.7518	0.1225
9	59.8861	62.1409	74.6007	11.4399	0.5797	0.6716	0.1278
10	60.5230	62.8925	74.2058	11.2170	0.4407	0.7054	0.1292

*Tabla 59. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,3796264	,4636788	,3547023	,1649340	,0648119	,0565947	,0153670

*Tabla 60. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 50 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	60.7717	62.0055	72.3976	12.1641	0.5402	0.6540	0.1425
2	61.0837	61.5148	71.5991	11.9426	0.5828	0.5700	0.1111
3	61.0132	62.0719	72.9969	11.8071	0.4694	0.6227	0.1176
4	61.3385	62.4480	72.4220	12.0200	0.5394	0.7270	0.1211
5	61.5611	62.4983	71.7350	12.0540	0.4784	0.5707	0.1279

6	61.1593	62.2788	72.3669	12.4750	0.6150	0.7385	0.1142
7	60.7430	61.7746	72.1469	12.1403	0.5753	0.6509	0.1232
8	60.0530	62.2266	72.7642	12.3128	0.5170	0.7095	0.0478
9	61.1595	61.4827	73.0164	12.2812	0.6190	0.6837	0.1464
10	61.0253	61.6811	72.5432	12.4538	0.5343	0.6232	0.1138

*Tabla 61. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4085462	,3710006	,4759416	,2176551	,0514063	,0599574	,0269333

*Tabla 62. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo a combustión.*

## Anexo II. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono izquierdo en vehículo de combustión.

A continuación, se muestra las Tablas de cada muestra por velocidad donde se observan los parámetros objetivos con sus valores y su desviación estándar.

Para velocidad de 0 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	43.9351	44.6532	54.7589	3.6393	0.7002	0.0239	0.1719
2	43.6631	43.9804	55.2450	3.8400	0.7224	0.0278	0.1733
3	44.4529	44.6069	55.1761	3.9347	0.7495	0.0255	0.1744
4	44.3088	45.1792	54.6001	3.7547	0.7774	0.0239	0.1748
5	43.2030	45.0984	55.4276	3.6434	0.6777	0.0284	0.1735
6	44.1253	43.8688	54.4028	3.7735	0.7387	0.0181	0.1773
7	43.7101	44.7507	55.3960	3.6122	0.6580	0.0293	0.1767
8	44.1413	45.2059	53.9651	4.0276	0.7067	0.0293	0.1721
9	44.1675	44.8449	54.9715	3.6897	0.6510	0.0337	0.1769
10	43.7390	45.3365	55.4943	3.5849	0.7752	0.0301	0.1760

*Tabla 63. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

### Estadísticos

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,3709751	,5016653	,5044141	,1465724	,0451468	,0043251	,0019794

Tabla 64. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.

Para velocidad de 10 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	52.1045	53.0198	64.0226	6.8945	0.5740	0.2695	0.2733
2	52.8264	53.3507	64.5374	6.9786	0.6526	0.3602	0.2794
3	52.1859	52.7283	64.2174	6.5625	0.6258	0.2120	0.2730
4	51.7536	53.0764	63.4605	6.5260	0.5132	0.3151	0.2671
5	52.2973	53.7848	63.7632	6.5565	0.5141	0.2755	0.2725
6	52.4950	53.0881	64.6260	6.6214	0.5519	0.2776	0.2365
7	51.4785	52.7190	64.2141	6.9660	0.5550	0.2027	0.2759
8	51.7140	53.4834	63.3210	6.6153	0.5141	0.3532	0.2402
9	51.4072	53.6435	63.4677	7.2323	0.4848	0.1823	0.2762
10	52.5907	53.3784	63.4114	7.0719	0.5852	0.2946	0.2864

Tabla 65. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4834896	,3621308	,4853802	,2551516	,0535403	,0607252	,0164566

Tabla 66. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.

Para velocidad de 20 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	54.2497	55.5932	65.8362	8.1610	0.5189	0.4479	0.2184
2	53.8249	54.8924	65.3580	8.4374	0.5345	0.3766	0.2145
3	54.6364	55.4604	65.4929	8.4393	0.5641	0.5190	0.2107
4	53.6087	56.2774	65.6201	8.4358	0.5075	0.4141	0.2100
5	54.3776	55.1905	65.3605	8.2224	0.4709	0.5001	0.2107
6	53.4935	55.3563	65.3449	8.5278	0.5423	0.3727	0.2029
7	54.0904	56.3894	66.1089	8.2405	0.4928	0.5169	0.2161
8	54.8530	55.5948	65.8878	8.2750	0.5239	0.4254	0.2107
9	54.1934	55.1176	65.3748	7.8715	0.5916	0.4519	0.2103
10	54.5749	55.7864	65.9355	8.5603	0.4745	0.3495	0.2104

