

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA
PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA
DE FUENTE SONORA ARTIFICIAL PARA
LA MEDIDA DE RUIDO DE RODADURA
EN BANCO DE NEUMÁTICOS"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre-2020

AUTOR: Jorge Martínez Rocamora

DIRECTOR/ES: Nuria Campillo Davó

RESUMEN DEL ESTUDIO

La interacción del neumático con la calzada produce el sonido conocido como ruido de rodadura. Este ruido es la principal fuente de emisión sonora causado por el tráfico rodado cuando se circula a velocidades de más de 30 km/h.

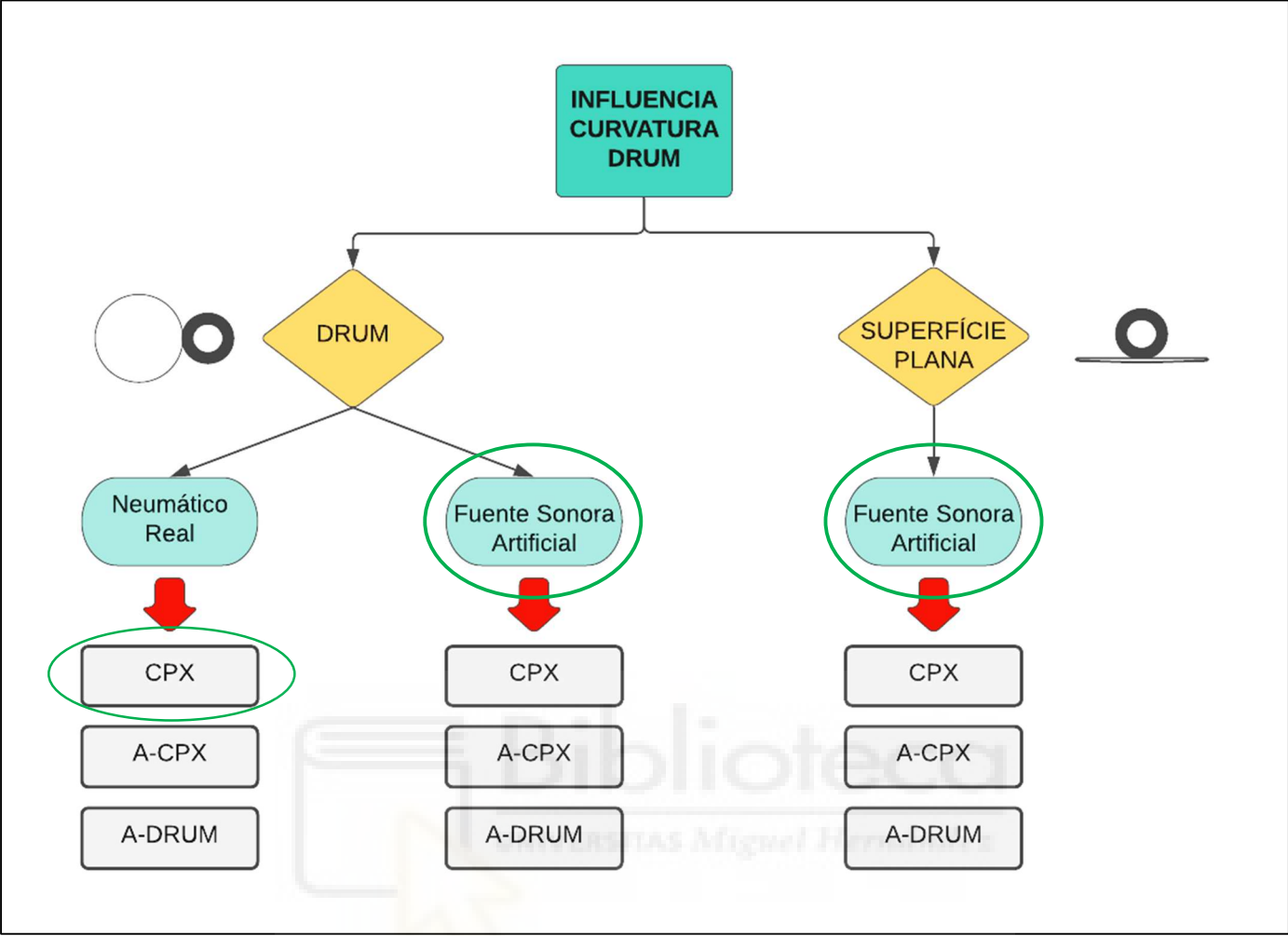
Durante varios años, se ha estado analizando este ruido utilizando diferentes métodos. Estos métodos convencionales tienen varias desventajas y limitaciones tales como la falta de repetitividad, la influencia de factores ambientales o los diferentes resultados que pueden ser obtenidos dependiendo de la pista de ensayo o del vehículo con el cual se lleven a cabo los ensayos. Hace falta, por tanto, una metodología de ensayo que sea capaz de eliminar o reducir todas las desventajas enumeradas anteriormente y mediante la cual la medida del ruido de rodadura sea más rápida, fiable y económica.

Por esta razón, la Universidad Miguel Hernández de Elche lleva varios años trabajando en el análisis del ruido de rodadura.

El presente trabajo fin de grado forma parte de una línea de investigación más amplia, centrada en el análisis de la influencia de la curvatura del tambor sobre la emisión y propagación sonora del ruido de rodadura generado por neumáticos rodando en banco de ensayos. En concreto, el trabajo realizado en el presente TFG recoge un estudio preliminar de la emisión sonora de un neumático rodando en banco de ensayos, basado en la medida de los niveles sonoros registrados en posiciones análogas al ensayo CPX.

Los resultados obtenidos en este estudio se emplearán en un trabajo futuro para diseñar la emisión sonora de una fuente sonora artificial, que, apoyada tanto en banco como en superficie plana, permitirá caracterizar el efecto de la curvatura del tambor sobre la propagación sonora en el entorno del neumático. En el presente trabajo, se presenta también la construcción de dicha fuente sonora artificial, que ha sido fabricada con el mismo tipo de neumático que el empleado en las mediciones sonoras en banco.

A continuación, se muestra mediante un esquema la línea de investigación que estudia la influencia de la curvatura del tambor/drum y la posición en la que se sitúa el presente estudio.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MARCO CONCEPTUAL.....	2
1.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO	5
2. RUIDO EN VEHÍCULOS	6
2.1. GENERACIÓN DEL RUIDO	7
2.1.1. RUIDO MECÁNICO	8
2.1.2. RUIDO AERODINÁMICO	8
2.1.3. RUIDO DE RODADURA.....	8
2.2. MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO	11
2.3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL RUIDO DE RODADURA	18
2.3.1. MÉTODO CPX.....	19
2.3.2. MÉTODO DRUM	24
2.4. NORMATIVA RELACIONADA	27
3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	29
3.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL	30
3.1.1. TUG ARTIFICIAL NOISE SOURCE	30
3.1.2. M + P NOISE SOURCE	31
3.1.3. FUENTE PARA ESTUDIO SPERoN	31
3.1.4. FUENTE SONORA ARTIFICIAL UMH	32
3.2. METODOLOGÍAS DE RUIDO DE RODADURA EN BANCO.....	33
3.2.1. TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK (TUG): THE SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)	33
3.2.2. PURDUE UNIVERSITY, INDIANA (USA).....	34
3.2.3. SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)	35
3.2.4. TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK(TUG) Y PROELASTIC SURFACE(PERS) .	35
3.2.5. KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, BELGIUM	37
3.2.6. UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE	38

4. MATERIALES Y MÉTODOS	49
4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	50
4.2. DISPOSICIÓN DEL MATERIAL Y CALIBRACIÓN.....	51
4.2.1. MATERIAL UTILIZADO.....	51
4.2.2. CALIBRACIÓN.....	51
4.3. MEDICIONES EN POSICIONES ANÁLOGAS AL ENSAYO CPX.....	53
4.3.1. DISEÑO SOPORTES PARA MICRÓFONOS.....	53
4.3.2. POSICIONES DE LOS MICRÓFONOS.....	54
4.3.3. DESCRIPCIÓN DEL NEUMÁTICO	57
4.3.4. OBTENCIÓN DE DATOS.....	58
5. ENSAYOS Y RESULTADOS	61
5.1. PROCESADO DE DATOS Y RESULTADOS.....	62
5.1.1. PROCESADO DE DATOS	62
5.1.2. RESULTADOS PRESIÓN SONORA vs FRECUENCIA	62
5.1.3. RESULTADOS VALORES GLOBALES.....	77
5.1.4. RESULTADOS CURVA LOGARÍTMICA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.....	80
5.1.5. RESULTADOS IMPACTO DE LOS BLOQUES DEL NEUMÁTICO.....	88
5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS	105
6. CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA FUENTE SONORA ARTIFICIAL	107
6.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL	108
6.1.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ (UMH)	108
6.1.2. PUESTA A PUNTO DE LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.....	112
6.1.3. VERIFICACIÓN DE LA EMISIÓN SONORA DE LOS ALTAVOCES.....	112
6.2. CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.....	116
7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS	122
7.1. CONCLUSIÓN.....	123
7.2. TRABAJOS FUTUROS	124
BIBLIOGRAFÍA	125

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Método de reducción del ruido de rodadura.....	4
FIGURA 2. Fuentes sonoras en un vehículo.....	7
FIGURA 3. Aportación de potencia sonora en el ruido total del vehículo.....	9
FIGURA 4. Partes y elementos de la sección de un neumático radial.....	9
FIGURA 5. Generación de ruido por vibraciones.....	11
FIGURA 6. Generación de ruido por proceso aerodinámico.....	12
FIGURA 7. Amplificación y reducción del sonido.....	13
FIGURA 8. Vibración generada en la banda de rodadura al impactar con el pavimento..	13
FIGURA 9. Efecto “Air pumping”	14
FIGURA 10. Efecto “stick-slip”	15
FIGURA 11. Efecto “Stick-snap”	15
FIGURA 12. Vibración de la carcasa provocada por la rodadura.....	16
FIGURA 13. Efecto bocina/ Horn effect.....	17
FIGURA 14. Amplificación del sonido provocado por la resonancia.....	17
FIGURA 15. Distribución CPX para 2 micrófonos.....	20
FIGURA 16. Montaje normalizado en un ensayo CPX.....	21
FIGURA 17. Disposición de 3 micrófonos método CPX.....	22
FIGURA 18. Disposición de 5 micrófonos para el método CPX.....	23
FIGURA 19. Método CPX en remolque.....	23
FIGURA 20. Tambor interior.....	24
FIGURA 21. Tambor exterior.....	25
FIGURA 22. Superficie semiesférica de medición.....	25
FIGURA 23. Posición de los micrófonos ensayo Drum.....	26
FIGURA 24. Ensayo Drum.....	26
FIGURA 25. TUG artificial noise source.....	30
FIGURA 26. M+P noise source.....	31
FIGURA 27. Fuente para estudios SPERoN.....	32
FIGURA 28. Disposición de los altavoces en la fuente artificial UMH.....	32
FIGURA 29. Nivel sonoro sobre asfalto real y en el rodillo sobre la superficie réplica asfáltica a 80 km/h.....	33
FIGURA 30. Máquina de ensayos Tire-Pavement Test Apparatus (Purdue).....	34

FIGURA 31. Comparación de valores DR y CPX.....	35
FIGURA 32. Ensayo en rodillo cubierto de réplicas de asfalto.....	36
FIGURA 33. Valores globales de presión sonora.....	36
FIGURA 34. Estudio de neumáticos de la Universidad de Leuven.....	37
FIGURA 35. Análisis neumáticos con dibujo y neumáticos lisos.....	38
FIGURA 36. Paralelepípedo de referencia para el ensayo A-CPX.....	39
FIGURA 37. Posiciones de los micrófonos en el ensayo A-CPX.....	40
FIGURA 38. Disposición de los micrófonos en el ensayo A-CPX.....	42
FIGURA 39. Posición de los micrófonos en el ensayo A-CB.....	43
FIGURA 40. Validación datos obtenidos durante el ensayo.....	43
FIGURA 41. Paralelepípedo de referencia.....	44
FIGURA 42. Distribución de micrófonos sobre la superficie semiesférica de medición...45	45
FIGURA 43. Distribución espacial de los micrófonos.....	46
FIGURA 44. Ubicación de los soportes alrededor del neumático.....	47
FIGURA 45. Disposición de los micrófonos durante el ensayo.....	48
FIGURA 46. Ensayo Coast-by para la obtención de datos.....	48
FIGURA 47. Calibrador Bruel & Kjaer 4231.....	51
FIGURA 48. Calibración individual de un micrófono.....	52
FIGURA 49. Gráfica micrófonos en fase.....	52
FIGURA 50. Diseño de la base de los soportes de los micrófonos.....	53
FIGURA 51. Parte superior del soporte.....	53
FIGURA 52. Descripción posiciones micrófonos ISO 11819-2.....	54
FIGURA 53. Adaptación micrófono 7 en el ensayo.....	55
FIGURA 54. Posición de los 7 micrófonos en el ensayo.....	56
FIGURA 55. Ensayo CPX en Drum.....	56
FIGURA 56. Etiquetado del neumático.....	57
FIGURA 57. Dibujo del neumático ensayado.....	58
FIGURA 58. Sentido de giro normal.....	59
FIGURA 59. Sentido de giro inverso.....	59
FIGURA 60. Aplicación del 80% de índice de carga durante el ensayo.....	60
FIGURA 61. MICRÓFONO 1 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	63
FIGURA 62. MICRÓFONO 1 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	63

FIGURA 63. MICRÓFONO 2 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	64
FIGURA 64. MICRÓFONO 2 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	64
FIGURA 65. MICRÓFONO 3 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	65
FIGURA 66. MICRÓFONO 3 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	65
FIGURA 67. MICRÓFONO 4 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	66
FIGURA 68. MICRÓFONO 4 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	66
FIGURA 69. MICRÓFONO 5 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	67
FIGURA 70. MICRÓFONO 5 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	67
FIGURA 71. MICRÓFONO 6 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	68
FIGURA 72. MICRÓFONO 6 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	68
FIGURA 73. MICRÓFONO 7 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h).....	69
FIGURA 74. MICRÓFONO 7 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h).....	69
FIGURA 75. MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	70
FIGURA 76. MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	70
FIGURA 77. MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	71
FIGURA 78. MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	71
FIGURA 79. MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	72
FIGURA 80. MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	72
FIGURA 81. MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	73
FIGURA 82. MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	73
FIGURA 83. MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	74
FIGURA 84. MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	74
FIGURA 85. MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	75
FIGURA 86. MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	75
FIGURA 87. MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h).....	76
FIGURA 88. MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h).....	76
FIGURA 89. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO NORMAL (100 Hz-10000Hz).....	78
FIGURA 90. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO NORMAL (315 Hz-5000Hz).....	78
FIGURA 91. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO INVERSO (100 Hz-10000Hz).....	79
FIGURA 92. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO INVERSO (315 Hz-5000Hz).....	79
FIGURA 93. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 1.....	81
FIGURA 94. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 2.....	81

FIGURA 95. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 3.....	82
FIGURA 96. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 4.....	82
FIGURA 97. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 5.....	83
FIGURA 98. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 6.....	83
FIGURA 99. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 7.....	84
FIGURA 100. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 1.....	84
FIGURA 101. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 2.....	85
FIGURA 102. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 3.....	85
FIGURA 103. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 4.....	86
FIGURA 104. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 5.....	86
FIGURA 105. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 6.....	87
FIGURA 106. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 7.....	87
FIGURA 107. BANDA DE RODADURA CON DISTINTAS MEDIDAS DE TACO.....	88
FIGURA 108. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 (10 km/h-60 km/h).....	91
FIGURA 109. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 (70 km/h-120 km/h).....	91
FIGURA 110. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 (10 km/h-60 km/h).....	92
FIGURA 111. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 (70 km/h-120 km/h).....	92
FIGURA 112. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 (10 km/h-60 km/h).....	93
FIGURA 113. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 (70 km/h-120 km/h).....	93
FIGURA 114. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 (10 km/h-60 km/h).....	94
FIGURA 115. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 (70 km/h-120 km/h).....	94
FIGURA 116. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 (10 km/h-60 km/h).....	95
FIGURA 117. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 (70 km/h-120 km/h).....	95
FIGURA 118. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 (10 km/h-60 km/h).....	96
FIGURA 119. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 (70 km/h-120 km/h).....	96
FIGURA 120. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 (10 km/h-60 km/h).....	97
FIGURA 121. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 (70 km/h-120 km/h).....	97
FIGURA 122. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	98
FIGURA 123. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	98

FIGURA 124. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	99
FIGURA 125. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	99
FIGURA 126. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	100
FIGURA 127. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	100
FIGURA 128. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	101
FIGURA 129. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	101
FIGURA 130. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	102
FIGURA 131. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	102
FIGURA 132. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	103
FIGURA 133. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	103
FIGURA 134. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)	104
FIGURA 135. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h).....	104
FIGURA 136. Modelo estándar de fuente sonora artificial.....	108
FIGURA 137. Diseño óptimo fuente sonora artificial.....	109
FIGURA 138. Esquema de conexiones fuente sonora artificial.....	110
FIGURA 139. Estructura soporte y anclaje a la llanta.....	111
FIGURA 140. Instalación completa fuente sonora artificial.....	111
FIGURA 141. Descripción gráfica método de ensayo comparativo.....	113
FIGURA 142. Ensayo conexiones serie-individual.....	114
FIGURA 143. Gráfica comparación conexiones.....	115
FIGURA 144. Distribución de los altavoces en la nueva fuente artificial.....	116
FIGURA 145. Conexiones en serie nueva fuente artificial.....	117
FIGURA 146. Taladro de columna.....	118

FIGURA 147. Corona para taladro.....	118
FIGURA 148. Realización de huecos en el neumático.....	118
FIGURA 149. Distribución de huecos para alojar los altavoces en el neumático.....	119
FIGURA 150. Colocación de los cables por el interior del neumático.....	120
FIGURA 151. Montaje de los altavoces utilizando soldadura con estaño	120
FIGURA 152. Fuentes sonora artificial montada.....	121



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Posiciones de los micrófonos en un ensayo CPX.....	21
Tabla 2. Coordenadas de los micrófonos en el ensayo A-CPX.....	40
Tabla 3. Coordenadas (en m) de las posiciones de los micrófonos.....	45
Tabla 4. Posiciones ensayo CPX.....	54
Tabla 5. Niveles globales presión sonora rango de frecuencias de 100Hz-10000 Hz.....	77
Tabla 6. Niveles globales presión sonora rango de frecuencias de 315Hz-5000 Hz.....	77
Tabla 7. Ecuaciones de las curvas logarítmicas de cada micrófono ambos sentidos.....	80
Tabla 8. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 19 mm.....	89
Tabla 9. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 22 mm.....	89
Tabla 10. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 23 mm.....	90
Tabla 11. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 27 mm.....	90



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MARCO CONCEPTUAL

El **ruido ambiental**, es un problema actual que se produce comúnmente en las grandes ciudades y normalmente es generado por acciones que realiza el ser humano.

Se conoce como ruido [1], al sonido sin articulación que resulta molesto. Ambiental, por su parte, es aquello vinculado al ambiente.

La noción de ruido ambiental, por lo tanto, se refiere a los sonidos poco agradables e incluso dañinos que modifican las condiciones consideradas como normales o tolerables en una cierta región. El ruido ambiental excesivo provoca lo que se conoce como **contaminación acústica**.

El término **contaminación acústica**, **contaminación sónica** o **contaminación sonora**, hace referencia al exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente en una determinada zona. Si bien, el ruido no se acumula, traslada o mantiene en el tiempo como las otras contaminaciones, pero también puede causar grandes daños en la calidad de vida de las personas si no se controla adecuadamente.

Esta **contaminación acústica**, normalmente es provocada por las actividades humanas donde el ruido es considerado como contaminante. La larga exposición al exceso de ruido o a un sonido molesto, produce efectos negativos sobre la salud auditiva, física y mental de los seres vivos, produciendo efectos nocivos fisiológicos y psicológicos en dichos seres vivos.

Los organismos internacionales afirman que se corre el riesgo de una disminución importante en la capacidad auditiva, así como la posibilidad de trastornos que van desde lo psicológico (paranoia, perversión) hasta lo fisiológico por la excesiva exposición a la contaminación sónica. Un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), considera los 70DbA [34]. Por encima de este nivel, el sonido resulta inapropiado para el descanso y la comunicación.

Tanto España como la Unión Europea, han establecido a lo largo de los años una serie de leyes y normas para reducir los niveles sonoros evitando así que se produzcan efectos dañinos. Las principales causas de la contaminación acústica son aquellas relacionadas con las actividades humanas como el transporte, la construcción de edificios, obras públicas y las industrias, entre otras.

En los últimos años, se ha observado como las industrias han aumentado sus esfuerzos para disminuir la emisión de ruido en fuentes específicas. Una opción para facilitar esta determinación de ruido en dichas fuentes es localizando el punto de dicha fuente donde se genera mayor cantidad de energía sonora y actuar directamente sobre él para disminuir así este tipo de emisión.

Para poder cumplir con los niveles máximos establecido por la legislación, es necesario conocer los aspectos más significativos de cada fuente de ruido, siendo el **tráfico rodado** la fuente sonora de mayor repercusión en entornos urbanos. El ruido regenerado por el tráfico rodado se compone de tres fuentes principales: el **ruido mecánico** (sistema motriz, escape y sistemas mecánicos), el **ruido de rodadura** (interacción entre el neumático y el pavimento) y **ruido aerodinámico**.

Durante años, las medidas encaminadas a la disminución del ruido generado por el tráfico se han basado únicamente en estrategias de diseño de dispositivos reductores de ruido, tales como pantallas acústicas. Pero en los últimos veinticinco años, muchos fabricantes de automóviles han conseguido disminuir notablemente los ruidos debidos al motor, a la transmisión y al escape, provocando con ello que el ruido generado por el contacto neumático/carretera llegue a ser predominante en la mayoría de las situaciones a velocidades medias y altas.

Para la disminución del ruido de rodadura, las soluciones pasan por actuar sobre el neumático y las características del pavimento, siendo de vital importancia tener en cuenta la influencia de las características de la superficie de rodadura sobre el ruido generado en la interacción neumático/asfalto. Es por ello, que los principales fabricantes de neumáticos están tomando medidas en el desarrollo de nuevos modelos con la capacidad de disminuir el ruido de rodadura.

Para conseguir reducir este ruido, los fabricantes modifican el tipo de goma, optimizando el dibujo de la banda de rodadura y reduciendo las resonancias internas de la propia estructura del neumático. Llevarlo a la práctica es muy complicado debido a que cuando se modifica el neumático para mejorar alguna de sus características, se modifica también el comportamiento de este notablemente. Por ejemplo, un compuesto que sea poco ruidoso es probable que tenga una baja adherencia, un dibujo que atrape poco aire no deja salir bien el agua y favorece el aquaplaning, etc.

Una de las formas para reducir el ruido de la rodadura de los neumáticos es el **"sound absorber" de Hankook** [2]. Este sistema consiste en una espuma que se adhiere a la cara interior del neumático y produce dos efectos. Por un lado, absorbe las ondas sonoras que se producen en el interior de la rueda, y por otro, **modifica la frecuencia de resonancia natural del neumático**; es decir, la estructura de la rueda vibra de una manera diferente al rodar y se busca que esa vibración esté fuera del rango de frecuencias que oye nuestro oído.

Otra marca que se ha unido a desarrollar neumáticos más silenciosos es Goodyear [3]. Para ello, esta marca se ha centrado en tres problemas clave como son: el aire que queda atrapado entre el neumático y el asfalto; las vibraciones que se producen al rodar el neumático; y el eco y las resonancias que se producen en la cavidad interior de las ruedas.

Para atajar el problema que provoca el aire que queda entre el neumático y el pavimento, **Goodyear ha rediseñado el dibujo de la banda de rodadura** para canalizar mejor el aire y reducir el ruido que hace su evacuación.

Respecto al problema sobre las vibraciones del neumático, se puede mitigar variando la frecuencia natural de vibración del neumático. Hay frecuencias sonoras que el oído humano no percibe y como es imposible eliminar la vibración, la marca procura que la vibración se produzca en un rango inaudible para el oído humano. Esto se consigue **modificando el compuesto del neumático y también mediante la adhesión de una espuma en la cara interior de la banda de rodadura.**

El tercer factor que han intentado corregir, relacionado con el eco y la resonancia del interior del neumático, lo han resuelto con esa misma banda de espuma en el interior del neumático. Además de reducir el tamaño de la “caja de resonancia” que forma el neumático con la llanta, esta espuma absorbe las ondas sonoras y reduce el ruido; similar al sistema utilizado por Hankook.



FIGURA 1. Método de reducción del ruido de rodadura [2] [3]

1.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

El ruido de rodadura es la principal fuente de emisión sonora causado por el tráfico rodado cuando se circula a velocidades de más de 30 km/h. Durante varios años, la Universidad Miguel Hernández ha estudiado el ruido de rodadura con diversos métodos.

Estos estudios, se han desarrollado para mejorar las metodologías tradicionales en las que se encuentran varias desventajas y limitaciones tales como la falta de repetitividad, la influencia de factores ambientales o los diferentes resultados que pueden ser obtenidos dependiendo de la pista de ensayo o del vehículo con el cual se lleven a cabo los ensayos.

El presente trabajo fin de grado forma parte de una línea de investigación más amplia, centrada en el análisis de la influencia de la curvatura del tambor sobre la emisión y propagación sonora del ruido de rodadura generado por neumáticos rodando en banco de ensayos. En concreto, el trabajo realizado en el presente TFG recoge un estudio preliminar de la emisión sonora de un neumático rodando en banco de ensayos, basado en la medida de los niveles sonoros registrados en posiciones análogas al ensayo CPX.

Los resultados obtenidos en este estudio se emplearán en un trabajo futuro para diseñar la emisión sonora de una fuente sonora artificial, que, apoyada tanto en banco como en superficie plana, permitirá caracterizar el efecto de la curvatura del tambor sobre la propagación sonora en el entorno del neumático. En el presente trabajo, se presenta también la construcción de dicha fuente sonora artificial, que ha sido fabricada con el mismo tipo de neumático que el empleado en las mediciones sonoras en banco.

CAPÍTULO 2

RUIDO EN VEHÍCULOS



2. RUIDO EN VEHÍCULOS

2.1. GENERACIÓN DEL RUIDO

La emisión sonora generada por un vehículo en circulación, no se puede agrupar en una única fuente de ruido, sino que el nivel sonoro global se ve determinado por la contribución de diversas fuentes. El ruido emitido por los vehículos circulando por las carreteras depende de diversos factores tales como las características del propio vehículo, la velocidad y régimen de circulación y las características de la rodadura.

Desde el punto de vista acústico, el ruido de un automóvil [4] depende del tipo de vehículo, su masa, la potencia del motor, el tipo de combustión, el estado de conservación del vehículo y sus componentes, etc.

Las condiciones de funcionamiento del vehículo y las características y estado de la calzada también influyen en la emisión sonora.

CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES SONORAS DE UN VEHÍCULO:

1. Ruido de origen mecánico
2. Ruido de origen aerodinámico
3. Ruido de rodadura

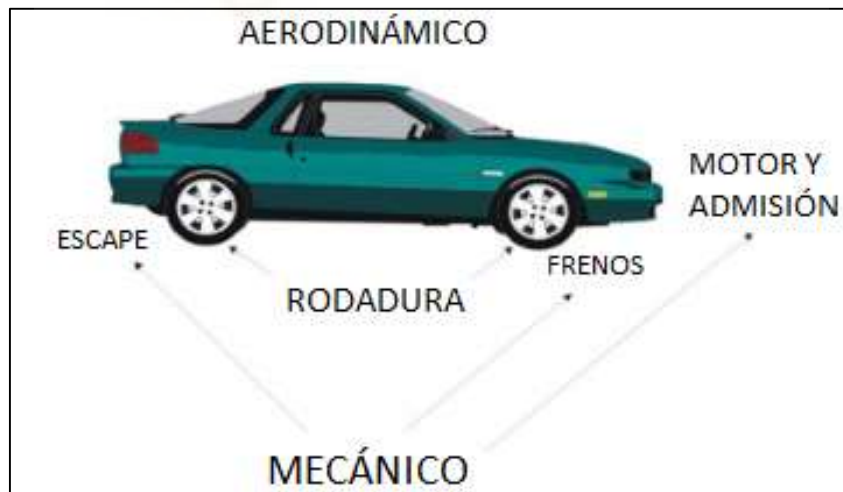


FIGURA 2. Fuentes sonoras en un vehículo [4]

2.1.1. RUIDO MECÁNICO

Este tipo de ruido está originado por las fuentes relacionadas con el motor propulsor y los elementos mecánicos que constituyen el vehículo. Son las fuentes preponderantes a velocidades bajas. Dependen fundamentalmente de las características del vehículo y del régimen y carga del motor.

Principales fuentes que provocan ruido mecánico [4]:

- Motor
- Admisión
- Escape
- Frenos

En los últimos años, se ha ido reduciendo este ruido mecánico debido al lanzamiento de vehículos con motores híbridos y eléctricos, y a las mejoras en los motores de combustión, predominando como fuente de ruido en el vehículo el ruido de rodadura.

2.1.2. RUIDO AERODINÁMICO

Este tipo de ruido se origina como resultado de las perturbaciones producidas por las turbulencias, fruto de la interacción del flujo de aire y la estructura del vehículo en su movimiento. La importancia relativa de esta fuente respecto al total del ruido del vehículo ha ido desapareciendo con la mejora en los diseños, materiales y acabados de los vehículos modernos, pasando a ser relevante su estudio únicamente para la optimización del confort acústico en el interior de la cabina de conducción. Este ruido, se suele englobar dentro del ruido de rodadura en los modelos de predicción de ruido.

2.1.3. RUIDO DE RODADURA

El ruido de rodadura se genera durante el contacto de los neumáticos rodando sobre la superficie de la carretera, teniendo una influencia considerable sobre los niveles de ruido emitidos, en función de la velocidad de circulación. Diferentes estudios demuestran que a partir de velocidades cercanas a los 30 km/h, el ruido de rodadura empieza a ser predominante sobre el ruido motor [5], y por ello se profundizará en el estudio de esta fuente sonora.

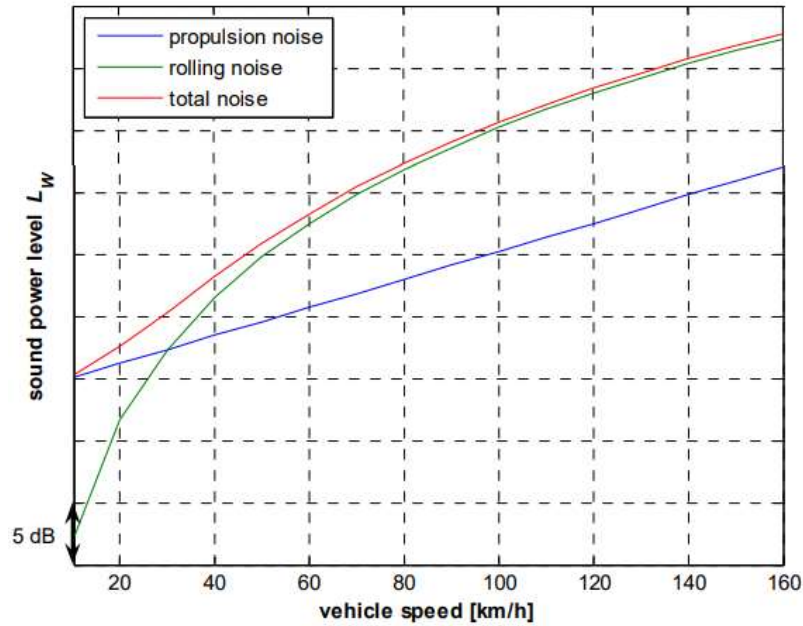


FIGURA 3. Aportación de potencia sonora en el ruido total del vehículo [6]

En la figura anterior, se puede observar como a partir de una determinada velocidad, la fuente sonora predominante es la rodadura de los neumáticos. Para ello, es necesario conocer las partes del neumático, mostradas en la *figura 4*, y la misión que desempeñan en el vehículo.

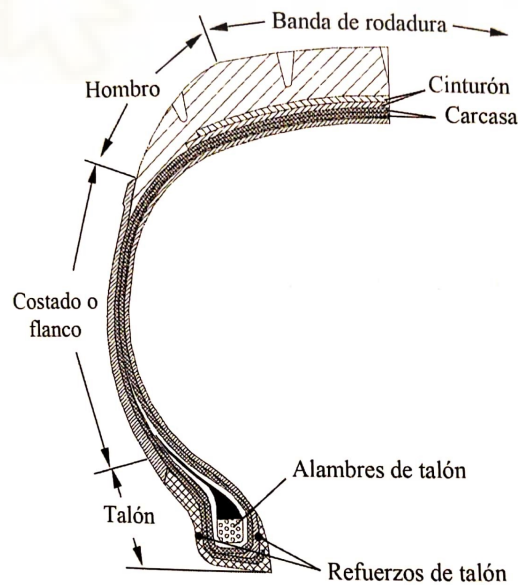


FIGURA 4. Partes y elementos de la sección de un neumático radial [7]

En la sección de la cubierta de la *figura 4*, se puede ver la forma y las diferentes partes que la componen, todas ellas con un tipo de estructura y unas características acordes a la misión que deben cumplir.

A continuación, se describen las distintas partes del neumático [7]:

- Carcasa: parte de la cubierta que le confiere la resistencia, soportando la presión de inflado y los esfuerzos exteriores. Está compuesta por capas superpuestas de telas o lonas embebidas en caucho y que se extienden de talón a talón. El tamaño de las cuerdas o cables del tejido, así como el número de capas, varía según las dimensiones y el tipo de utilización para el que se diseña la cubierta.
- Talón: parte del neumático que se asienta sobre la llanta, fijando el neumático a la misma. Para conferir a la zona la suficiente rigidez se dispone de un aro metálico, compuesto normalmente por acero trenzado, recubierto de caucho y tejidos. Los talones quedan unidos a los costados a través de los llamados refuerzos de talón y deben adaptarse perfectamente a la pestaña de la llanta sobre la que se montan para proporcionar una buena estanqueidad, especialmente en cubiertas que no llevan cámara.
- Cinturón: compuesto por varias lonas y alambres que forman un anillo superpuesto a la carcasa, contribuye a aumentar la rigidez de la zona.
- La banda de rodadura: zona en la que va grabado el dibujo en forma de tacos, nervios, ranuras y estrías, constituye la zona de contacto con el suelo, por lo que debe tener buenas propiedades antidesgaste, de adherencia, resistencia al calor, etc.
- Hombros: son los extremos laterales de la banda de rodadura y le sirven de protección contra los roces y choques laterales. Es una zona de generación importante de calor por ser la unión entre el flanco y la banda de rodadura.
- Flancos: parte comprendida entre talón y hombro. Deben poseer una elevada resistencia para proteger las telas de la carcasa contra golpes, roces, etc. Por otro lado, deben tener una adecuada flexibilidad para complementar a la suspensión, proporcionando al neumático el amortiguamiento y la elasticidad necesarios.

2.2. MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO

En la generación y amplificación del ruido de rodadura, intervienen varios fenómenos de índole compleja. En este apartado, se procederá a exponer los distintos mecanismos de generación de este ruido agrupándolos en 3 grupos [5] [8][33]:

- **Generación de ruido por vibraciones.**

Este tipo de generación de ruido cubre todas las formas de interacción entre el neumático y el pavimento. Este tipo de interacción genera la vibración de la banda de rodadura y su posterior radiación. Estas vibraciones pueden ser causadas por la no homogeneidad de la estructura de la cubierta o por la rugosidad del pavimento. El siguiente grafico lista las fuentes típicas de ruidos [33].

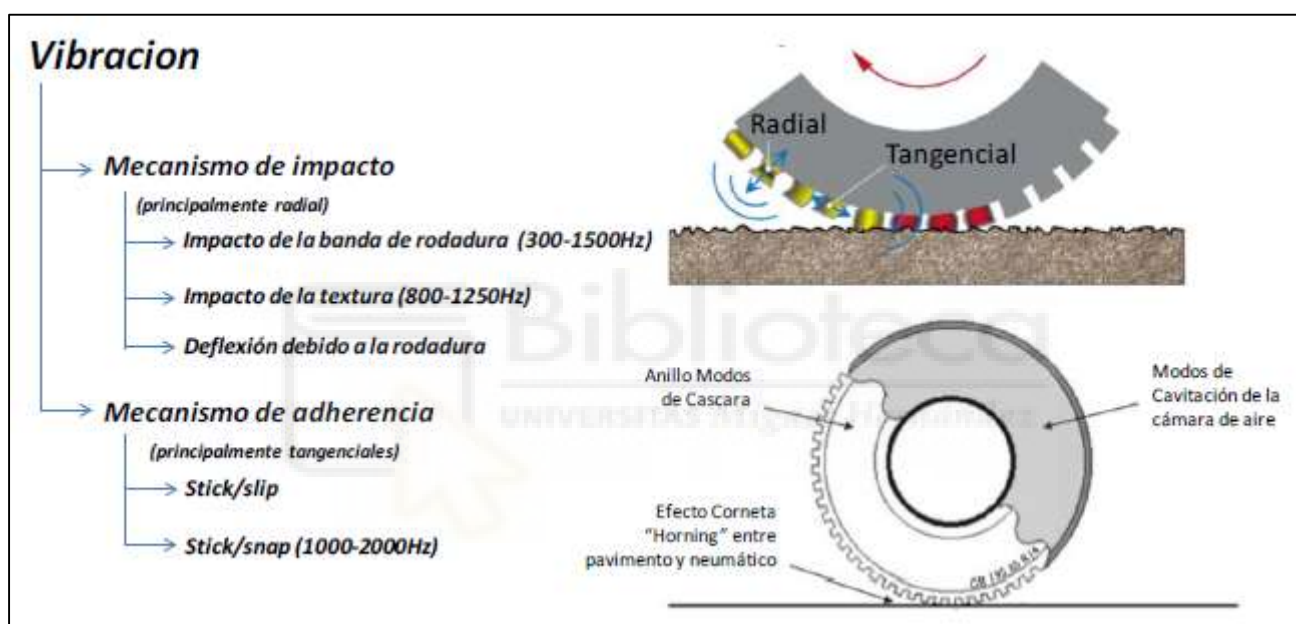


FIGURA 5. Generación de ruido por vibraciones [33]

- **Generación de ruido por proceso aerodinámico.**

Este segundo mecanismo de generación de ruido está asociado al desplazamiento de volúmenes de aire sobre el dibujo del neumático. En la siguiente figura se detallan los mecanismos correspondientes a este grupo [33].

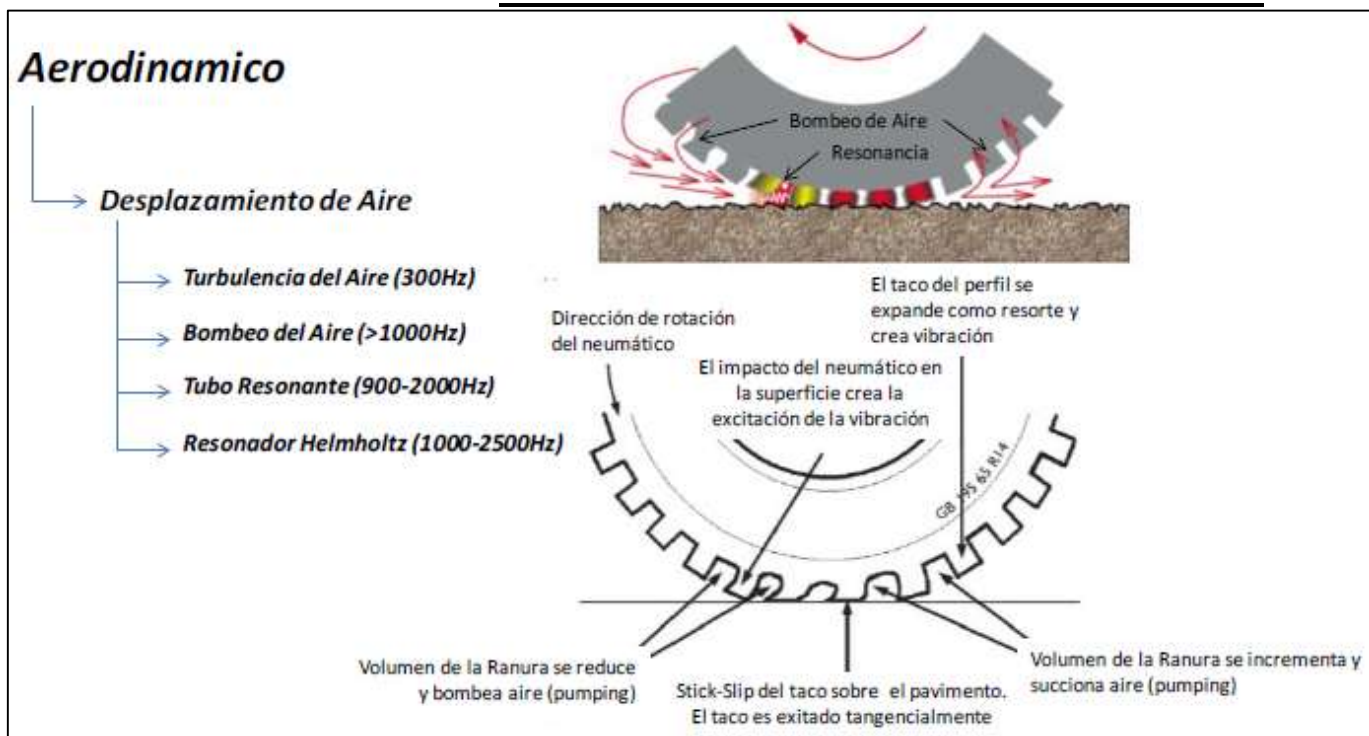


FIGURA 6. Generación de ruido por proceso aerodinámico [33]

- **Amplificación o reducción**

Durante la propagación del sonido generado por las fuentes anteriormente listadas, debido a la configuración del sistema y las propiedades mecánicas del pavimento o superficie de rodadura, se generan amplificaciones o reducciones de los niveles de ruido captados. La siguiente figura lista las fuentes correspondientes a esta categoría [33].

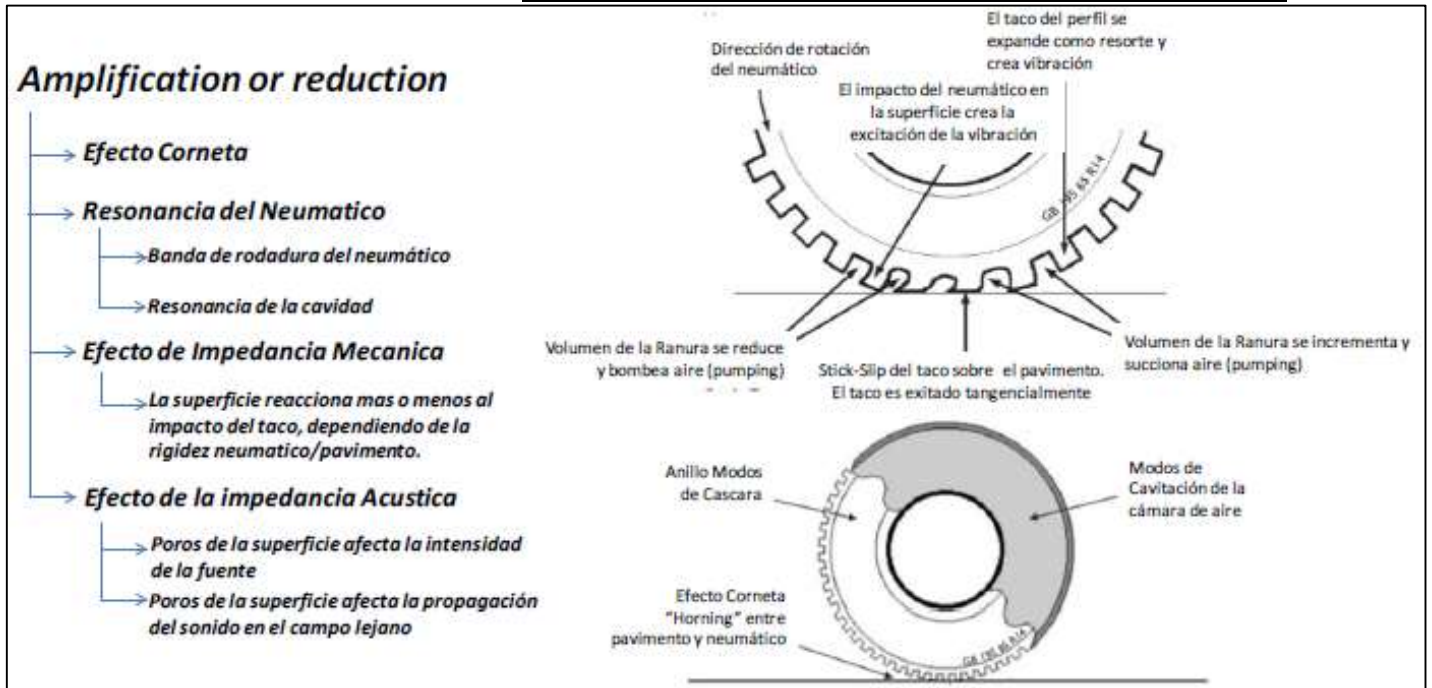


FIGURA 7. Amplificación y reducción del sonido [33]

Los impactos y golpes causados por la variación de fuerzas entre la banda de rodadura y la calzada durante el movimiento generan una respuesta vibratoria de la carcasa del neumático que unida a los efectos aerodinámicos entre la banda y la superficie de la carretera causan el ruido generado por la rodadura.

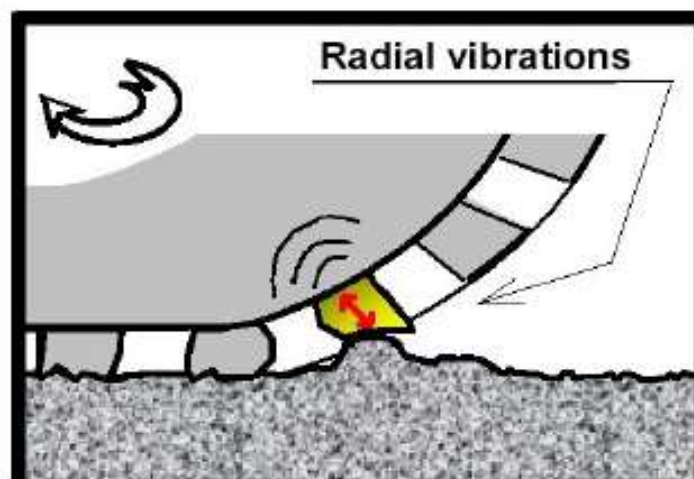


FIGURA 8. Vibración generada en la banda de rodadura al impactar con el pavimento [5]

A medida que la huella contacta con la superficie, los impactos son transmitidos por medio del bloque, generando vibraciones y comprimiendo a su vez el aire atrapado entre los surcos del neumático.

Este aire atrapado entre los bloques del neumático se comprime y descomprime con el paso del neumático, provocando lo que se conoce como "air pumping". Este suceso desencadena un efecto de resonancia longitudinal en las ranuras de los neumáticos debido a los cambios de presión de aire, produciéndose un efecto acústico similar al sonido creado al aplaudir.

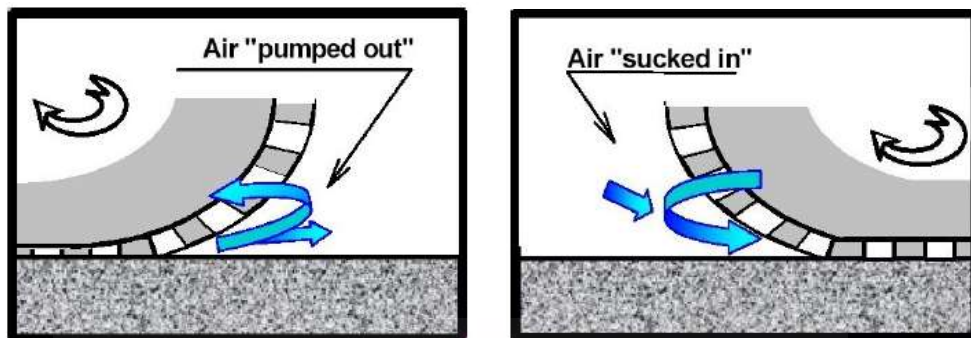


FIGURA 9. Efecto "Air pumping" [5]

A su vez, las fuerzas de fricción que actúan en la cara de contacto con la superficie de los bloques causan el efecto "stick-slip". Dichos esfuerzos son transferidos desde el neumático al pavimento en los momentos de aceleración y frenado experimentándose importantes fuerzas laterales en el interfaz neumático/pavimento. En el caso de que estas fuerzas laterales excedan los límites de fricción, el neumático perderá adherencia con el pavimento generando ruido y vibraciones.

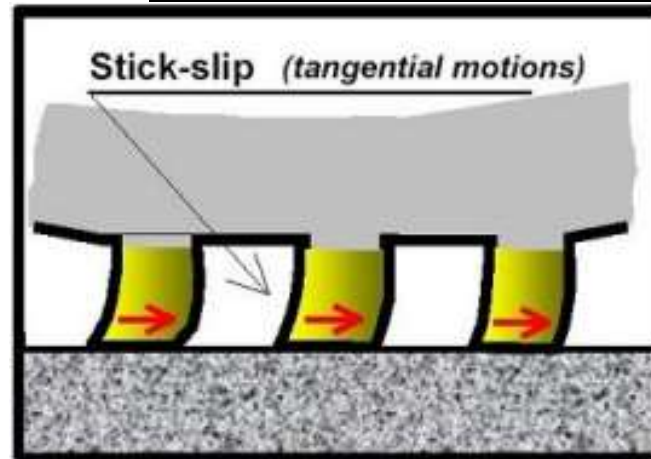


FIGURA 10. Efecto "stick-slip" [5]

A medida que la banda del neumático va separándose de la superficie durante el proceso de rodadura, el aire comprimido en las ranuras es expulsado rápidamente finalizando el proceso del "air pumping" y el bloque del neumático vuelve a su posición de rodadura inicial generado ruido por el efecto "stick-snap" por el efecto de descompresión y adhesión de superficie de contacto.

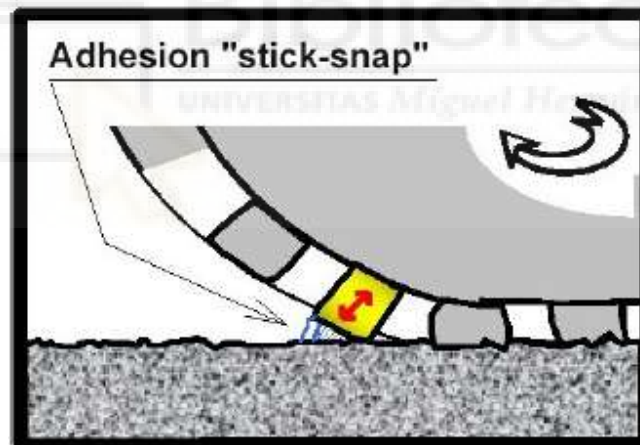


FIGURA 11. Efecto "Stick-snap" [5]

En cuanto a las vibraciones del neumático, estas se generan por los impactos y las desviaciones ocurridas como consecuencia de los cambios de contacto con la superficie y como resultado del movimiento de los elementos de la banda de rodadura.

El bloque de la banda de rodadura que entra en contacto con la superficie impacta y genera vibraciones conducidas radialmente al interior del neumático. Durante este proceso, la tensión ejercida en la banda aumenta y disminuye dependiendo de las fuerzas de rozamiento entre el neumático y la carretera mientras el bloque pasa a través de la zona de contacto. A medida que el borde de salida del bloque deja la zona de

contacto, se libera una tensión que hace que rápidamente el bloque regrese a su radio sin desviarse, el regreso del bloque a su radio original se conoce como el efecto "snap-out", el cuál excita la vibraciones radiales y tangenciales en la estructura del neumático.

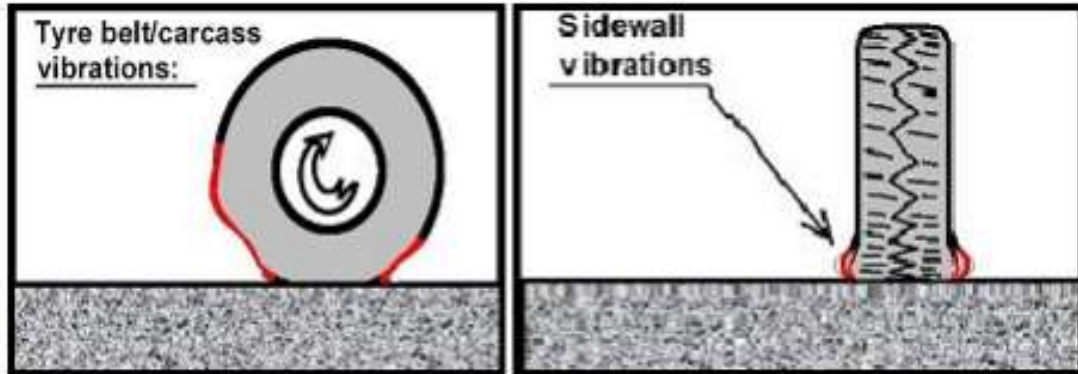


FIGURA 12. Vibración de la carcasa provocada por la rodadura [5]

El movimiento del aire en las cavidades de la banda de rodadura, como ya hemos mencionado anteriormente y llamado "air pumping", provoca un efecto adicional llamado "organ pipe", producido por la resonancia del aire atrapado en las ranuras longitudinales en la superficie de contacto. El efecto "organ pipe" generado por los mecanismos aerodinámicos tiende a ser importante en el rango de frecuencias próximo a 1000 Hz, siendo ésta la frecuencia característica del ruido de rodadura.

Los mecanismos de generación de ruido en la rodadura expuestos se ven amplificados por varios fenómenos físicos dependiendo de las características de la zona de contacto entre el neumático y el pavimento.

El primero de estos mecanismos sería el "Horn Effect" o Efecto Bocina, el cual asemeja la geometría de un neumático en movimiento a la de un cuerno semejante al empleado en los instrumentos musicales capaces de amplificar el sonido emitido. Debido a esto, cualquier sonido generado por cualquiera de los mecanismos descritos puede ser amplificado si se provoca próximo a la "garganta del cuerno".

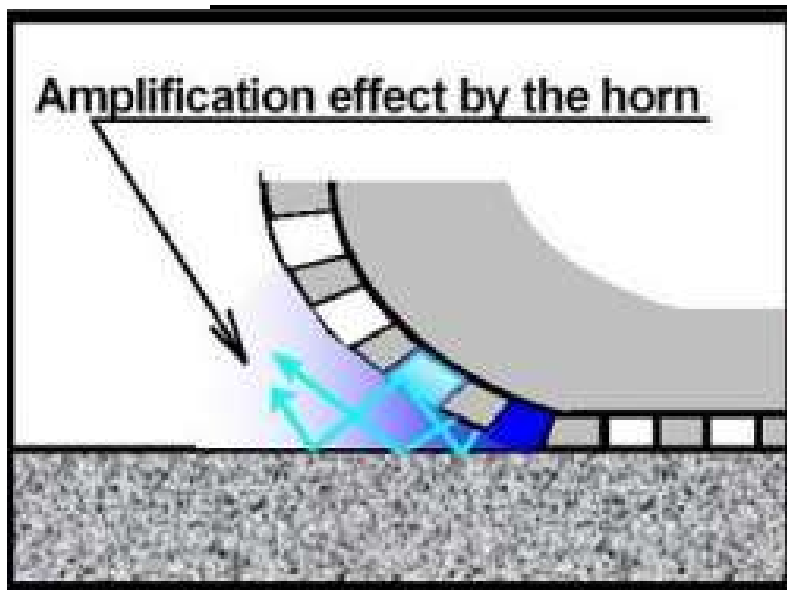


FIGURA 13. Efecto bocina/ Horn effect [5]

Por otra parte, la banda de rodadura en contacto con el pavimento genera unos pasajes por los que circula el aire, apareciendo fenómenos acústicos que propician la generación de sonido mediante efectos similares a los producidos por los resonadores de Helmholtz.

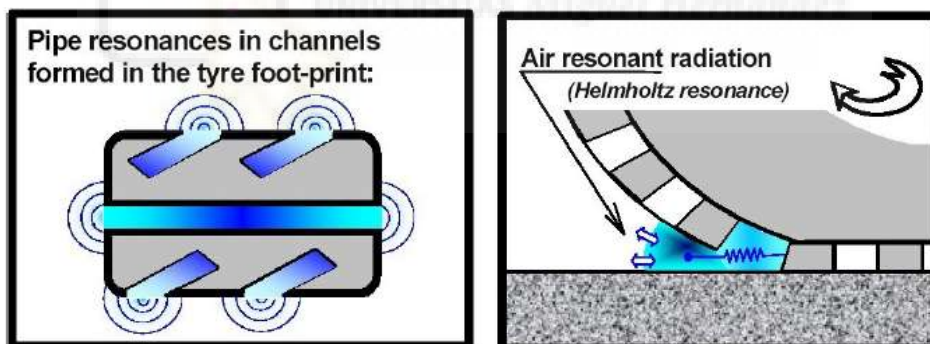
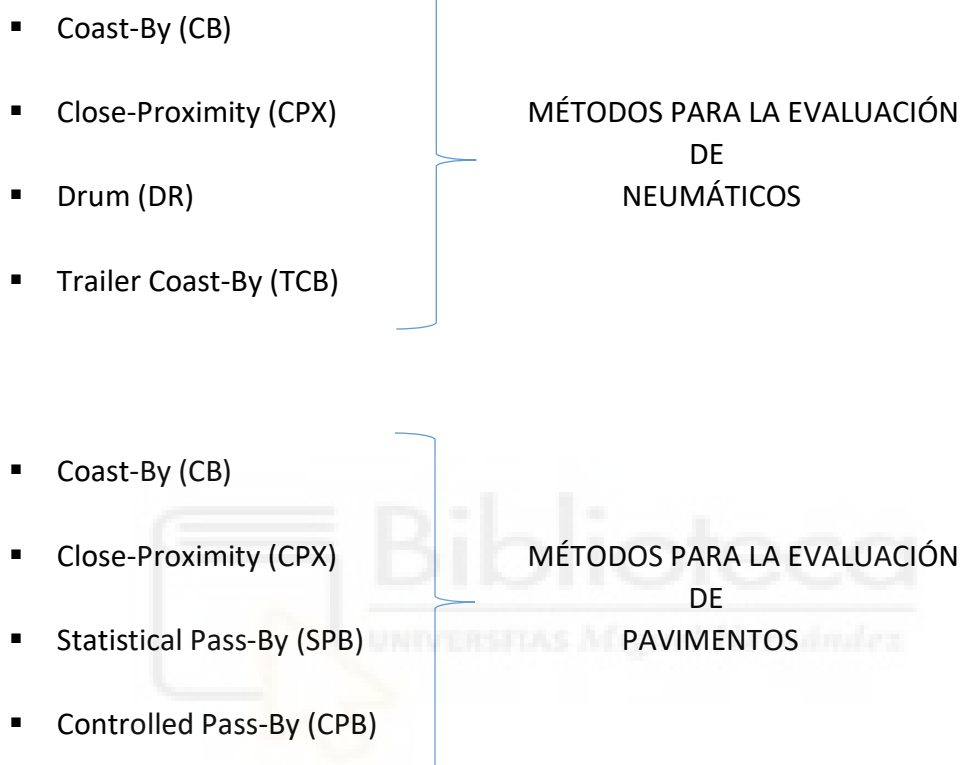


FIGURA 14. Amplificación del sonido provocado por la resonancia [5]

2.3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

En cuanto a los métodos de medida para evaluar la emisión sonora de los neumáticos en su interacción con el pavimento, se pueden encontrar distintos tipos teniendo cada uno sus particularidades. A continuación, se mencionan los distintos métodos de medición sonora [12] y su principal uso.



La mayoría de los métodos orientados al neumático hacen uso como superficie de rodadura de una superficie normalizada definida en la norma ISO 10844 [16], con el fin de que los resultados puedan ser comparables [12].

Uno de los métodos más extendidos es el Coast-By [35], que proporciona el nivel de ruido neumático/carretera mediante el registro del nivel de presión sonora a 7,5m de distancia del eje del vehículo para una velocidad de referencia.

Un procedimiento de medida también muy extendido, aunque más empleado en el campo de la investigación de pavimentos, es el método Close-Proximity o método del tráiler. Según esta metodología se registra el nivel de presión sonora en el entorno cercano del neumático bajo estudio obteniendo finalmente el Close-Proximity Sound Index (CPXI).

La metodología Trailer Coast-By, es una combinación de los métodos CB y CPX en la que se instala el neumático de prueba en un remolque arrastrado por un vehículo

tractor. El método propone registrar el máximo nivel de presión sonora procedente del neumático del remolque cuando pasa por delante de los micrófonos.

La metodología del tambor, o Drum [36], es un método de laboratorio con la que se evalúa el sonido emitido por un neumático que gira sobre un tambor de acero equipado con una superficie réplica de asfalto que emula las condiciones de un pavimento.

Respecto a los métodos orientados al pavimento, además del CPX también es muy empleado el método Statistical Pass-By, cuyo procedimiento es análogo al CB con la diferencia de que se emplea un flujo de tráfico convencional, cuyos vehículos circulan a velocidad constante con el motor operando en las condiciones habituales para esa la velocidad.

En el caso de que los vehículos sean seleccionados previamente, entonces el método se denomina Controlled Pass-By.

Entre todas las metodologías estandarizadas, los métodos CPX y DRUM tienen especial importancia. Por esta razón, se van a explicar a continuación con más detalle.

2.3.1. MÉTODO CPX

El método *Close-Proximity (CPX)*, es un procedimiento de medida muy extendido que se emplea normalmente en el campo de la investigación de pavimentos. Según esta metodología se registra el nivel de presión sonora en el entorno cercano del neumático bajo estudio obteniendo finalmente el *Close-Proximity Sound Index (CPXI)*.

En el método *CPX* se miden los niveles de presión sonora con *ponderación A* emitidos por la rodadura de un neumático en marcha, junto con la velocidad del vehículo de ensayo. Para registrar estos datos, se emplean al menos dos micrófonos situados cerca de los neumáticos según la norma ISO 11819-2 [18]. El vehículo de ensayo puede ser autopulsado o remolcado por otro vehículo.

Se trata de un método en el cual el neumático de ensayo está rodando sobre una carretera o pista de ensayo con los micrófonos de medida situados próximos a la interfaz neumático-pavimento. El neumático puede ser uno de los cuatro neumáticos normales de un vehículo, un neumático extra instalado sobre el vehículo o bien un neumático instalado sobre un remolque especialmente diseñado para el ensayo, siendo esta última opción la más empleada habitualmente.

En este método, el número mínimo de micrófonos es de dos: el micrófono frontal (MF) y el trasero (MR) como se puede observar en la *figura 15*. Los micrófonos, están situados 10cm por encima de la superficie de la carretera y a 20cm sobre el centro del

neumático. El micrófono frontal debe estar situado a 45° en el sentido de la rodadura, y el trasero a 135° [26].

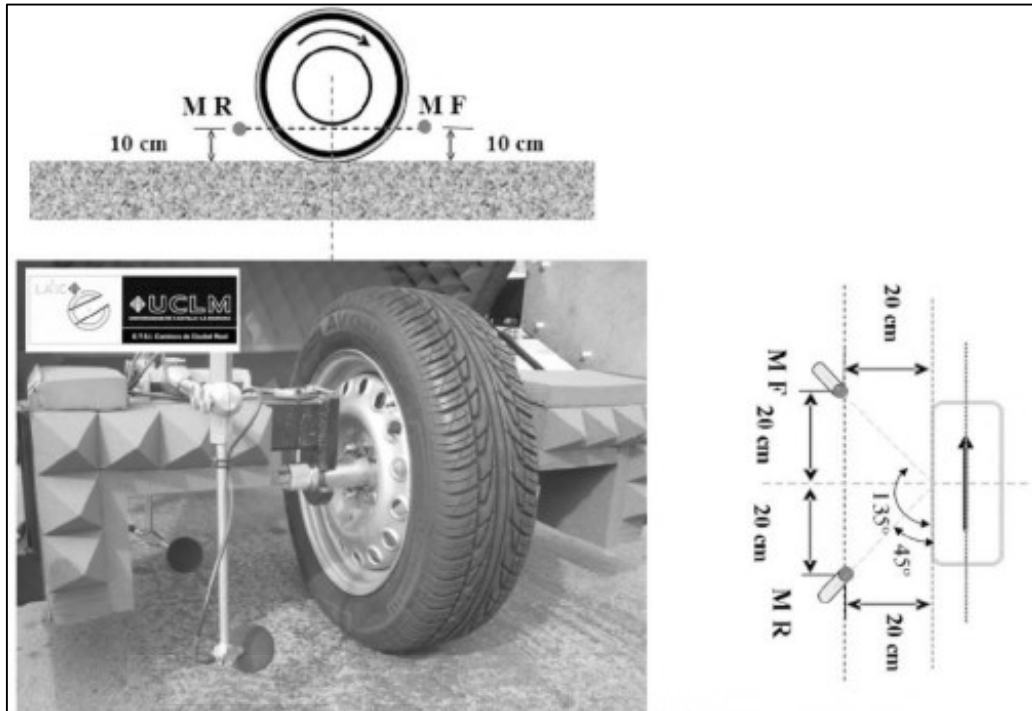


FIGURA 15. Distribución CPX para 2 micrófonos [26]

Además de los dos micrófonos que obliga la norma ISO 11819-2 [18] a montar para este ensayo, se pueden añadir más micrófonos en los ángulos de 0° , 90° y 180° como se indican en la *figura 16*.

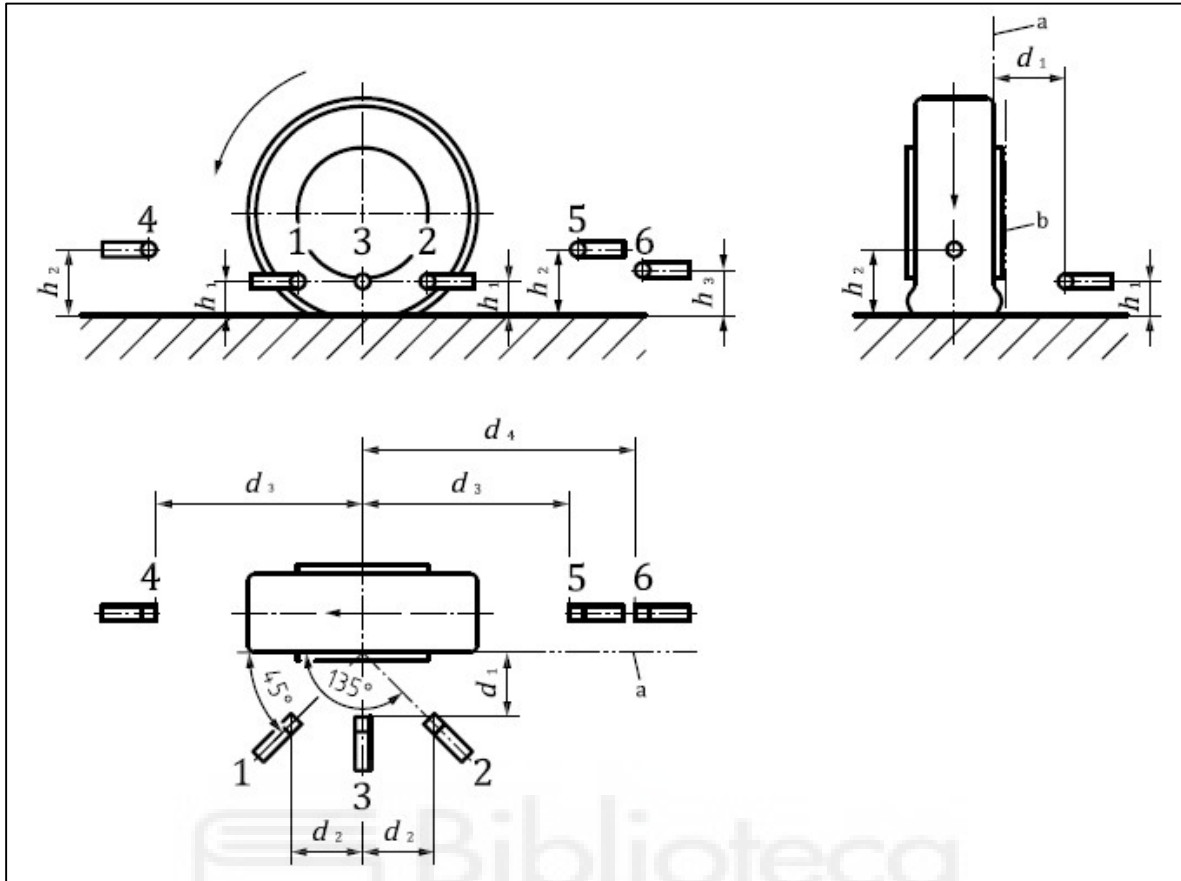


FIGURA 16. Montaje normalizado en un ensayo CPX [18]

TABLA 1. Posiciones de los micrófonos en un ensayo CPX [18]

Microphone(s)	h_1	h_2	h_3	d_1	d_2	d_3	d_4
1, 2	0,10 m			0,20 m	0,20 m		
3	0,10 m			0,20 m	0,00 m		
4, 5		0,20 m				0,65 m	
6			0,15 m				0,80 m

Los tiempos de registro en este tipo de ensayos, suele estar en torno a 0,2 segundos, y el nivel sonoro continuo con ponderación A [26].

Una de las principales ventajas del método CPX es su puesta en práctica en entornos urbanos, al no verse afectado por reflexiones acústicas cerca de edificios como ocurre con el método Pass-By. Además, otra ventaja es la evaluación de la superficie del firme de forma continua, mientras que en el método Pass-By son sólo tramos puntuales donde están situados los micrófonos.

Otro punto a favor del método CPX, es que los métodos que utilizan micrófonos cerca del neumático por lo que son más apropiados para el estudio de la interacción neumático-calzada, ya que carece de utilidad para mostrar el ruido ambiental; es decir, este método, no obtiene tanta información del ruido mecánico ni del ruido aerodinámico. Es un método exclusivo para la caracterización acústica del ruido de rodadura [26].

A continuación, se muestra la posición de los micrófonos en el ensayo CPX y algunos ejemplos de este ensayo.

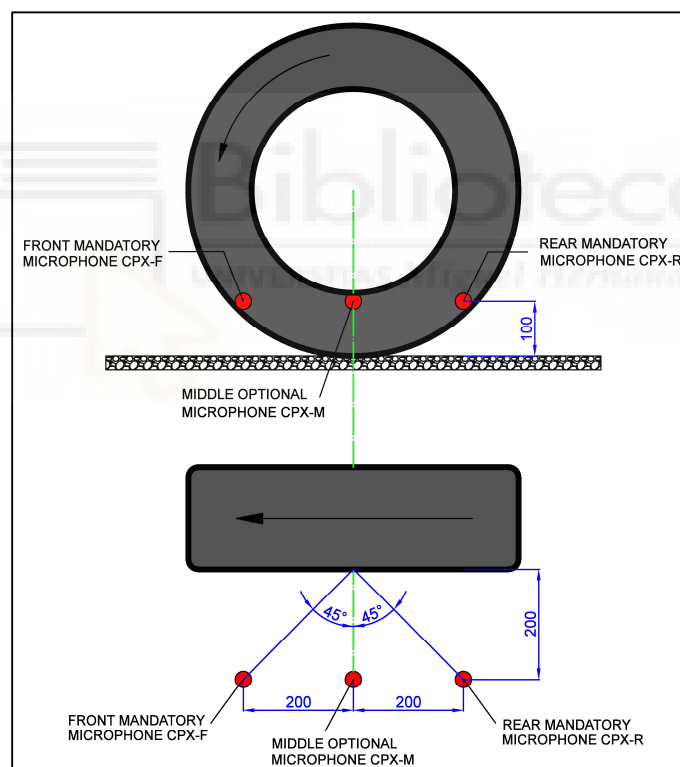


FIGURA 17. Disposición de 3 micrófonos método CPX [11]

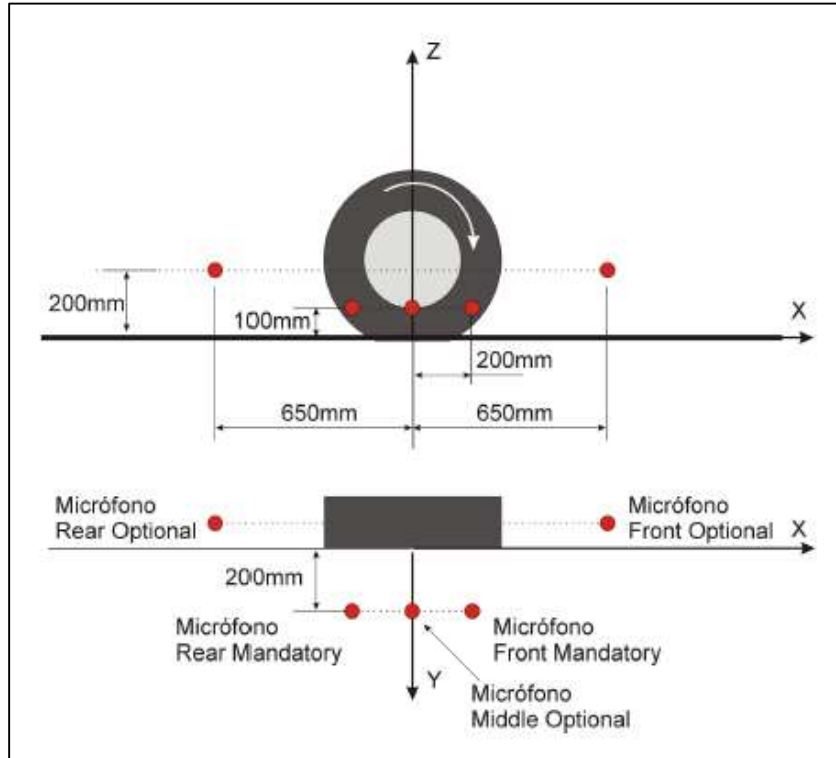


FIGURA 18. Disposición de 5 micrófonos para el método CPX [12]



FIGURA 19. Método CPX en remolque [37]

2.3.2. MÉTODO DRUM

Para la realización de ensayos en laboratorio relacionados con neumáticos, ya sea para analizar la durabilidad, la adherencia o el ruido de rodadura, se suele utilizar un tambor o rodillo de acero de 1500 o 2500 mm de diámetro.

A este mecanismo de rodillo de acero, se le conoce con el nombre *Drum*, donde el neumático de ensayo está montado de tal manera que rueda contra la parte interior o exterior de un tambor, siendo esta última la configuración más utilizada por los grupos de investigación de ruido de rodadura.

A continuación, se pueden observar ambos tipos de ensayos *Drum*. En primer lugar, en la *figura 20* se observa el neumático rodando sobre la superficie interior del tambor, mientras que en la *figura 21* rueda por su exterior; siendo esta última configuración la más utilizada [11].



FIGURA 20. Tambor interior

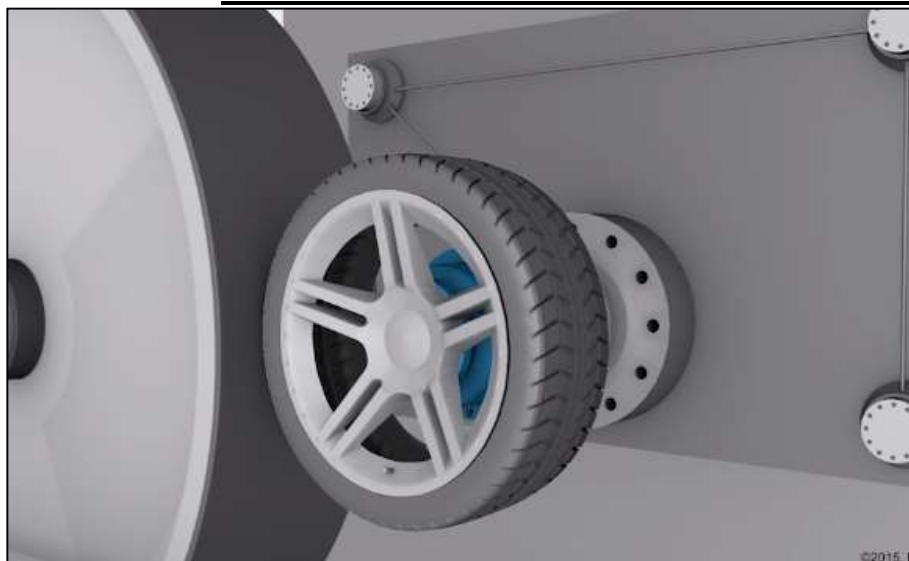


FIGURA 21. Tambor exterior

Este método de medida, cuyas normas existentes son la norma japonesa JASO 1981 [23] que consiste en medir el ruido de rodadura que produce un neumático cuando entra en contacto con un tambor que está girando y también la norma provisional ISO/CD 20908 Tyre sound emission test — Methods of drum [36] que está pendiente de aprobación. La superficie del tambor es de acero, pero se puede modificar para imitar diferentes tipos de pavimentos.

Por otro lado, en la UMH se ha desarrollado un método alternativo al método Drum, denominado Alternative Drum. En este ensayo, los micrófonos van montados cerca del neumático con una posición descrita en la norma ISO/CD 20908 [36] describiendo una superficie semiesférica S que envuelve a la fuente sonora a partir de un paralelepípedo hipotético de referencia. A continuación, en la *figura 22* y en la *figura 23*, se muestra la posición de los micrófonos respecto al neumático.

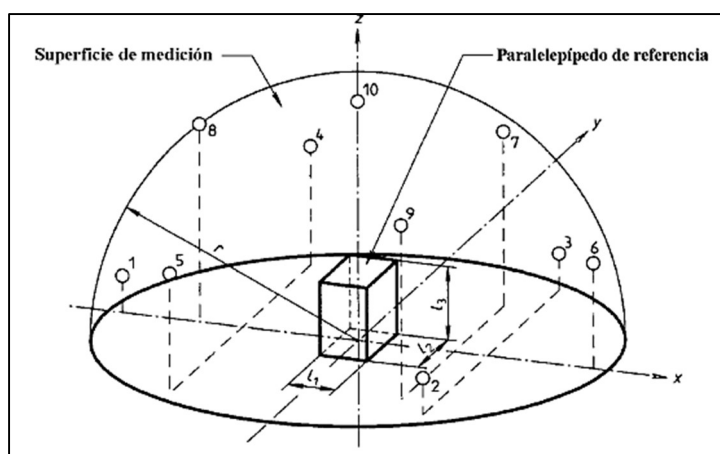


FIGURA 22. Superficie semiesférica de medición [25]

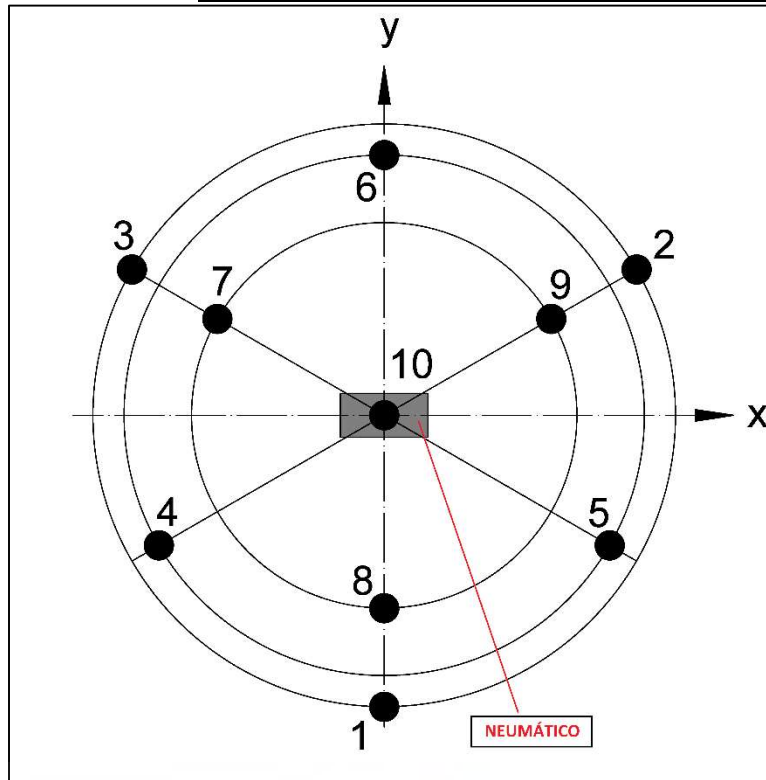


FIGURA 23. Posición de los micrófonos ensayo Alternative-Drum [25].



FIGURA 24. Ensayo Alternative-Drum [11]

2.4. NORMATIVA RELACIONADA

Para este proyecto, hay que tener en consideración todas las leyes y normas asociadas con la emisión de ruido, la normativa asociada a los neumáticos y todas las leyes relacionadas con los métodos de ensayo para la determinación de emisión sonora. Por esta razón, a continuación, se citan las leyes relacionadas con este proyecto:

- ✓ **Ley 37/2003**, de 17 de noviembre del Ruido [13].
- ✓ **Norma UNE-EN ISO 3744:2010** para la determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Método de ingeniería para condiciones de campo libre sobre un plano reflectante [14].
- ✓ **Norma ISO 362-1-2007** para la medición del ruido emitido por la aceleración de los vehículos de carretera-Método de ingeniería- Parte1: Categorías M y N [15].
- ✓ **Norma ISO 10844:2011**, Especificación sobre las pruebas en pista para medir el ruido emitido por los vehículos y sus neumáticos [16].
- ✓ **UNECE Reglamento 117** de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE) Disposiciones uniformes relativas a la homologación de neumáticos por lo que se refiere a las emisiones de ruido de rodadura, a la adherencia en superficie mojada y/o a la resistencia a la rodadura [17].
- ✓ **Norma ISO 11819-2**, medición de la influencia de la superficie de la calzada en el ruido del tráfico- Parte 2: método *close-proximity* [18].
- ✓ **Regulación (EC) No. 1222/2009** del parlamento europeo aprobada el 25 de noviembre de 2009 sobre el etiquetado de los neumáticos respecto a la eficiencia en el consumo de combustible y otros parámetros esenciales [19].
- ✓ **Norma ISO 3745**. Acústica- Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido mediante presión sonora- Métodos de precisión para salas anecoicas y semi-anecoicas; 2003 [20].
- ✓ **Norma ISO 3744**. Acústica- Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido mediante presión sonora – Métodos de ingeniería para un campo libre sobre un plano reflectante; 2010 [25].
- ✓ **Norma ISO/IEC 17020**. Evaluación de conformidad. Requisitos para la operación de varios tipos de cuerpos que son inspeccionados; 2012 [21].

- ✓ **Norma ISO/IEC 17025.** Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración; 2005 [22].
- ✓ **Norma japonesa JASO 1981.** Medición del ruido generado por la rodadura del neumático mientras gira sobre un tambor (*Drum*) [23].
- ✓ **ISO/CD 20908** Tyre sound emission test — Methods of drum [36].



CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE



3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

3.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL

Una fuente sonora artificial, es aquel objeto que emite un sonido que ha sido modificado y alterado; que es artificial. En los estudios del ruido de rodadura, la fuente sonora artificial normalmente tiene forma de neumático y se reproduce el ruido de rodadura sobre él para la realización de diferentes ensayos sonoros, como por ejemplo el estudio de las reflexiones de los remolques tipo trailer en los ensayos CPX. La fuente sonora artificial, debe cumplir con las indicaciones propuestas en la Norma ISO 11819-2 [18].

En la actualidad, existen distintos tipos de fuente sonora artificial, pero a continuación se muestran los tres modelos que tienen más repercusión en este proyecto y son necesarios mencionar.

3.1.1. TUG ARTIFICIAL NOISE SOURCE

Esta fuente artificial [10], está desarrollada por el grupo SILENDA VIA. La estructura de esta fuente artificial está fabricada de plástico de alta densidad y tiene aspecto de neumático. Va acoplada a una llanta real y gracias a 8 altavoces se consigue reproducir el sonido producido por la interacción neumático-calzada.

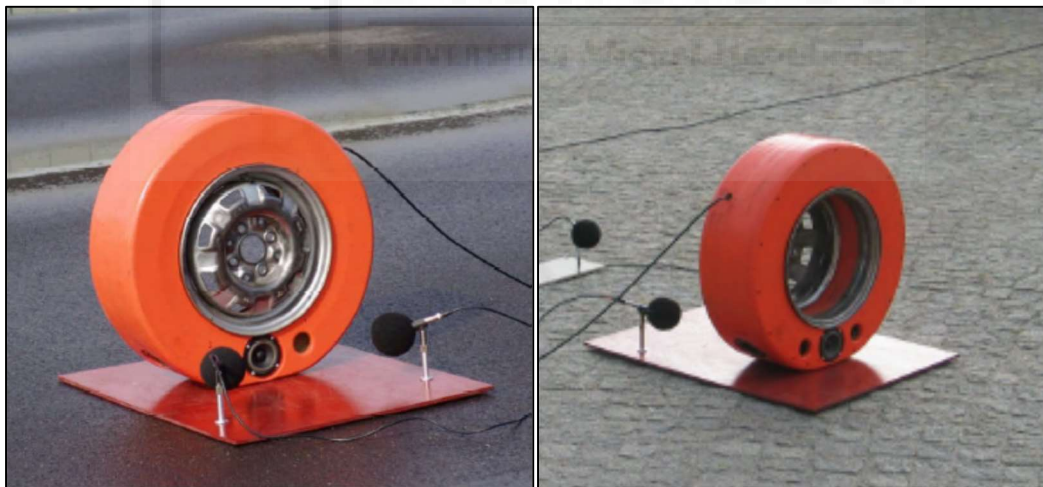


FIGURA 25. TUG artificial noise source [10]

En la anterior figura, se observa la disposición de los altavoces en este tipo de fuente sonora. Dos de los altavoces, estarían colocados en la posición donde se produce el efecto “Horn”, y los otros seis restantes colocados en la parte inferior de la fuente se distribuyen 3 en cada flanco.

3.1.2. M + P NOISE SOURCE

Esta segunda fuente [10] se compone de una llanta de rueda real, a la cual se le han adherido unas láminas de madera pegadas entre sí y atornilladas con tornillos pasantes. Estas láminas son las que simulan la forma del neumático.

En este caso tan solo encontramos un único altavoz, situado en una caja en la parte inferior del neumático. Las medidas de la caja son: 150 x 150 x 85 mm. El altavoz está direccionado hacia el suelo, encontrándose a 30 mm por encima de este.



FIGURA 26. M+P noise source [10]

En la *figura 26*, se observa la forma y estructura de este tipo de fuente. Además, se puede observar la forma de la caja donde va situado el altavoz que está enfocado hacia el suelo.

3.1.3. FUENTE PARA ESTUDIO SPERoN

Esta solución no es una fuente propiamente dicha [38], ya que no emite sonido, sino que es ella quien actúa de receptor recogiendo los sonidos emitidos desde otros puntos.

Su estructura, está compuesta por un neumático real y una llanta fabricada en madera. En el neumático en lugar de altavoces, se disponen unos micrófonos para recopilar información. Los micrófonos van alojados en el cuerno del neumático, 3 en la parte central del cuerno y otros 3 situados en el exterior de la huella de contacto.

A continuación, en la *figura 27*, se muestra la disposición de estos micrófonos, así como la estructura y materiales de este tipo de fuente.



FIGURA 27. Fuente para estudios SPERoN [38]

3.1.4. FUENTE SONORA ARTIFICIAL UMH

La Universidad Miguel Hernández (UMH), desarrolló en el año 2013 una fuente sonora artificial [9] para la realización de estudios relacionados con el ruido de rodadura. Esta fuente, está fabricada sobre un neumático en el cual se han colocado siete altavoces capaces de reproducir el ruido de rodadura. Dos de estos altavoces están colocados en la propia banda de rodadura para simular el efecto “Horn” anteriormente mencionado y los cinco restantes están situados sobre uno de los flancos; tres en la parte inferior y los otros dos en la parte superior como se muestra a continuación en la *figura 28*.

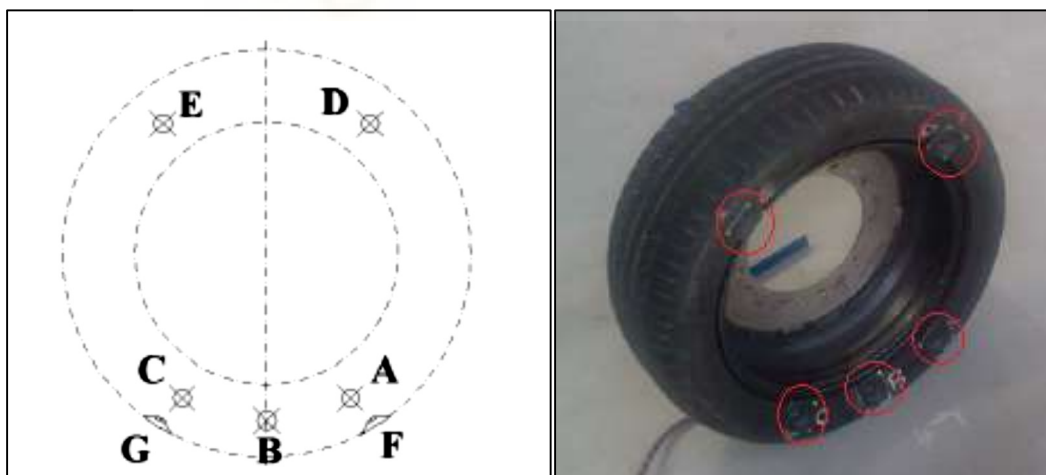


FIGURA 28. Disposición de los altavoces en la fuente artificial UMH [9]

3.2. METODOLOGÍAS DE RUIDO DE RODADURA EN BANCO

Para la realización de ensayos en laboratorio relacionados con neumáticos, ya sea para analizar la durabilidad, la adherencia o el ruido de rodadura, se suele utilizar un tambor o rodillo de acero de 1500 o 2500 mm de diámetro.

A este mecanismo de rodillo de acero, se le conoce con el nombre *Drum*, donde el neumático de ensayo está montado de tal manera que rueda contra la parte interior o exterior de un tambor, siendo esta última la configuración más utilizada por los grupos de investigación de ruido de rodadura.

Como se ha visto hasta ahora y como se explica más adelante, el ensayo de ruido de rodadura en neumáticos en instalaciones tipo *Drum* es un campo en el que todavía queda mucho por avanzar. A continuación, se describe el estado del arte relacionado con los diferentes estudios realizados sobre la medición del ruido de rodadura de neumáticos en laboratorio en las últimas dos décadas [11].

3.2.1. TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK (TUG)

THE SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)

En el año 1999, ambas entidades colaboraron en este estudio en el que se midieron hasta 100 neumáticos distintos para observar las relaciones entre el ruido, la fricción y la resistencia a la rodadura de los neumáticos. Las mediciones se realizaron a 80 km/h con el método CPX. En este estudio la toma de medidas se practicó sobre una réplica de superficie asfáltica ISO 10844 [16] que cubre uno de los tambores de la máquina de TUG. Para la medida del ruido de rodadura se hizo una comparativa entre los valores de presión sonora SPL de las mediciones obtenidas en un ensayo en carretera real y otro realizado en el rodillo del laboratorio. Estos fueron los resultados más destacables.

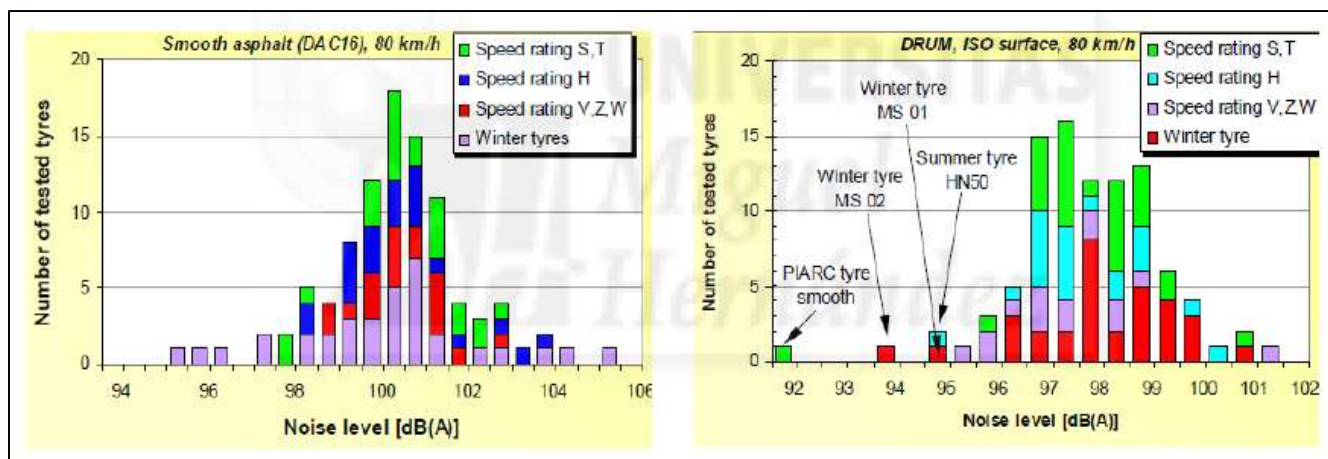


FIGURA 29. Nivel sonoro sobre asfalto real (izquierda) y en el rodillo sobre la superficie réplica asfáltica (derecha), ambos a 80 km/h.

Estos resultados arrojaron varias conclusiones a tener en cuenta. En primer lugar, se observó que en muchos casos los neumáticos más silenciosos eran los de invierno. También se apreció con claridad que los neumáticos con códigos de velocidad S y T son los más ruidosos. La mayor diferencia de ambos estudios estuvo en que sobre el asfalto real el nivel sonoro era mayor que sobre la réplica asfáltica de laboratorio [28][11].

3.2.2. PURDUE UNIVERSITY, INDIANA (USA)

En 2003, el grupo de investigación de la Universidad de Purdue (USA) cuenta con una máquina de ensayo de neumáticos llamada TPTA (*Tire-Pavement Test Apparatus*). Este banco de ensayo consta de un tambor de 3.7 m de diámetro donde las secciones de pavimento se colocan alrededor de él. El neumático puede alcanzar hasta 50 km/h [29].