*Tabla 67. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

#### Estadísticos

	dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0
	Desv. típ.	,4462185	,4813347	,2874281	,2072492	,0381930	,0610343

*Tabla 68. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 30 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	57.0065	58.3787	69.4291	9.6736	0.5812	0.5083	0.2277
2	56.8507	58.3007	70.2019	9.3519	0.5520	0.5447	0.2091
3	56.3556	59.1469	69.5736	9.9026	0.6492	0.4336	0.2053
4	57.7175	59.0169	69.9541	9.5022	0.6360	0.4747	0.2056
5	56.9759	58.0818	70.2064	9.9103	0.5106	0.4402	0.2044
6	56.5505	58.9575	69.7620	9.5460	0.4921	0.5339	0.2013
7	57.6055	57.7177	69.0632	9.5179	0.4888	0.5435	0.2075
8	56.4330	58.0939	68.6405	9.9270	0.5857	0.5391	0.2043
9	56.5488	58.6446	68.7585	9.8162	0.5483	0.4781	0.2066
10	56.9309	58.5987	68.9243	9.5039	0.5204	0.4394	0.2099

*Tabla 69. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

#### Estadísticos

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4650465	,4632574	,5834845	,2093623	,0563761	,0459448	,0072986

*Tabla 70. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 40 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	58.7686	60.1715	72.3036	11.2218	0.5516	0.6090	0.0000
2	58.5841	60.1636	72.3215	10.8547	0.4762	0.5092	0.0000
3	59.3343	59.5898	72.2075	11.1619	0.5414	0.5348	0.0000
4	59.0210	60.8601	72.1882	11.4490	0.5696	0.6805	0.0000
5	58.8132	59.7475	72.4433	11.1478	0.4999	0.5697	0.0000
6	59.3286	60.5927	71.5541	11.1969	0.4551	0.6412	0.0000
7	59.3756	59.4460	72.4208	11.2959	0.5792	0.6125	0.0000
8	59.1106	59.9925	71.6107	11.0328	0.6511	0.6798	0.0000
9	58.1796	59.7551	71.9804	11.3321	0.6251	0.5996	0.0000
10	58.8165	60.5067	71.5856	11.1092	0.4861	0.6334	0.0000

*Tabla 71. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,3796220	,4636583	,3546802	,1649329	,0648088	,0565947	,0000000

*Tabla 72. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

Para velocidad de 50 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	59.5907	60.6971	71.8757	11.5006	0.6036	0.5550	0.0000
2	59.9027	60.2063	71.0772	11.2791	0.6463	0.4710	0.0000
3	59.8323	60.7635	72.4750	11.1436	0.5329	0.5237	0.0000
4	60.1576	61.1396	71.9001	11.3565	0.6029	0.6280	0.0000
5	60.3802	61.1898	71.2131	11.3905	0.5419	0.4717	0.0000
6	59.9784	60.9704	71.8450	11.8115	0.6784	0.6395	0.0000
7	59.5620	60.4662	71.6250	11.4768	0.6387	0.5519	0.0000
8	58.8720	60.9181	72.2423	11.6493	0.5804	0.6105	0.0000
9	59.9786	60.1742	72.4945	11.6177	0.6825	0.5847	0.0000
10	59.8444	60.3727	72.0213	11.7903	0.5978	0.5242	0.0000

*Tabla 73. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

**Estadísticos**

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,4085819	,3710087	,4759416	,2176551	,0513935	,0599574	,0000000

*Tabla 74. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo a combustión.*

### Anexo III. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono derecho en vehículo eléctrico.

A continuación, se muestra las Tablas de cada muestra por velocidad donde se observan los parámetros objetivos con sus valores y su desviación estándar.