FIGURA 30. Máquina de ensayos *Tire-Pavement Test Apparatus* de la Universidad de Purdue [29].

En este estudio se mide la influencia de la granulometría del pavimento sobre los neumáticos, entre otros parámetros el ruido de rodadura. Se colocaron un total de cinco micrófonos sobre el TPTA para realizar las mediciones, tres para cumplir con el método de proximidad CPX que establece la norma y otros dos a 5 cm por encima de la superficie del pavimento.

Los resultados obtenidos mostraron que la influencia de la forma de los tacos no es un factor significativo en el ruido de rodadura provocado por los neumáticos mientras que el tamaño de los tacos sí que influye directamente en los valores de presión sonora registrados.

3.2.3. SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI)

En 2005, el equipo de investigación de VTI realizó un estudio específico para comparar las mediciones en carretera con el método CPX (*Close Proximity*) frente a las mediciones realizadas en laboratorio (DR), examinando así el comportamiento en ambos casos, y viendo si el error cometido es elevado o si realmente es aproximada la simulación en laboratorio. Con esta investigación, se observó que las diferencias en la mayoría de las ocasiones no son muy significativas como se puede observar en la siguiente figura [11][30].

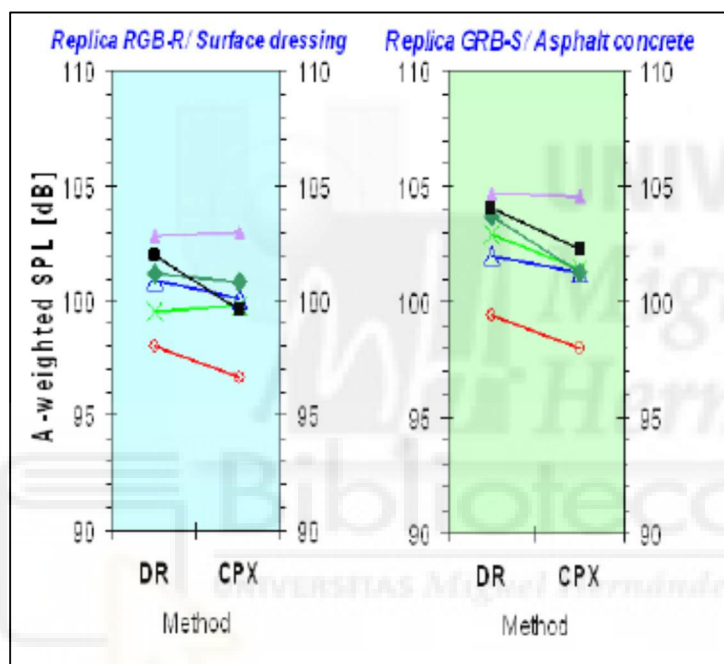


FIGURA 31. Comparación de valores DR y CPX [30]

3.2.4. TECHNICAL UNIVERSITY OF GDANSK (TUG) Y PROELASTIC SURFACE (PERS)

En 2009, la Universidad de Gdansk realizó un estudio sobre la eficacia de una superficie de asfalto nueva llamada *Proelastic Surface*, un nuevo material producido por la empresa Rosehill. Estos ensayos se realizaron a 80 km/h sobre un rodillo cubierto por una capa de este material y de otras superficies de asfalto normalizado [31][11].



FIGURA 32. Ensayo en rodillo cubierto de réplicas de asfalto [31]

En la *figura 32*, se muestra en la parte izquierda de la superficie externa del rodillo una réplica de una superficie asfáltica llamada APS-4 mientras que en la derecha se encuentra la superficie PERS.

Los resultados de este estudio indican que para todos los neumáticos el ruido generado en la superficie asfáltica *Proelastic Surface* es considerablemente más bajo que en otras superficies.

Además, se analizaron los valores de presión sonora y se observó que la superficie asfáltica *Proelastic Surface* PERS es la que menor emisión sonora provoca, independientemente del neumático ensayado como se observa en la *figura 33*.

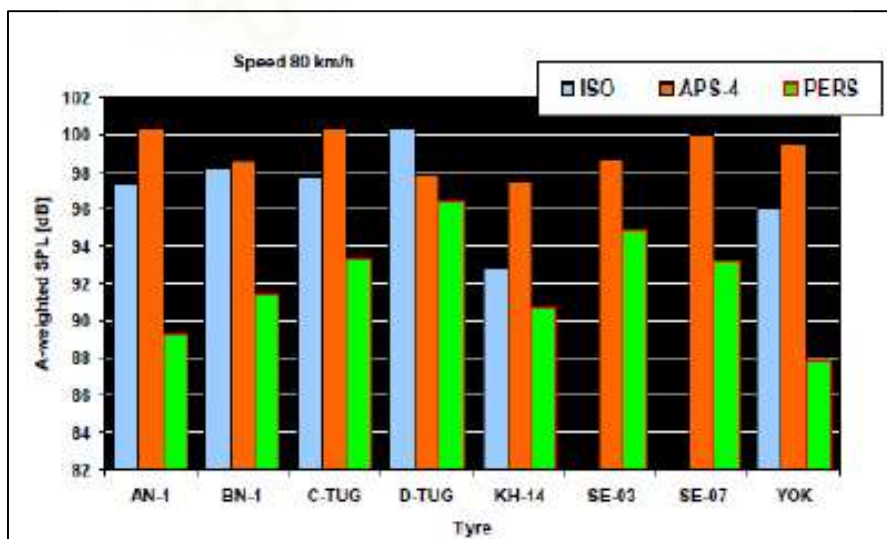


FIGURA 33. Valores globales de presión sonora

3.2.5. KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, BELGIUM

En 2011, el departamento de Ingeniería mecánica de esta universidad realizó un trabajo de investigación relacionado con el estudio de los neumáticos en laboratorio utilizando distintas máquinas específicas, entre otras un rodillo (Drum). Ese año, se llevó a cabo un intenso estudio junto con el fabricante americano de neumáticos *Goodyear* donde se analizaron los diferentes parámetros que afectan al ruido emitido por un neumático durante la rodadura [32][11].

A continuación, en la *figura 34*, se muestra la disposición de los micrófonos durante la realización de este ensayo.



FIGURA 34. Estudio de neumáticos de la Universidad de Leuven [32]

En la siguiente *figura 35*, se observan los datos obtenidos. En este estudio, se pudo apreciar como los neumáticos con dibujo (en rojo) son mucho más ruidosos en todo el espectro sonoro relevante que los neumáticos lisos tipo *slick* (en negro). Este efecto es mucho más acusado en bajas frecuencias (hasta 800 Hz) que en altas frecuencias.

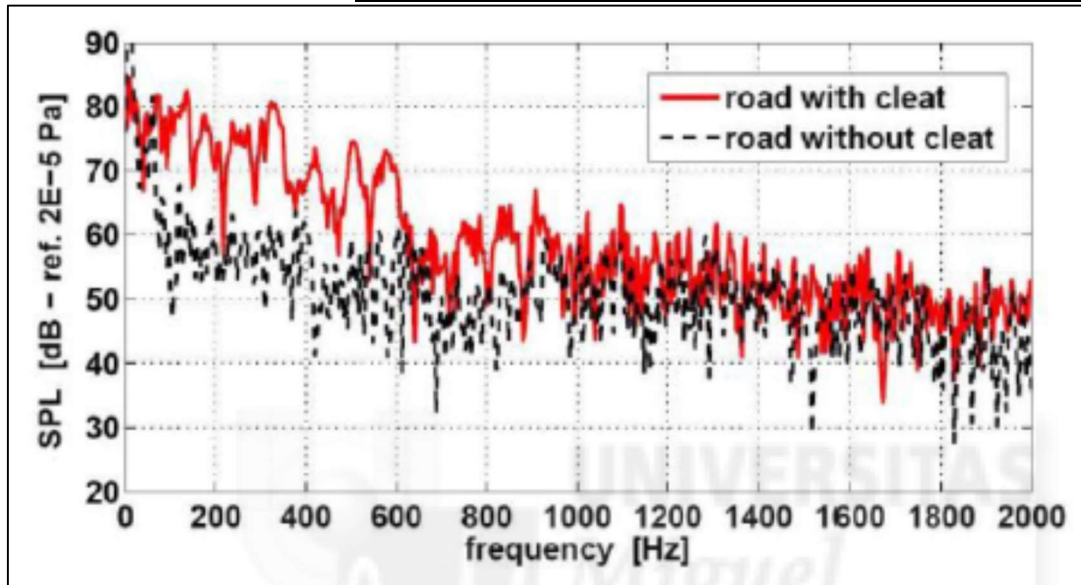


FIGURA 35. Análisis neumáticos con dibujo (rojo) y neumáticos lisos (negro) [32]

3.2.6. UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

En 2013, el Grupo de Investigación de Ingeniería Mecánica Aplicada, perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche, desarrolló un modelo con base experimental para la evaluación del ruido de rodadura de neumáticos durante su ensayo de homologación según el Reglamento 117 [17]. La principal novedad de este método radica en obtener el nivel de potencia sonora de la fuente, considerada ésta como un sistema en el que neumático y pavimento intervienen simultáneamente [11] [12].

La potencia sonora se obtuvo con el método alternativo basado en la norma ISO 3744 [25], denominado Alternative Close Proximity (*A-CPX*). En este método, los micrófonos están instalados en el vehículo, próximos al neumático.

La diferencia respecto al método *CPX* tradicional, se basa en medir en unas posiciones más alejadas que las *CPX* obligatorias. De esta forma, se puede asumir que para el ensayo *A-CPX*, las mediciones se realizan en un campo acústico lejano.

La hipótesis de partida de la metodología *A-CPX* [12], considera el neumático como una fuente sonora puntual omnidireccional estática situada sobre dos planos reflectantes: el pavimento y la carrocería del vehículo. Para calcular la potencia sonora emitida por la fuente, en el método se asume que esta magnitud es proporcional al nivel cuadrático medio de la presión sonora, promediado en tiempo y en espacio, como se verá más adelante.

En este caso la superficie paralelepédica imaginaria envuelve sólo un neumático, que será el que se localiza en el lado derecho del eje trasero del vehículo como se muestra en la *figura 36*. La dimensión característica del paralelepípedo, d_0 , se expresa mediante la *ecuación (1)*:

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{L1}{2}\right)^2 + L2^2 + L3^2} \quad (1)$$



FIGURA 36. Paralelepípedo de referencia para el ensayo A-CPX [12]

Puesto que la fuente sonora se considera situada sobre dos planos reflectantes, la superficie sobre la que se distribuyen los micrófonos forma un cuarto de esfera, cuyo radio r satisface la siguiente condición:

$$r_{A-CPX} > 2 \cdot d_{0_A-CPX}$$

Las posiciones de los micrófonos se distribuyen sobre esta superficie siguiendo las coordenadas indicadas en la *Tabla 2*, según la *Figura 37*.

TABLA 2. Coordenadas de los micrófonos en el ensayo A-CPX

POSICIÓN DE MICRÓFONO	x/r	y/r	z/r
A-CPX Front down	0,86	0,50	0,15
A-CPX Rear down	-0,86	0,50	0,15
A-CPX Middle	0	0,89	0,45
A-CPX Front top	0,57	0,33	0,75
A-CPX Rear top	-0,57	0,33	0,75

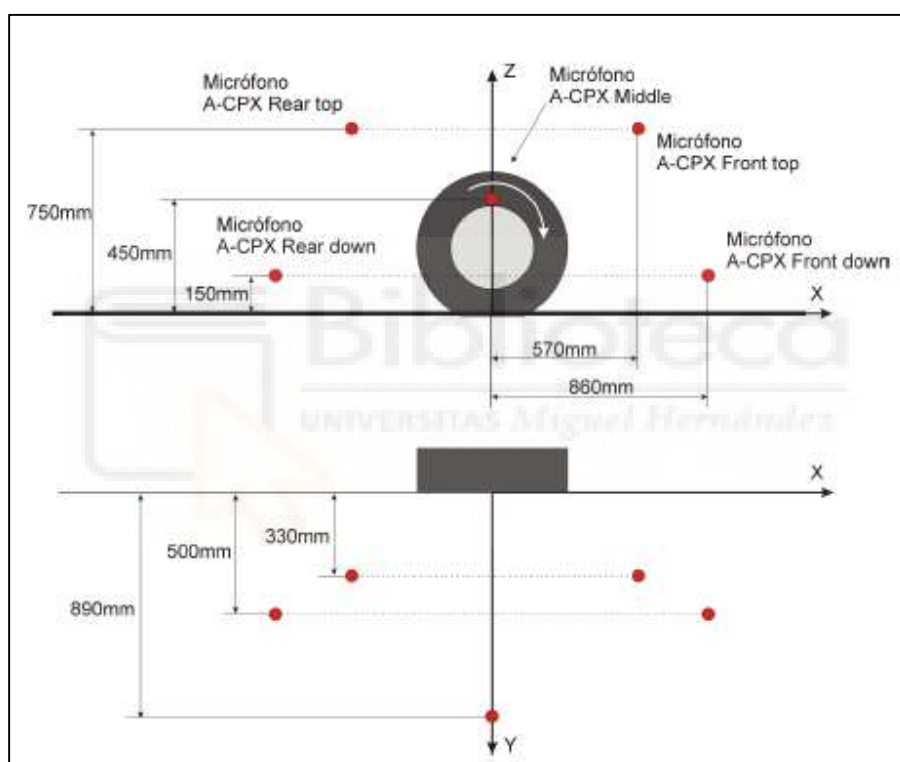


FIGURA 37. Posiciones de los micrófonos en el ensayo A-CPX [12]

El procedimiento de ensayo consiste en hacer circular el vehículo a velocidad constante, en un régimen de funcionamiento normal, es decir, el motor encendido y la palanca de cambios en marcha adecuada para la velocidad de ensayo. En estas condiciones el vehículo recorrerá un tramo de 200m de longitud sobre el asfalto que se desee usar en el ensayo, mientras los micrófonos registran los niveles de presión sonora.

En el procesado de los datos, cada tramo de 200m se divide en segmentos de 20m para los cuales se calcula el nivel de presión sonora promedio registrado en cada micrófono, *ecuación (2)*.

$$L_{pi,sA-CPX} = 10 * \log \left[\frac{1}{N} * \sum_{j=1}^N 10^{0.1 * L_{piA-CPX}} \right] dB \quad (2)$$

Donde $L_{pi,sA-CPX}$, es el nivel de presión sonora para el micrófono i en el segmento s , para cada banda de tercio de octava, en dB. $L_{piA-CPX}$ es el nivel de presión sonora en la muestra j (35ms) dentro del segmento s , para cada banda, en dB. N es el número de muestras registradas para cada segmento.

A continuación, se calcula para cada micrófono el nivel de presión sonora promedio para el total de segmentos contenidos en cada tramo de 200m ensayado, *ecuación (3)*.

$$L_{pi,tA-CPX} = \frac{1}{10} * \sum_{i=1}^{10} L_{pi,sA-CPX} \quad dB \quad (3)$$

Donde $L_{pi,tA-CPX}$, es el nivel de presión sonora promedio registrado por el micrófono i en el tramo t , para cada banda de tercio de octava, en dB.

El siguiente paso consiste en calcular el nivel de presión sonora promedio sobre la superficie de medida de cuarto de esfera para cada tramo, *ecuación (4)*.

$$L_{pA-CP} = 10 * \log \left[\frac{1}{5} * \sum_{i=1}^5 10^{0.1 * L_{pi}} \right] dB \quad (4)$$

Finalmente se calcula el nivel de potencia sonora de la rodadura de los neumáticos para cada tramo, según la *ecuación (5)*.

$$L_{WA-CPX} = L_{pA-CPX} + 10 * \log \left(\frac{S_{ACPX}}{S_0} \right) \quad dB \quad (5)$$

Donde S_{A-CPX} es el área de la superficie de medida, según $S_{A-CPX} = \pi \cdot r_{A-CPX}^2$, en metros cuadrados, y $S_0 = 1m^2$.

En la siguiente imagen (Fig. 38) se puede observar la disposición de los micrófonos con el uso de un material de aerodelismo que reduce el rozamiento de los soportes con el aire para la obtención de la potencia sonora mediante el ensayo alternativo A-CPX [12].



FIGURA 38. Disposición de los micrófonos en el ensayo A-CPX [12]

Para establecer la relación entre la potencia sonora que emite un neumático en rodadura y la que emite el conjunto de los cuatro neumáticos de un vehículo se diseñó una segunda metodología, denominada Alternative Coast-By (A-CB) [12], planteada para evaluar la potencia sonora de la rodadura de cuatro neumáticos instalados en un vehículo. Para llevar a cabo este ensayo, el vehículo circulaba a una velocidad determinada circulando por la zona de ensayo, en la que se ubicaban los micrófonos para la medición sonora. Esta segunda metodología se empleó como punto intermedio en el análisis de la propagación sonora para la validación del modelo con base experimental.

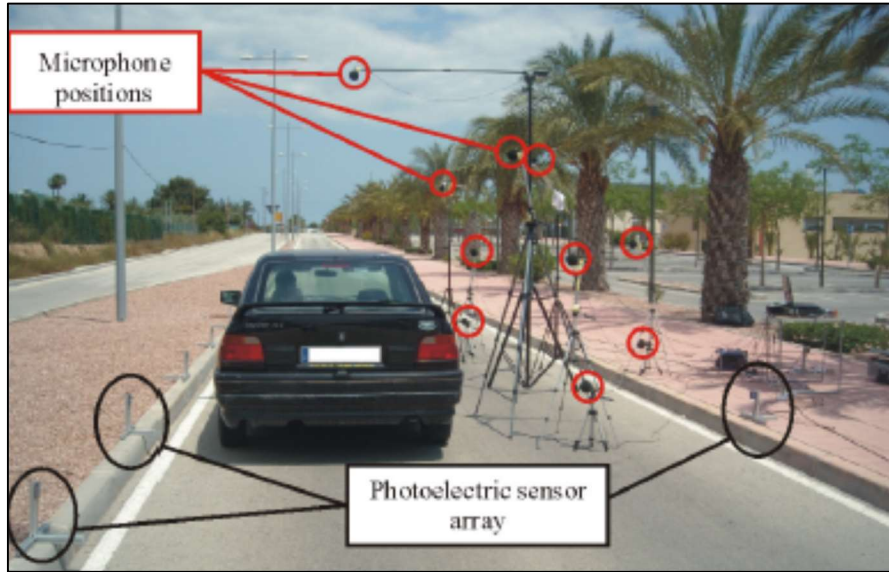


FIGURA 39. Posición de los micrófonos en el ensayo A-CB [12]

Tras recopilar los datos obtenidos durante los ensayos, se compararon con los obtenidos con un modelo matemáticos como se muestra en la *figura 40*. De esta forma se pudo validar y demostrar que el ensayo realizado en la Universidad Miguel Hernández es correcto.

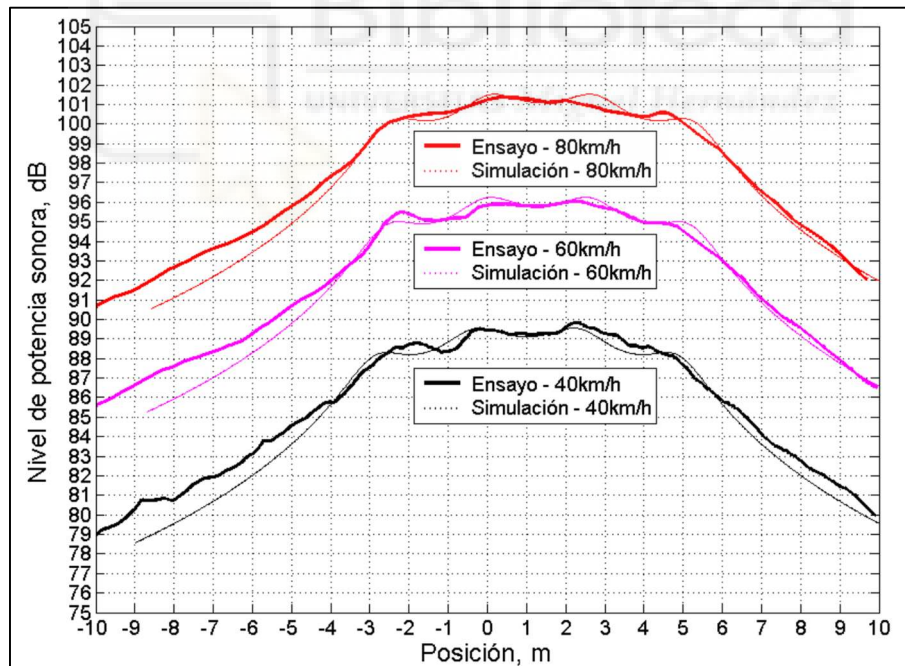


FIGURA 40. Validación datos obtenidos durante el ensayo [12]

En 2017, se llevó a cabo un nuevo estudio para el desarrollo de un nuevo método de ensayo, denominado Alternative Drum (A-DR), para evaluar el nivel de potencia sonora emitido por un neumático durante su rodadura bajo condiciones controladas de laboratorio en una instalación tipo *Drum* [11], siguiendo la norma ISO 3744 [25].

Este método de ensayo trabaja con un único plano reflectante, que es el propio rodillo de la máquina, pero en el laboratorio donde está situado la máquina de ensayo existen distintos elementos reflectantes que pueden interferir (paredes, techo, suelo, etc). Por tanto y como es obvio, la sala de ensayos dista de ser una cámara anecoica. No obstante, en esta metodología se describen los procedimientos para determinar la magnitud de la corrección por entorno acústico de ensayo K_2 , con objeto de considerar las desviaciones del entorno frente al caso ideal. Para esta norma internacional, la corrección por entorno acústico de ensayo K_2 debe ser menor o igual a 2 dB.

La norma ISO 3744 [25] define la posición de los micrófonos mediante una superficie semiesférica S que envuelve a la fuente sonora a partir de un paralelepípedo hipotético de referencia. Al igual que en el método A-CPX, aplicamos la ecuación (6) para determinar la dimensión característica de la fuente d_0 .

$$d_0 = \sqrt{\left(\frac{L1}{2}\right)^2 + \left(\frac{L2}{2}\right)^2 + L3^2} \quad (6)$$

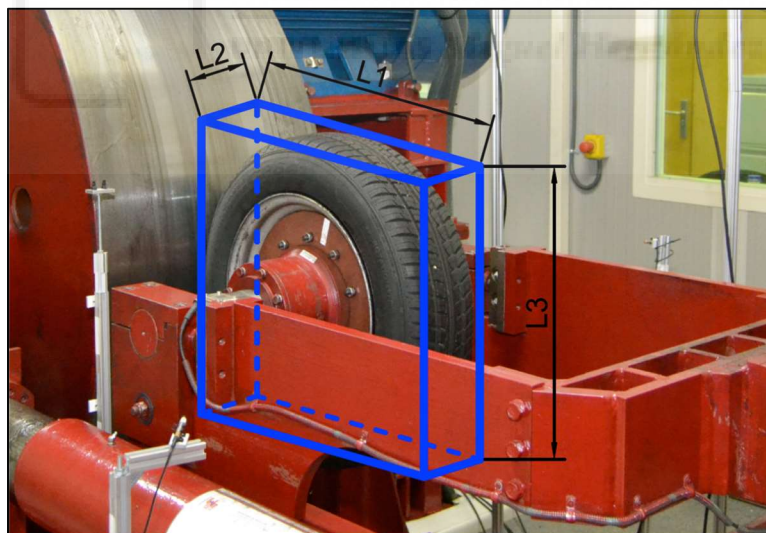


FIGURA 41. Paralelepípedo de referencia [11]

Los micrófonos se colocan en una superficie semiesférica de medición que tiene que estar centrada en el medio del paralelepípedo hipotético de referencia. El radio r de la semiesfera debe cumplir la siguiente condición:

$$r > 2 \cdot d_0$$

Tal como prescribe la norma, los micrófonos se colocan de acuerdo con el esquema de distribución sobre la superficie semiesférica de medición de radio r que se muestra en la Fig. 42 y las coordenadas que se muestran en la Tabla 3.

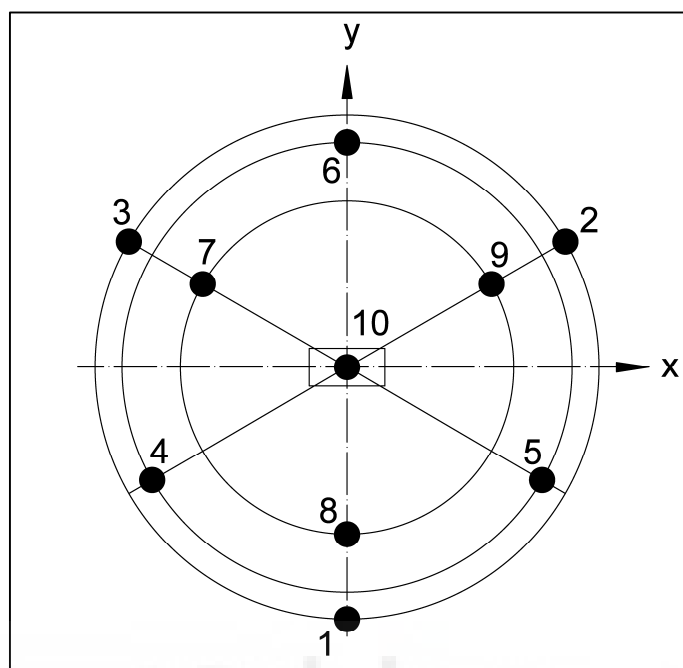


FIGURA 42. Distribución de micrófonos sobre la superficie semiesférica de medición [11].

TABLA 3. Coordenadas (en m) de las posiciones de los micrófonos [11]

POSICIÓN DE MICRÓFONO	X	Y	h_{micro}	Z
1.1m	-0.99	0	1.01	0.15
2.1m	0.5	-0.86	0.15	0.15
3.1m	0.5	0.86	1.87	0.15
4.1m	-0.45	0.77	1.78	0.45
5.1m	-0.45	-0.77	0.24	0.45
6.1m	0.89	0	1.01	0.45
7.1m	0.33	0.57	1.58	0.75
8.1m	-0.66	0	1.01	0.75
9.1m	0.33	-0.57	0.44	0.75
10.1m	0	0	1.01	1

Nótese que h_{micro} hace referencia a la altura de cada micrófono respecto al suelo de la celda de ensayos.

Además, la posición Y del micrófono 2.1, tuvo que ser modificada debido a la estructura metálica de la máquina de ensayos, pasando a ser la nueva posición de -0,76m.

En la siguiente imagen (*figura 43*) se puede observar una simulación de la distribución espacial de los micrófonos para la superficie de medición semiesférica según las coordenadas anteriores.

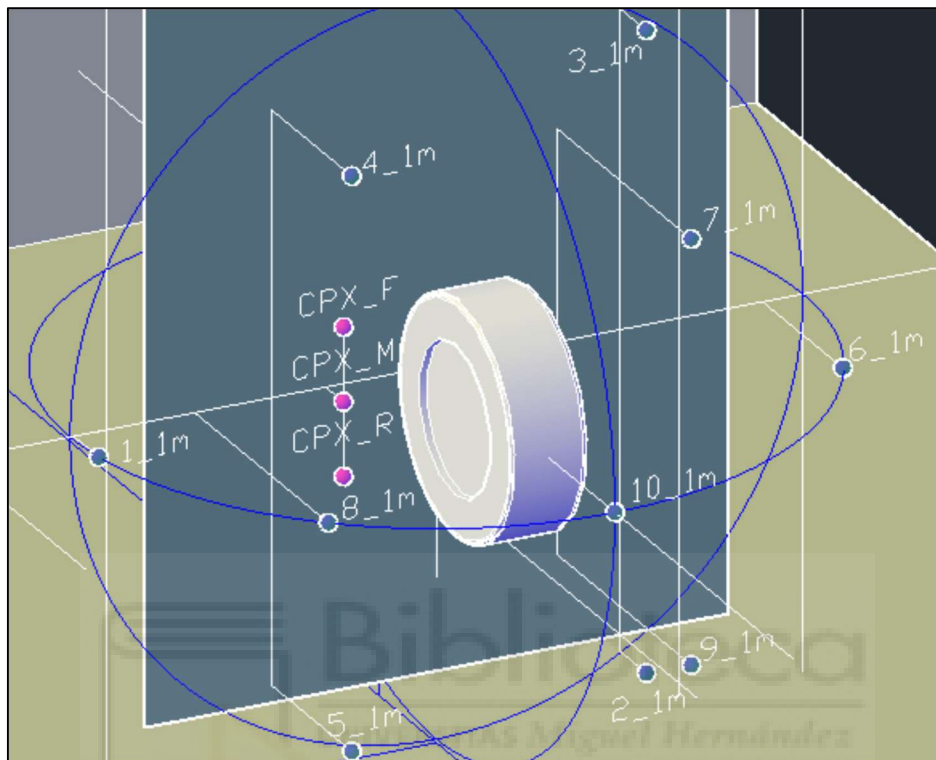


FIGURA 43. Distribución espacial de los micrófonos [11]

Para colocar los micrófonos en las posiciones adecuadas, se utilizan unos soportes de aluminio de poco espesor para no interferir en los datos obtenidos. En la *figura 44*, se puede observar la colocación de estos soportes respecto al neumático. Adicionalmente, se añadió un soporte para situar 3 micrófonos según lo establecido en la norma *ISO / CD 11819-2 Método CPX* [18] para así poder comparar los datos obtenidos con los obtenidos en el método *A-CPX*.

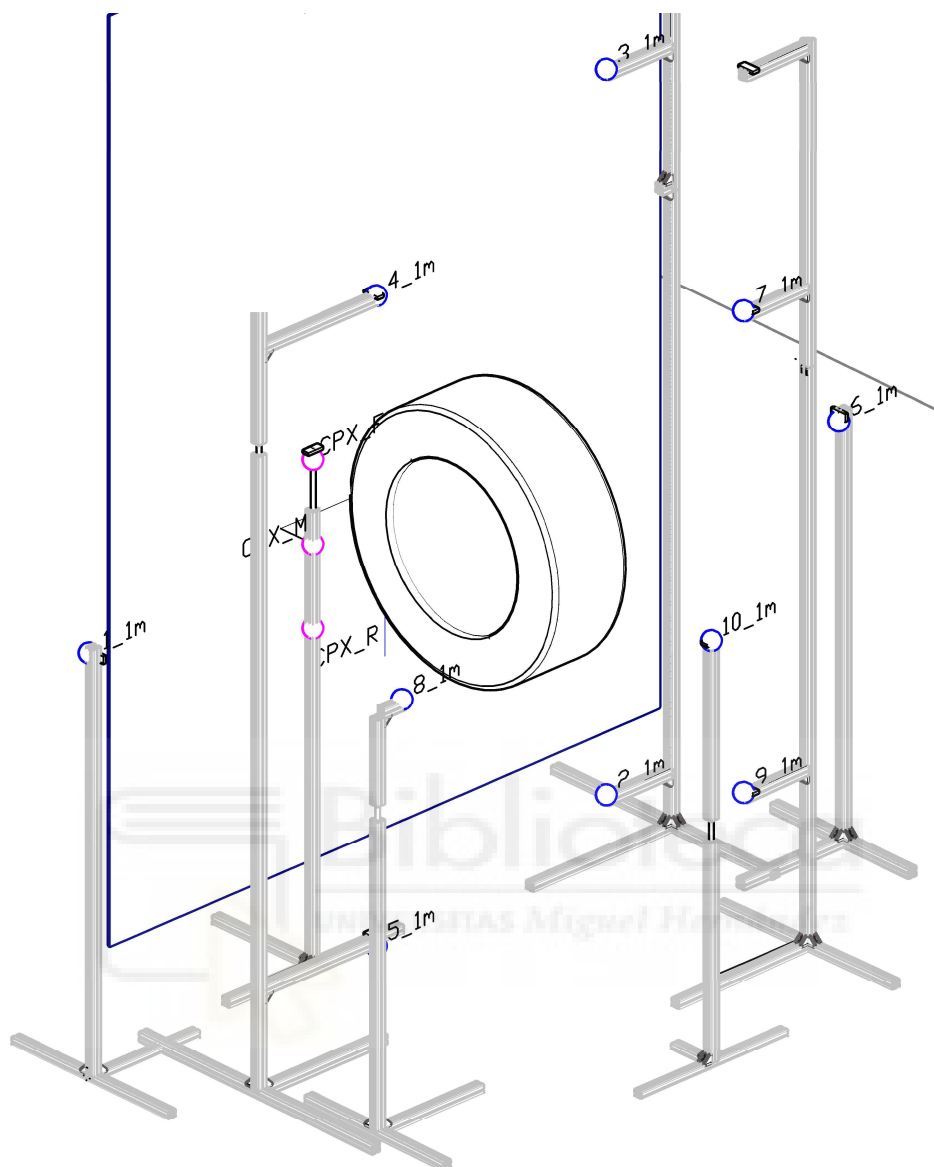


FIGURA 44. Ubicación de los soportes alrededor del neumático [11].

Finalmente, según establece la norma ISO 3744, el nivel de potencia sonora L_w puede calcularse mediante la ecuación:

$$L_w = L_{pf} + 10 \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

Donde $S_0 = 1 \text{ m}^2$; S es el área de la superficie de medición en m^2 (para una superficie semiesférica tenemos que $S = 2 * \pi * r^2$).

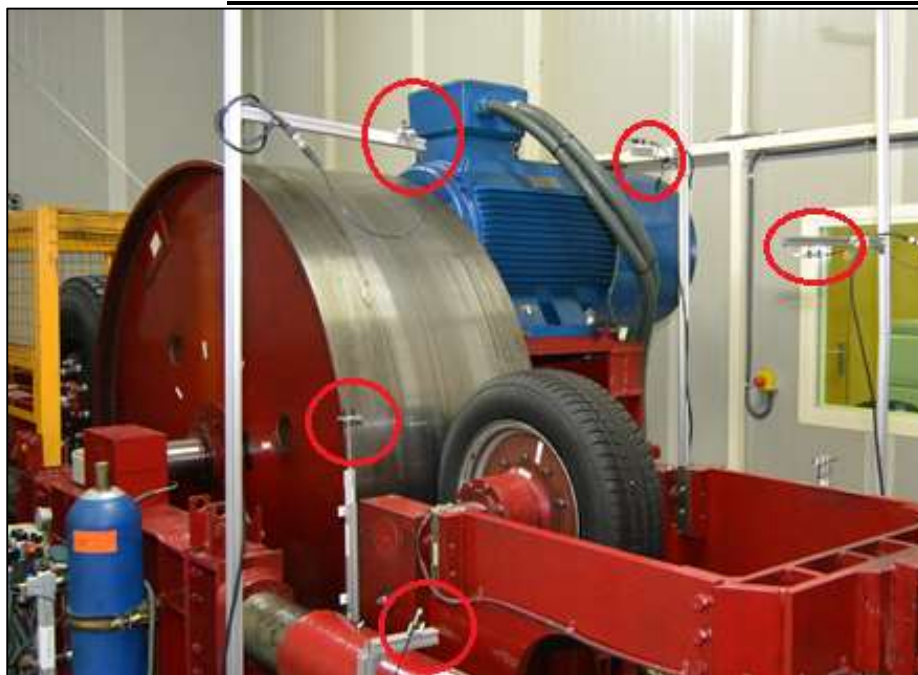


FIGURA 45. Disposición de los micrófonos durante el ensayo [11]

Para llevar a cabo la validación de este nuevo método de medida [11], se tuvo que obtener la presión sonora mediante el método *Coast-by* (figura 46), y realizar una posterior comparación de los datos obtenidos en el ensayo *Drum*. De esta forma, se pudo afirmar que dicho modelo era válido y cumple con la normativa.



FIGURA 46. Ensayo *Coast-by* para la obtención de datos [11]

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS



4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Para esta parte del proyecto, se va a realizar un ensayo CPX en el banco de ensayos de neumáticos de la Universidad Miguel Hernández, con el que estudiar la emisión sonora del neumático en campo cercano estudiando a su vez la influencia del sentido de giro del tambor (Drum), y que posteriormente servirá para proporcionar la señal sonora que deberá emitir la fuente sonora artificial instalada en el Drum, así como a su vez analizar la influencia de la curvatura del tambor.

En este ensayo, se utiliza un neumático idéntico al que se utilizará en la fabricación de la fuente artificial. Este neumático se hace girar en intervalos ascendentes de velocidad desde 10 km/h hasta una velocidad máxima de 120 km/h. En las proximidades del neumático, se colocan diversos micrófonos situados a las distancias normalizadas por la norma ISO 11819-2 [18] tomando muestras de 30 segundos para cada velocidad. Se repetirá el mismo procedimiento invirtiendo el sentido de giro del tambor y posteriormente se procederá a un procesado de la información y una comparación de resultados.



4.2. DISPOSICIÓN DEL MATERIAL Y CALIBRACIÓN

En este apartado se va a describir todo el material utilizado en la realización de los ensayos, así como la calibración y comprobación del perfecto funcionamiento de los elementos de medida.

4.2.1. MATERIAL UTILIZADO

Para la obtención de datos durante el ensayo, se ha utilizado el material siguiente:

MATERIAL UTILIZADO EN EL ENSAYO:

- ✓ Sistema de adquisición de datos *LMS SCADA TEXT ESPRESS 7A*
- ✓ 3 micrófonos 4935 de ¼ de pulgada
- ✓ 3 micrófonos GRAS 40 PL de ¼ de pulgada
- ✓ 1 micrófono Brüel & Kjaer 4957 de ¼ de pulgada
- ✓ 7 cables para micrófono

4.2.2. CALIBRACIÓN

La calibración de los micrófonos se realizó mediante el calibrador sonoro de Brüel&Kjaer, modelo 4231, que cumple con los requisitos de las normas EN/IEC 60942 y ANSI S1.40-1984 [27].



FIGURA 47. Calibrador Brüel & Kjaer 4231 [27]

La calibración se realizó en dos fases. En primer lugar, se comprobaron de forma individual los micrófonos con el uso del calibrador. El calibrador emite un nivel continuo de presión sonora (1000Hz) cuando está instalado en un micrófono. De esta forma, se puede ajustar el equipo hasta obtener el valor que está emitiendo el calibrador.

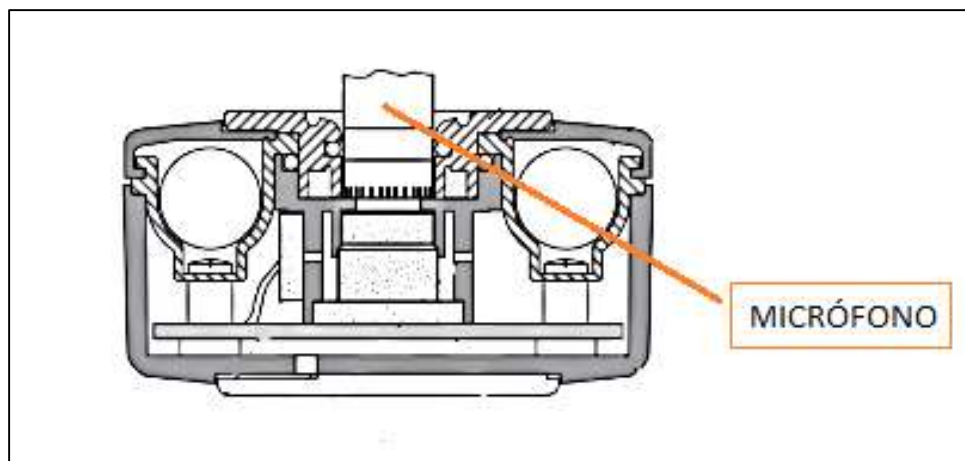


FIGURA 48. Calibración individual de un micrófono [27]

Tras la calibración individual, se colocaron todos los micrófonos juntos a la misma distancia de un altavoz que emitía un sonido de 1000 Hz y de esta forma se pudo comprobar que todos los micrófonos funcionaban en fase y registraban la misma señal senoidal como se muestra en la siguiente figura.

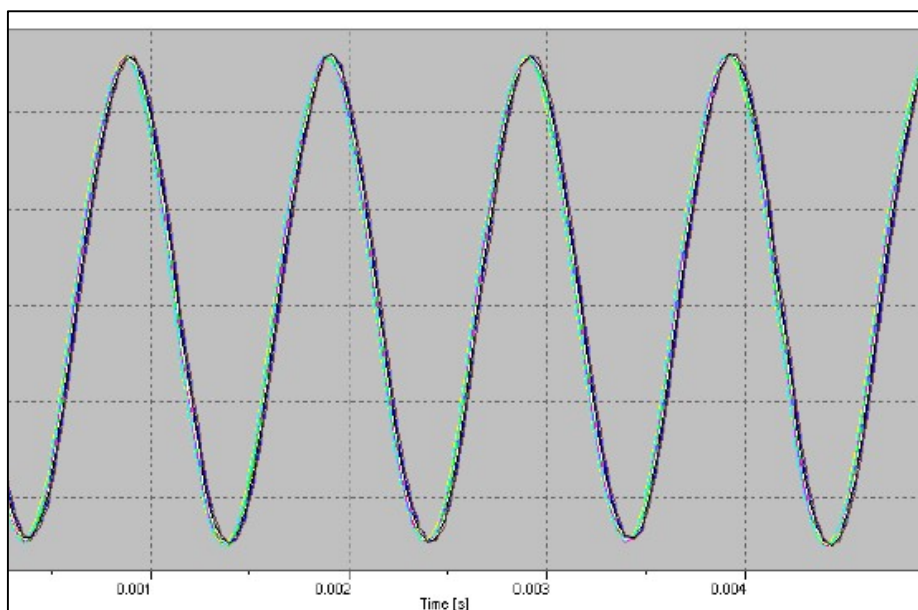


FIGURA 49. Gráfica micrófonos en fase

4.3. MEDICIONES EN POSICIONES ANÁLOGAS AL ENSAYO CPX.

En este apartado, se va a describir cómo se ha realizado el ensayo para obtener la información necesaria mediante el uso de los micrófonos anteriormente nombrados.

4.3.1. DISEÑO SOPORTES PARA MICRÓFONOS

Una vez calibrados correctamente los micrófonos, se ha procedido a su instalación en las posiciones correspondientes, de acuerdo con la norma ISO 11819-2 CPX [18]. Para conseguir que los altavoces permanezcan en dichas posiciones, se han utilizado unos soportes fabricados con perfiles de aluminio de 20mm x 20mm. Con esta configuración se comprobó que el soporte se mantenía rígido y totalmente estático sin ningún tipo de problema [11] como se muestra a continuación en la *figura 50*:



FIGURA 50. Diseño de la base de los soportes de los micrófonos [11]

La parte superior de los soportes ha sido diseñada para que cada micrófono esté colocado en su posición exacta como se muestra en la *figura 51* [11].

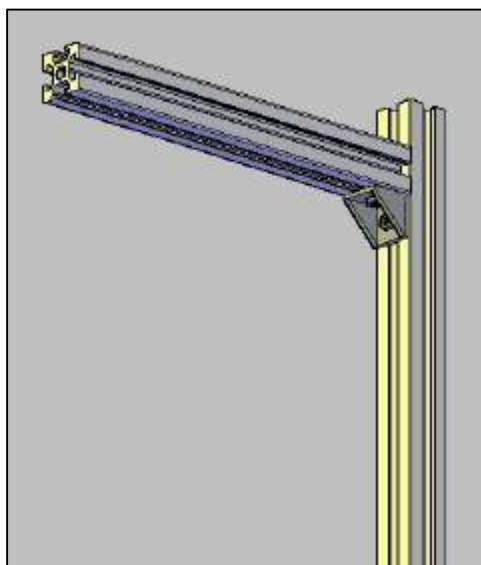


FIGURA 51. Parte superior del soporte [11]

4.3.2. POSICIONES DE LOS MICRÓFONOS

La posición de cada uno de los micrófonos está definida por la norma ISO 11819-2 CPX [18], donde se definen las posiciones para un ensayo CPX. Según la norma el número mínimo de micrófonos es de 2 unidades, y deben estar todos funcionando simultáneamente. Además, se definen las posiciones de hasta 6 micrófonos como se muestra a continuación:

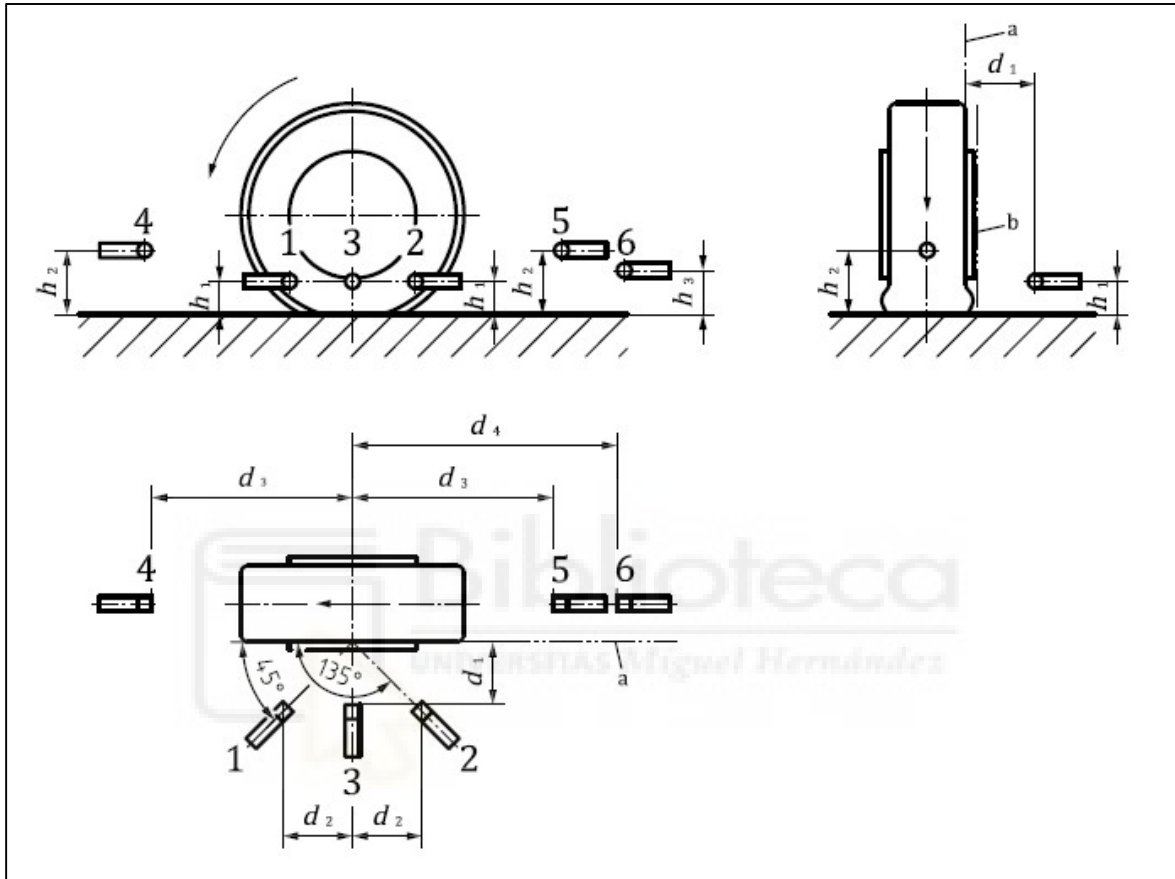


FIGURA 52. Descripción posiciones micrófonos ISO 11819-2 [18]

En la siguiente tabla, se definen las posiciones de forma numérica que deben cumplir los micrófonos [18].