Para velocidad de 0 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	39.1997	39.8935	51.7877	3.1783	1.1137	0.0000	0.1439
2	39.4517	40.4628	52.7244	3.2900	1.8852	0.0000	0.1428
3	40.0690	40.8119	52.0573	3.3192	1.3663	0.0000	0.1454
4	39.4945	40.5124	52.6800	3.3286	1.1845	0.0000	0.1401
5	39.9396	40.6050	52.6198	3.5645	1.9916	0.0000	0.1400
6	39.8737	40.7480	52.3478	3.6272	1.9278	0.0000	0.1410
7	39.6184	40.4941	51.9732	3.2594	1.7177	0.0000	0.1426
8	39.5771	40.2626	52.0071	4.0852	1.7706	0.0000	0.2025
9	39.3955	40.7709	52.2962	4.1563	2.0696	0.0000	0.1400
10	39.4976	40.1122	52.7039	3.5528	1.3846	0.0000	0.1400

*Tabla 75. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,2698495	,2997579	,3499632	,3416942	,3494160	,0000000	,0193021

*Tabla 76. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 10 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	52.3246	53.4870	63.7790	7.4184	0.6797	0.4253	0.3124
2	52.7132	54.3602	64.1428	7.8275	0.6791	0.3788	0.3139
3	51.4800	53.5296	64.0250	6.6623	0.6493	0.3931	0.3150
4	53.2522	52.8524	63.8518	8.3202	0.6472	0.4325	0.3126
5	52.1889	53.0666	64.1259	7.4536	0.6066	0.3528	0.3275
6	51.9703	54.0973	62.9392	7.0911	0.5897	0.4092	0.3238
7	52.1554	53.1803	62.9726	7.2479	0.6593	0.3156	0.3259
8	52.6075	53.6524	63.2346	7.8126	0.5705	0.3941	0.3331
9	52.9726	53.4507	64.1474	8.0968	0.6906	0.4249	0.2274
10	51.8243	54.2212	62.8622	7.0635	0.6697	0.3428	0.3263

*Tabla 77. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,5417773	,5024811	,5430801	,5126953	,0413121	,0392179	5,7599257

*Tabla 78. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 20 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	59.1582	61.7068	69.8789	11.7835	0.5851	0.6474	0.1091
2	58.2209	62.0634	69.7522	11.9294	0.5107	0.5727	0.1003
3	60.0896	62.3116	70.1797	12.6753	0.5660	0.6576	0.0799
4	59.6154	60.8596	70.2932	12.2735	0.5554	0.6199	0.1031
5	58.2629	61.1977	70.4030	11.6175	0.5854	0.5800	0.1086
6	58.7404	60.9397	70.4987	11.7927	0.5572	0.6474	0.0183
7	59.5167	61.7697	68.9552	11.9449	0.5399	0.6323	0.0886
8	59.8086	62.4124	69.7158	12.4806	0.5892	0.5553	0.1099
9	59.9082	62.4133	70.1434	11.5800	0.4741	0.5597	0.1030
10	58.6612	61.5456	68.8922	11.6213	0.5677	0.6426	0.0992

*Tabla 79. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,6893017	,5852797	,5636964	,3824942	,0364923	,0401561	,0275741

*Tabla 80. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 30 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	64.2331	66.5401	76.8907	15.3196	0.5383	0.7302	0.3515
2	64.2472	67.4853	76.2315	15.5763	0.4415	0.7329	0.3502
3	64.6835	66.1201	75.9780	15.4630	0.4594	0.6954	0.3838
4	63.3465	65.9912	76.9040	15.4140	0.4390	0.6364	0.3522
5	63.5520	67.0423	76.8307	15.9999	0.5164	0.6834	0.3467
6	64.6595	66.5957	77.7331	14.4482	0.4579	0.6932	0.3568
7	64.5276	66.2943	77.7532	15.0806	0.4757	0.6738	0.3518
8	64.6337	65.8033	76.2449	14.6619	0.5427	0.6684	0.3542
9	64.4381	66.1773	76.1099	14.6205	0.4632	0.6464	0.3031
10	56.9309	58.5987	68.9243	9.5039	0.5204	0.4394	0.2099

*Tabla 81. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,5058950	,5534865	,6518913	,4984695	,0396729	,0349203	,0223208

*Tabla 82. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 40 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	66.0463	67.6803	77.3751	17.9721	0.5272	0.5809	0.1157
2	66.9248	67.8057	77.8029	17.2651	0.5241	0.4763	0.1126
3	65.1783	68.3461	77.2043	18.5938	0.5076	0.5399	0.1139
4	66.6339	67.4810	76.5273	18.1915	0.4707	0.4782	0.1117
5	65.2551	67.3591	78.3690	18.4925	0.4735	0.4783	0.1136
6	65.8652	66.9112	77.8406	18.3678	0.5236	0.5188	0.2168
7	65.7011	67.6805	77.8172	17.3176	0.4622	0.5696	0.2177
8	65.9525	67.1548	77.1556	17.3484	0.4935	0.5777	0.0344
9	66.5855	68.6630	76.6796	18.0810	0.4742	0.5860	0.1142
10	65.4195	66.8943	77.5350	17.3449	0.4783	0.5742	0.1105