TABLA 4. Posiciones ensayo CPX [18]

Microphone(s)	h_1	h_2	h_3	d_1	d_2	d_3	d_4
1, 2	0,10 m			0,20 m	0,20 m		
3	0,10 m			0,20 m	0,00 m		
4, 5		0,20 m				0,65 m	
6, 7			0,15 m				0,80 m

Además de los 6 micrófonos que define la norma, se ha decidido colocar un séptimo micrófono simétrico al micrófono número 6 para tener así una simetría en el ensayo y mayor número de datos como se muestra en la *figura 53*.

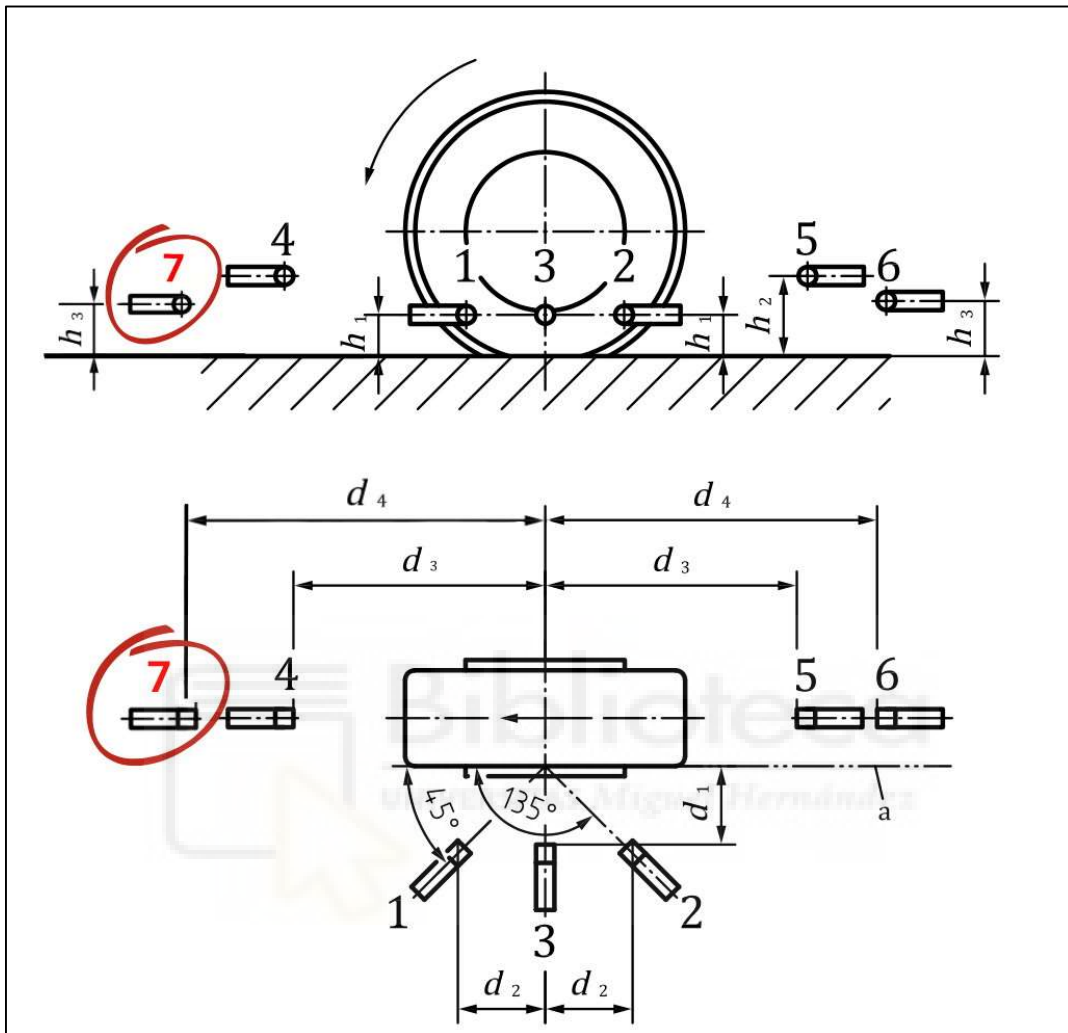


FIGURA 53. Adaptación micrófono 7 en el ensayo

Hay que destacar que, para este ensayo, el plano de referencia sobre el que se sitúan los micrófonos es el generado en el punto de contacto entre el neumático y el tambor de ensayo. Es decir, será el plano vertical tangente al tambor en dicho punto de contacto como se muestra en la *figura 54*.

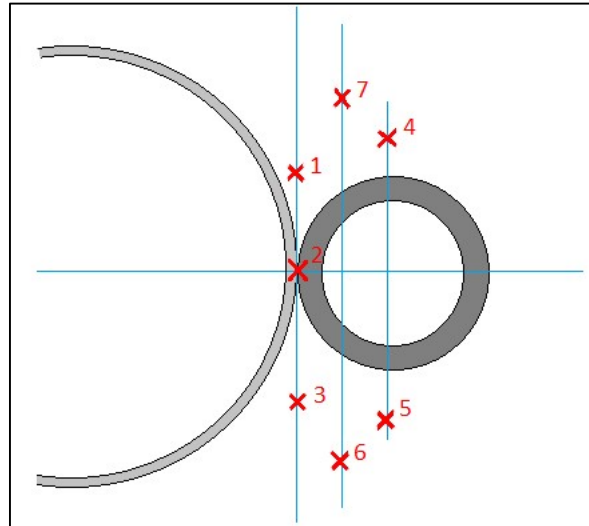


FIGURA 54. Posición de los 7 micrófonos en el ensayo

Los micrófonos se colocaron en las posiciones descritas anteriormente y en el laboratorio se mostraban de la siguiente forma:



FIGURA 55. Ensayo CPX en Drum

4.3.3. DESCRIPCIÓN DEL NEUMÁTICO

El neumático que se ha decidido utilizar para este ensayo, es el mismo que el que se utilizará para la fabricación de la fuente sonora artificial. Es un neumático de la marca MICHELIN, modelo PRIMACY 4 y con unas dimensiones 205/55/R16. A continuación se muestra la etiqueta proporcionada por el fabricante:

MICHELIN

Michelin Primacy 4
205/55 R16 91V con cordón de protección de llanta (FSL)

Michelin - Fabricante de neumáticos de Francia, él representado por el conocido Bib. Producto de calidad en el segmento de precios altos.

La medida del neumático 205/55 R16 91V [corregir](#) ⓘ

Disponibilidad **En stock**

Tipo de neumático **Neumáticos de verano** ⚙️

Etiqueta del neumático UE C A 68 dB

Opiniones clientes **★★★★★**

Índice de velocidad **V:** Este neumático es admisible para velocidades de **hasta 240 km/h** permitido.

Código EAN 3528707773869

Número de artículo R-367076

Índice de eficiencia de [Delticom](#) **★★★★★**

FIGURA 56. Etiquetado del neumático

Este neumático, presenta un dibujo de la banda de rodadura irregular. Este dibujo presenta canales y surcos, creando tacos de diferentes medidas, cuyas medidas son de 27mm, 23mm, 22mm y 19mm. A continuación, se muestra una figura con el dibujo de este neumático.



FIGURA 57. Dibujo del neumático ensayado

4.3.4. OBTENCIÓN DE DATOS

Para la obtención de datos en este ensayo, se han realizado 3 medidas para cada velocidad de ensayo con una duración de 30 segundos cada una. Se han obtenido medidas desde una velocidad inicial de 10 km/h hasta una velocidad máxima de 120 km/h. La velocidad se ha incrementado a intervalos de 10 km/h hasta llegar a esa velocidad máxima.

Además, el ensayo se ha realizado invirtiendo el sentido de giro del Drum, para poder comparar así la influencia de giro de éste. Se entiende por **giro normal** al giro del tambor en el sentido de las agujas del reloj cuando se observa la máquina de ensayo desde la sala de mando. Ambos sentidos de giro se muestran a continuación:

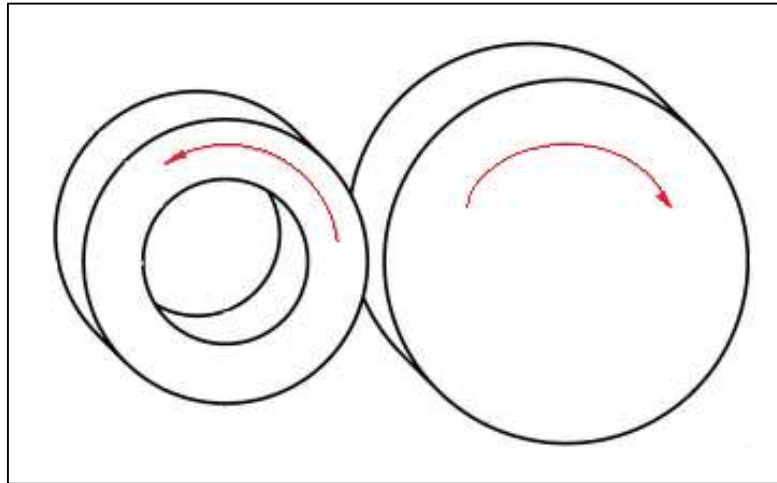


FIGURA 58. Sentido de giro normal

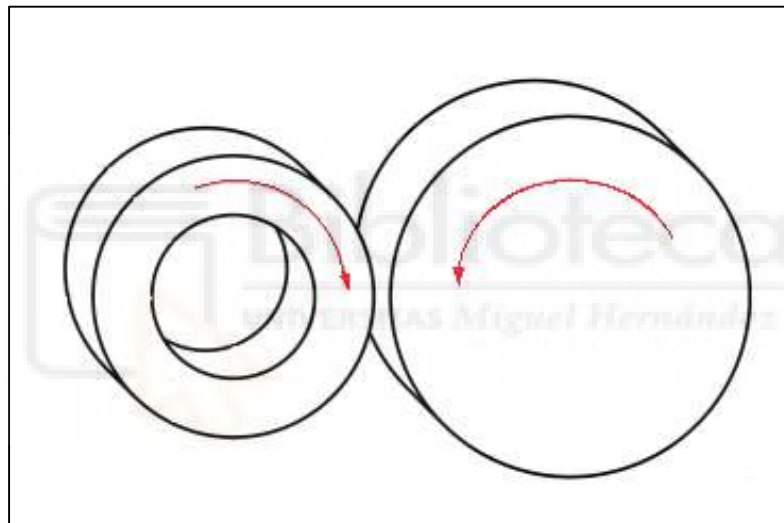


FIGURA 59. Sentido de giro inverso

Previamente, se realizó el inflado del neumático con una presión de inflado de **2 bar** y un **calentamiento** previo de **10 minutos** a una velocidad de **90 km/h**. Durante todo el ensayo se ha aplicado una carga del **80% del índice de carga** del neumático como indica la norma A-DRUM (80% de 615 kg = **492 kg**) [11].

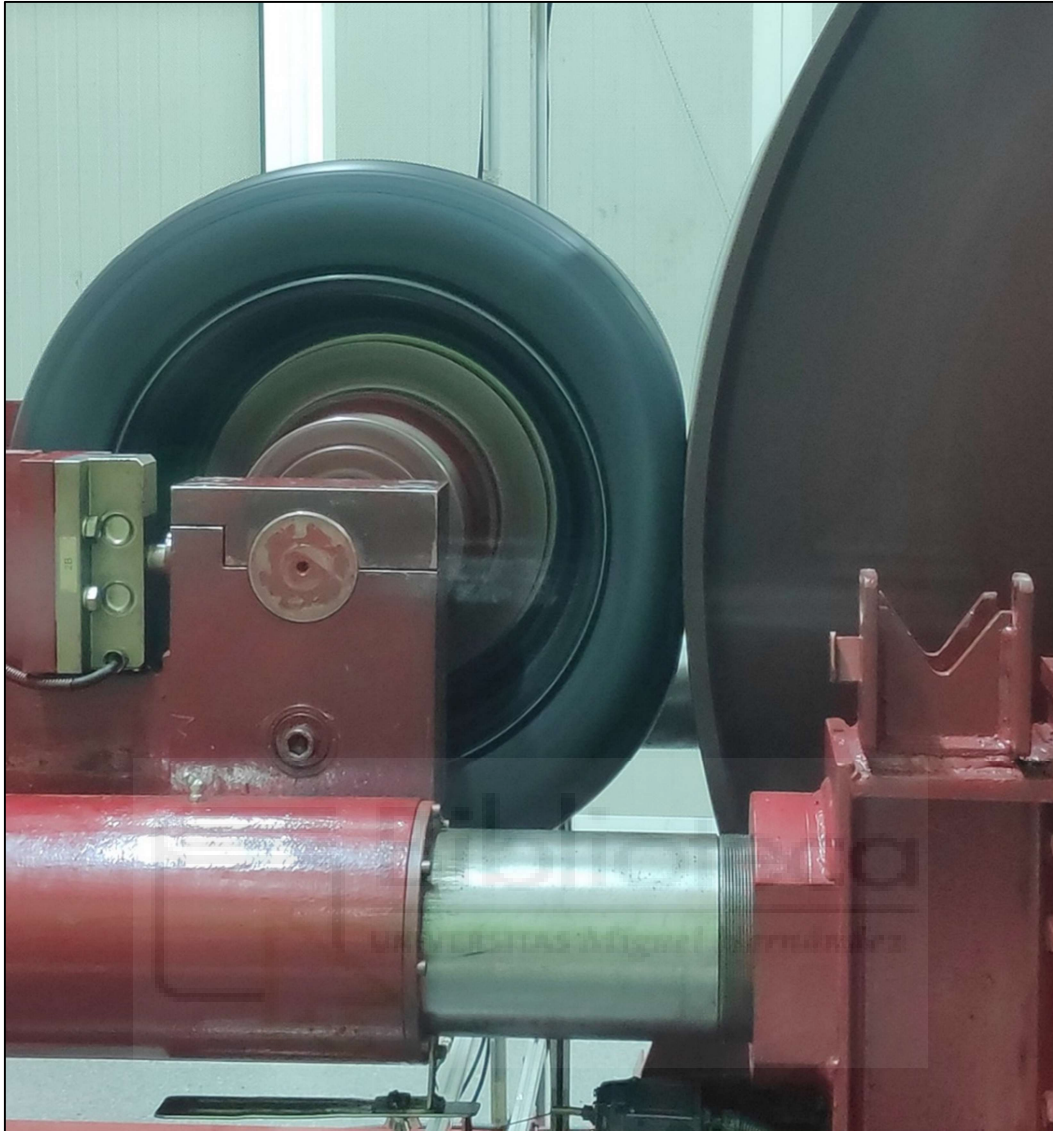


FIGURA 60. Aplicación del 80% de índice de carga durante el ensayo

Con este ensayo se han obtenido un total de 72 medidas (36 por cada sentido de giro) que han sido procesadas como se muestra a continuación.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS Y RESULTADOS



5. ENSAYOS Y RESULTADOS

5.1. PROCESADO DE DATOS Y RESULTADOS

En este apartado se va a describir cómo se ha realizado el procesado de datos hasta obtener los índices sonoros adecuados, así como la representación gráfica de estos.

5.1.1. PROCESADO DE DATOS

Una vez realizadas las mediciones de 30 segundos cada una, se ha aplicado en primer lugar un filtrado con el propio programa de adquisición de datos (TextExpress). Este primer procesado consiste en aplicar un filtrado de la señal a tercios de octava, en el cual a su vez se aplica una ponderación temporal con un tiempo de integración de 125ms (Fast), trabajando en el rango de frecuencias entre 100 y 10000Hz. Por tanto, los datos obtenidos, en Pascales, es necesario exportarlos para continuar con el procesado. Los datos se han exportado con la extensión “. mat” para poder continuar con su procesamiento.

Tras exportar los datos, se ha trabajado con el programa Matlab para completar todo el procesado restante. Con este programa, se ha obtenido en primer lugar los valores de presión sonora en función de la frecuencia para cada micrófono aplicando una ponderación frecuencial, con ponderación A (dB(A)) dependiendo de la velocidad y sentido de giro del tambor. Estos datos han sido representados gráficamente y se ha podido observar el impacto sonoro que provocan los tacos del neumático.

Con el uso de Matlab, también se ha obtenido la curva de regresión logarítmica para cada micrófono, así como la ecuación de dicha curva. Además, se han obtenido los valores globales para todo el espectro de frecuencias analizado en este trabajo (100-10000 Hz) y también para las frecuencias normalizadas según la norma ISO 11819-2 [18] (315-5000 Hz).

5.1.2. RESULTADOS PRESIÓN SONORA vs FRECUENCIA

Tras obtener los valores de presión sonora (dBA) registrados en cada micrófono, se ha procedido a su representación gráfica. Estos valores se han representado en función de la frecuencia, y para cada velocidad de ensayo, y a su vez se ha distinguido entre los dos sentidos de giro del tambor.

SENTIDO DE GIRO NORMAL

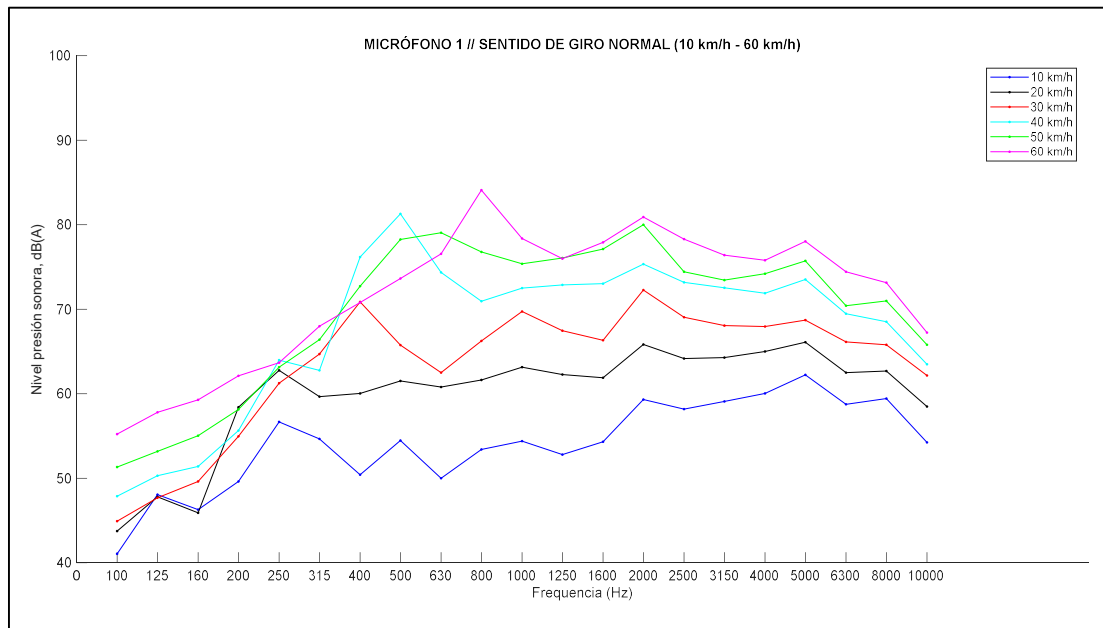


FIGURA 61. MICRÓFONO 1 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

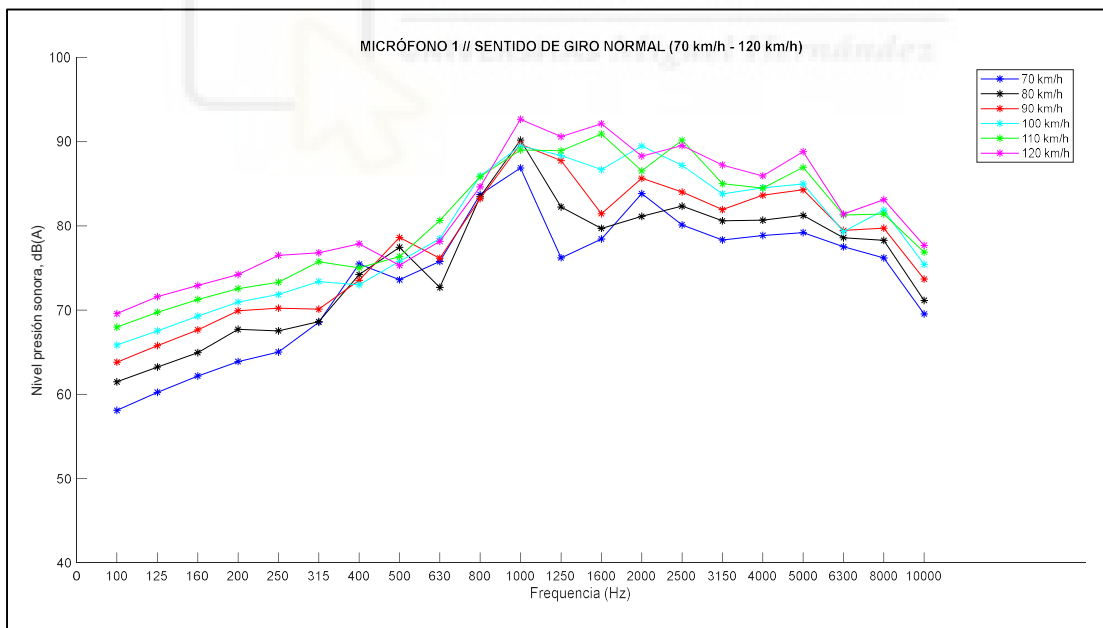


FIGURA 62. MICRÓFONO 1 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

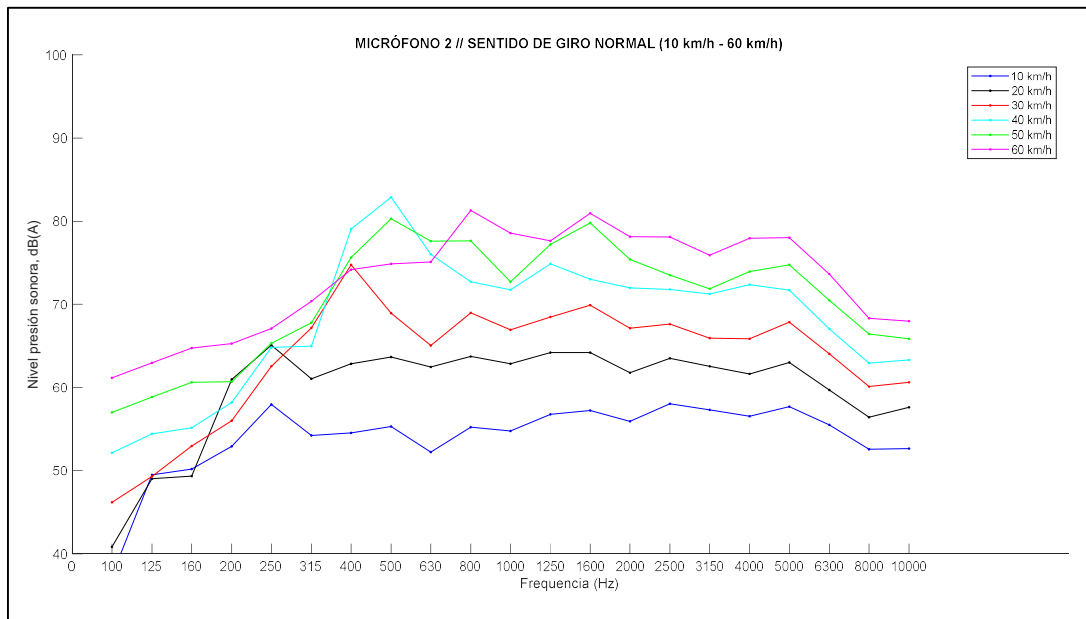


FIGURA 63. MICRÓFONO 2 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

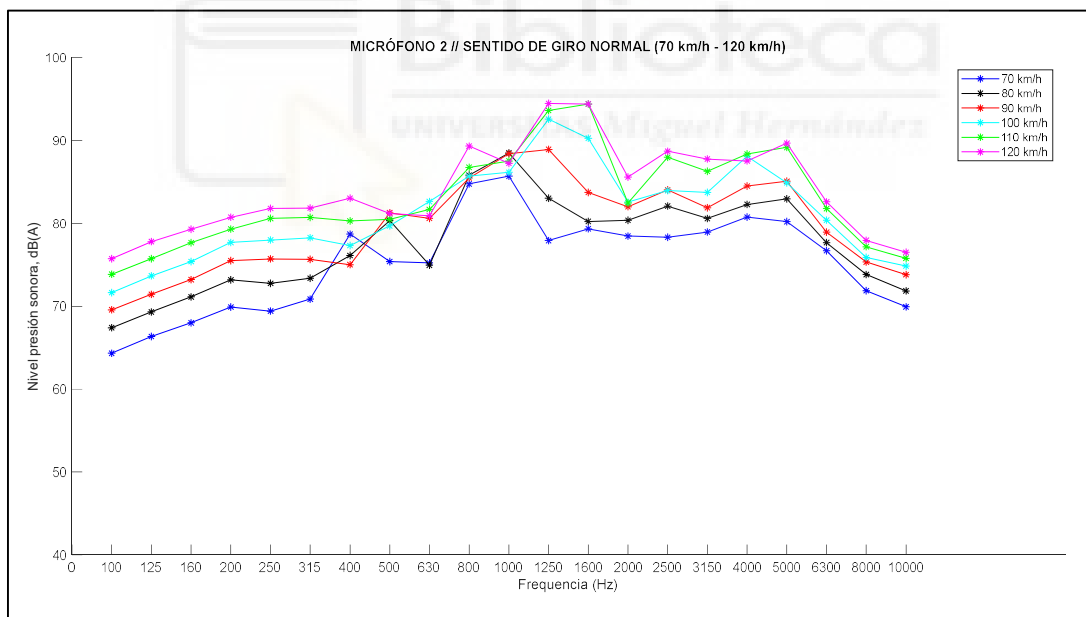


FIGURA 64. MICRÓFONO 2 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

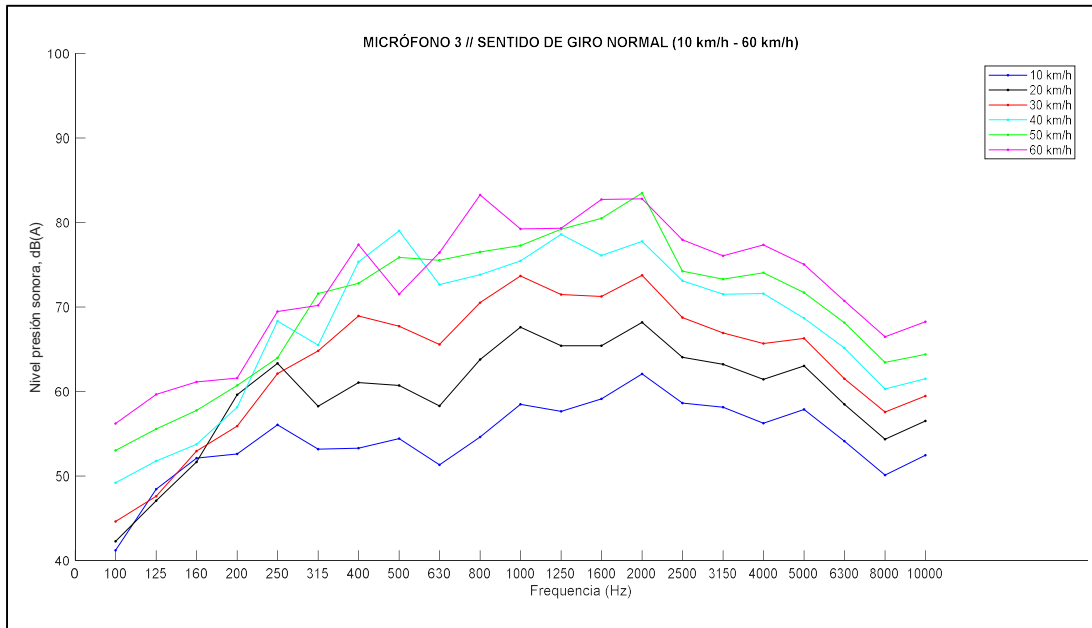


FIGURA 65. MICRÓFONO 3 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

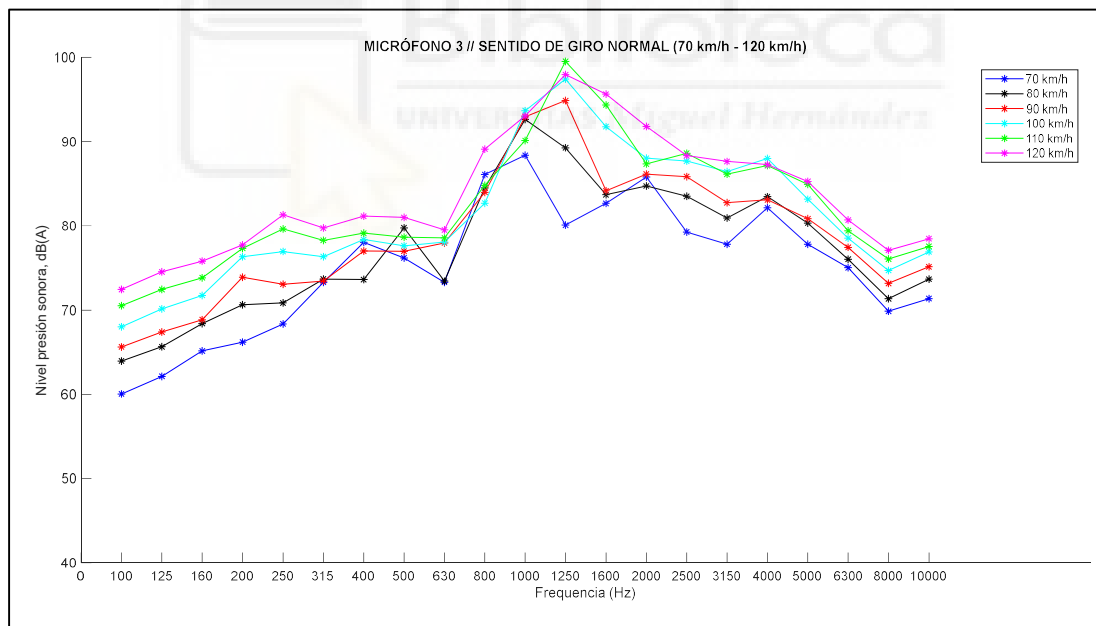


FIGURA 66. MICRÓFONO 3 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

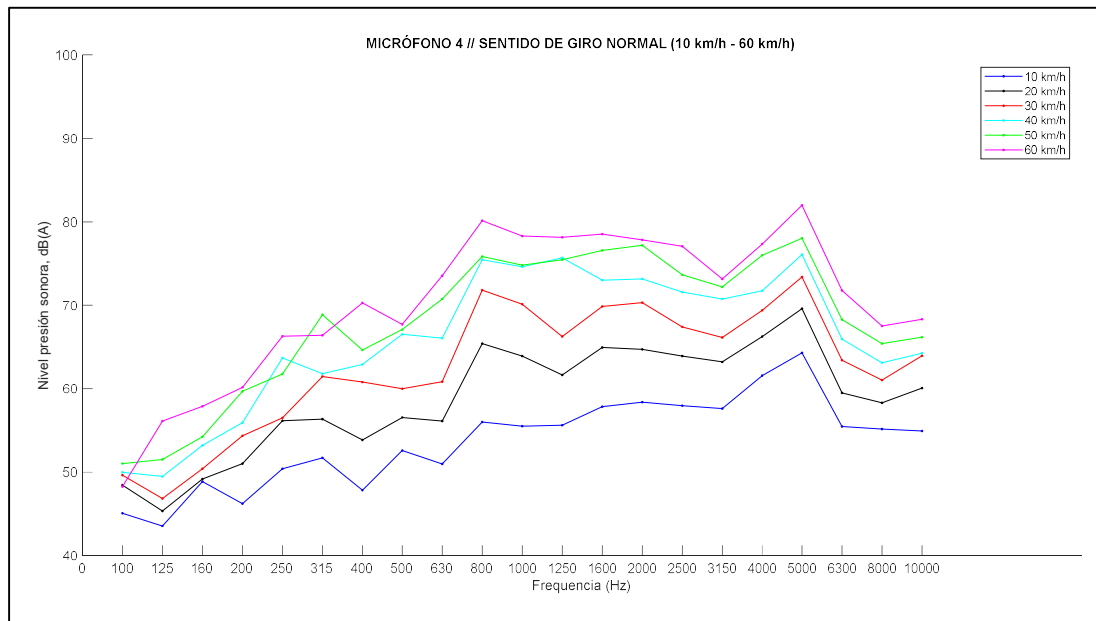


FIGURA 67. MICRÓFONO 4 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

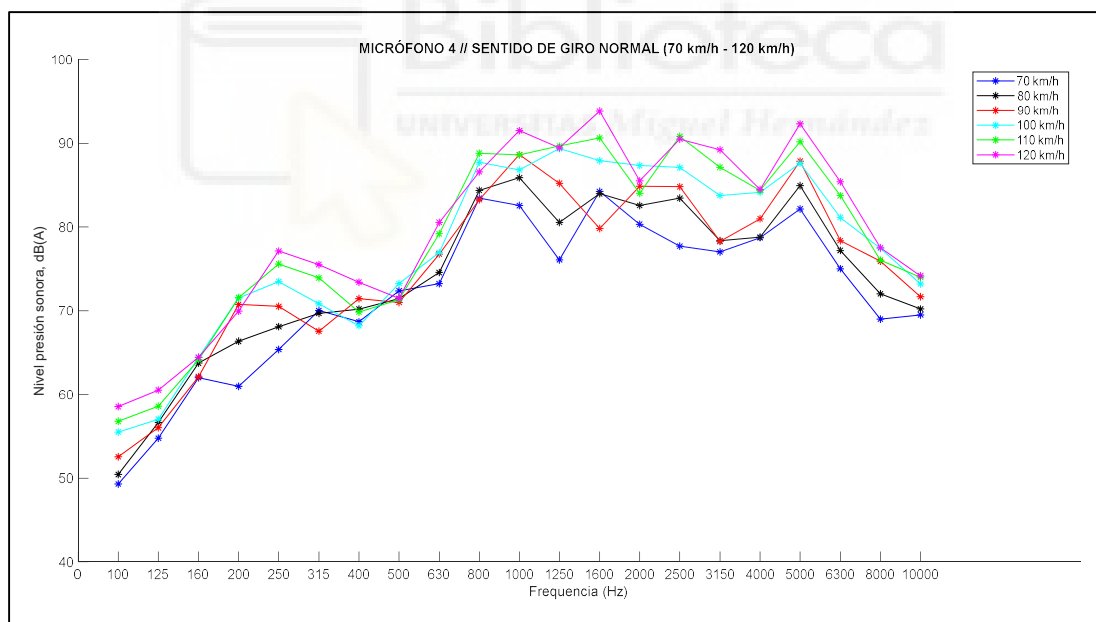


FIGURA 68. MICRÓFONO 4 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

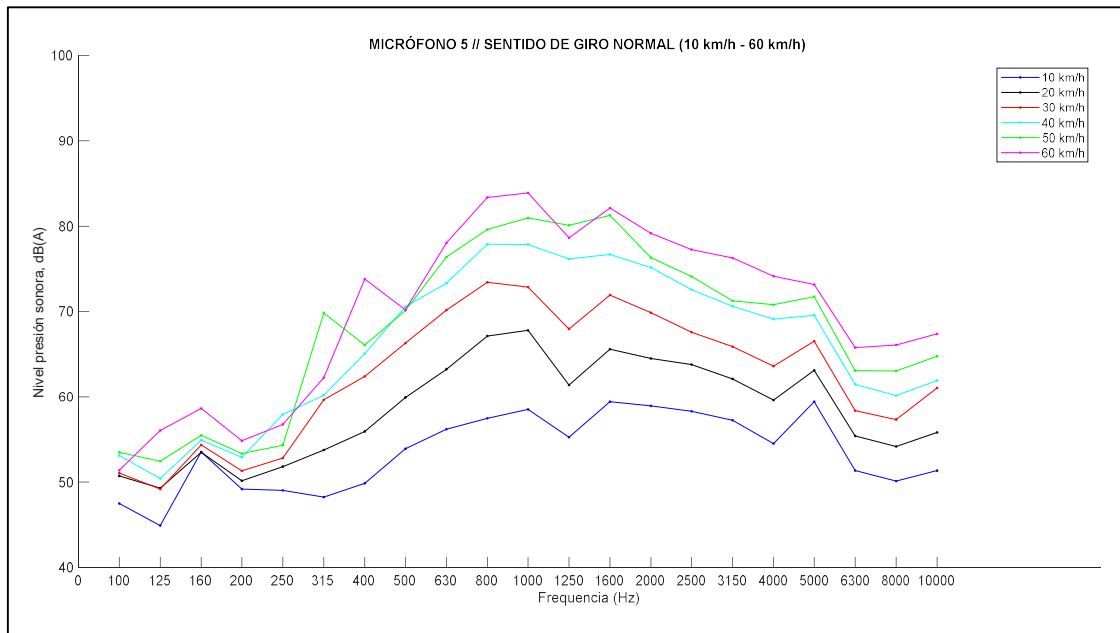


FIGURA 69. MICRÓFONO 5 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

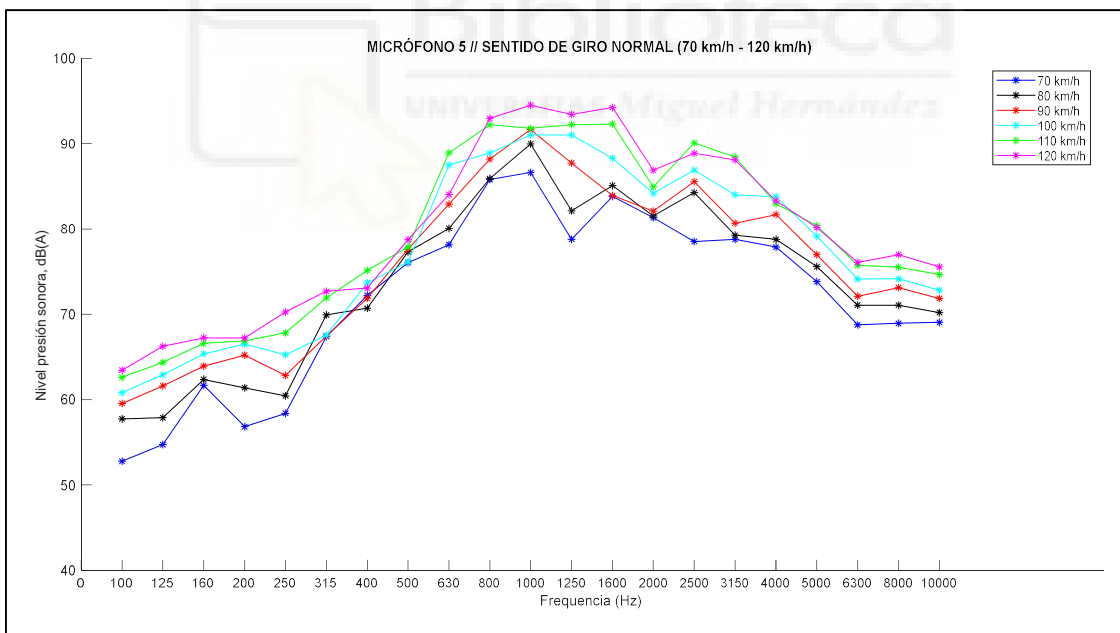


FIGURA 70. MICRÓFONO 5 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

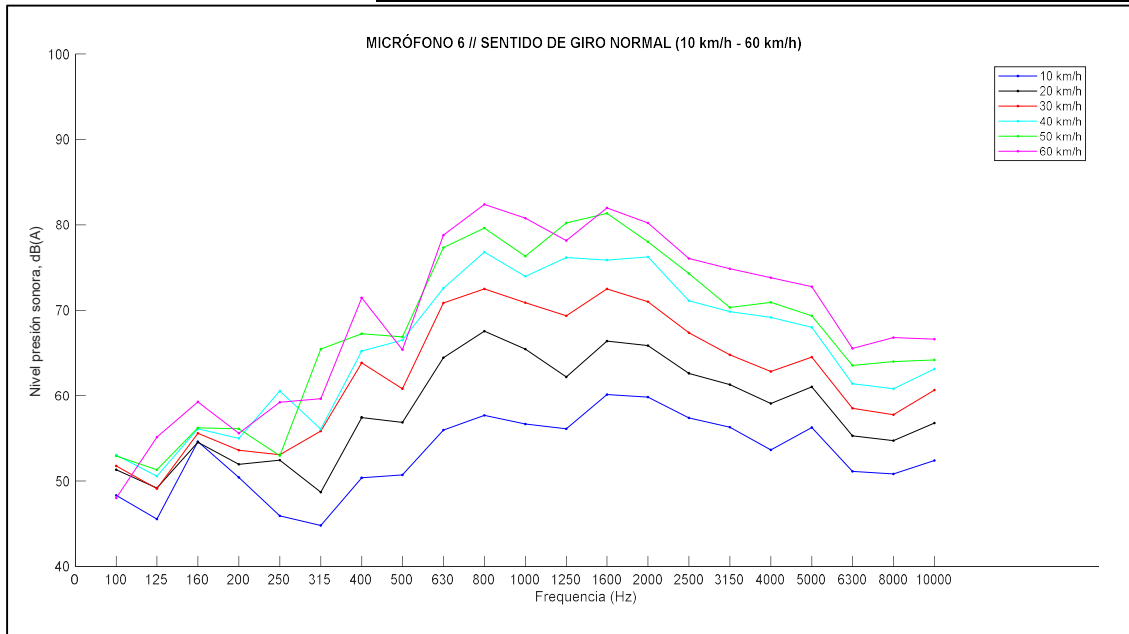


FIGURA 71. MICRÓFONO 6 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

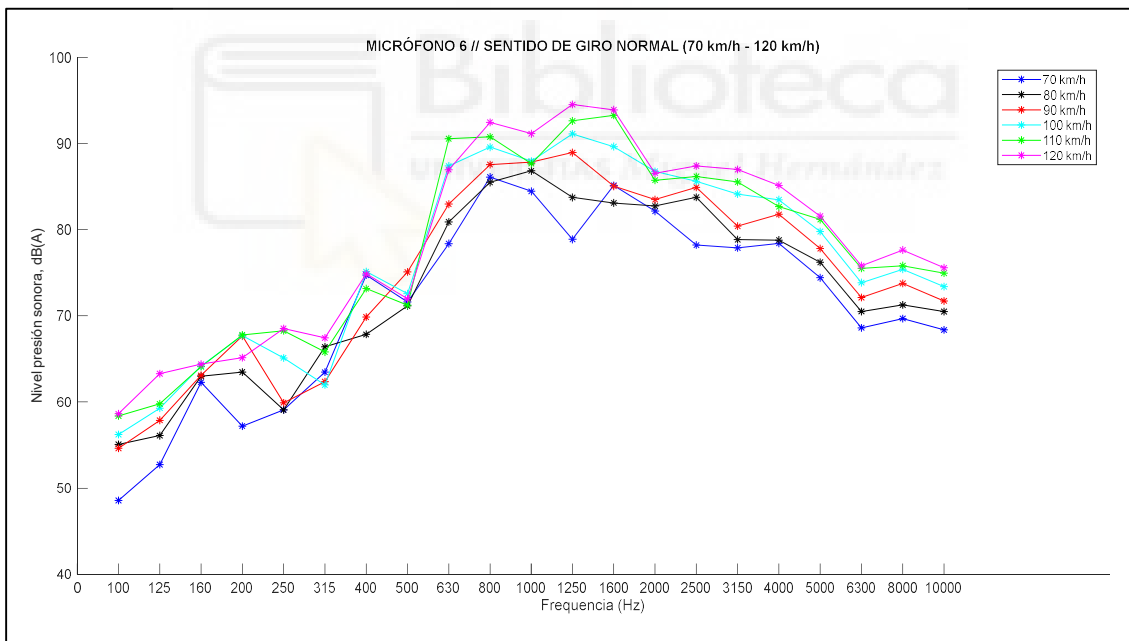


FIGURA 72. MICRÓFONO 6 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

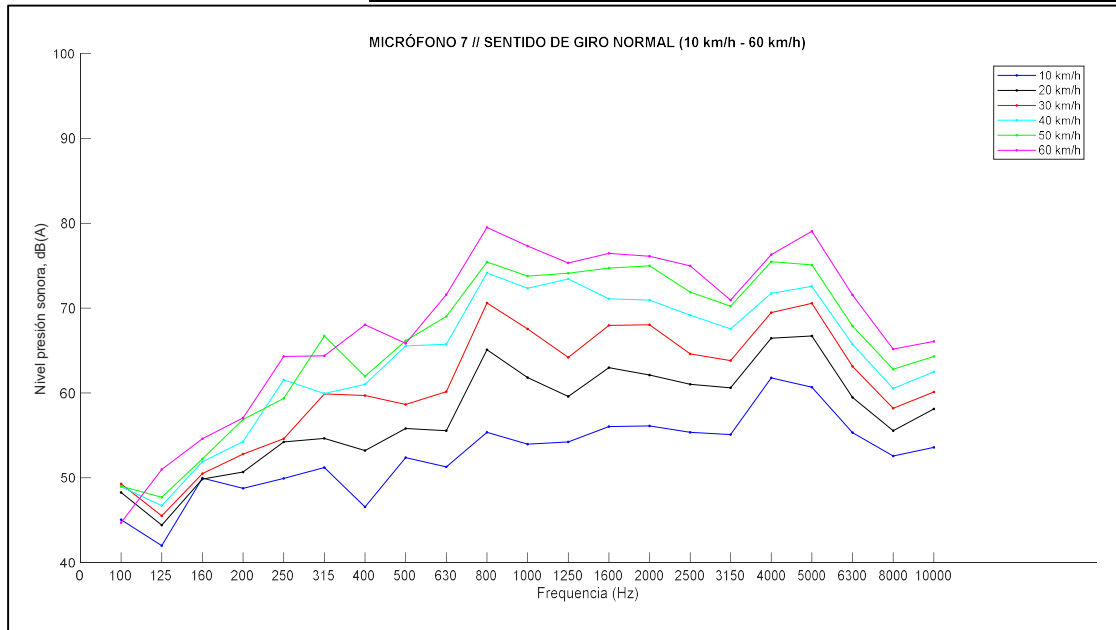


FIGURA 73. MICRÓFONO 7 SENTIDO NORMAL (10 km/h - 60 km/h)

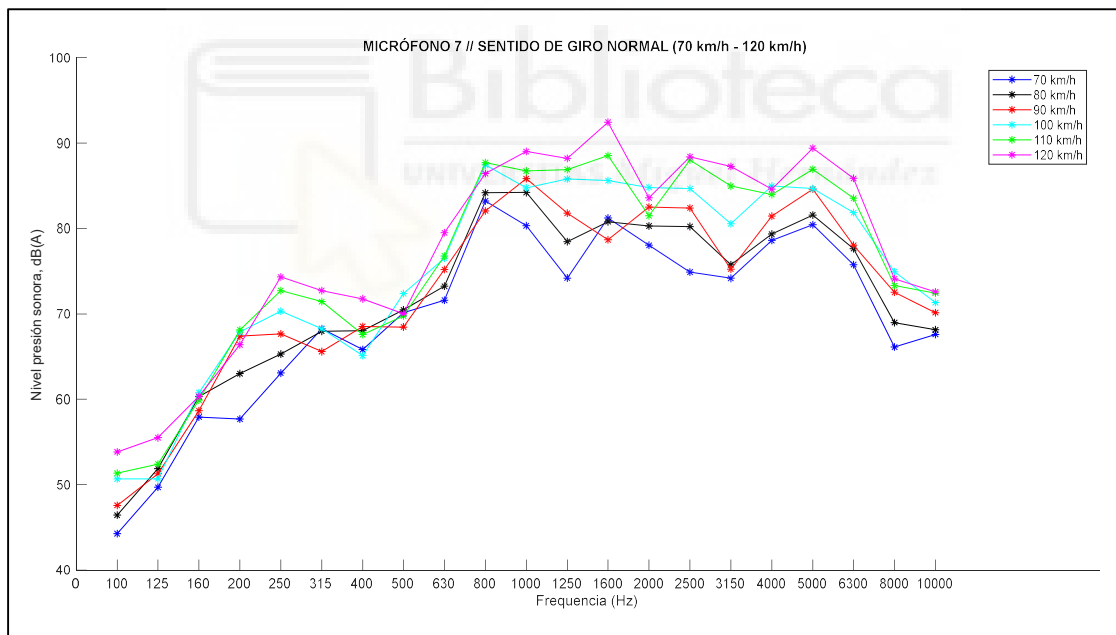


FIGURA 74. MICRÓFONO 7 SENTIDO NORMAL (70 km/h - 120 km/h)

SENTIDO DE GIRO INVERSO

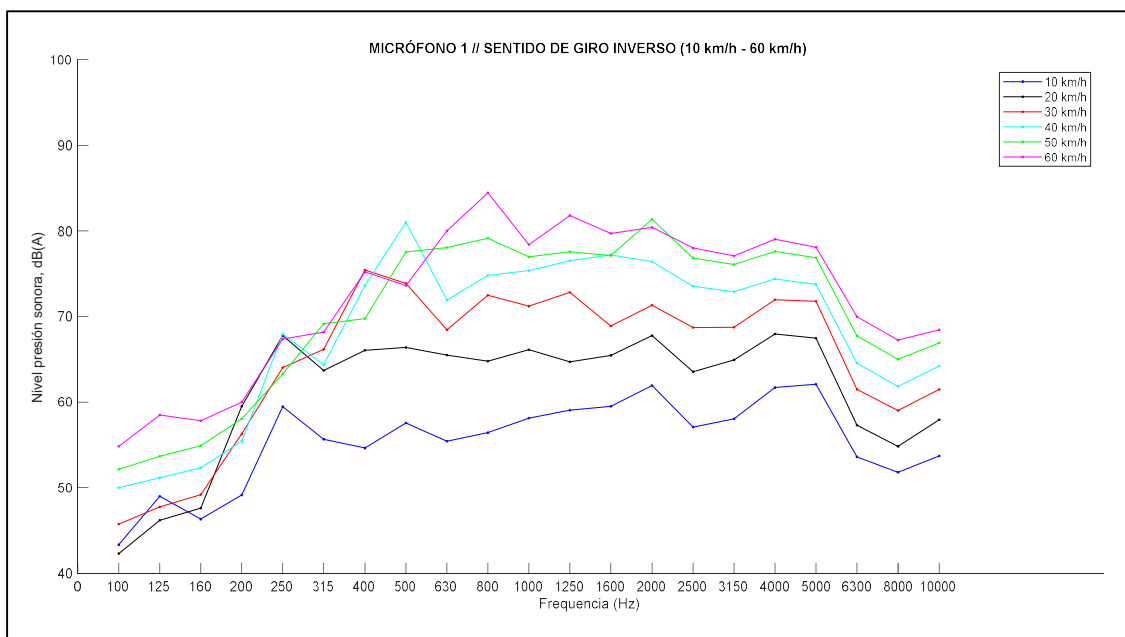


FIGURA 75. MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

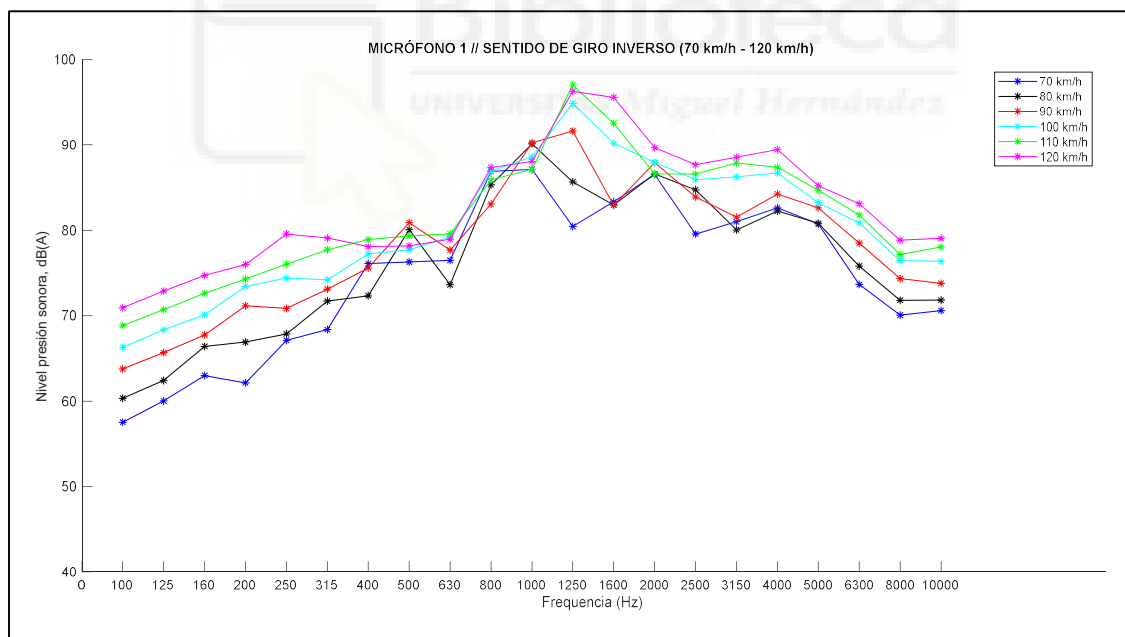


FIGURA 76. MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

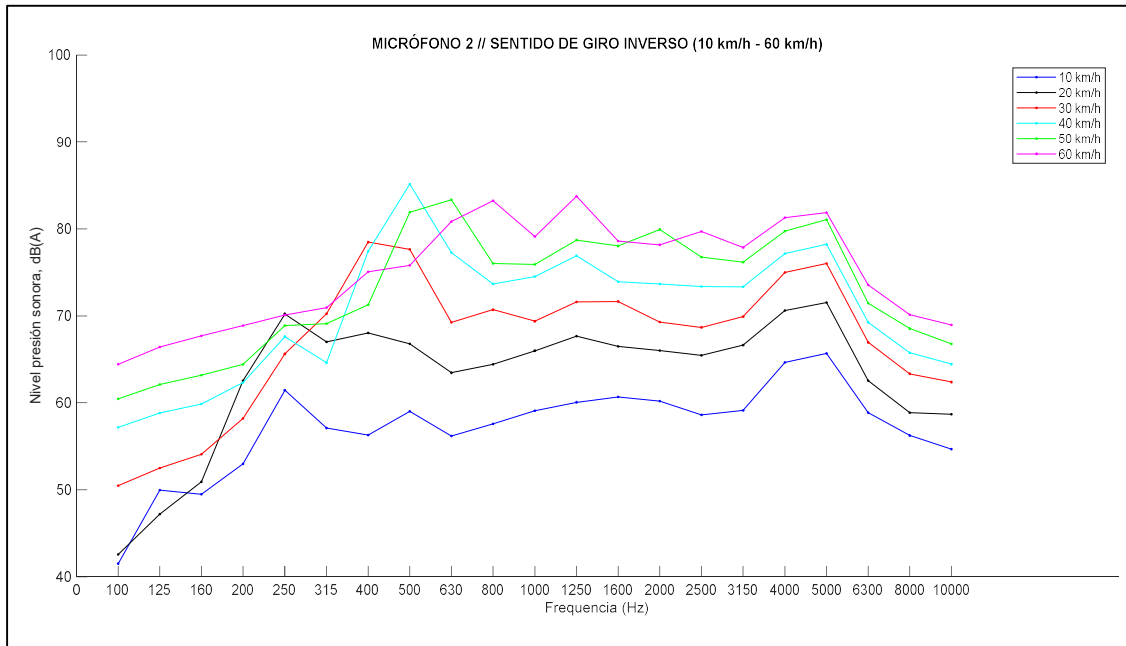


FIGURA 77. MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

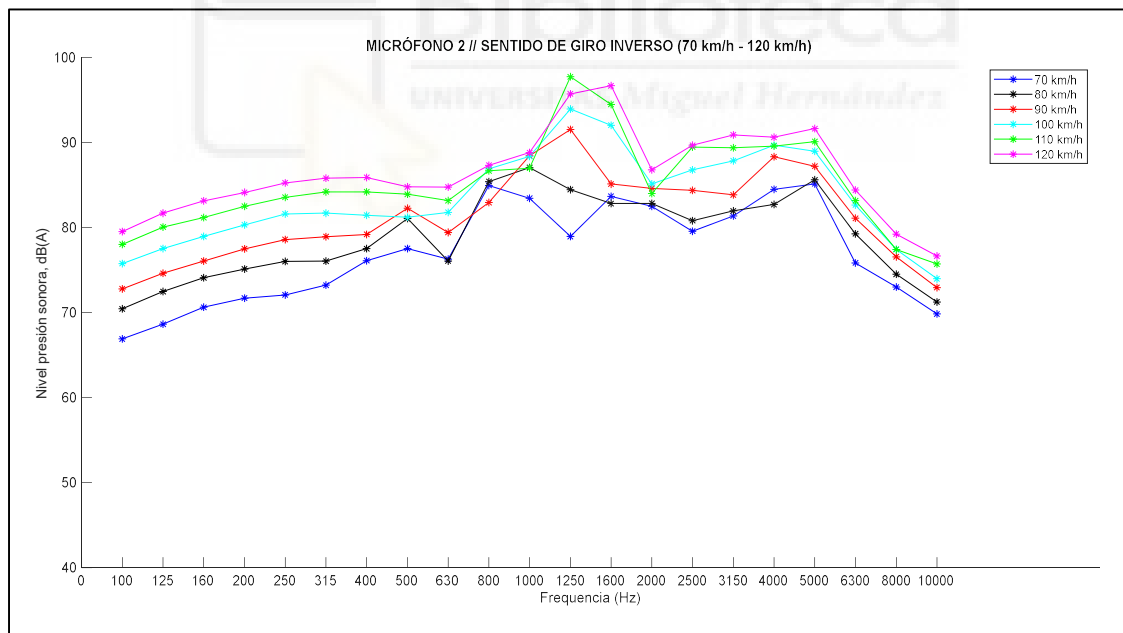


FIGURA 78. MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

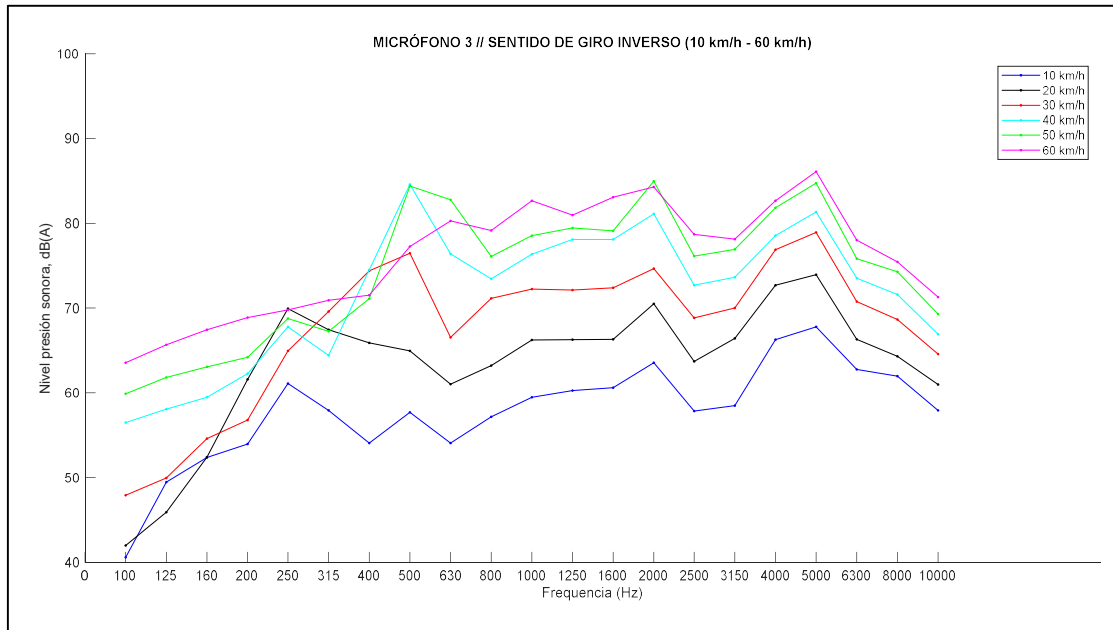


FIGURA 79. MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

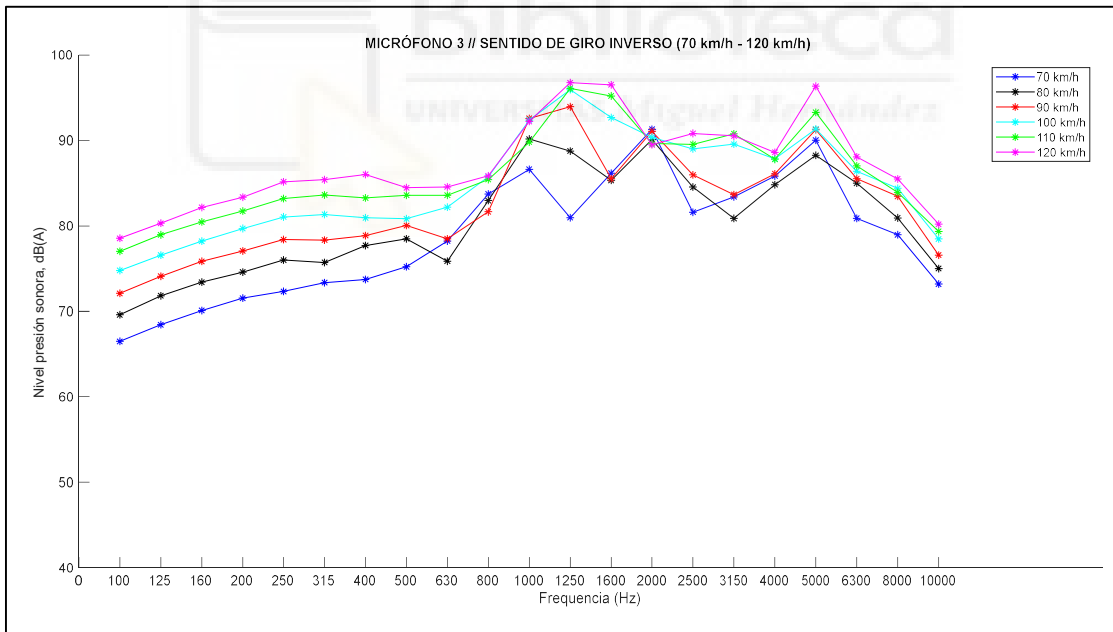


FIGURA 80. MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

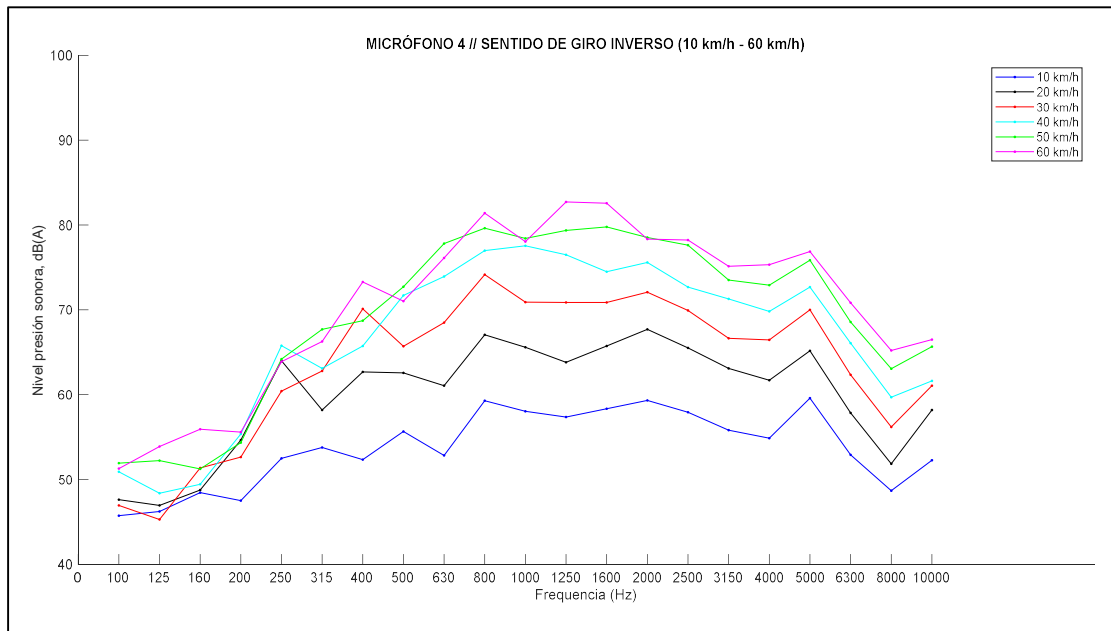


FIGURA 81. MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

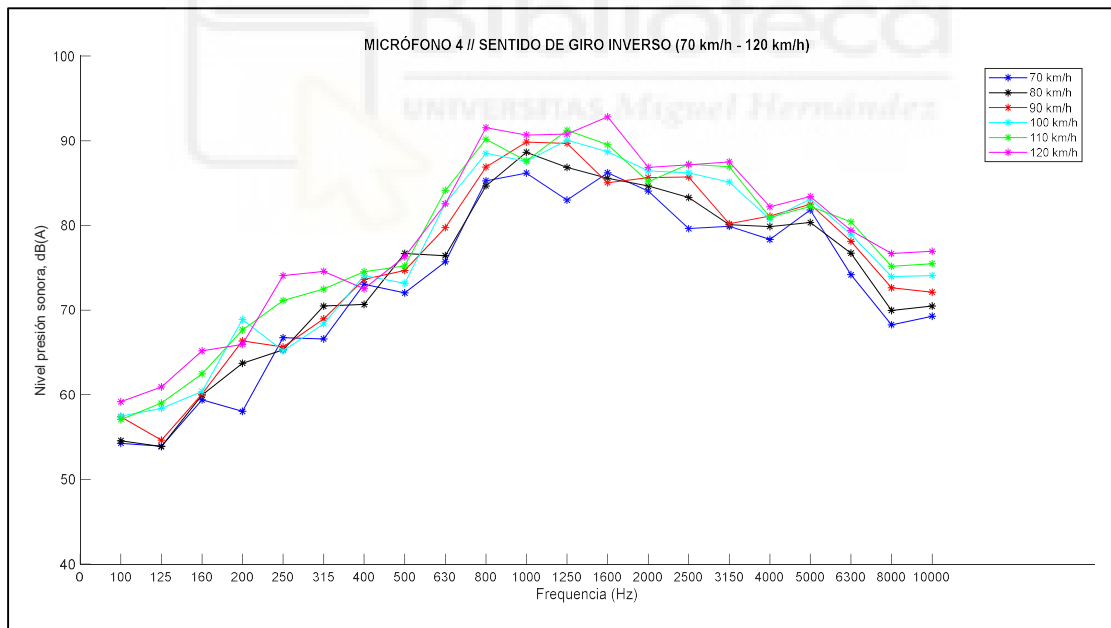


FIGURA 82. MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

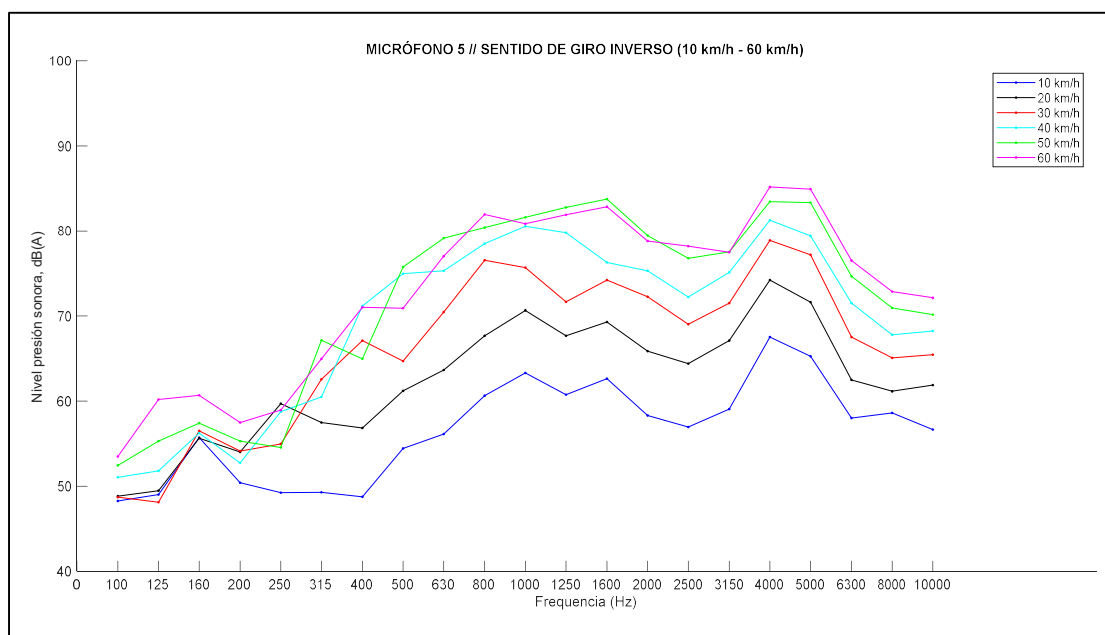


FIGURA 83. MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

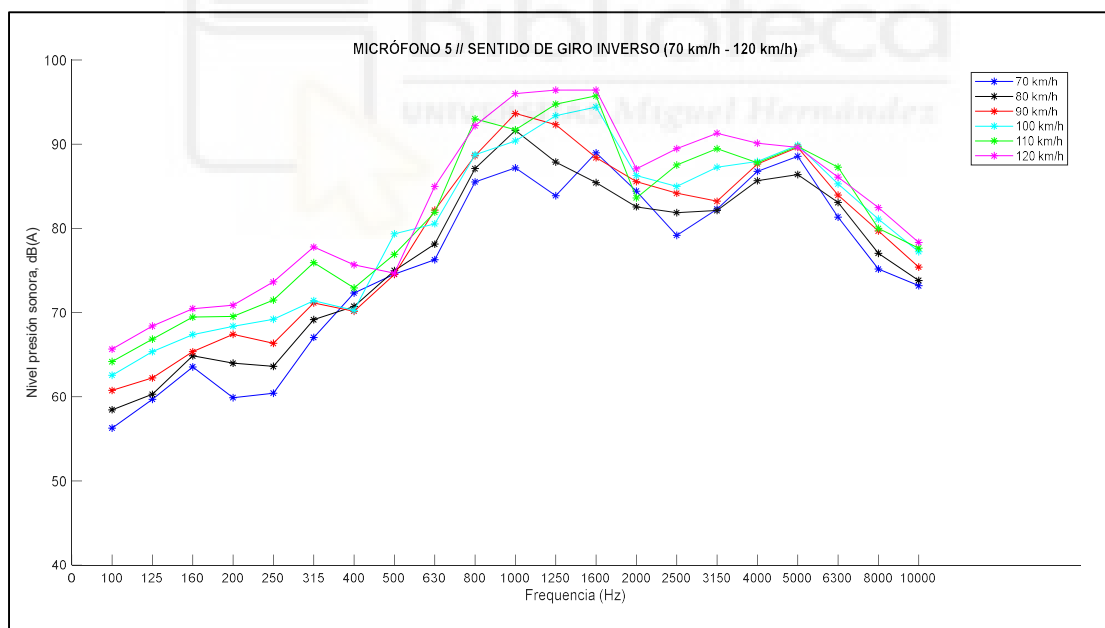


FIGURA 84. MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

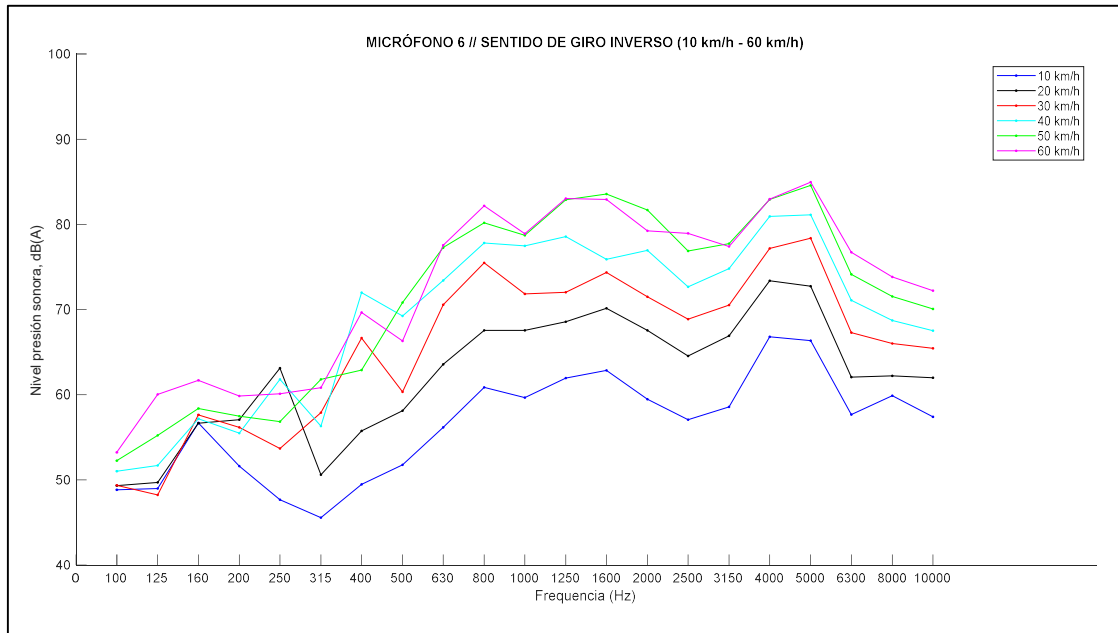


FIGURA 85. MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

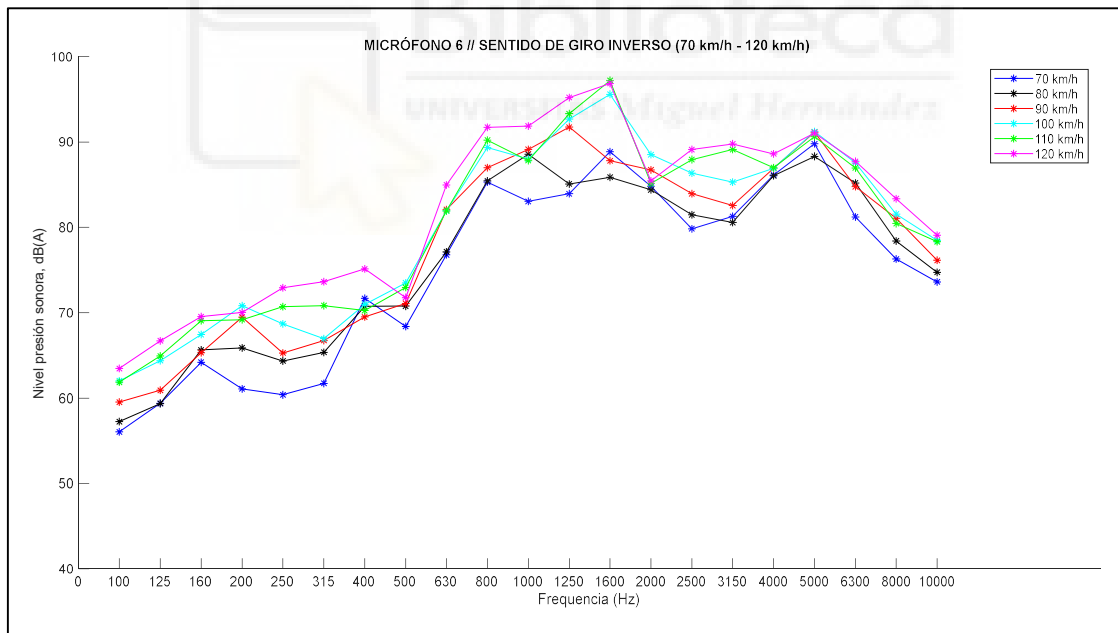


FIGURA 86. MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

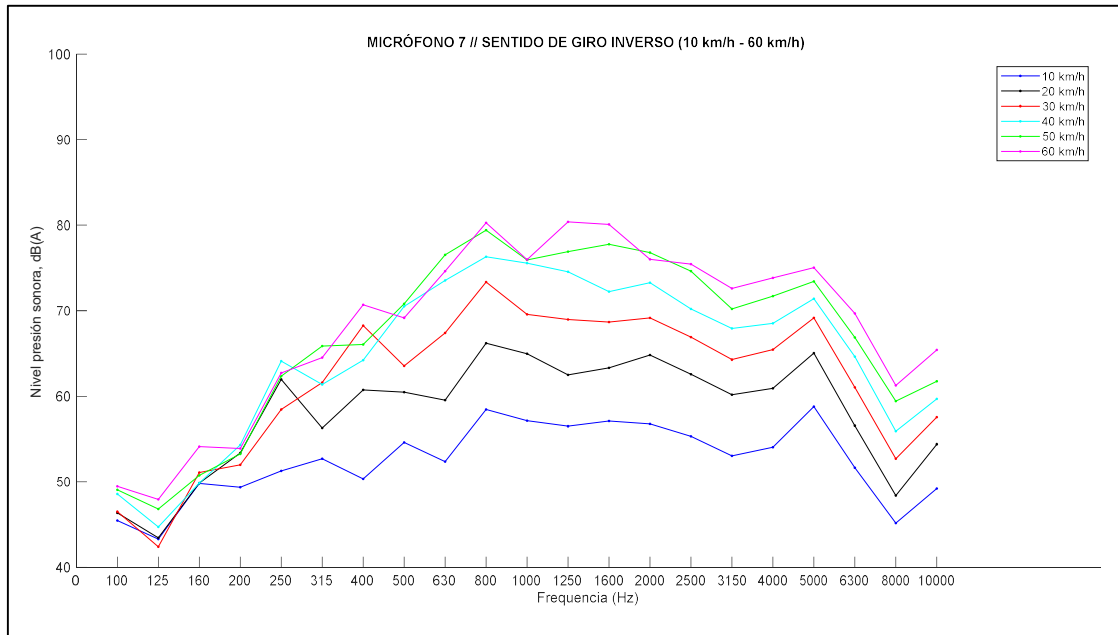


FIGURA 87. MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (10 km/h - 60 km/h)

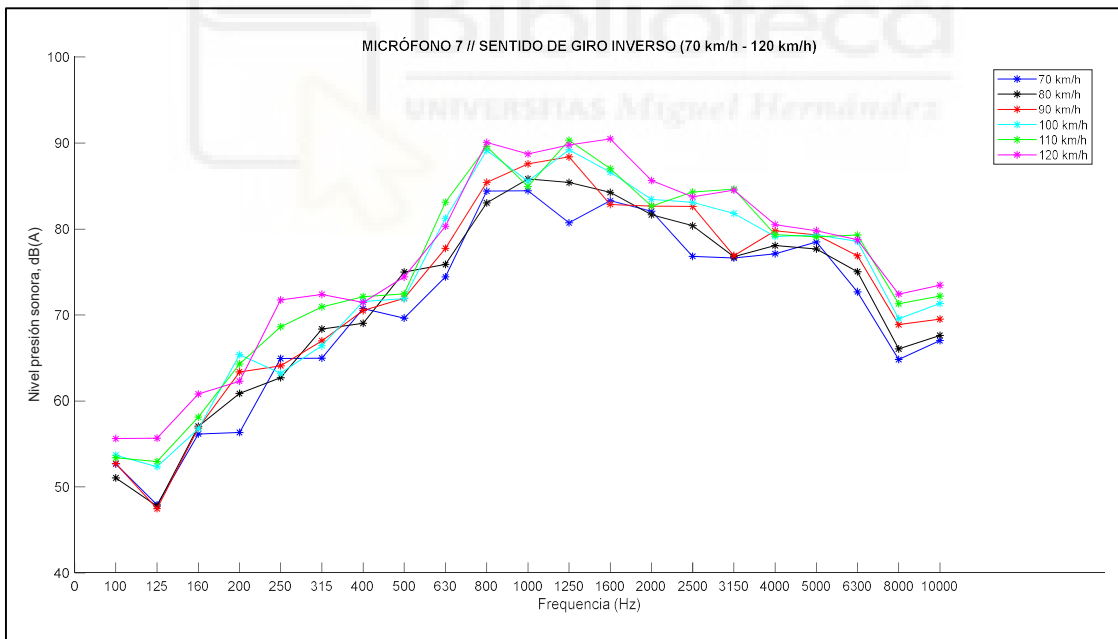


FIGURA 88. MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (70 km/h - 120 km/h)

5.1.3. RESULTADOS VALORES GLOBALES

Para poder comparar los valores de presión, se ha decidido también comparar los valores globales proporcionados por cada uno de los micrófonos. Estos valores globales, se han calculado para todo el rango de frecuencias estudiado (100 Hz-10000 Hz) y también para el rango de frecuencias normalizado según la norma ISO 11819-2 CPX [18] (315 Hz- 5000 Hz). Para esta comparación, se ha decidido mostrar todos los valores agrupados en tablas. La *tabla 5* muestra los niveles de presión sonora globales para un rango de frecuencias que va de 100 Hz a 10000Hz mientras que la *tabla 6* muestra los niveles de presión sonora para un rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz como dicta la norma. Además, se muestran de forma gráfica dichos valores globales a continuación.

TABLA 5. Niveles globales presión sonora para rango de frecuencias de 100 Hz a 10000 Hz

VELOCIDAD (km/h)	MICRÓFONO 1		MICRÓFONO 2		MICRÓFONO 3		MICRÓFONO 4		MICRÓFONO 5		MICRÓFONO 6		MICRÓFONO 7	
	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)	100 - 10000 (Hz)
10	69,7	70,8	68,5	72,6	69,4	74,0	69,8	68,8	68,6	73,2	62,3	73,1	68,2	67,5
20	75,4	77,8	75,1	79,5	75,8	80,4	75,6	76,1	75,0	79,8	74,8	79,7	73,9	74,5
30	80,0	82,9	80,3	84,9	81,2	85,4	80,1	81,3	80,4	85,2	80,1	84,5	78,2	79,7
40	86,1	86,8	86,9	88,9	86,4	90,0	83,9	85,2	85,2	88,7	84,2	88,2	81,9	83,6
50	87,7	88,6	87,7	90,3	88,6	92,3	85,9	88,2	88,0	91,7	87,6	91,6	84,3	86,4
60	89,6	90,6	89,2	91,4	90,5	92,8	88,6	89,7	90,2	92,1	89,3	91,9	86,9	87,6
70	92,1	94,0	91,8	93,3	93,7	96,8	91,1	93,4	92,3	95,9	92,1	95,7	89,4	91,3
80	93,9	95,2	94,0	94,6	96,5	97,4	93,1	94,6	94,3	96,7	93,2	95,9	91,2	92,5
90	95,5	96,8	95,8	97,4	98,6	99,8	94,8	96,2	96,2	99,2	95,4	98,3	92,4	94,1
100	97,1	99,0	97,8	99,8	101,0	101,6	97,0	96,9	97,8	100,2	97,7	100,5	95,1	95,4
110	98,1	100,3	100,0	101,9	102,1	102,3	98,7	97,8	100,0	101,6	99,3	101,3	96,5	96,1
120	99,5	101,3	100,6	102,5	102,4	103,6	100,1	99,1	101,0	103,1	100,4	102,2	98,4	97,2

TABLA 6. Niveles globales de presión sonora para rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz

VELOCIDAD (km/h)	MICRÓFONO 1		MICRÓFONO 2		MICRÓFONO 3		MICRÓFONO 4		MICRÓFONO 5		MICRÓFONO 6		MICRÓFONO 7	
	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)	315-5000 (Hz)
10	68,3	70,1	67,2	71,7	68,6	72,8	69,2	68,3	68,1	72,6	67,6	72,4	67,4	67,0
20	74,4	77,1	74,1	78,6	75,3	79,6	75,2	75,7	74,7	79,5	74,5	79,4	73,4	74,0
30	79,5	82,7	80,0	84,7	81,0	85,1	79,8	81,2	80,3	85,0	79,9	84,2	77,9	79,5
40	85,9	86,7	86,8	88,7	86,3	89,7	83,7	85,1	85,2	88,5	84,1	88,0	81,7	83,4
50	87,5	88,5	87,5	90,1	88,5	92,1	85,7	88,1	88,0	91,6	87,5	91,5	84,1	86,3
60	89,3	90,5	88,9	91,2	90,3	92,5	88,4	89,5	90,1	91,9	89,2	91,6	86,6	87,5
70	91,8	93,9	91,5	93,1	93,6	96,5	90,9	93,3	92,2	95,7	92,0	95,5	89,1	91,2
80	93,6	95,1	93,7	94,2	96,4	96,9	92,9	94,5	94,3	96,4	93,1	95,4	90,9	92,3
90	95,2	96,6	95,5	97,1	98,5	99,4	94,6	96,0	96,1	99,0	95,3	98,0	92,1	94,0
100	96,8	98,8	97,5	99,5	100,9	101,2	96,8	96,8	97,8	100,0	97,6	100,2	94,8	95,3
110	97,8	100,2	99,7	101,7	102,0	101,9	98,5	97,7	99,9	101,4	99,2	101,0	96,2	96,0
120	99,2	101,1	100,3	102,1	102,3	103,2	99,8	99,0	100,9	102,9	100,4	102,0	98,1	97,1

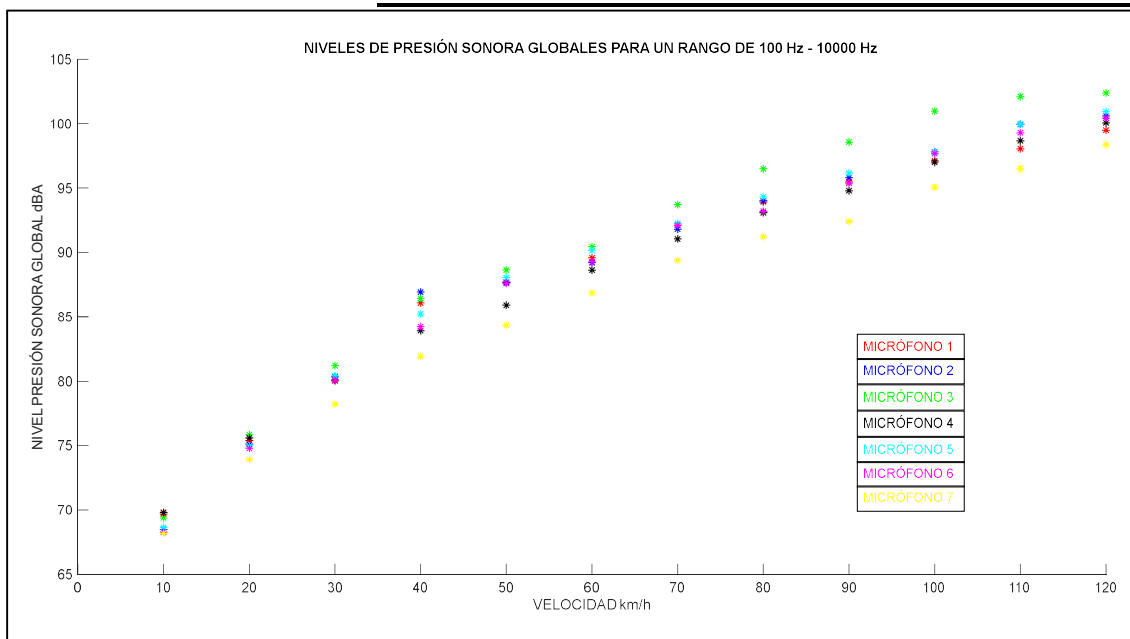


FIGURA 89. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO NORMAL (100 Hz-10000Hz)

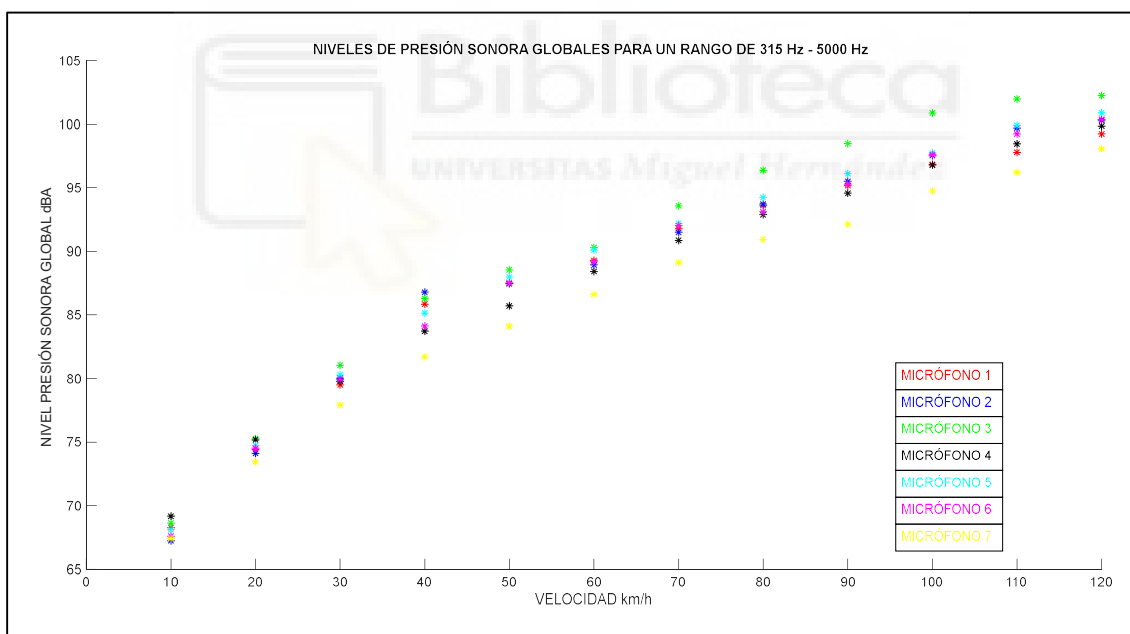


FIGURA 90. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO NORMAL (315 Hz-5000Hz)

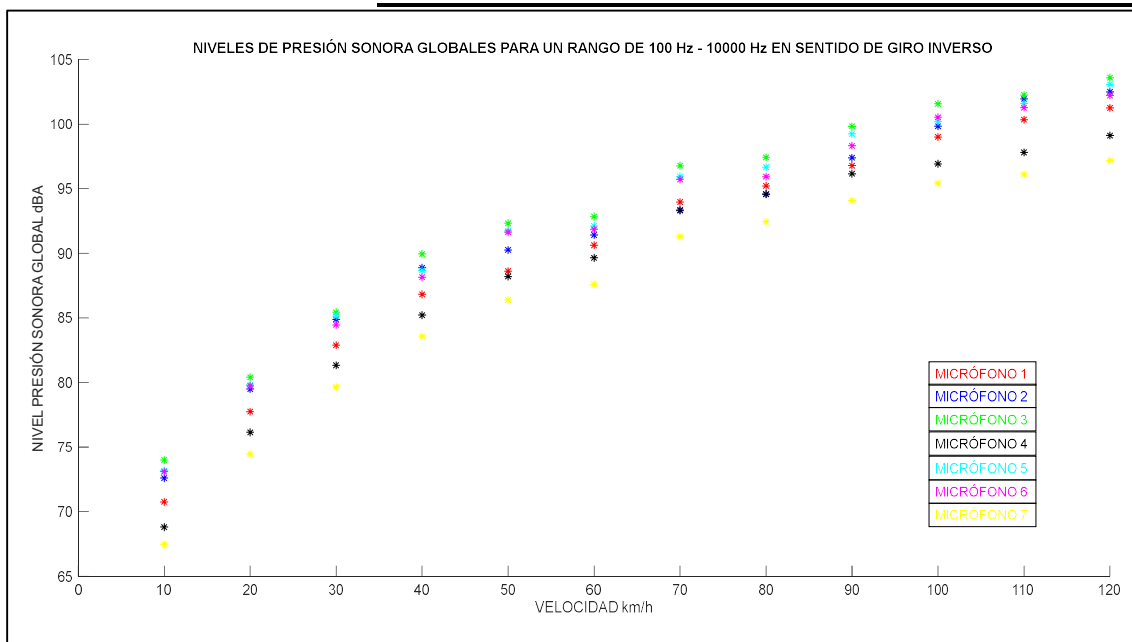


FIGURA 91. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO INVERSO (100 Hz-10000Hz)

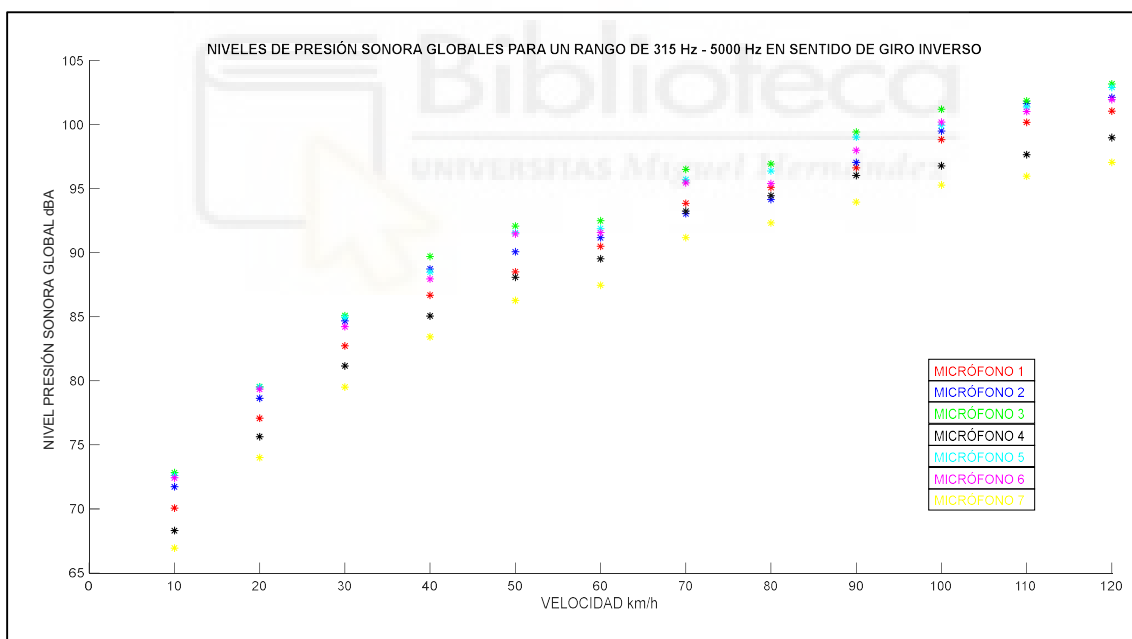


FIGURA 92. NIVELES DE PRESIÓN GLOBALES GIRO INVERSO (315 Hz-5000Hz)

5.1.4. RESULTADOS CURVA LOGARÍTMICA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD

Este apartado está dedicado a la representación gráfica de la curva de presión en función de la velocidad, así como su ecuación característica. La ecuación de cada una de las gráficas se ha determinado en función de la velocidad como $Lp=A+B \cdot \log(v)$. Las ecuaciones para cada micrófono se han agrupado en la siguiente tabla y, además, se pueden observar las curvas de presión de cada uno de los micrófonos en ambos sentidos a continuación.