*Tabla 83. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

#### Estadísticos

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
	Desv. típ.	,6018201	,5758735	,5634743	,5300739	,0251218	,0463666	,0539689

*Tabla 84. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 50 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	67.0047	68.8693	78.5129	19.3753	0.5722	0.8990	0.2930

2	66.3040	69.4492	78.2284	18.8384	0.5298	0.7945	0.2930
3	67.5978	68.1267	77.7222	19.8894	0.5420	0.8430	0.2918
4	66.4548	69.2821	78.8457	19.3194	0.5076	0.8153	0.2929
5	66.7734	68.9746	77.6415	20.1815	0.5092	0.8067	0.2966
6	67.7379	67.9869	78.9279	18.5300	0.5131	0.8962	0.2934
7	66.8436	69.5446	77.8204	19.0306	0.5608	0.8990	0.2935
8	66.4186	69.2759	78.5931	18.6745	0.4752	0.7945	0.2906
9	66.1654	68.3694	78.6009	19.7712	0.5042	0.7969	0.2968
10	67.7108	69.5769	79.3265	20.3136	0.5233	0.8712	0.2920

*Tabla 85. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

Estadísticos							
	dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0
	Desv. típ.	,5964114	,5927015	,5599031	,6293151	,0287039	,0456963

*Tabla 86. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono derecho para vehículo eléctrico.*

## Anexo IV. Tablas de captura de datos por velocidad para el micrófono izquierdo en vehículo eléctrico.

A continuación, se muestra las Tablas de cada muestra por velocidad donde se observan los parámetros objetivos con sus valores y su desviación estándar.

Para velocidad de 0 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	39.1943	40.9781	51.7318	3.2147	1.0396	0.0000	0.1030
2	39.4463	41.5474	52.6684	3.3264	1.8112	0.0000	0.1031
3	40.0636	41.8965	52.0013	3.3556	1.2923	0.0000	0.1057
4	39.4891	41.5970	52.6240	3.3650	1.1105	0.0000	0.0997
5	39.9342	41.6896	52.5638	3.6009	1.9176	0.0000	0.1044
6	39.8683	41.8326	52.2918	3.6636	1.8538	0.0000	0.1031
7	39.6130	41.5787	51.9172	3.2958	1.6437	0.0000	0.1029
8	39.5717	41.3472	51.9511	4.1216	1.6966	0.0000	0.1028
9	39.3901	41.8555	52.2402	4.1927	1.9956	0.0000	0.1027
10	39.4922	41.1968	52.6479	3.5892	1.3106	0.0000	0.1030

*Tabla 87. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,2698495	,2997579	,3499464	,3416942	,3494327	,0000000	,0015013

Tabla 88. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 0 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.

Para velocidad de 10 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	49.8112	50.7961	61.6911	6.0539	0.6223	0.2526	0.3776
2	50.1997	51.6694	62.0549	6.4630	0.6218	0.2061	0.2991
3	48.9666	50.8388	61.9372	5.2979	0.5919	0.2204	0.3001
4	50.7387	50.1616	61.7639	6.9558	0.5899	0.2598	0.3007
5	49.6754	50.3758	62.0380	6.0892	0.5493	0.1801	0.3016
6	49.4569	51.4065	60.8514	5.7267	0.5324	0.2365	0.2890
7	49.6420	50.4894	60.8847	5.8835	0.6020	0.1429	0.3001
8	50.0941	50.9615	61.1467	6.4482	0.5132	0.2214	0.2583
9	50.4592	50.7598	62.0595	6.7324	0.6333	0.2522	0.3006
10	49.3109	51.5304	60.7743	5.6991	0.6124	0.1701	0.3001

Tabla 89. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,5417546	,5024941	,5430750	,5126899	,0413012	,0392179	,0294617

Tabla 90. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 10 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.

Para velocidad de 20 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	57.5372	59.4376	68.6590	10.3095	0.5435	0.4798	0.1304
2	56.5999	59.7942	68.5323	10.4554	0.4691	0.4051	0.1317
3	58.4686	60.0424	68.9597	11.2013	0.5245	0.4900	0.1312
4	57.9944	58.5905	69.0732	10.7995	0.5139	0.4523	0.1344
5	56.6419	58.9285	69.1830	10.1435	0.5438	0.4124	0.1399
6	57.1195	58.6705	69.2788	10.3187	0.5157	0.4798	0.1396
7	57.8957	59.5005	67.7352	10.4709	0.4984	0.4647	0.1200
8	58.1876	60.1432	68.4958	11.0066	0.5476	0.3877	0.1313
9	58.2872	60.1442	68.9235	10.1059	0.4326	0.3921	0.1343
10	57.0402	59.2764	67.6722	10.1473	0.5261	0.4750	0.2915

*Tabla 91. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

#### Estadísticos

	dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,6892943	,5852764	,5637120	,3825055	,0364701	,0401561

*Tabla 92. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 20 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 30 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
---------	------------	------------	-------------	------------------	------------------	-------------------	---------------

1	62.0657	64.8790	73.7162	13.0089	0.5073	0.7438	0.3124
2	62.0798	65.8242	73.0570	13.2656	0.4105	0.7465	0.3111
3	62.5161	64.4590	72.8035	13.1523	0.4283	0.7090	0.3147
4	61.1791	64.3301	73.7294	13.1033	0.4079	0.6500	0.3130
5	61.3846	65.3812	73.6562	13.6893	0.4853	0.6970	0.3176
6	62.4921	64.9346	74.5586	12.1376	0.4269	0.7068	0.3176
7	62.3602	64.6332	74.5786	12.7699	0.4447	0.6874	0.2997
8	62.4663	64.1422	73.0704	12.3512	0.5116	0.6820	0.3151
9	62.2707	64.5162	72.9354	12.3098	0.4321	0.6600	0.3140
10	61.4366	65.5107	74.1177	12.4913	0.4864	0.7476	0.3151

*Tabla 93. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

		Estadísticos						
		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,5058950	,5534865	,6518732	,4984733	,0396743	,0349203	,0051195

*Tabla 94. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 30 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 40 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	64.5740	66.4225	77.2116	16.3823	0.5332	0.6018	0.1114
2	65.4525	66.5479	77.6394	15.6753	0.5301	0.4971	0.1183
3	63.7060	67.0883	77.0407	17.0040	0.5137	0.5607	0.1196
4	65.1616	66.2231	76.3638	16.6017	0.4768	0.4990	0.1174
5	63.7828	66.1013	78.2054	16.9028	0.4796	0.4992	0.1193
6	64.3929	65.6534	77.6771	16.7781	0.5297	0.5397	0.1125
7	64.2288	66.4227	77.6537	15.7278	0.4683	0.5905	0.1135
8	64.4801	65.8970	76.9920	15.7587	0.4996	0.5985	0.1102
9	65.1132	67.4052	76.5160	16.4912	0.4803	0.6069	0.1199
10	63.9472	65.6365	77.3715	15.7552	0.4844	0.5950	0.1162

*Tabla 95. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

**Estadísticos**

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
	Desv. típ.	,6018202	,5758757	,5634805	,5300732	,0250933	,0463771	,0036417

*Tabla 96. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 40 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

Para velocidad de 50 Km/h:

Muestra	LeqA (dBA)	LMax (dBA)	LPeak (dBA)	Loudness (Sones)	Sharpness (Acum)	Roughness (Asper)	Tonality (tu)
1	65.1975	67.0327	78.8382	17.2340	0.5579	0.8456	0.3432
2	64.4968	67.6126	78.5537	16.6970	0.5155	0.7411	0.3432
3	65.7906	66.2901	78.0475	17.7481	0.5277	0.7896	0.3420
4	64.6476	67.4455	79.1710	17.1781	0.4933	0.7619	0.3431
5	64.9663	67.1379	77.9667	18.0402	0.4949	0.7533	0.3668
6	65.9307	66.1503	79.2532	16.3886	0.4988	0.8428	0.3336
7	65.0364	67.7080	78.1457	16.8893	0.5465	0.8456	0.7337
8	64.6114	67.4393	78.9184	16.5332	0.4609	0.7411	0.3408
9	64.3583	66.5328	78.9262	17.6299	0.4899	0.7435	0.3470
10	65.9037	67.7403	79.6518	18.1723	0.5089	0.8178	0.3422

*Tabla 97. Tabla descriptora de parámetros psicoacústicos de las diez muestras tomadas a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

#### Estadísticos

		dBA	dBA	dBA	Sones	Acum	Asper	Tu
N	Válidos	10	10	10	10	10	10	10
	Perdidos	0	0	0	0	0	0	0
Desv. típ.		,5964104	,5927010	,5599186	,6293401	,0287041	,0456963	,1233210

*Tabla 98. Tabla de desviación estándar para cada parámetro psicoacústico analizado a una velocidad de 50 Km/h en el micrófono izquierdo para vehículo eléctrico.*