TABLA 7. Ecuaciones de las curvas logarítmicas de cada micrófono en ambos sentidos

	GIRO NORMAL	GIRO INVERSO
MICRÓFONO 1	$Lp_1 = 38,9+28,9 \cdot \log(v)$	$Lp_{1 \text{ INV}} = 40,4+28,9 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 2	$Lp_2 = 36+30,8 \cdot \log(v)$	$Lp_{2 \text{ INV}} = 43,5+27,8 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 3	$Lp_3 = 33,8+32,9 \cdot \log(v)$	$Lp_{3 \text{ INV}} = 44,4+28,3 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 4	$Lp_4 = 37,9+29,2 \cdot \log(v)$	$Lp_{4 \text{ INV}} = 39,1+29 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 5	$Lp_5 = 35,6+31,1 \cdot \log(v)$	$Lp_{5 \text{ INV}} = 43,7+28,2 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 6	$Lp_6 = 35,5+30,8 \cdot \log(v)$	$Lp_{6 \text{ INV}} = 43,9+27,7 \cdot \log(v)$
MICRÓFONO 7	$Lp_7 = 36,7+28,8 \cdot \log(v)$	$Lp_{7 \text{ INV}} = 37,9+28,5 \cdot \log(v)$

SENTIDO DE GIRO NORMAL

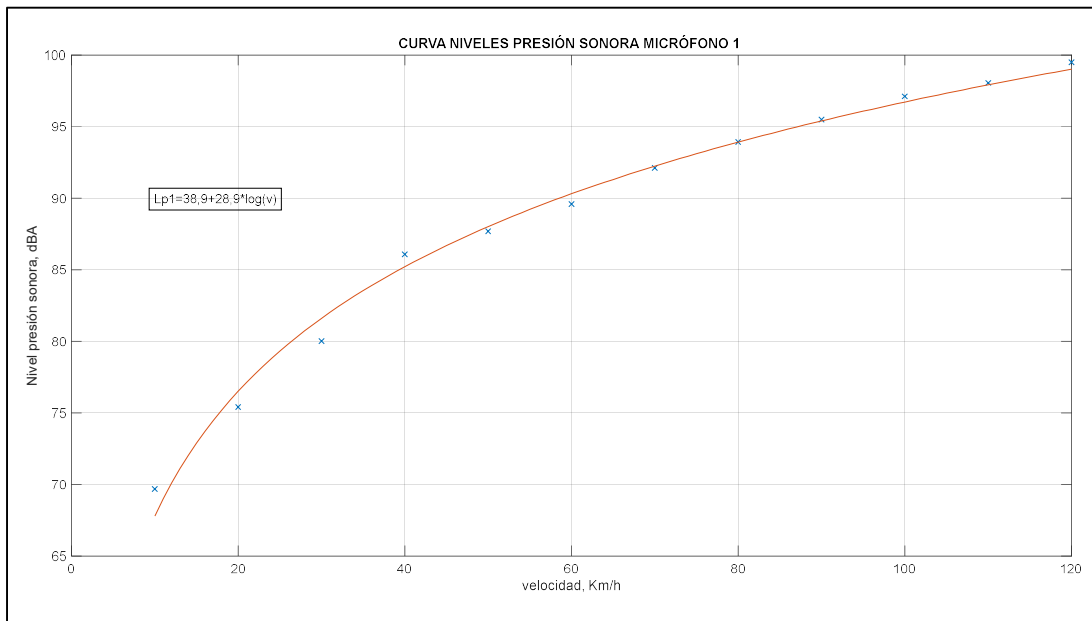


FIGURA 93. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 1

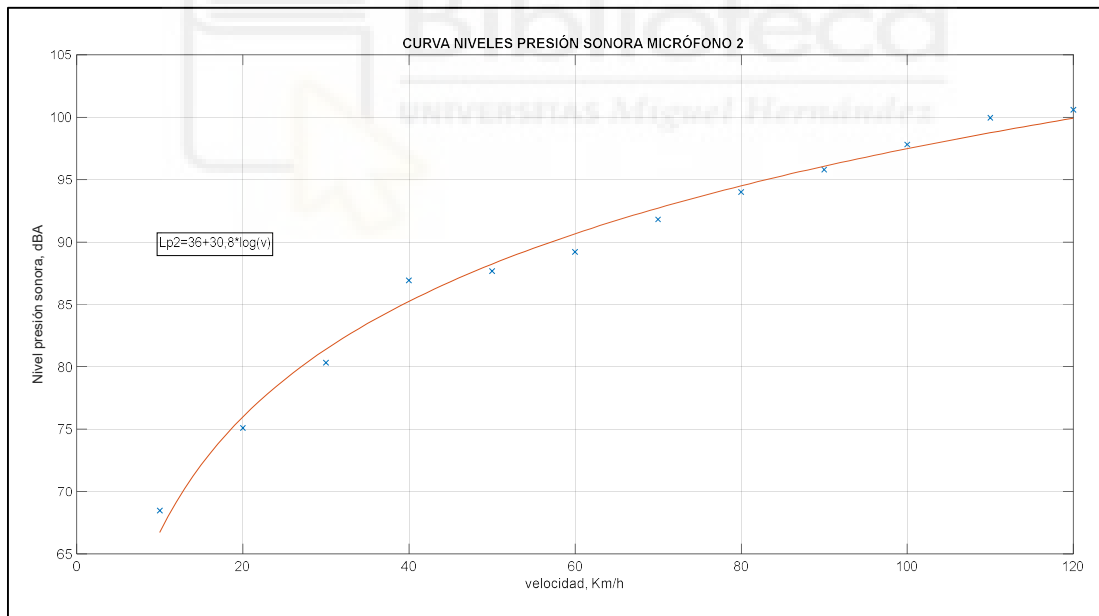


FIGURA 94. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 2

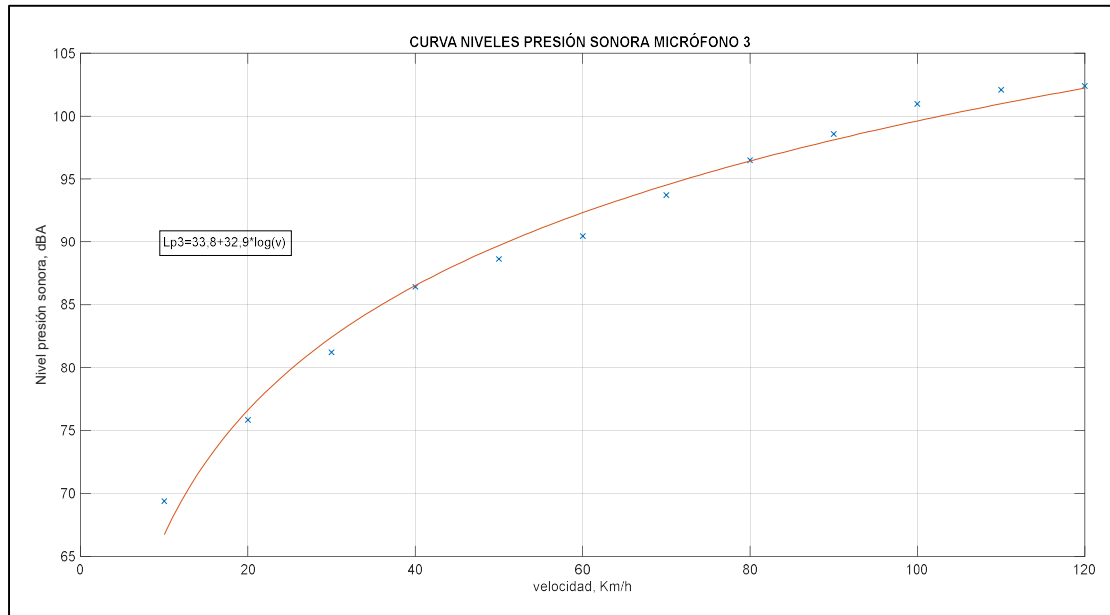


FIGURA 95. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 3

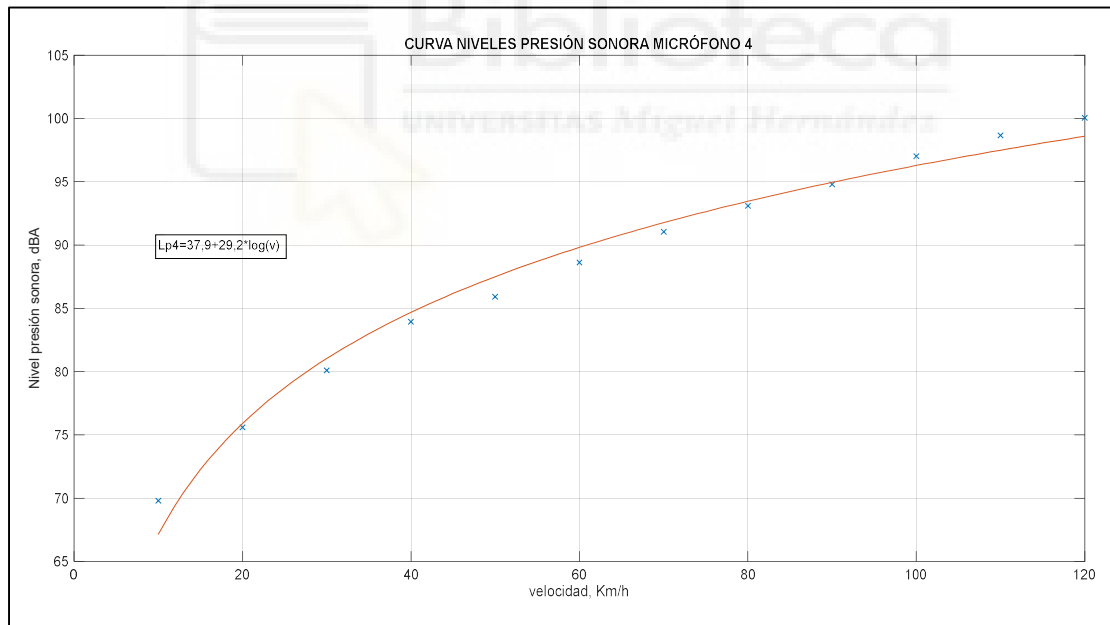


FIGURA 96. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 4

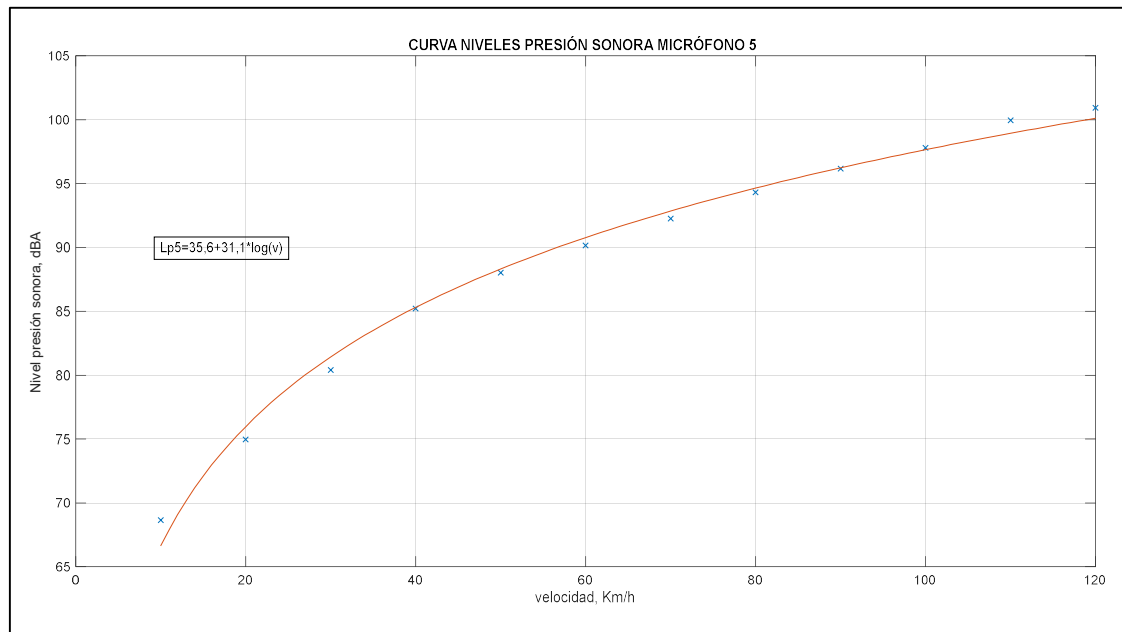


FIGURA 97. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 5

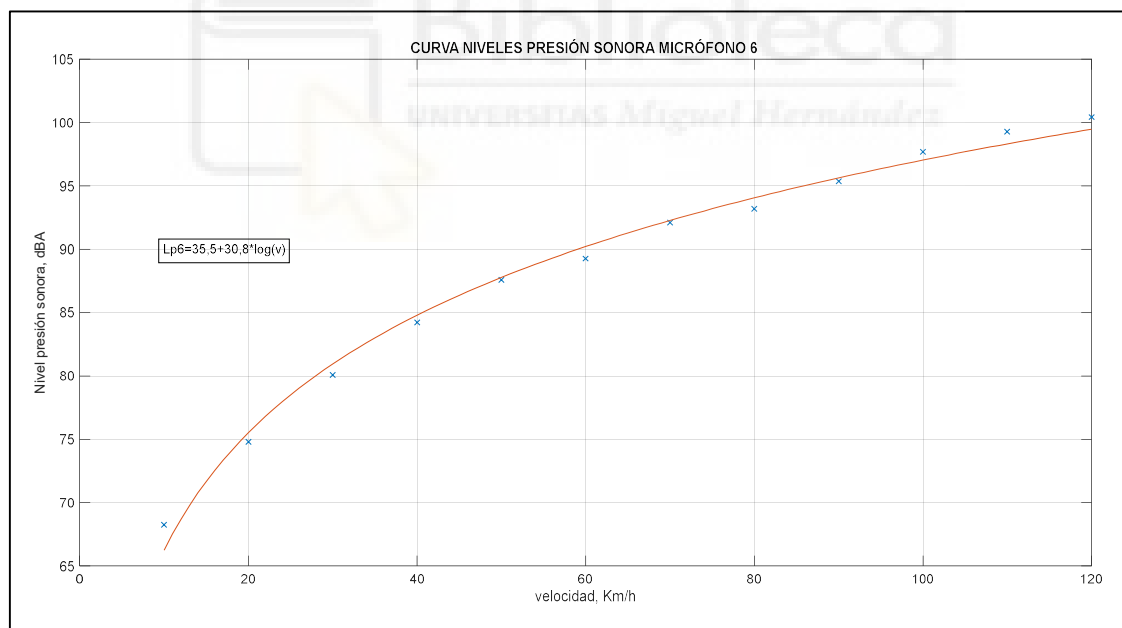


FIGURA 98. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 6

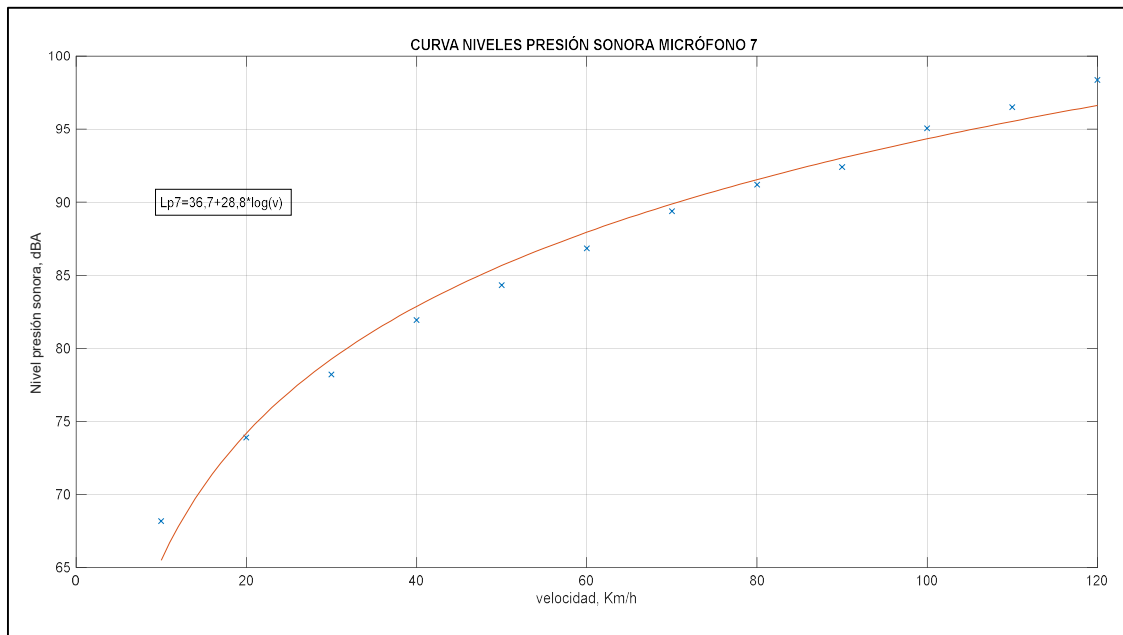


FIGURA 99. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO NORMAL MICRÓFONO 7

SENTIDO DE GIRO INVERSO

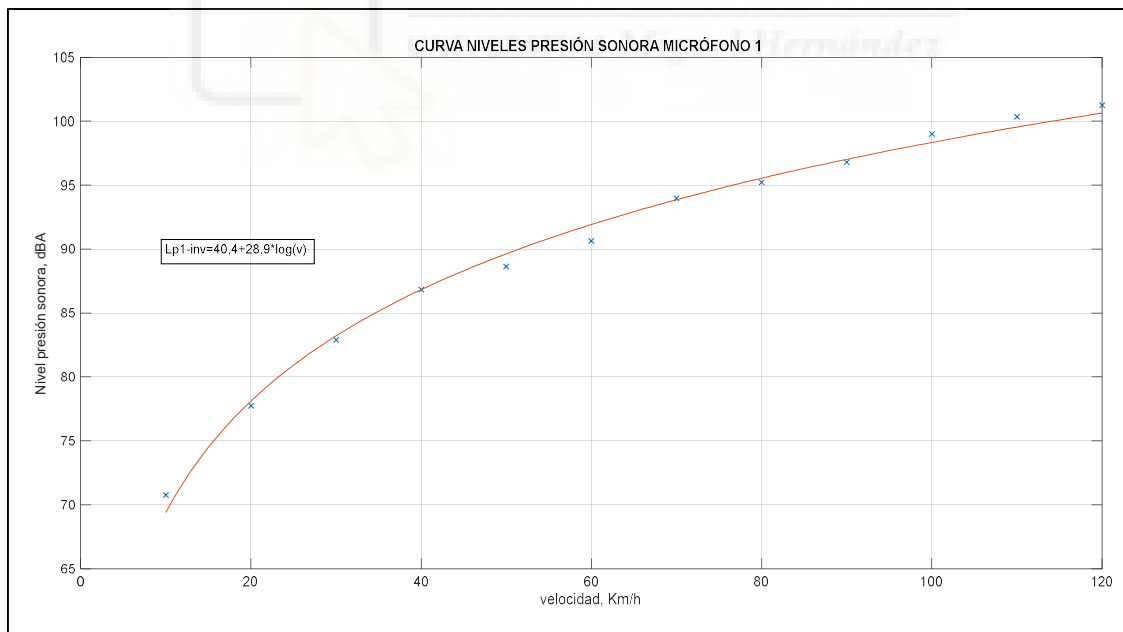


FIGURA 100. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 1

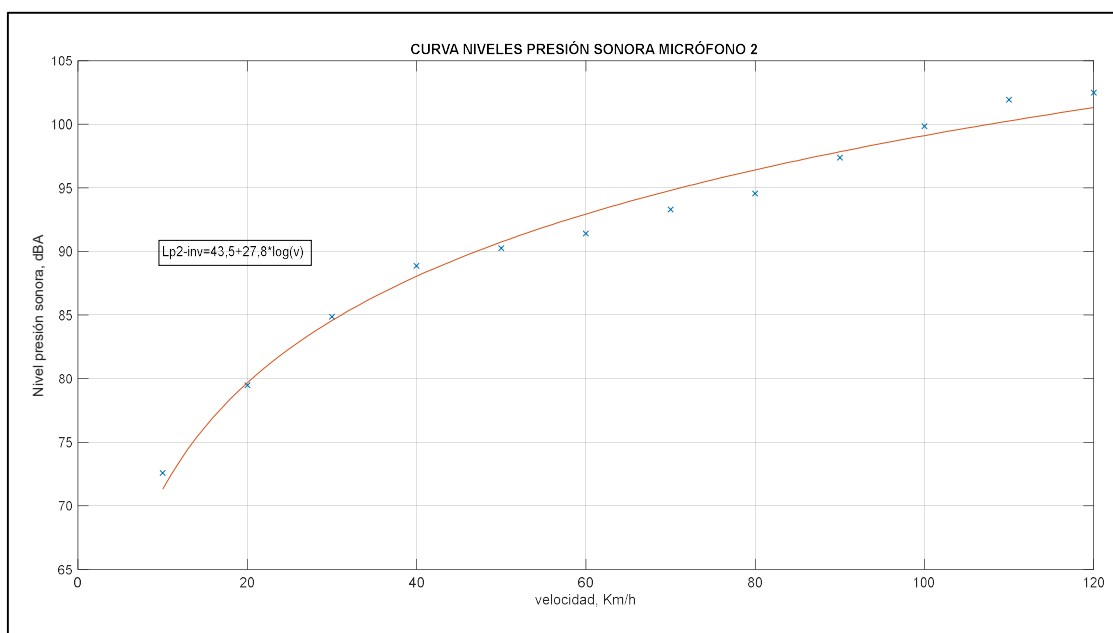


FIGURA 101. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 2

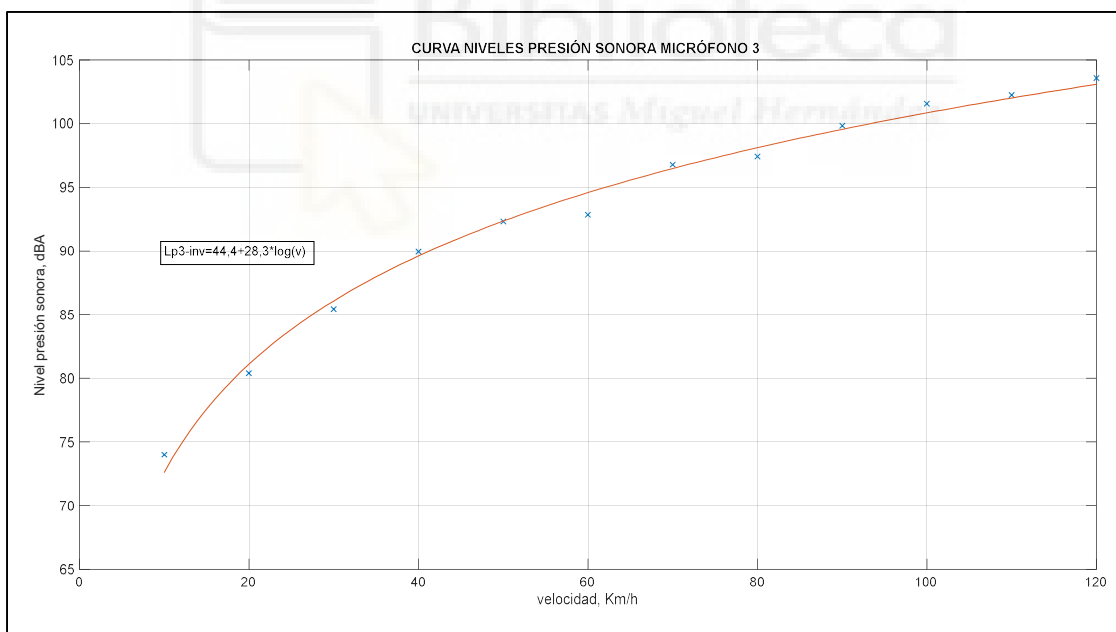


FIGURA 102. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 3

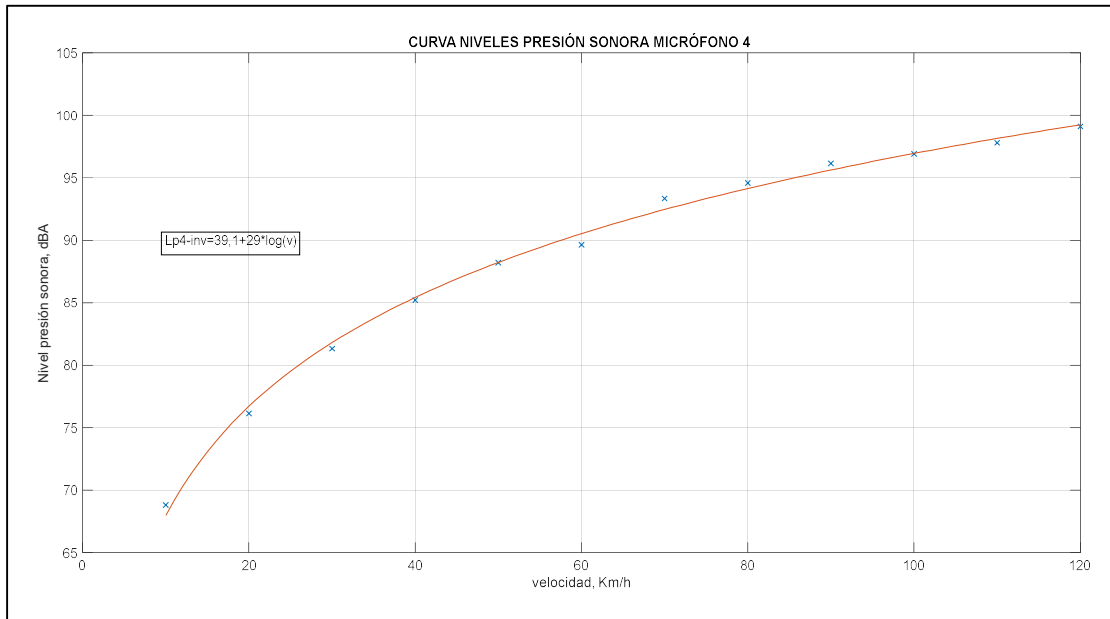


FIGURA 103. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 4

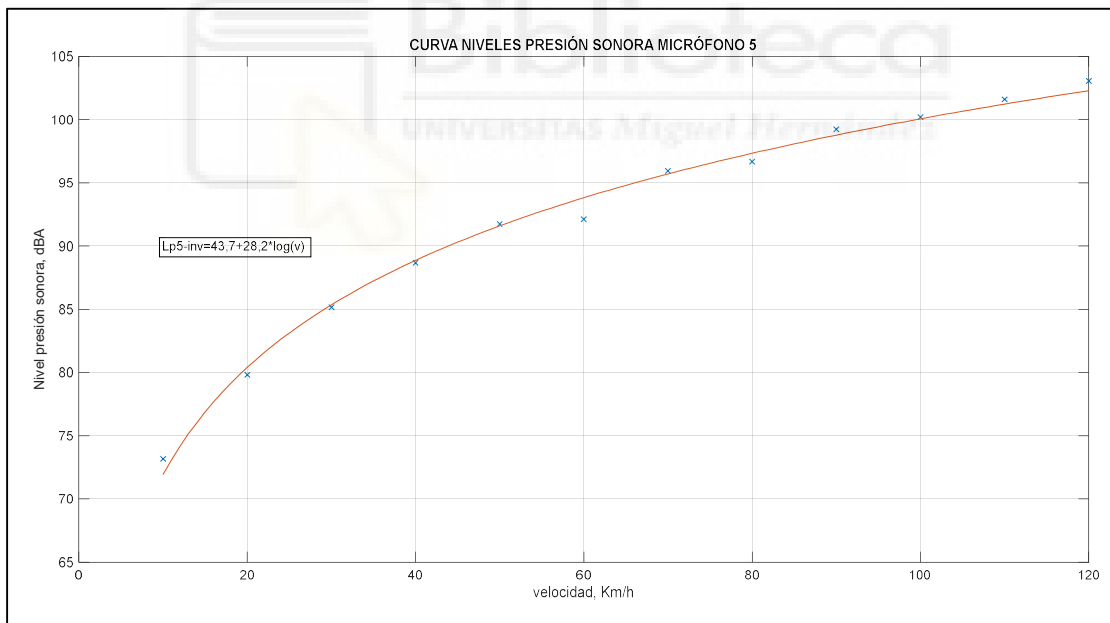


FIGURA 104. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 5

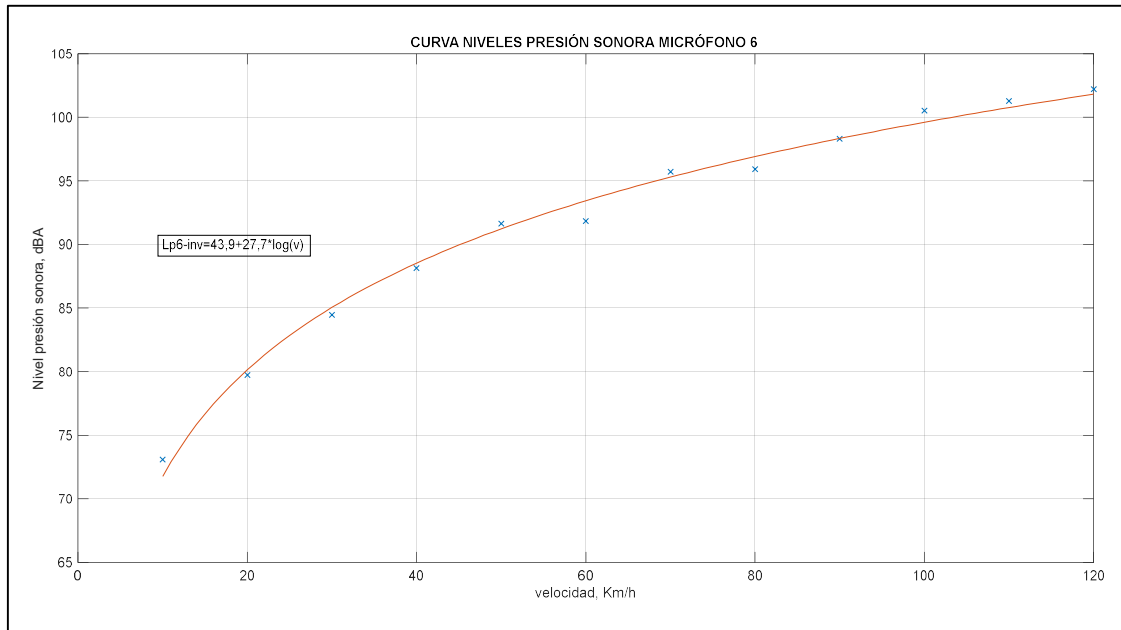


FIGURA 105. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 6

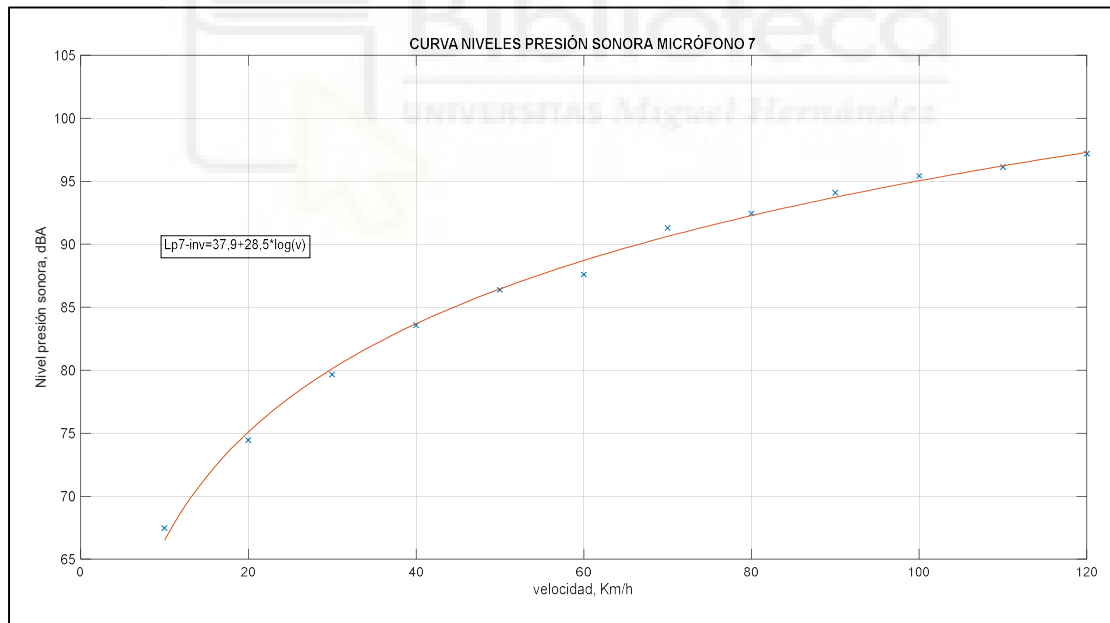


FIGURA 106. CURVA LOGARÍTMICA SENTIDO DE GIRO INVERSO MICRÓFONO 7

5.1.5. RESULTADOS IMPACTO DE LOS BLOQUES DEL NEUMÁTICO

Tras analizar las gráficas de nivel de presión sonora en función de la frecuencia obtenidas por cada uno de los micrófonos, se ha observado unas alteraciones que se producen de forma repetida. Estos impactos sonoros son provocados por los distintos tacos del neumático debido a su estructura tan irregular. Para poder identificar estos impactos, en primer lugar, hay que conocer las medidas de cada uno de los tacos del neumático. Las medidas obtenidas de los tacos son: 19mm, 22mm, 23mm y 27mm.



FIGURA 107. BANDA DE RODADURA CON DISTINTAS MEDIDAS DE TACO

Tras conocer las medidas de los tacos, es necesario calcular en qué frecuencia se ha causado el impacto y poder identificarlo en la gráfica. Para ello, utilizando la siguiente ecuación se ha conseguido determinar:

$$f = \frac{v}{l} \text{ (Hz)} \quad (8)$$

Donde f es la frecuencia en hercios (Hz), v es la velocidad (m/s) y l es la longitud del taco de neumático estudiado (m).

Los datos obtenidos se han agrupado en las siguientes tablas, dependiendo del tamaño del bloque que causa el impacto se ha determinado la frecuencia en la que se produce dicho impacto y a la banda de frecuencia a la que pertenece.

BLOQUE 19mm

TABLA 8. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 19 mm

VELOCIDAD (km/h)	FRECUENCIA IMPACTO BLOQUE 19 mm (Hz)	BANDA FRECUENCIA (Hz)
10	146,20	160
20	292,40	315
30	438,60	400
40	584,80	630
50	730,99	800
60	877,19	800
70	1023,39	1000
80	1169,59	1250
90	1315,79	1250
100	1461,99	1600
110	1608,19	1600
120	1754,39	1600

BLOQUE 22mm

TABLA 9. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 22 mm

VELOCIDAD (km/h)	FRECUENCIA IMPACTO BLOQUE 22 mm (Hz)	BANDA FRECUENCIA (Hz)
10	126,26	125
20	252,53	250
30	378,79	400
40	505,05	500
50	631,31	630
60	757,58	800
70	883,84	800
80	1010,10	1000
90	1136,36	1250
100	1262,63	1250
110	1388,89	1250
120	1515,15	1600

BLOQUE 23mm

TABLA 10. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 23 mm

VELOCIDAD (km/h)	FRECUENCIA IMPACTO BLOQUE 23 mm (Hz)	BANDA FRECUENCIA (Hz)
10	120,77	125
20	241,55	250
30	362,32	400
40	483,09	500
50	603,86	630
60	724,64	800
70	845,41	800
80	966,18	1000
90	1086,96	1000
100	1207,73	1250
110	1328,50	1250
120	1449,28	1600

BLOQUE 27mm

TABLA 11. BANDAS DE FRECUENCIA BLOQUE 27 mm

VELOCIDAD (km/h)	FRECUENCIA IMPACTO BLOQUE 27 mm (Hz)	BANDA FRECUENCIA (Hz)
10	102,88	100
20	205,76	200
30	308,64	315
40	411,52	400
50	514,40	500
60	617,28	630
70	720,16	800
80	823,05	800
90	925,93	1000
100	1028,81	1000
110	1131,69	1250
120	1234,57	1250

Una vez conocida la frecuencia y la banda de frecuencia en la que recae el impacto se ha determinado en cada una de las gráficas presión-frecuencia generadas por cada micrófono para cada uno de los sentidos. Para mostrar estos impactos, se ha utilizado las gráficas mostradas a continuación.

SENTIDO DE GIRO NORMAL

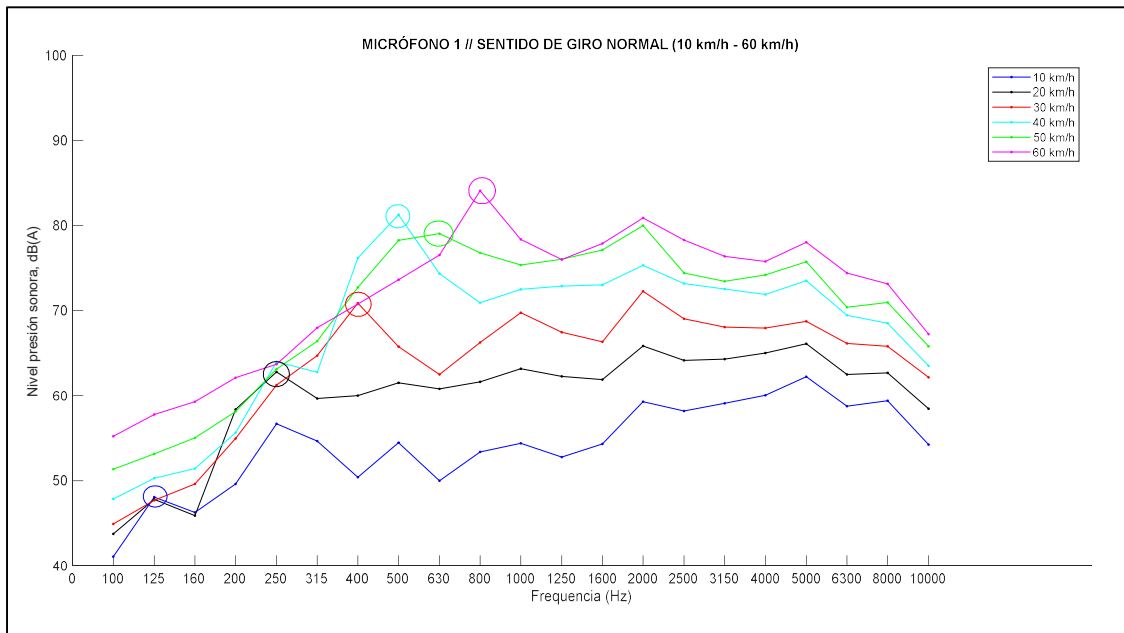


FIGURA 108. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 (10 km/h-60 km/h)

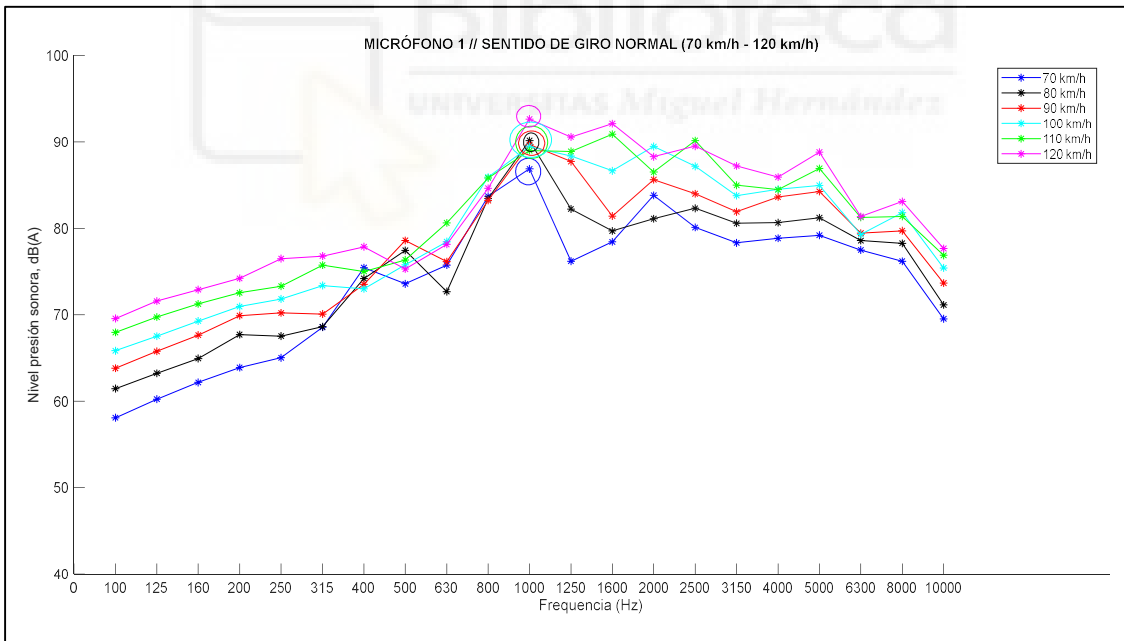


FIGURA 109. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 (70 km/h-120 km/h)

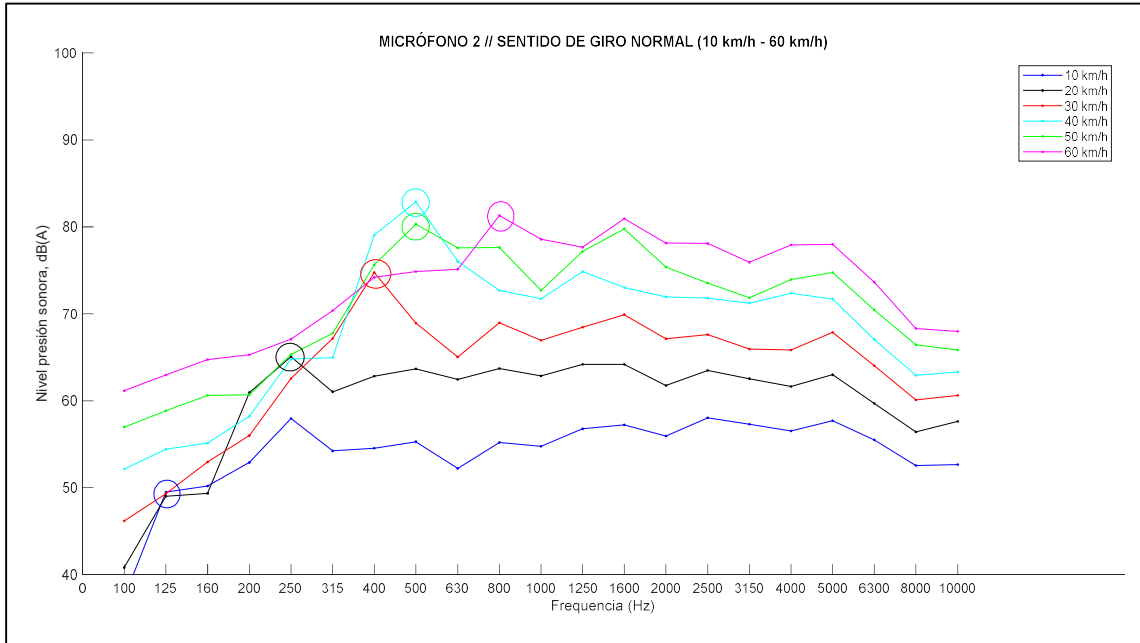


FIGURA 110. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 (10 km/h-60 km/h)

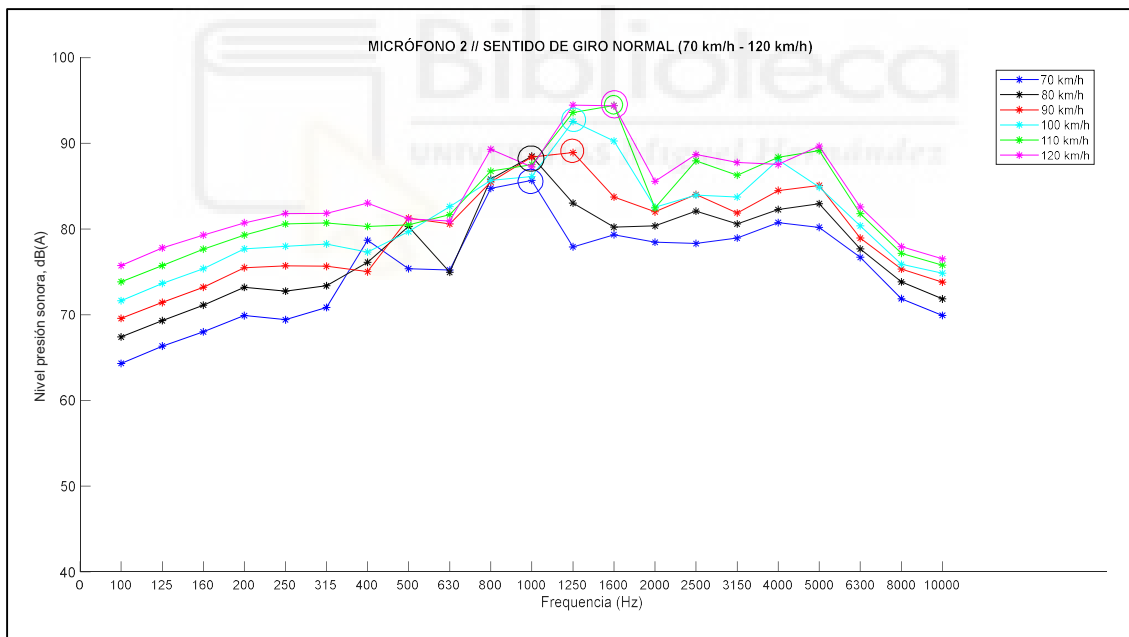


FIGURA 111. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 (70 km/h-120 km/h)

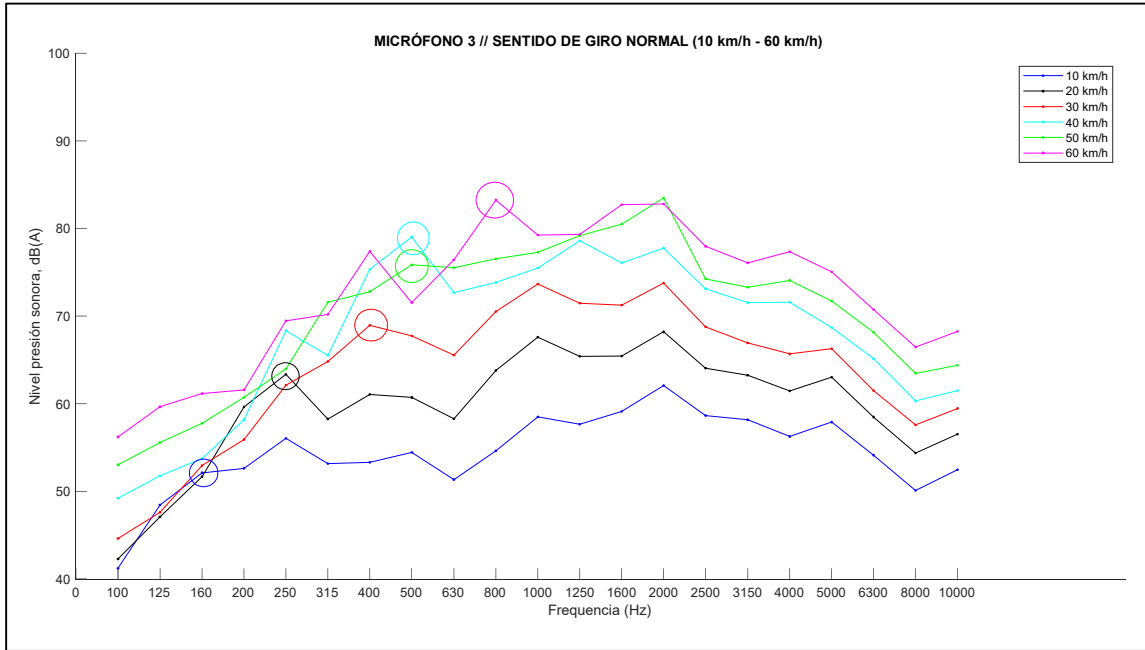


FIGURA 112. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 (10 km/h-60 km/h)

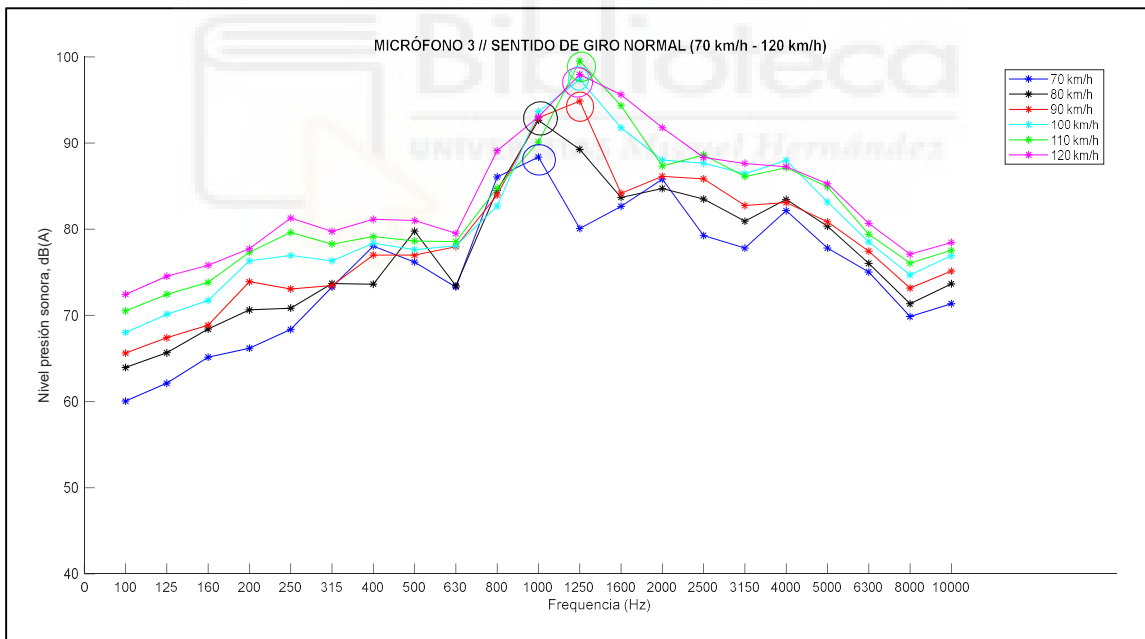


FIGURA 113. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 (70 km/h-120 km/h)

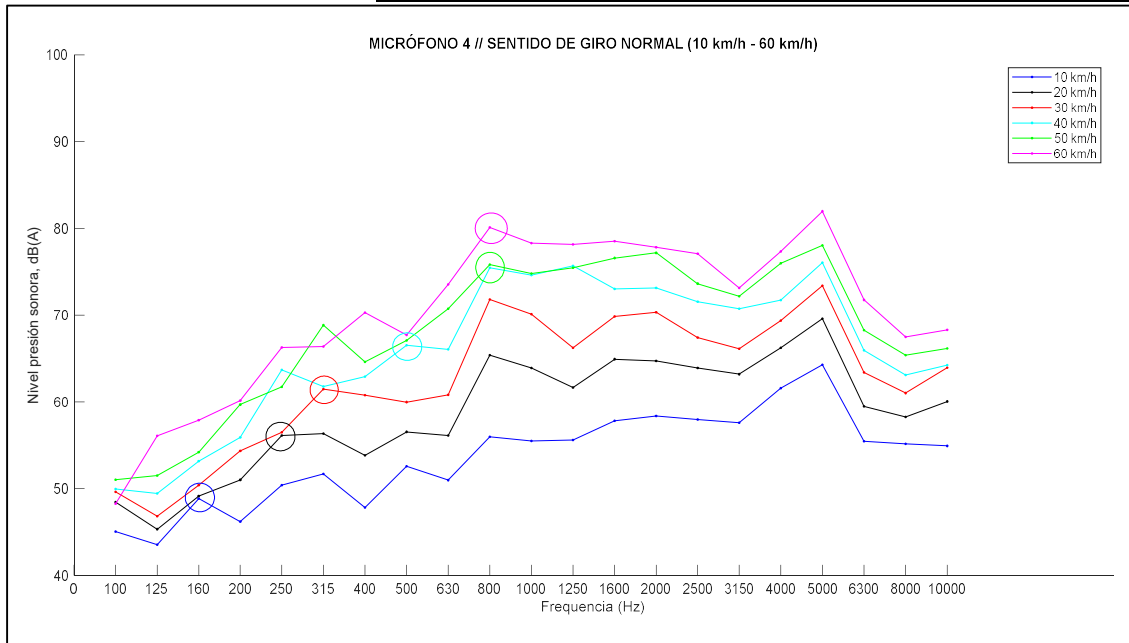


FIGURA 114. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 (10 km/h-60 km/h)

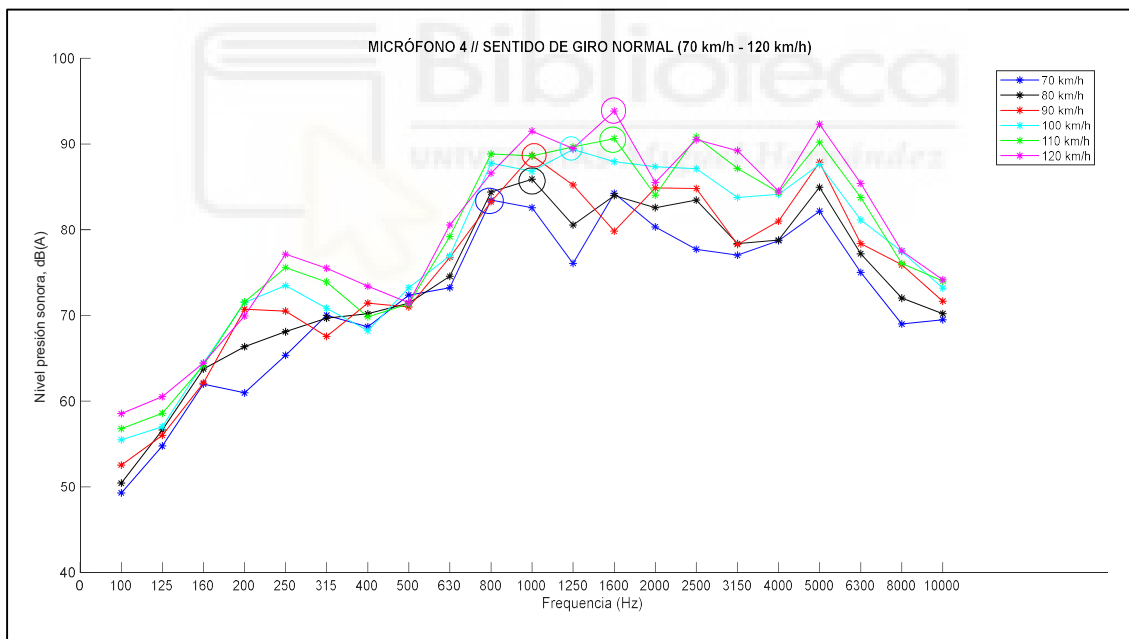


FIGURA 115. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 (70 km/h-120 km/h)

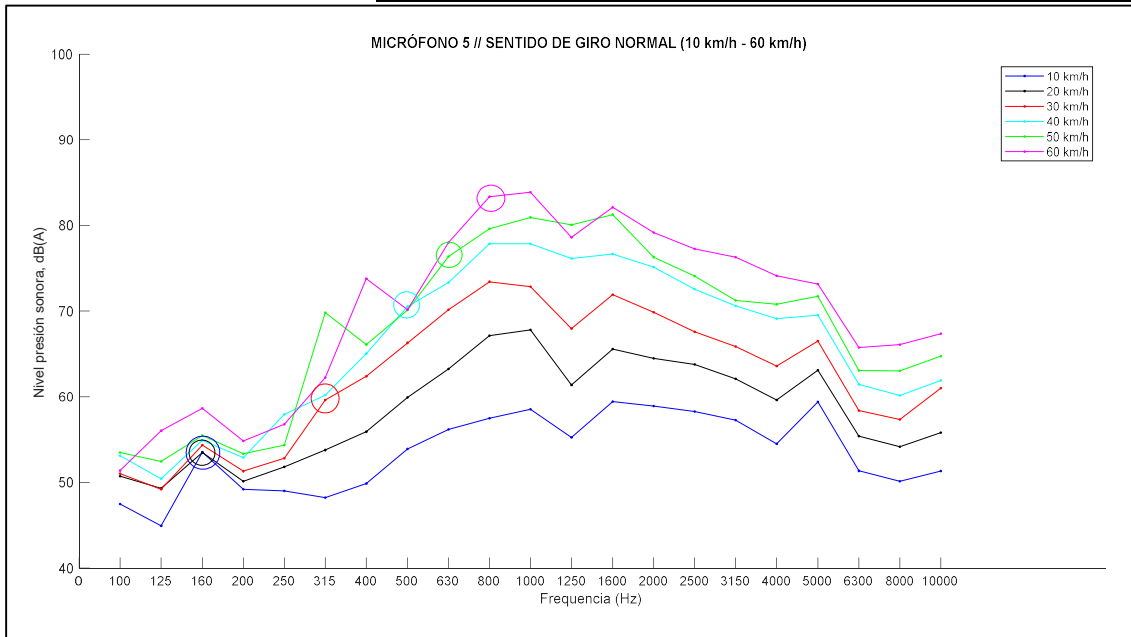


FIGURA 116. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 (10 km/h-60 km/h)

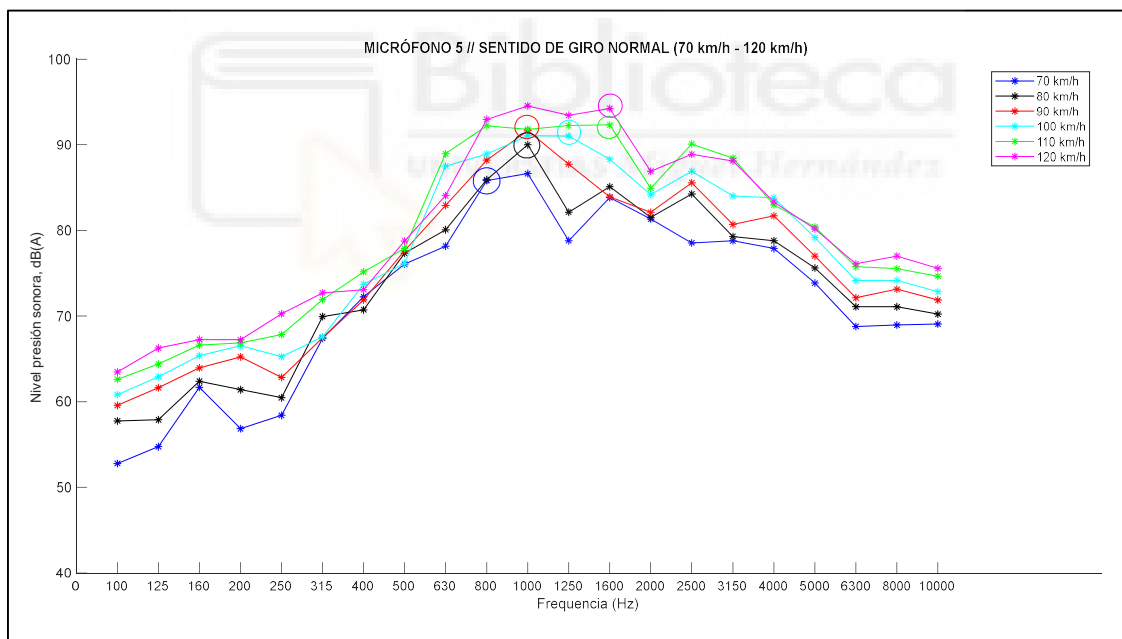


FIGURA 117. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 (70 km/h-120 km/h)

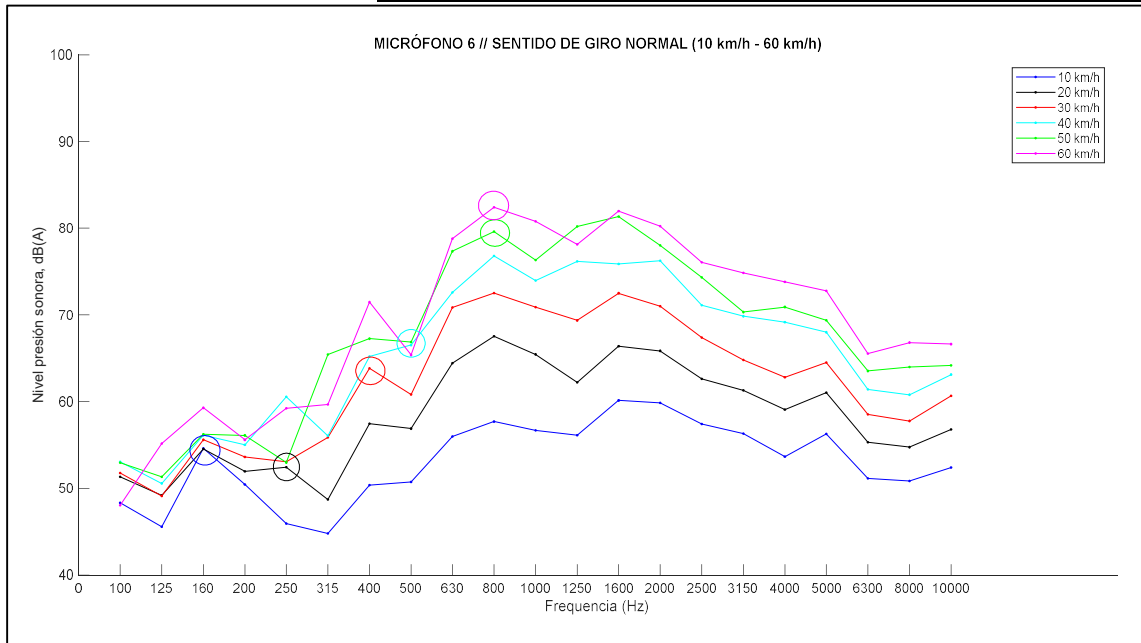


FIGURA 118. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 (10 km/h-60 km/h)

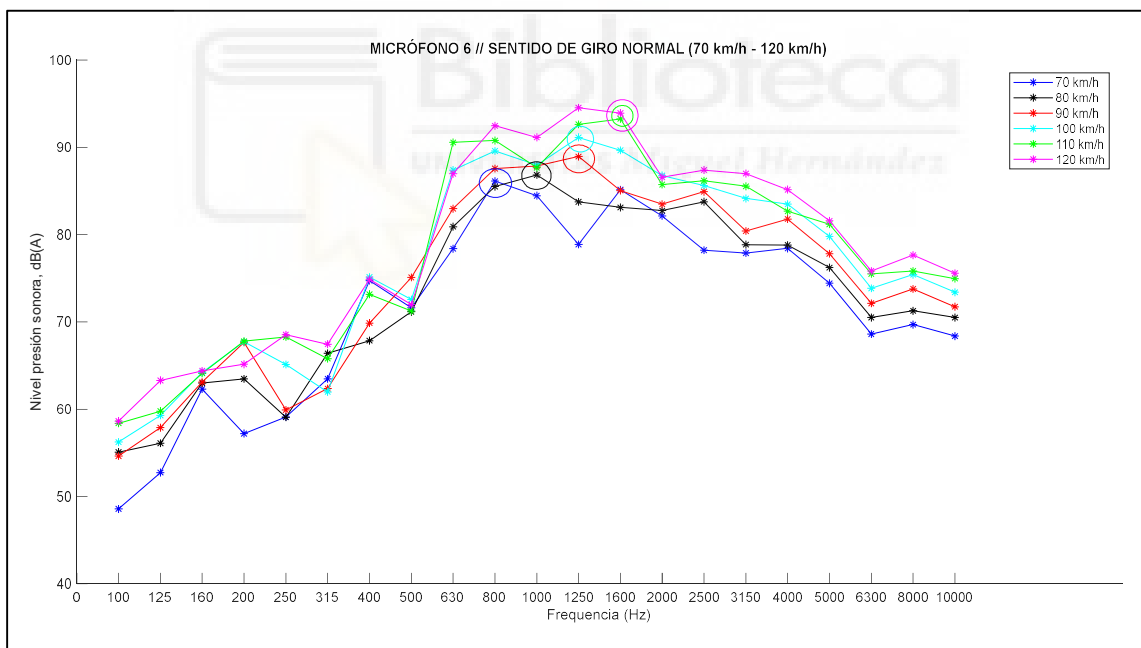


FIGURA 119. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 (70 km/h-120 km/h)

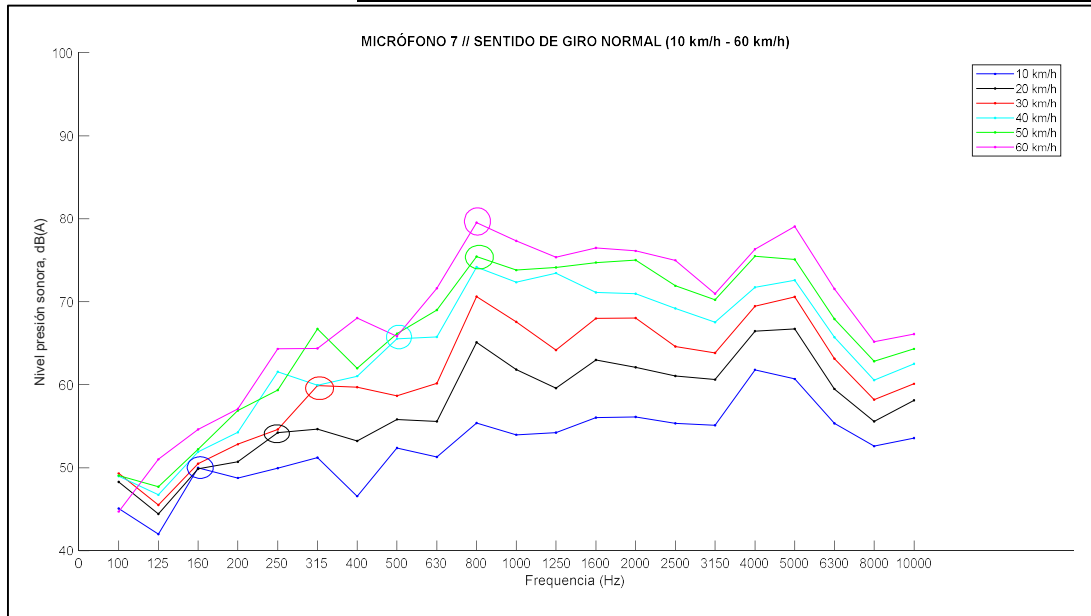


FIGURA 120. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 (10 km/h-60 km/h)

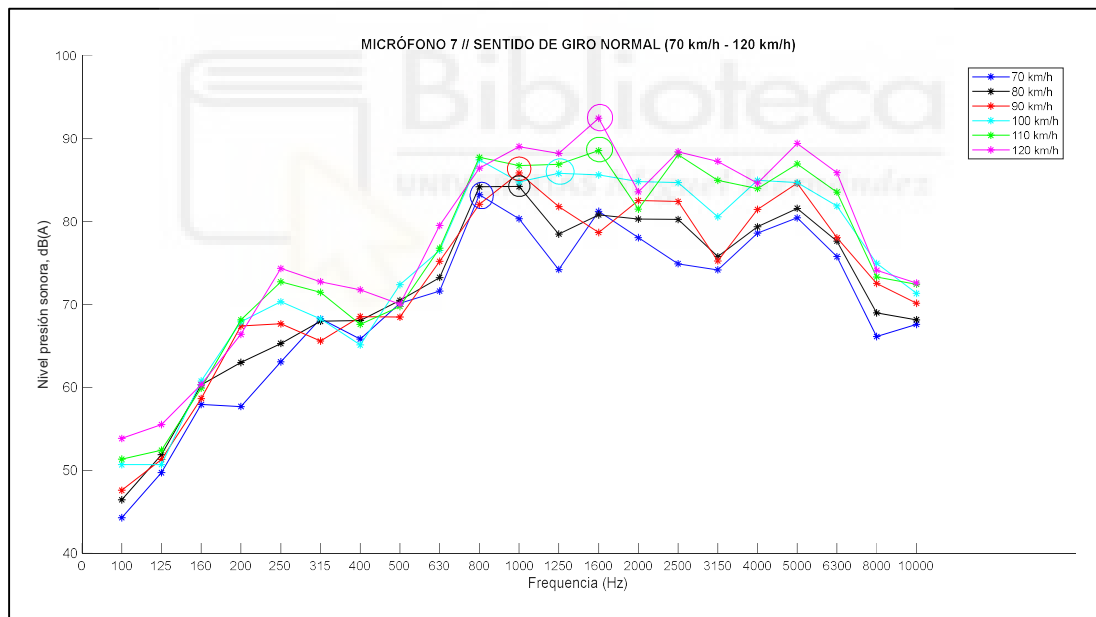


FIGURA 121. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 (70 km/h-120 km/h)

SENTIDO DE GIRO INVERSO

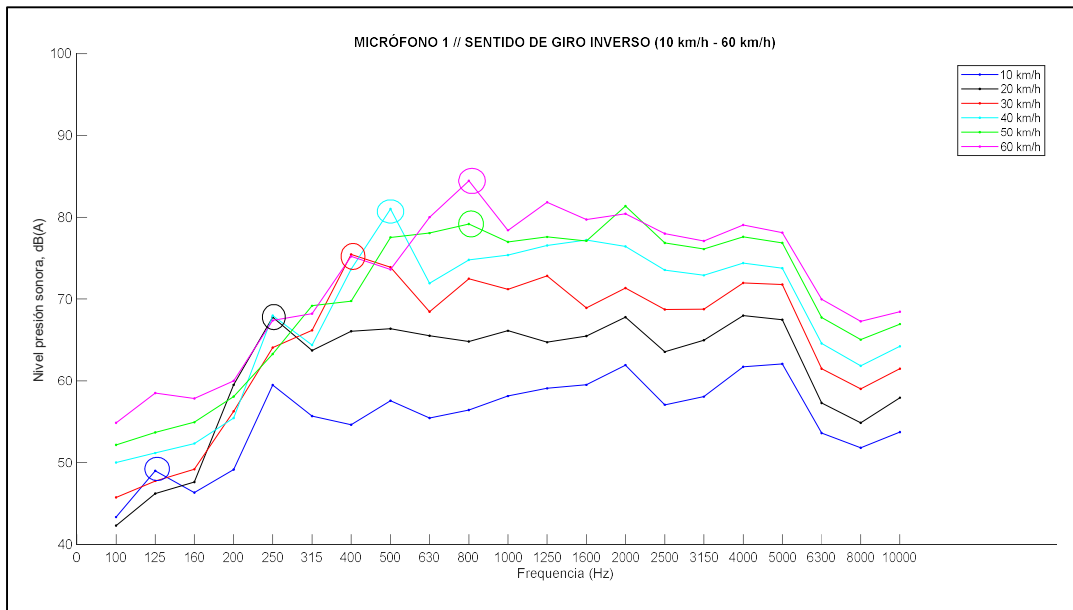


FIGURA 122. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

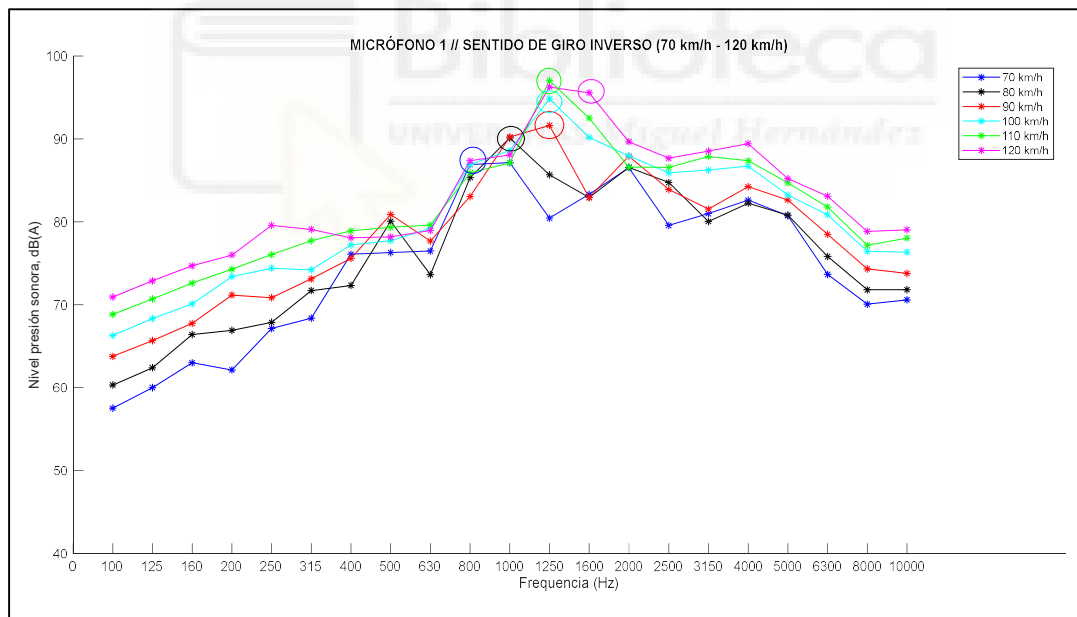


FIGURA 123. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 1 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

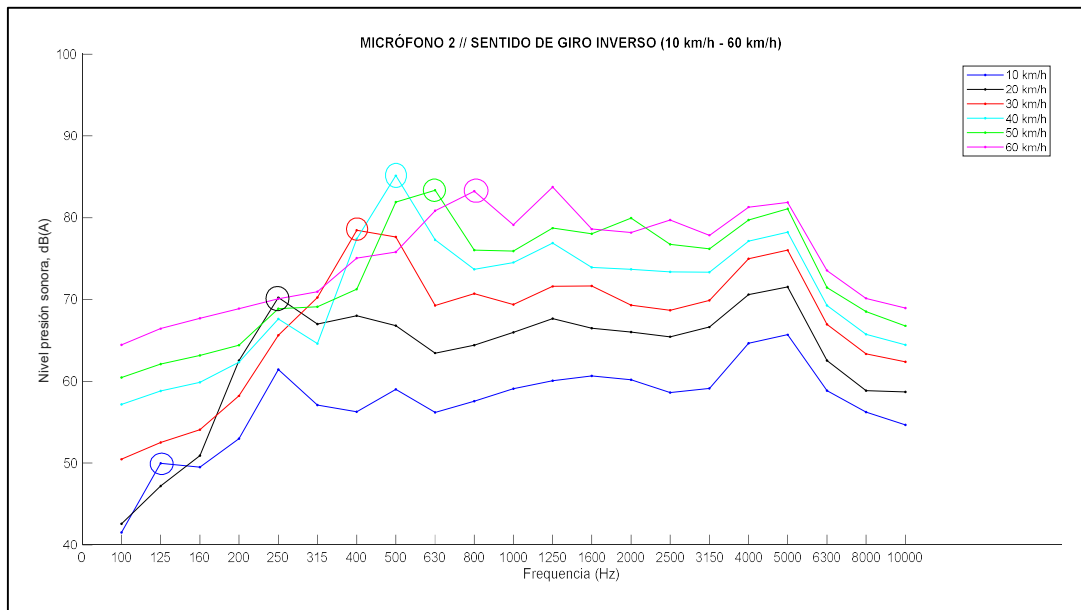


FIGURA 124. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

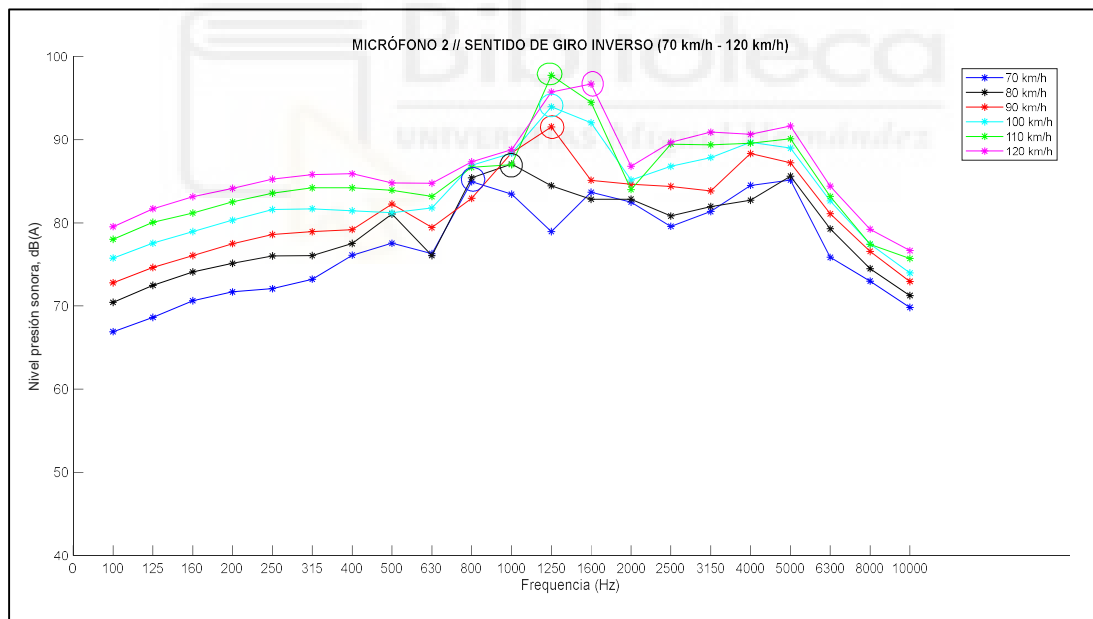


FIGURA 125. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 2 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

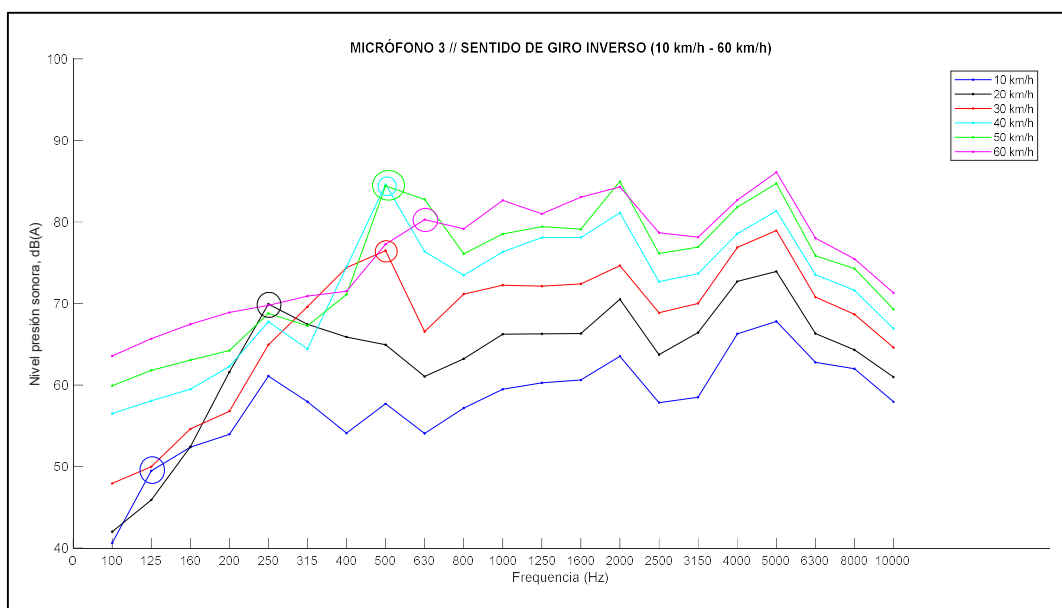


FIGURA 126. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

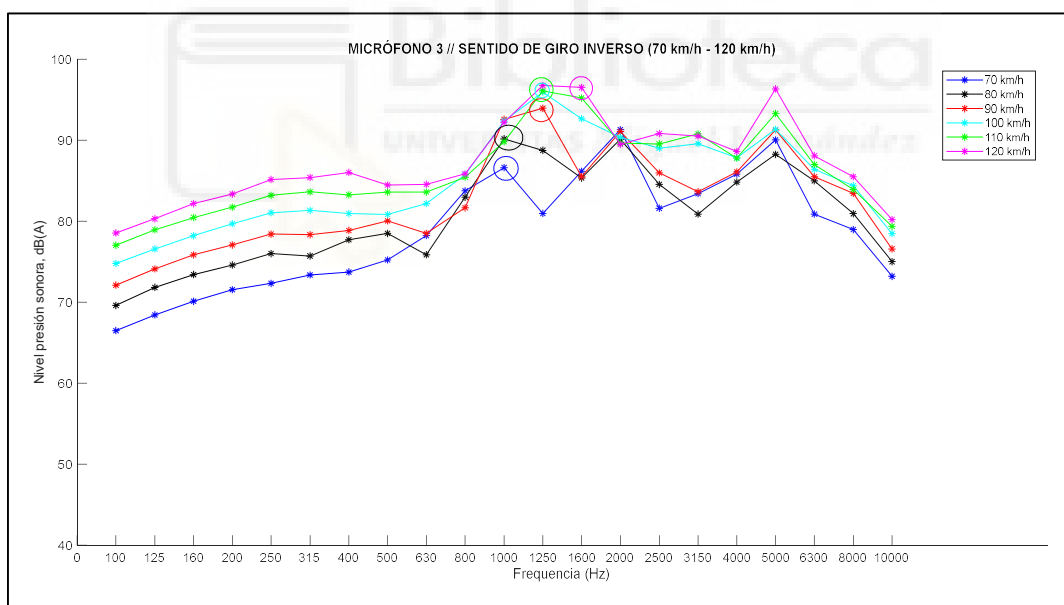


FIGURA 127. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 3 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

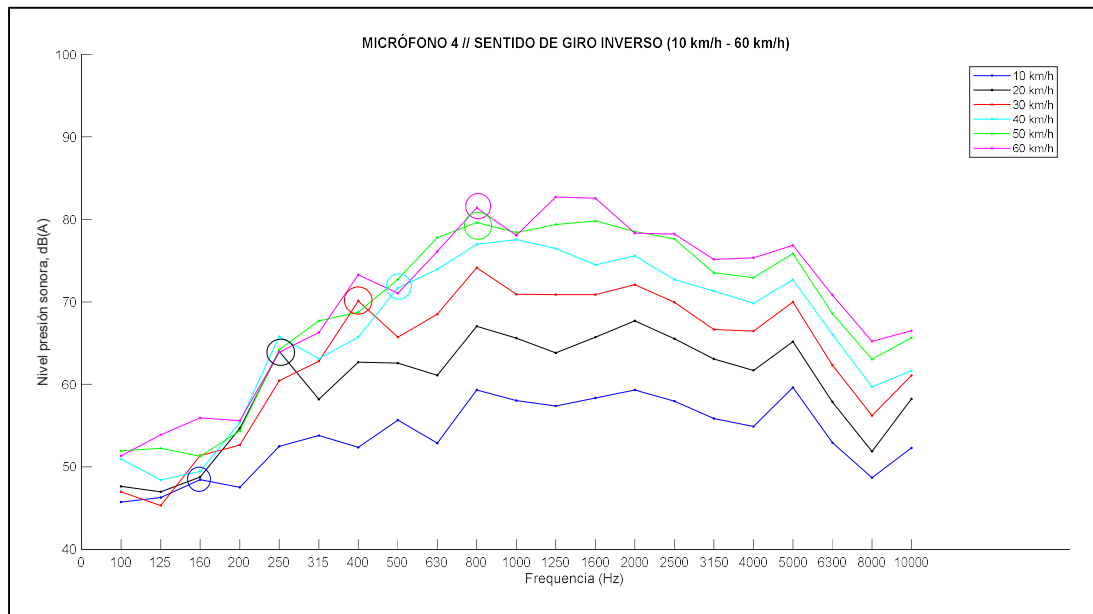


FIGURA 128. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

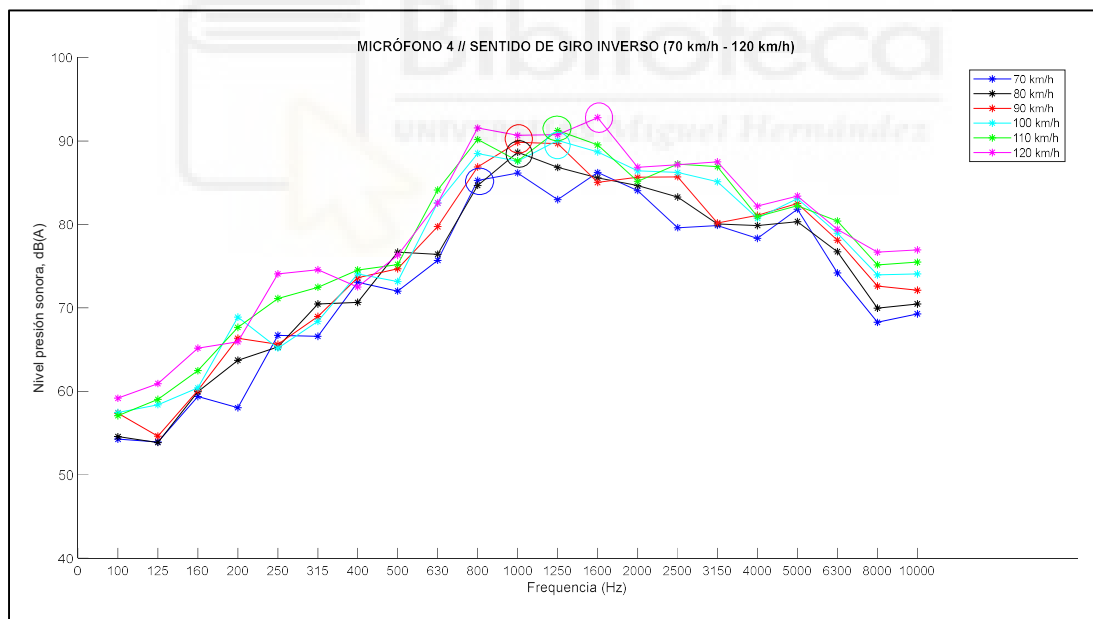


FIGURA 129. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 4 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

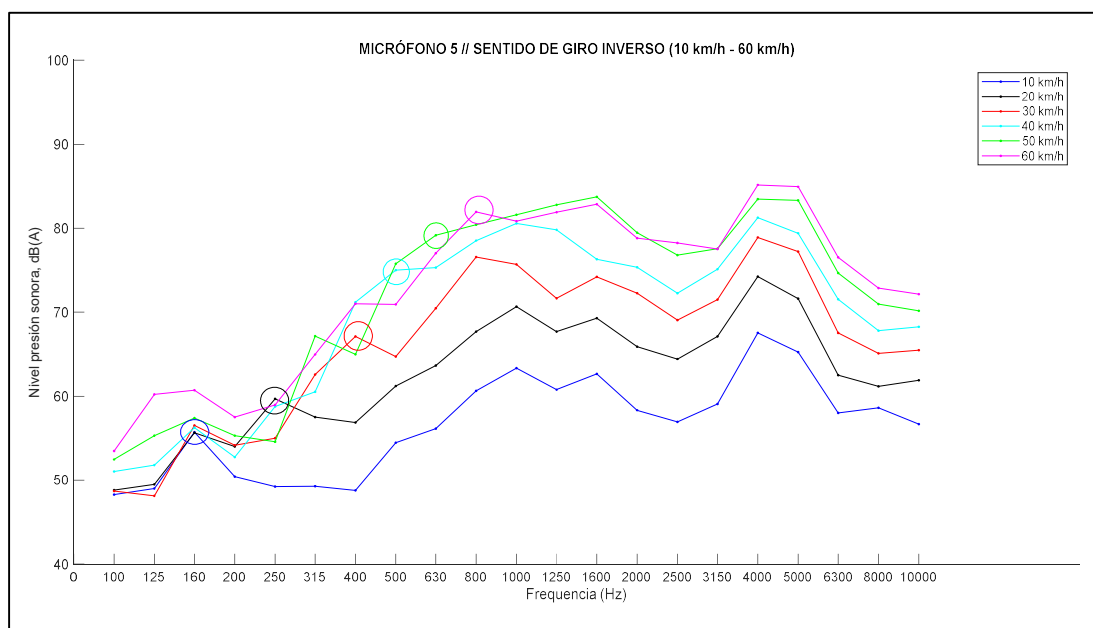


FIGURA 130. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

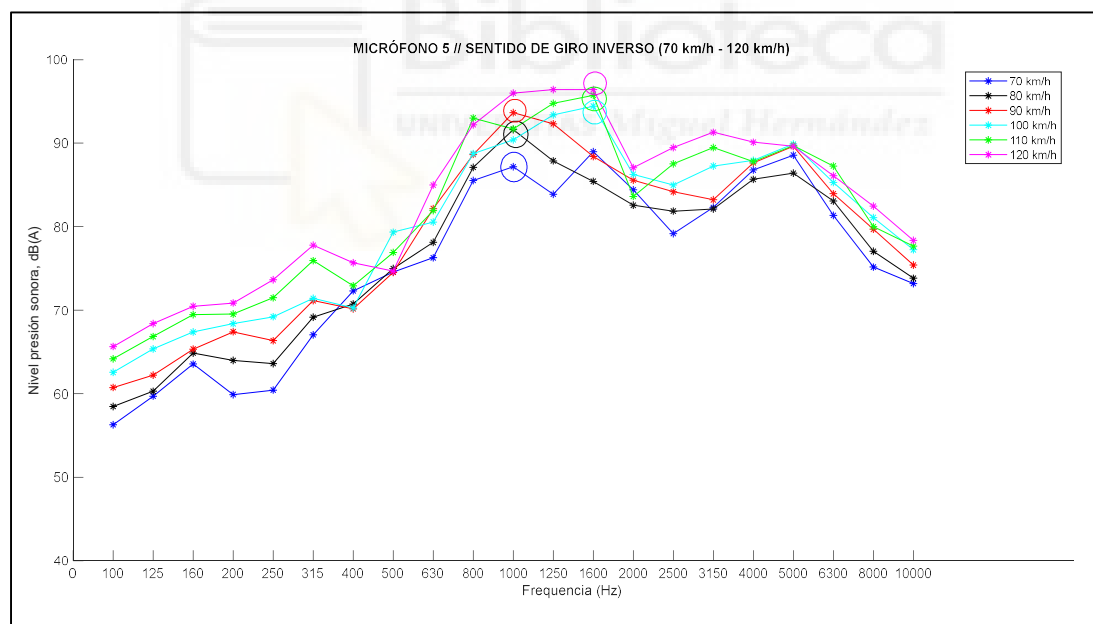


FIGURA 131. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 5 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

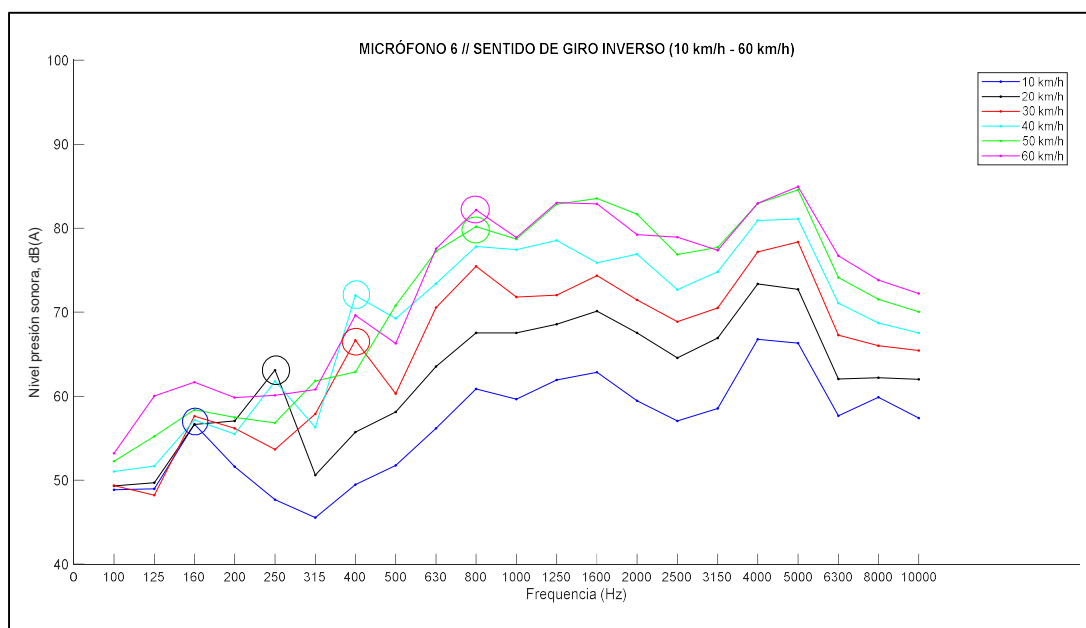


FIGURA 132. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

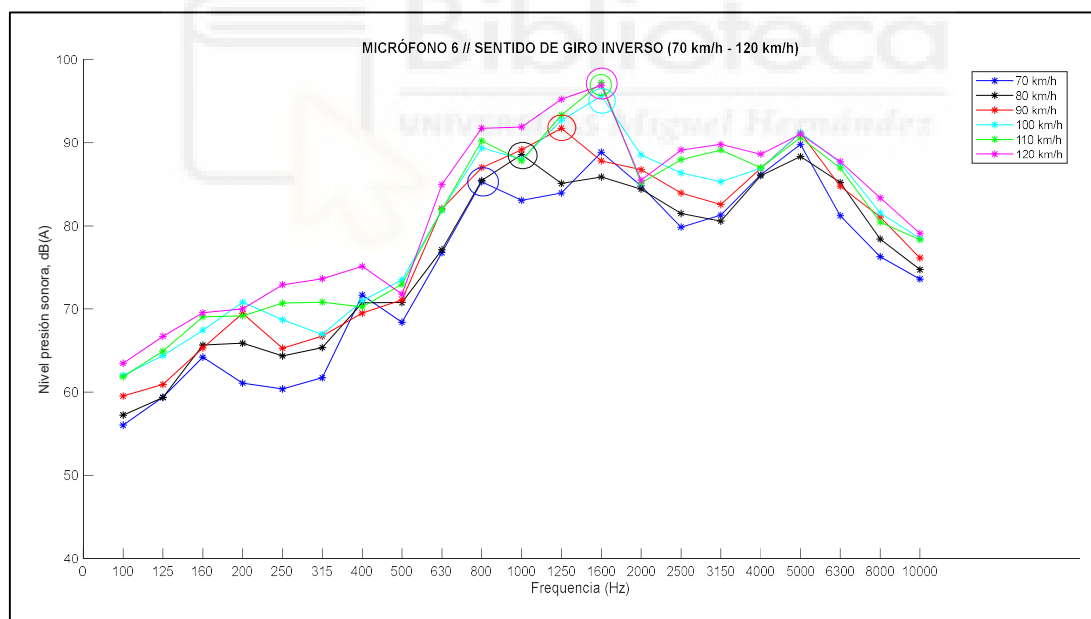


FIGURA 133. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 6 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

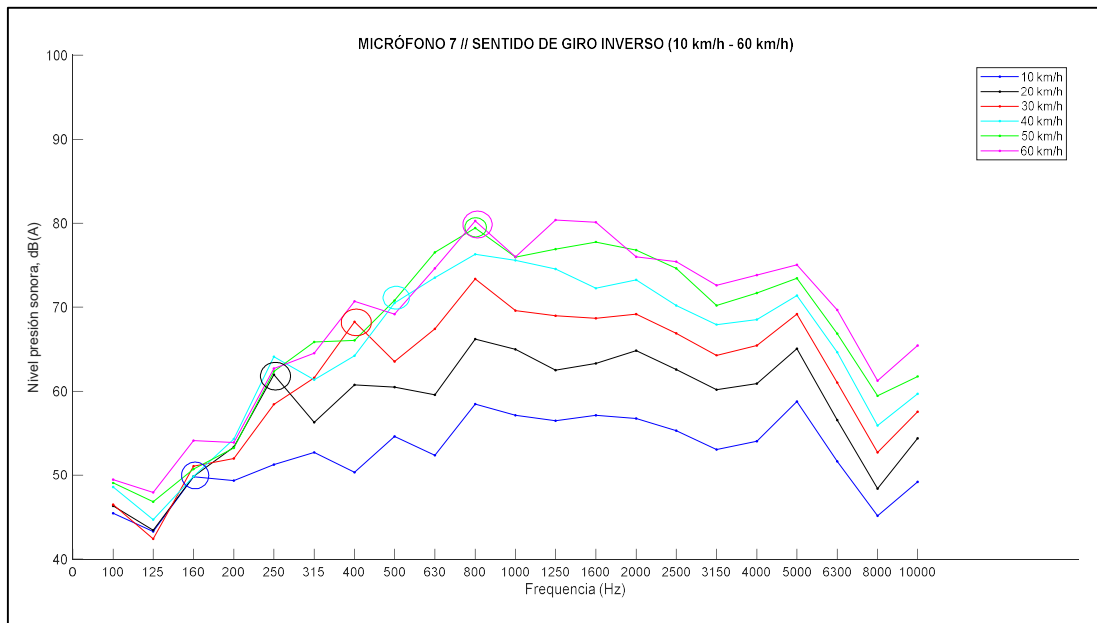


FIGURA 134. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (10 km/h-60 km/h)

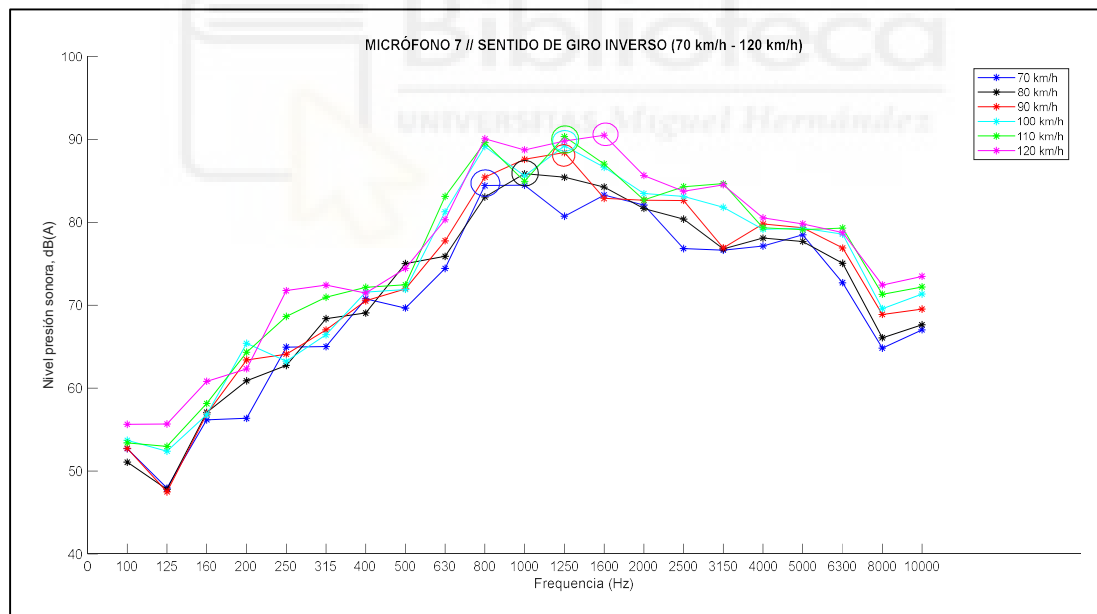


FIGURA 135. IMPACTOS RODADURA MICRÓFONO 7 SENTIDO INVERSO (70 km/h-120 km/h)

5.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras la obtención y procesado de datos de forma numérica y gráfica, se va a realizar un análisis sobre los resultados obtenidos.