## Anexo V. Ficha técnica de equipos usados en la caracterización de vehículos y pruebas subjetivas.

Micrófono Earthworks M30:

<b>Earthworks M30</b>	
<b>Respuesta en frecuencia</b>	3Hz -30kHz $\pm 1/-3$ dB
<b>Patrón polar</b>	Omnidireccional
<b>Sensibilidad</b>	34mV/Pa (-29dBV/Pa)
<b>Requerimiento de poder</b>	24-48V Phantom, 10mA
<b>Máxima entrada acústica</b>	140dB SPL
<b>Salida</b>	XLR (pin 2+)
<b>Impedancia de salida</b>	65 $\Omega$ balanceado (entre los pines 2 & 3)
<b>Mínima carga de salida</b>	600 $\Omega$ entre los pines 2 & 3
<b>Ruido</b>	20dB SPL equivalente (ponderado A)
<b>Dimensiones</b>	229mm x 22mm (9.0 x .860 pulgadas)
<b>Peso</b>	0.5 lb. (225g)

*Tabla 99. Ficha técnica micrófono Earthworks M30.*

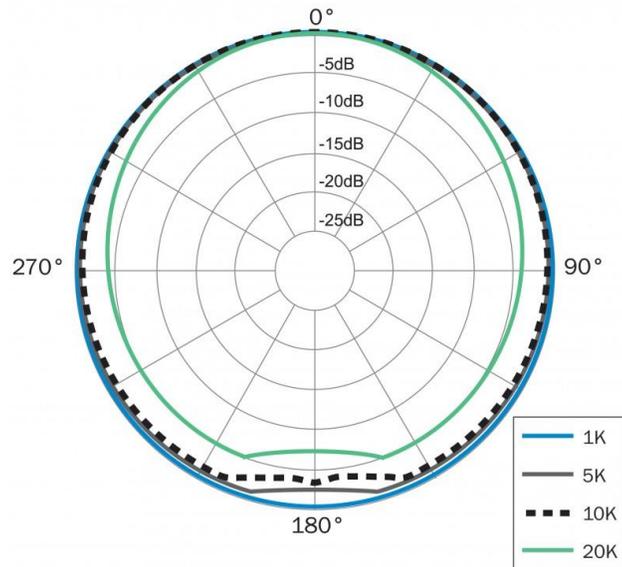


Figura 44. Patrón polar micrófono de medición Earthworks M30. (Fuente: Bproaudio)

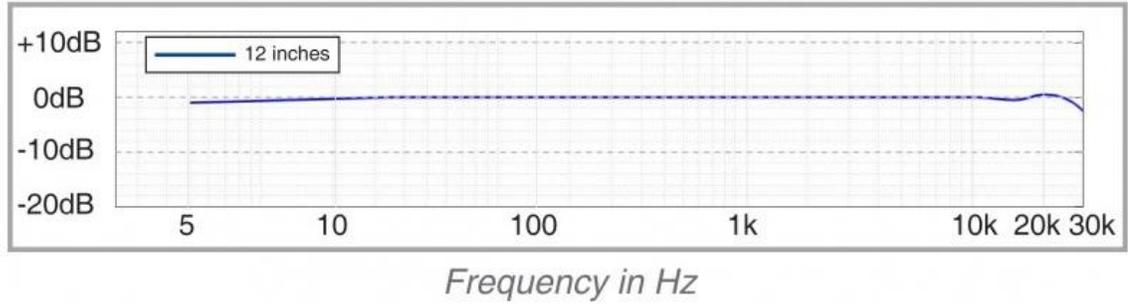


Figura 45. Respuesta en frecuencia micrófono de medición Earthworks M30. (Fuente: Bproaudio)