Tras obtener los niveles de presión sonora, se observa la influencia de la velocidad en dichos niveles. Al aumentar la velocidad de giro del neumático, dichos niveles de presión sonora aumentan formando una curva logarítmica descrita por la ecuación $Lp=A+B \cdot \log(v)$ en todas las posiciones de micrófono estudiadas.

Con los datos obtenidos, también se observa cómo afecta la propagación en función de la posición del micrófono respecto a la huella de contacto. Se puede observar cómo el micrófono colocado en la posición 7 presenta valores de presión sonora globales (dBA) inferiores a los obtenidos en el micrófono 4. De la misma forma que los valores de presión sonora de micrófono 6 son inferiores que los obtenidos en el micrófono 5. Esto se debe a la posición del micrófono, que al estar más alejado del punto de contacto disminuye el nivel de presión sonora. A continuación, se muestran unos extractos de la *tabla 5* en los que cotejar dicha explicación.

	MICRÓFONO 4	MICRÓFONO 7
VELOCIDAD (km/h)	100 -10000 (Hz)	
10,0	69,8	68,2
20,0	75,6	73,9
30,0	80,1	78,2
40,0	83,9	81,9
50,0	85,9	84,3
60,0	88,6	86,9
70,0	91,1	89,4
80,0	93,1	91,2
90,0	94,8	92,4
100,0	97,0	95,1
110,0	98,7	96,5
120,0	100,1	98,4

	MICRÓFONO 5	MICRÓFONO 6
VELOCIDAD (km/h)	100 -10000 (Hz)	
10,0	68,6	62,3
20,0	75,0	74,8
30,0	80,4	80,1
40,0	85,2	84,2
50,0	88,0	87,6
60,0	90,2	89,3
70,0	92,3	92,1
80,0	94,3	93,2
90,0	96,2	95,4
100,0	97,8	97,7
110,0	100,0	99,3
120,0	101,0	100,4

Además de esto, en los gráficos de niveles de presión sonora en función de la frecuencia se observan aumentos de nivel de presión de manera repentina. Estos “picos”, se ha podido determinar que son producidos por la estructura que presenta la banda de rodadura del neumático, ya que tiene un dibujo irregular, y tras medir la distancia entre los surcos que aumentan el agarre del neumático a la calzada se ha determinado la banda de frecuencia en la cual se producía el impacto y con ello un aumento del nivel de presión en la gráfica.

También se ha podido comprobar, que en todos los gráficos se observa un aumento del nivel de presión sonora a una frecuencia de 5kHz. Esto es debido al ruido producido por el motor eléctrico que hace girar el tambor.

Tras haber completado este estudio y haber obtenido resultados en los dos sentidos de giro del tambor giratorio, se ha podido comprobar la influencia del giro del tambor sobre el ruido de rodadura, produciendo niveles de presión superiores en el sentido de giro inverso. Esto puede deberse a la estructura del neumático, que, a pesar de ser un neumático apto para el uso en ambos lados del vehículo, no presenta una banda de rodadura con un dibujo regular.

Con este estudio, también se han obtenido los registros sonoros con los que en un trabajo futuro se diseñará la emisión sonora de la fuente sonora artificial. Con esta nueva fuente, se procederá a medir los niveles sonoros en el entorno de la fuente cuando ésta está apoyada sobre una superficie plana y también montada sobre el tambor de ensayos. En el siguiente apartado se explica la fabricación de la nueva fuente sonora artificial con la que realizar futuros ensayos.



CAPÍTULO 6

CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA FUENTE SONORA ARTIFICIAL



6. CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA FUENTE SONORA ARTIFICIAL

6.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL

Una fuente sonora artificial, es aquel objeto que reproduce un sonido de forma artificial. En los ensayos de neumáticos, este tipo de fuentes tiene forma de neumático y se emite el sonido a través de los altavoces instalados en ella. La fuente artificial debe cumplir las indicaciones de la norma 11819-2 ANEXO A.2.3 [18], en la que se muestran los siguientes modelos básicos.

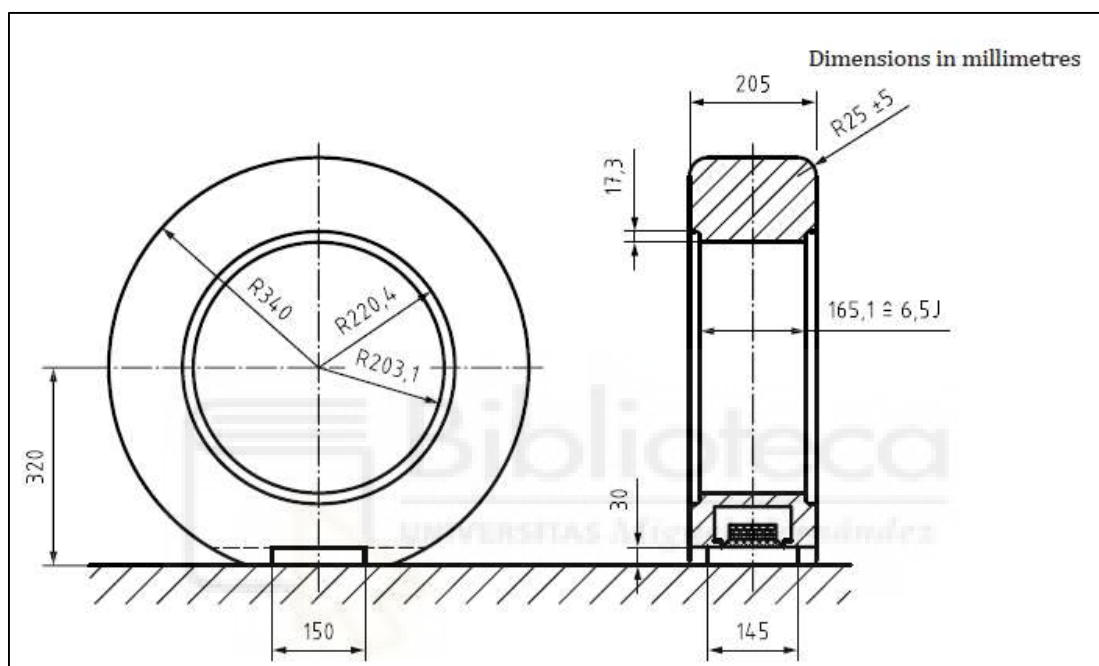


FIGURA 136. Modelo estándar de fuente sonora artificial [18]

A continuación, se va a explicar la fuente sonora artificial propiedad de la Universidad Miguel Hernández de Elche, y la fabricación de una nueva fuente más actualizada para la realización de los ensayos necesarios para el presente trabajo.

6.1.1. FUENTE SONORA ARTIFICIAL UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ (UMH)

En 2013, la Universidad Miguel Hernández de Elche fabricó una fuente sonora artificial [9] para la realización de diversos ensayos.

En primer lugar, se realizó un estudio de emisión sonora donde se determinó el mejor diseño y posición de los altavoces como se muestra en la siguiente figura.

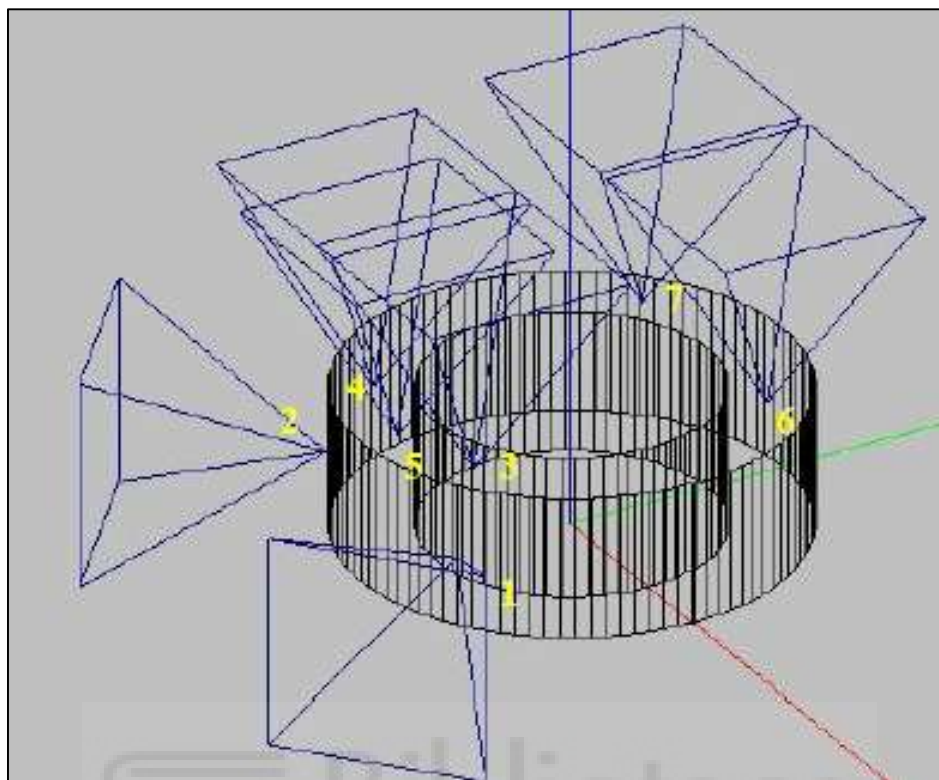


FIGURA 137. Diseño óptimo fuente sonora artificial [9]

Para diseñar esta fuente, se decidió utilizar una rueda convencional e instalar los altavoces sobre ella. Este diseño, contaba con 7 altavoces, cinco colocados sobre el flanco de la rueda y los dos restantes sobre la banda de rodadura para imitar el “Horn effect”.

A continuación, se describen los materiales utilizados para fabricar esta fuente:

- Neumático MICHELIN 205/55 R16
- Llanta de aluminio de 16”
- 7 altavoces de 2” 2W 4Ω
- 4 amplificadores 2.0
- Tarjeta de sonido 7.1

Los altavoces, se instalaron sobre el neumático y estos se conectaron a los amplificadores con las conexiones por cable necesarias. Los altavoces conseguían reproducir el audio gracias a una tarjeta de sonido que conectaba el PC con los amplificadores.

En la siguiente figura, se puede observar de forma esquemática las conexiones de la fuente artificial.

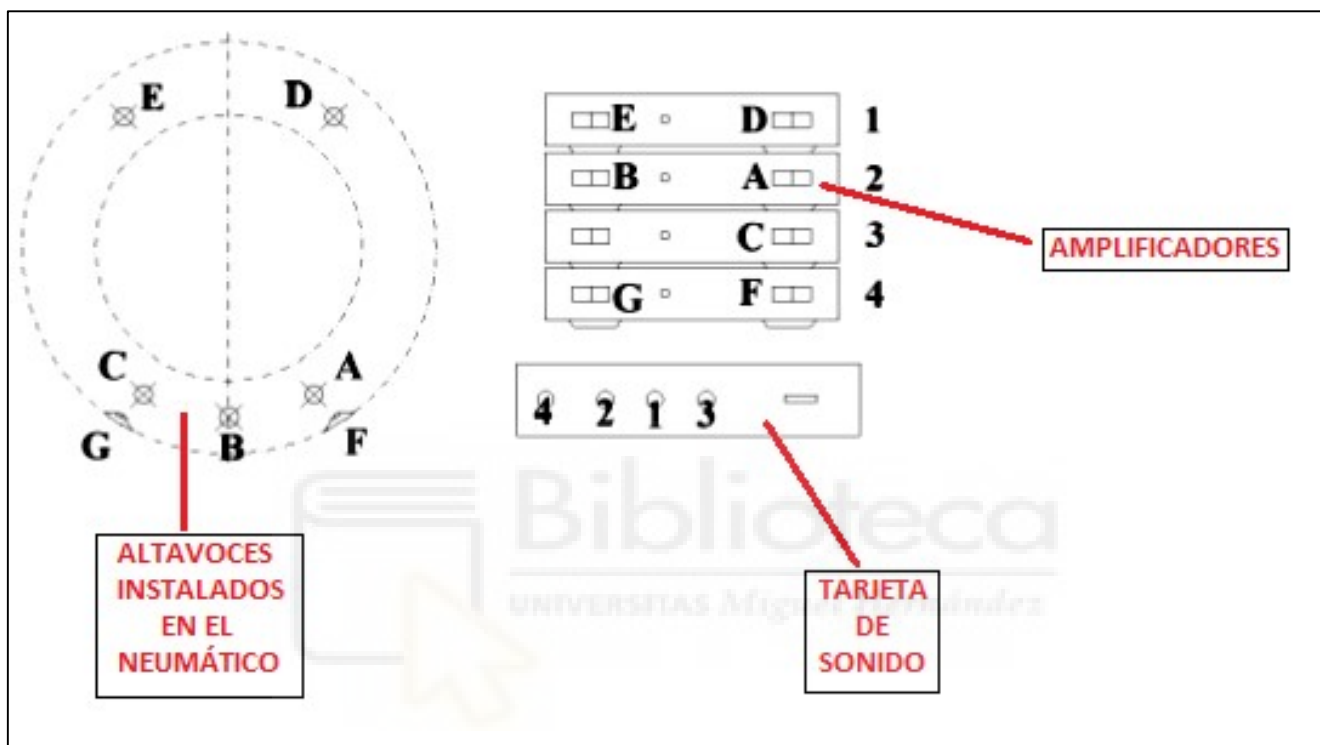


FIGURA 138. Esquema de conexiones fuente sonora artificial [9]

Para mantener la fuente sonora firme, se fabricó un soporte de acero que va anclado a la llanta. A continuación, se puede ver el soporte en la *figura 139* y la instalación completa de la fuente sonora en la *figura 140*.



FIGURA 139. Estructura soporte y anclaje a la llanta [9]



FIGURA 140. Instalación completa fuente sonora artificial [9]

Una vez montada y configurada la fuente artificial, se procedió a la realización de ensayos para comprobar que era una fuente sonora artificial válida. Para ello, se compararon los datos de cada altavoz con los datos obtenidos durante un ensayo A-CPX realizado previamente. Tras esta comprobación, se pudo validar la fuente sonora artificial para la realización de ensayos, ya que cumplía la norma ISO-3744 [25].

6.1.2. PUESTA A PUNTO DE LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL

Se ha llevado a cabo una puesta a punto para comprobar el correcto funcionamiento de los distintos componentes de la fuente debido al tiempo que ha estado en desuso.

Los componentes de dicha fuente funcionaban de forma correcta, pero el estado del neumático en el que se instalaron los altavoces se encuentra demasiado deteriorado y ha perdido las características que debe tener un neumático. La banda de rodadura del neumático apenas tiene dibujo y la goma se ha vuelto demasiado rígida pudiendo alterar la transmisión de las ondas sonoras. Además, el diseño de esta fuente sólo permitía la emisión por uno de los flancos del neumático.

Se ha decidido fabricar una **nueva fuente sonora artificial** con un neumático en perfectas condiciones para la circulación, por lo que se van a solucionar los problemas debidos a el uso un neumático deteriorado y sin dibujo. Esta nueva fuente va a contar con mayor número de altavoces, (pasando de 7 a 12), y un diseño que permita la emisión sonora por ambos flancos del neumático, así como la emisión en la zona baja de la banda de rodadura, consiguiendo así reproducir el efecto “horn”.

Para la fabricación de la nueva fuente, se ha decidido **reutilizar** elementos de la fuente previa que funcionan correctamente como son los **amplificadores** y la **tarjeta de sonido**.

Para poder utilizar los componentes anteriormente mencionados, la conexión de los **12 altavoces** que se van a utilizar en la nueva fuente deberá ser una **conexión en serie**. De esta manera, no será necesario recurrir a utilizar un mayor número de amplificadores.

6.1.3. VERIFICACIÓN DE LA EMISIÓN SONORA DE LOS ALTAVOCES

Para la utilización de los componentes de la fuente previa en la nueva fuente, se ha de comprobar mediante un ensayo comparativo los niveles de potencia sonora de la fuente artificial cuando los altavoces están **conectados de forma individual** a los amplificadores o **conectados en serie** entre sí, debido a que, para la nueva fuente sonora, se va a aumentar el número de altavoces sin aumentar el número de amplificadores. Gracias a la conexión en **serie** de los altavoces, no sería necesario utilizar más amplificadores que los cuatro reutilizados en la fuente sonora antigua.

Este ensayo comparativo, se ha llevado a cabo en una sala del laboratorio de ingeniería acústica de la Universidad Miguel Hernández, donde solo se presentan como superficies reflectantes las paredes, el techo y el suelo de dicha sala.

Por la fuente sonora se ha reproducido ruido rosa sin variar el volumen del PC con el que se reproduce este ruido rosa y se ha utilizado un sonómetro Brüel & Kjaer previamente calibrado con un calibrador homologado [27] para la obtención de datos.

Las mediciones para la obtención de los niveles de potencia sonora (dBA), de 10 segundos de duración cada una, se han realizado a 1m y a 3m de la fuente (distancia suficiente para que se propague la onda correctamente). Los datos han sido obtenidos en un rango de frecuencias que va desde 125 Hz a 10000 Hz.

A continuación, se puede observar un esquema (figura 141) y una imagen de la obtención de datos (figura 142).

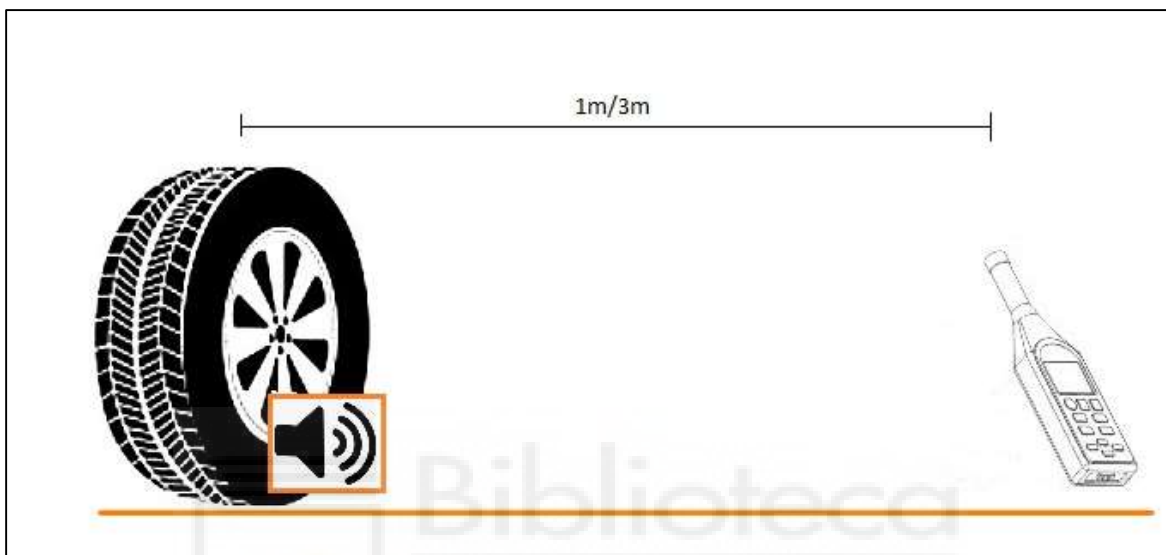


FIGURA 141. Descripción gráfica método de ensayo comparativo



FIGURA 142. Ensayo conexiones serie-individual

Tras la obtención de datos, se han procesado los niveles de potencia sonora obtenidos con la siguiente ecuación, donde L_w es el nivel de potencia sonora en dB_A .

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{(\text{potencia sonora})}{(\text{potencia de referencia})} \quad (dB_A) \quad (9)$$

Los valores obtenidos en este ensayo muestran una **diferencia de 5 dB_A** , de una conexión en serie respecto a la conexión individual. Mientras que en la **conexión individual** se ha obtenido un nivel de potencia sonora de **94,8 dB_A** , en la **conexión en serie** de los altavoces se ha obtenido un nivel de potencia sonora de **89,8 dB_A** .

En la siguiente gráfica (*figura 143*) se muestran los datos obtenidos durante el ensayo. En la gráfica se puede observar cómo en una conexión individual los valores son mayores que con la conexión en serie; así como al aumentar la distancia del sonómetro con la fuente sonora los niveles de potencia disminuyen.

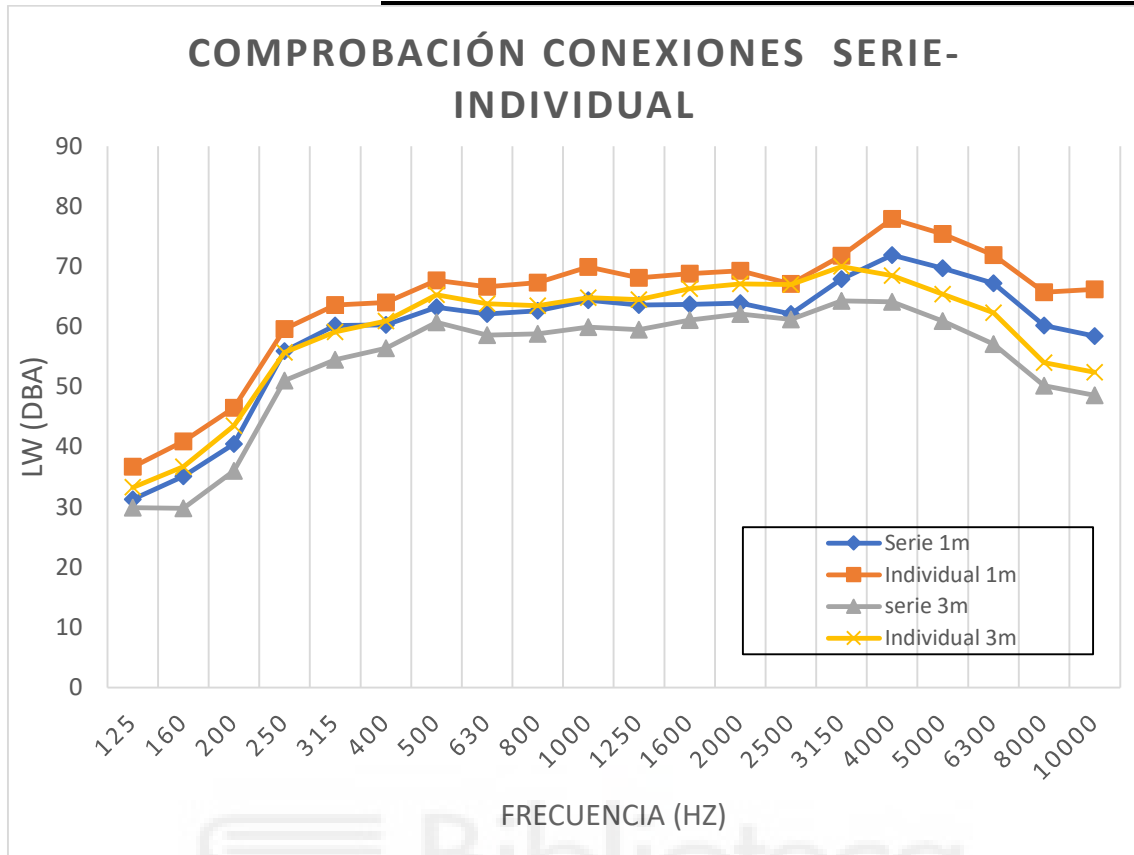


FIGURA 143. Gráfica comparación conexiones

Tras comprobar el comportamiento que tiene conectar individualmente o en serie los altavoces, se ha decidido que, para la nueva fuente a fabricar, se realizará una conexión en serie para poder así reutilizar los componentes anteriormente mencionados.

6.2. CONSTRUCCIÓN DE LA NUEVA FUENTE SONORA ARTIFICIAL

Como se ha explicado anteriormente, el estado del neumático en el que está construida la fuente artificial, se encuentra demasiado deteriorado y ha perdido las características que debe tener un neumático. Además, la banda de rodadura del neumático apenas tiene dibujo y la goma del neumático se ha vuelto demasiado rígida por lo que podría alterar la transmisión del sonido. Por esta razón, se ha decidido construir una nueva fuente artificial reutilizando algunos elementos de la fuente existente.

La nueva fuente artificial, consta de 12 altavoces situados de tal forma que la emisión sonora se efectúe en todos los sentidos ya que el objetivo fundamental de esta nueva fuente es medir en banco, por tanto, necesitamos emisión en ambos flancos del neumático.

Estos altavoces están dispuestos 5 en el flanco interior del neumático; 5 en el flanco exterior del neumático y los 2 restantes están colocados en la banda de rodadura para imitar el efecto "horn" (altavoces G y F). A continuación, se puede observar una figura con la disposición de los 12 altavoces de la nueva fuente sonora artificial. Ambos flancos tienen la misma distribución de altavoces.

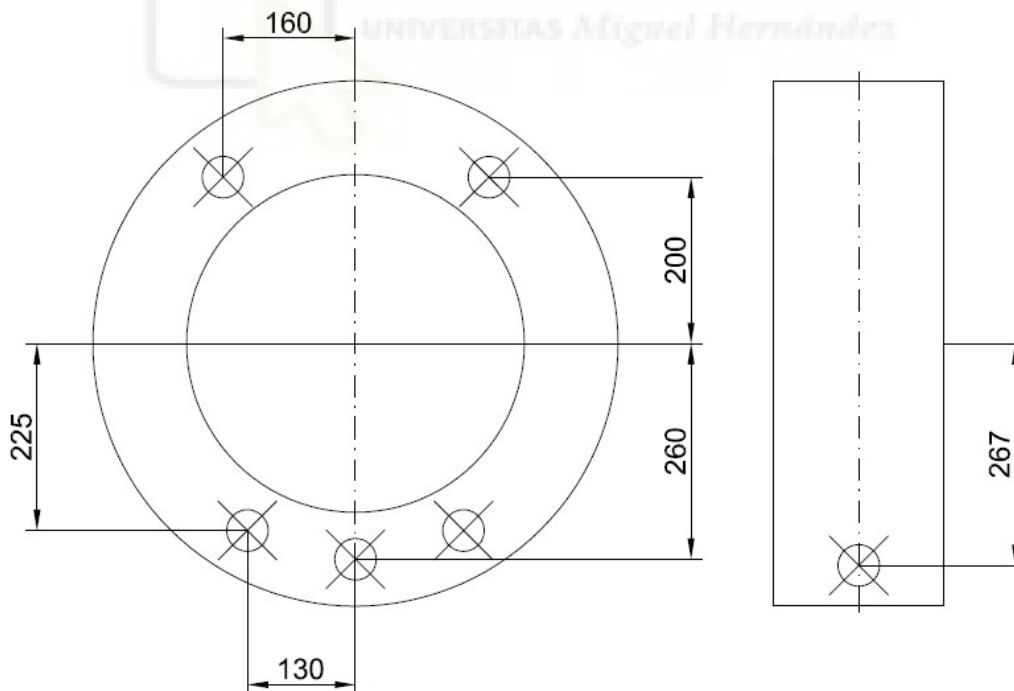


FIGURA 144. Distribución de los altavoces en la nueva fuente artificial.

Para la fabricación de la nueva fuente, se ha decidido utilizar un neumático similar al de la fuente previa para poder reutilizar la misma llanta y además es el mismo modelo de neumático que el ensayado en el banco. También se ha decidido utilizar altavoces de 2" y 4W de potencia. Estos altavoces son de un tamaño que se adapta a las necesidades de este tipo de fuentes con una potencia suficiente para reproducir ruido de rodadura.

Los materiales utilizados para fabricar esta fuente son los siguientes:

- Neumático MICHELIN *Primacy 4* 205/55 R16
- Llanta de aluminio de 16" (*Reutilizada*)
- 12 altavoces de 2" 4W 4Ω
- 4 amplificadores 2.0 (*Reutilizados*)
- Tarjeta de sonido 7.1 (*Reutilizada*)

Las conexiones de los altavoces son similares a la explicada anteriormente en la fuente artificial previa, pero conectando los altavoces en serie de la siguiente forma:

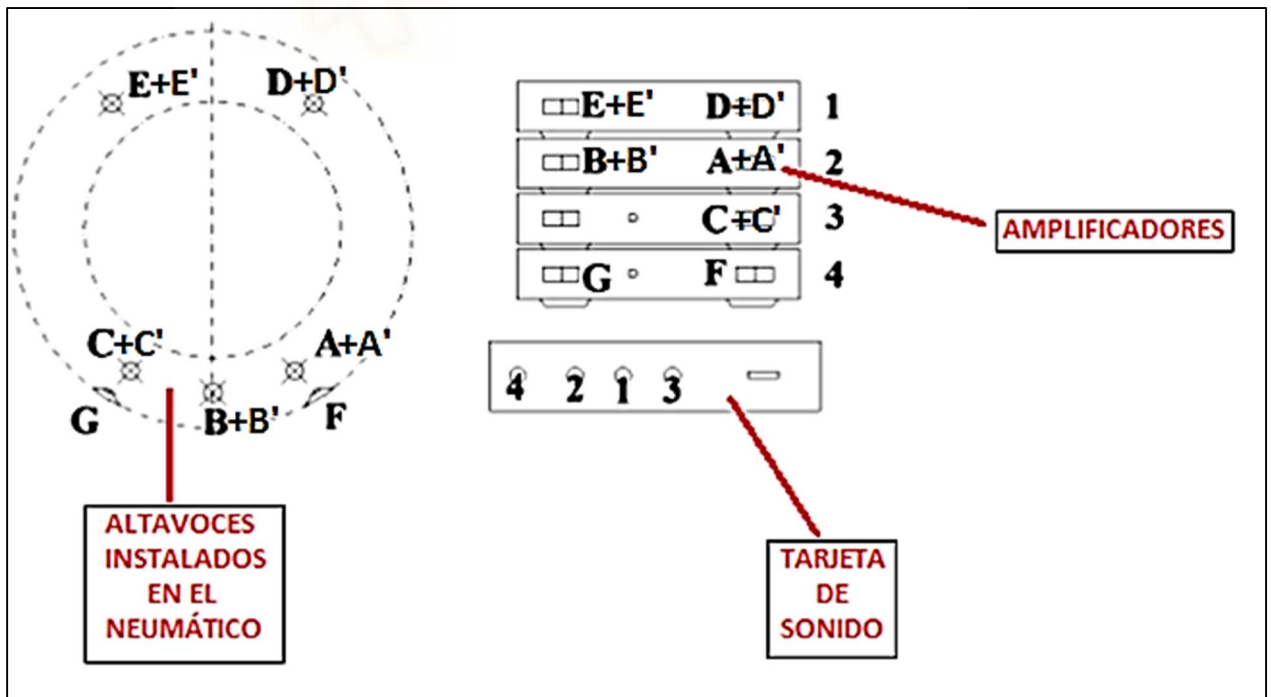


FIGURA 145. Conexiones en serie nueva fuente artificial

Para la colocación de los altavoces sobre el nuevo neumático, se han tenido que realizar los agujeros donde van a ir colocados éstos. Estos agujeros se han realizado con un taladro de columna (*figura 146*) y con el uso de una corona (*figura 147*).



FIGURA 146. Taladro de columna



FIGURA 147. Corona para taladro

Los huecos donde se alojan los altavoces quedan de la forma siguiente:



FIGURA 148. Realización de huecos en el neumático



FIGURA 149. Distribución de huecos para alojar los altavoces en el neumático

Una vez realizados los huecos, se ha montado el neumático sobre una llanta apropiada para este neumático (R16). Además, se ha procedido a colocar los cables por el interior del neumático y a conectar los altavoces en su hueco correspondiente como se muestra en la *figura 150*. Estos cables son los encargados de conectar los amplificadores a los altavoces y poder así reproducir un sonido uniforme por el conjunto de altavoces. Para mejorar la sujeción de los cables, se han soldado manualmente utilizando estaño (*figura 151*).



FIGURA 150. Colocación de los cables por el interior del neumático

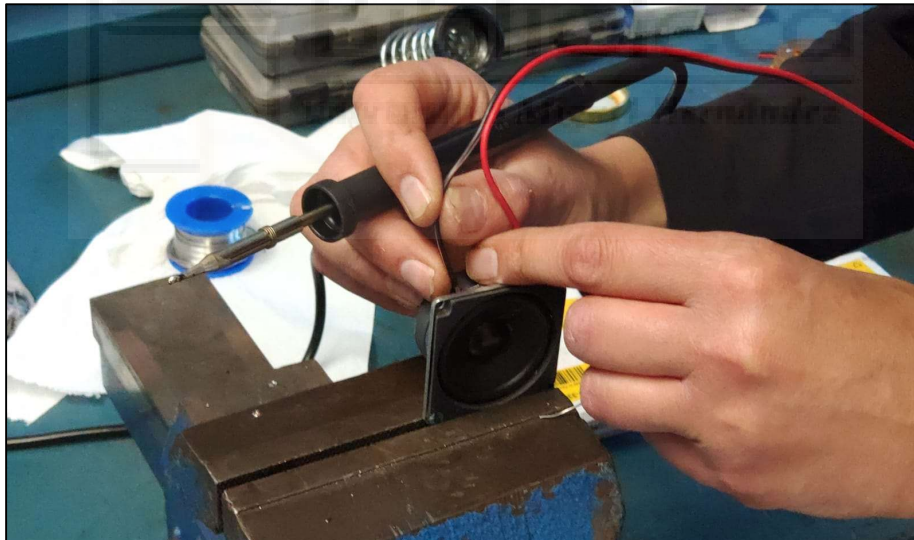


FIGURA 151. Montaje de los altavoces utilizando soldadura con estaño



FIGURA 152. Fuentes sonora artificial montada

Tras completar el montaje de la nueva fuente sonora artificial, se comprobó individualmente el perfecto funcionamiento de cada altavoz y posteriormente, respetando las conexiones anteriormente nombradas, se verificó el correcto funcionamiento de la nueva fuente sonora artificial. De esta forma, la nueva fuente sonora artificial queda preparada para futuros ensayos.

Sería recomendable la realización de un ensayo previo situando el sonómetro a 1m y 3m (como se ha realizado en el *apartado 6.1.2.* con la fuente previa) con todos los micrófonos sonando al mismo tiempo con ruido rosa.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS



7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

7.1. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos con este estudio son necesarios para continuar con la línea de investigación que estudia la influencia de la curvatura del tambor/drum en el ruido de rodadura.

Con este estudio, tras el ensayo de un neumático real sobre el tambor, se ha podido demostrar como los niveles de presión sonora son superiores cuando el giro es en sentido inverso respecto al sentido de giro normal. En las gráficas y tablas anteriormente mostradas, se puede observar como estos niveles de presión sonora llegan a superar en ocasiones en 2 dBA a los niveles obtenidos cuando el sentido de giro es normal.

Además, se ha comprobado cómo, a pesar de trabajar en campo cercano, cuando se aumenta la distancia respecto a la huella de contacto, disminuye el nivel de presión sonora considerablemente. Esto se puede apreciar comparando los micrófonos 4 y 7; dónde se observa una disminución de hasta 2 dBA por parte del micrófono 7 que está más alejado de la huella de contacto.



7.2. TRABAJOS FUTUROS

Con esta línea de investigación sobre la influencia de la curvatura del tambor, se puede continuar con distintos trabajos como se ha mostrado anteriormente en el esquema explicativo:

- Obtención y procesado de datos utilizando las posiciones de ensayo A-CPX y A-DRUM, estudiando un neumático real sobre el tambor/drum.
- Con el uso de la fuente sonora artificial y utilizando los registros sonoros utilizados en los ensayos CPX, A-CPX y A-DRUM, realizar un estudio comparativo tras colocar la fuente sonora artificial montada en el tambor y colocada también en una superficie plana.

Las conclusiones obtenidas con este trabajo abren nuevas líneas de investigación con las que se seguirá desarrollando el estudio en este campo. Las líneas en las que se propone continuar la investigación son:

- Con el uso de la fuente artificial sonora, realizar ensayos comparativos con distintos materiales y compuestos para determinar la absorción de sonido de cada uno de estos materiales. Por ejemplo, comparar superficies asfálticas con distinta composición o la inclusión de algún elemento absorbente en el asfalto. Se podría comparar distintos tipos de asfalto como puede ser el asfalto natural, asfalto de petróleo, asfalto soplado, asfaltos fillerizados, asfaltos duros, asfaltos líquidos, asfaltos fluxantes, emulsiones asfálticas y gilsonita.
- Con esta fuente artificial, se pueden realizar ensayos para comprobar el estado de la calzada, así como comprobar la porosidad del asfalto.
- Para mejorar el ensayo Drum, se podría recubrir la superficie lisa del tambor con un material asfáltico que permitiría la obtención de datos más exacta. Con esta superficie asfáltica en el tambor, se podría estudiar distintos dibujos de neumático para desarrollar dibujos cada vez más silenciosos.
- Podrían mejorarse aún más las características acústicas de la sala de ensayos si se forrase el suelo con material acústicamente absorbente. Se podría, por tanto, volver a realizar todas las mediciones para ver como dicha modificación repercute en los niveles de presión sonora registrados. Un paso más sería construir una cámara anecoica para las mediciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Edición 23^a, 2014.
- [2] FIDALGO RUBÉN. *“Cómo reducir el ruido que hacen las ruedas”*. AUTOCASIÓN, 2017.
- [3] Faconauto News. *“Goodyear le quita el ruido a las ruedas”*. FACONAUTO, 2017.
- [4] SEGUÉS ECHAZARRETA, FERNANDO *“Ruido de tráfico: carreteras”*. EOI, 2008.
- [5] SANDBERG, U.; EISMONT, J.A. *Tyre/road noise reference book*. Informex, Kisa, Sweden, 2002.
- [6] BLOKLAND, G.; PEETERS B. *Modeling the noise emission of road vehicles and results of recent experiments*. Internoise 2009.
- [7] LUQUE, P.; ÁLVAREZ, D.; VERA, C.; *Ingeniería del Automóvil, Sistemas y comportamiento dinámico*. EDICIONES PARANINFO, 2017.
- [8] Campello Vicente, Héctor. *“Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos”*. Elche, Abril 2014.
- [9] Rubio Rodríguez, Adrián. *“Diseño y construcción de una fuente sonora artificial para el estudio del ruido de rodadura”*. Elche, Septiembre 2013.
- [10] SILVIA PROJECT. *“Development of Procedures for Certifying Noise Testing Equipment”*.
- [11] Clar García, David. *“Metodología de ensayo en laboratorio para la medición del ruido de rodadura de neumáticos”*. Elche, Junio 2017.
- [12] Campillo Davó, Nuria. *“Modelización experimental del ruido de rodadura en ensayo de homologación de neumáticos”*. Elche, Marzo 2013.
- [13] Ley 37/2003, de 17 de noviembre del Ruido.
- [14] International Organization for Standardization ISO 3744, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure-Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane, 1994.
- [15] ISO 362-1-2007 para la medición del ruido emitido por la aceleración de los vehículos de carretera-Método de ingeniería- Parte1: Categorías M y N.

- [16] ISO 10844, Acoustics – Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.
- [17] UNECE Regulation 117. Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to Rolling sound emissions and to adhesion on wet surfaces and/or to rolling resistance. 2007.
- [18] ISO/CD 11819-2, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: “The Close Proximity Method”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.
- [19] Regulation (EC) No 1222/2009 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 on the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other essential parameters.
- [20] International Organization for Standardization ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemianechoic rooms, 2003.
- [21] International Organization for Standardization ISO/IEC 17020, Conformity assessment. Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection, 2012.
- [22] Norma ISO/IEC 17025. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración; 2005.
- [23] Norma japonesa JASO 1981. Medición del ruido generado por la rodadura del neumático mientras gira sobre un tambor (*Drum*).
- [24] Form 4: New Work Item Proposal. Reference number: ISO/TC 31/SC 5T. “Tyre noise test - Methods of Drum”. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2015.
- [25] ISO 3744, Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane, International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.
- [26] Santiago Expósito Paje, “*Mezclas SMA Sostenibles y Medioambientalmente Mejora frente al ruido, capacidad sonoreductora Medioambientalmente Amigables*”, 2013.
- [27] HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.
- [28] Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 26 junio 1998.

- [29] Emil Venere, Robert Bernhard, “Machine harnesses sound science to probe causes of road noise”, 18Abril, 2003.
- [30] SWEDISH ROAD AND TRANSPORT RESEARCH INSTITUTE (VTI), 2005.
- [31] Jerzy EJSMONT, Ulf SANDBERG Beata, ŚWIECZKO-ŻUREK, Piotr MIODUSZEWSKI, “Tyre/road noise, Poroelastic road surface, Noise reduction, Quiet pavement”, 2009.
- [32] Peter Kindt, Filip De Coninck, Paul Sas, Wim Desmet, “Analysis of tire/road noise caused by road impact excitations”, 2011.
- [33] Jorge Muract, Leonardo Molisani, Ronald O'Brien, “Modelo analítico para predicción de ruido generado por la banda de rodadura”; Noviembre 2013.
- [34] Departamento de Enfermedades No Transmisibles, Discapacidad y Prevención de la Violencia y los Traumatismos (NVI) “ESCUCHAR SIN RIESGO”; 2015.
- [35] Nuria Campillo-Davó, Ramon Peral-Orts, Hector Campello-Vicente, Emilio Velasco-Sanchez, “An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a rolling tyre”; Agosto 2018.
- [36] ISO/CD 20908 Tyre sound emission test — Methods of drum
- [37] S. E. Paje, M. Bueno, F. Terán, Miró R, Pérez-Jiménez F, Martínez AH. Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. Applied Acoustics 2010.
- [38] B. Peeters and A. Kuijpers. M+P- “The effect of porous road surfaces on radiation and propagation of tyre noise”. 2008