## Interfaz Audient Evo 8:

<b>Interfaz Audient Evo 8</b>	
Preamplificador del micrófono.	
<b>Rango de ganancia del micrófono:</b>	58dB
<b>Rango de ganancia de línea:</b>	58dB (-10dB pad)
<b>Alimentación Phantom:</b>	48V +/-4V @ 10mA/Canal (solo 2 canales disponibles en ordenadores con host USB-A)
<b>EIN Micro:</b>	<-128dBu
<b>CMRR:</b>	>85dB @ 1kHz
<b>Nivel máximo de entrada:</b>	16 dBu
<b>Impedancia de entrada (Micro):</b>	>3kΩ Balanceado
<b>Impedancia de entrada (Línea):</b>	>10kΩ Balanceado
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	"+/-0.5dB 10Hz a 40kHz"
<b>Crosstalk:</b>	<-105dBu @ 1kHz & 10kHz
<b>THD+N @ 0dBu (1kHz):</b>	<0.0015%
<b>Relación señal/ruido (SNR):</b>	100dB
<b>XLR:</b>	Pin 2 (Positivo), Pin 3 (Negativo) y Pin 1 (Blindaje)
<b>1/4" Jack:</b>	PUNTA (Positivo), ANILLO (Negativo) y FUNDA (Blindaje)
Entrada directa.	
<b>Rango de ganancia de DI:</b>	58 dB
<b>Nivel máximo de entrada:</b>	10dBu
<b>Impedancia de entrada:</b>	1MegΩ No Balanceado
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	"+/-0.5dB 10Hz a 20kHz"
<b>THD+N @ 0dBu (1kHz):</b>	<0.3%

<b>Relación señal/ruido (SNR)</b>	100dB
<b>Jack 1/4":</b>	PUNTA (Positivo) y FUNDA (Blindaje)
Entradas Conversor Análogo Digital.	
<b>Nivel de referencia digital:</b>	0dBFS = +8dBu
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	"±0.5dB 10Hz a Fs/2"
<b>Crosstalk:</b>	-105dBu @ 1kHz & 10kHz
<b>THD+N @ -1dBFS (1kHz):</b>	<0.001%
<b>Gama Dinámica:</b>	113dB Ponderación A
Salidas Conversor Digital Análogo.	
<b>Nivel máximo de salida:</b>	11dBu
<b>Nivel de referencia digital:</b>	0dBFS = +11dBu
<b>Impedancia de salida:</b>	<100Ω Balanceada
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	"±0.5dB 10Hz a Fs/2"
<b>Crosstalk:</b>	<-110dBu @ 1kHz
<b>THD+N @ -1dBFS (1kHz):</b>	<0.0015%
<b>Gama Dinámica:</b>	113dB Ponderación A
<b>1/4" Jack:</b>	PUNTA (Positivo), ANILLO (Negativo) y FUNDA (Blindaje)
Salida de Auriculares.	
<b>Impedancia de salida:</b>	<50Ω
<b>Respuesta en frecuencia:</b>	"±0.5dB 10Hz a Fs/2"
<b>Crosstalk:</b>	-110dBu @ 1kHz
<b>THD+N @ -1dBFS (1kHz):</b>	<0.0015%
<b>Gama Dinámica:</b>	113dB Ponderación A
<b>Nivel máximo a 30ohms:</b>	"0.5dBu, 0.0025% THD+N, 1.16Vpk Potencia: 45mW"
<b>Máximo nivel a 60ohms:</b>	"+4.22dBu, 0.0015% THD+N, 1.78Vpk Potencia: 52mW"
<b>Nivel máximo a 60ohms:</b>	"+10.1dBu, 0.0018% THD+N, 3.52Vpk Potencia: 20mW"
<b>1/4" Jack:</b>	PUNTA (Positivo), ANILLO (Negativo) y FUNDA (Blindaje)

Tabla 100. Ficha técnica interfaz Audient Evo8.

Audífonos de estudio Beyerdynamic DTX910:

<b>Beyerdynamic DTX910</b>	
<b>Tipo de transmisión</b>	Vía cable
<b>Diseño del auricular</b>	Abierto
<b>Impedancia</b>	32 ohms
<b>Frecuencia de respuesta</b>	15 – 23.000 Hz
<b>Nivel de presión sonora nominal</b>	98 dB
<b>Construcción</b>	Circumaurales (Al rededor del oído)
<b>Entrada</b>	plug Mini-jack de 3.5 mm con adaptador de ¼" (6.35 mm)
<b>Peso</b>	260 g

Tabla 101. Especificaciones técnicas audífonos Beyerdynamic DTX 910.

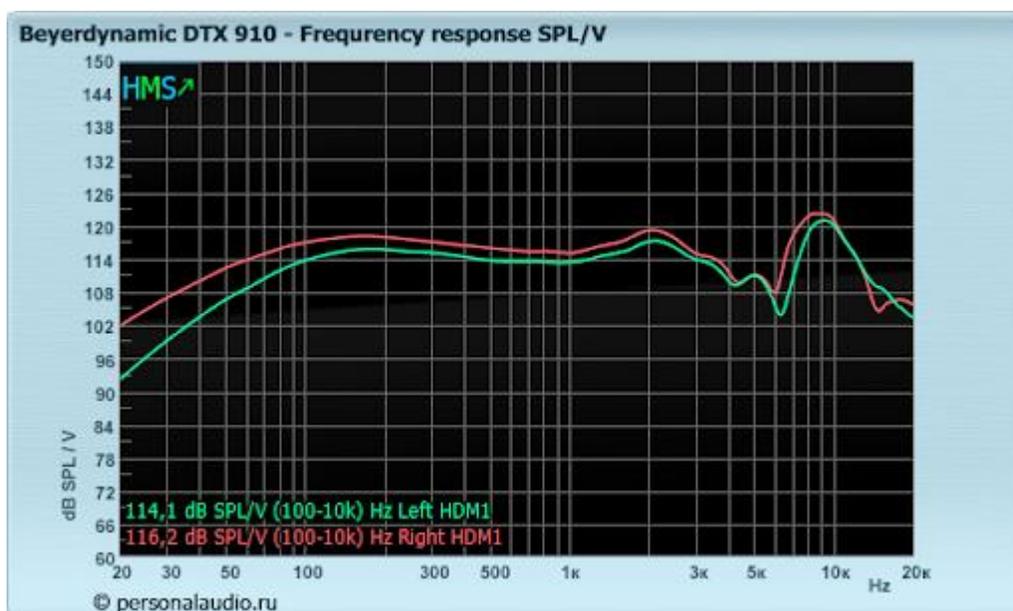


Figura 46. Respuesta en frecuencia Beyerdynamic DTX 910 (Fuente: Personal Audio)

## Anexo VI. Ficha técnica de vehículo a combustión y eléctrico.

Vehículo a combustión:

<b>Mazda CX7</b>	
<b>Tipo de Carrocería</b>	Todo terreno
<b>Número de puertas</b>	5
<b>Longitud</b>	4.680 mm
<b>Anchura</b>	1.870 mm
<b>Altura</b>	1.645 mm
<b>Batalla</b>	2.750 mm
<b>Vía delantera</b>	1.615 mm
<b>Vía trasera</b>	1.610 mm
<b>Superficie frontal</b>	2,58 m <sup>2</sup>
<b>Factor de resistencia</b>	0,88
<b>Peso</b>	1.770 kg
Gasolina	69 l
<b>Número de plazas</b>	5
<b>Combustible</b>	Gasolina
<b>Potencia máxima</b>	260 CV / 191 kW
<b>Revoluciones potencia máxima</b>	5.500 rpm
<b>Par máximo</b>	380 Nm
<b>Revoluciones de par máximo</b>	3.000 rpm
<b>Ubicación del motor</b>	Delantero transversal
<b>Número de cilindros</b>	4
<b>Tracción</b>	Total
<b>Caja de cambios</b>	Automática/Secuencial
<b>Número de velocidades</b>	6
<b>Diámetro de frenos traseros</b>	302 mm

<b>Neumáticos delanteros</b>	235/60 R17
<b>Neumáticos traseros</b>	235/60 R17
<b>Llantas delanteras</b>	7.5 x 18
<b>Llantas Traseras</b>	7.5 x 18

Tabla 102. Ficha técnica vehículo a combustión Mazda CX7.

Vehículo eléctrico:

<b>BYD e6</b>	
<b>Tipo de Carrocería</b>	Monovolumen
<b>Número de puertas</b>	5
<b>Longitud</b>	4.560 mm
<b>Anchura</b>	1.822 mm
<b>Altura</b>	1.630 mm
<b>Batalla</b>	2.830 mm
<b>Vía delantera</b>	1.556 mm
<b>Vía trasera</b>	1.558 mm
<b>Peso</b>	2.370 kg
<b>Número de plazas</b>	5
<b>Potencia máxima</b>	122 CV / 90 kW
<b>Revoluciones potencia máxima</b>	No disponible
<b>Par máximo</b>	450 Nm
<b>Revoluciones del par máximo</b>	No disponible
<b>Ubicación del motor</b>	Delantero transversal
<b>Tipo de batería</b>	Acumulador de litio hierro fosfato (LFP)
<b>Ubicación de la batería</b>	Central
<b>Tracción</b>	Delantera
<b>Caja de cambios</b>	Automático
<b>Número de velocidades</b>	1

<b>Tipo de mando</b>	Selección
<b>Tipo de Embrague</b>	Sin embrague
<b>Neumáticos delanteros</b>	225/65 R17
<b>Neumáticos traseros</b>	225/65 R17
<b>Llantas delanteras</b>	7.5 x 18
<b>Llantas Traseras</b>	7.5 x 18

*Tabla 103. Ficha técnica vehículo eléctrico BYD e6.*