

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL
NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN
SONORA SOBRE LA EVALUACIÓN DEL
RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS
EN BANCO DE NEUMÁTICOS”

TRABAJO FIN DE GRADO

JUNIO-2021

AUTOR: Jerónimo Blasco Pérez

DIRECTORA: Nuria Campillo Davó

Índice General:

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. GENERALIDADES RUIDO DE RODADURA	1
1.1.1. MECANISMOS GENERADORES Y DE PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA	2
1.1.2. GRÁFICA RUIDO DE RODADURA	7
1.2. TÉCNICAS DE MEDICIÓN	9
1.3. ESTADO DEL ARTE	15
1.4. OBJETIVOS	18
2. MATERIAL Y MÉTODOS	21
2.1. INSTRUMENTACIÓN Y SOFTWARE EMPLEADOS	21
2.1.1. DESCRIPCIÓN	21
2.1.2. VERIFICACIONES	24
2.2. ENSAYO	26
2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO DE ENSAYO	26
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO	27
3. RESULTADOS OBTENIDOS	33
3.1. PROCESADO DE DATOS	33
3.2. FACTOR DE CORRECCIÓN K1	35
3.3. RESULTADO ENSAYO A-DRUM	38
3.4. RESULTADO POSICIONES A-CPX	50
4. CONCLUSIONES	72
5. FUTUROS TRABAJOS	73
6. ANEXOS	74
6.1. VALORES DE K1 POR FRECUENCIAS	74
6.2. INFLUENCIA SOBRE MEDIDAS DE VALORES A 5000 Hz	77
7. BIBLIOGRAFÍA	79



Índice de Figuras:

Figura 1: Sección transversal de un neumático. Fuente [3].	1
Figura 2: A) Vibraciones laterales. Fuente [5]. B) Vibraciones radiales. Fuente [5].	3
Figura 3: Flujo turbulento generado por el bombeo de aire. Fuente [5].	3
Figura 4: Absorción de aire. Fuente [5].	4
Figura 5: Efecto Stick-Slip. Fuente [5].	4
Figura 6: Efecto Stick-Snap debido a la adhesión. Fuente [5].	5
Figura 7: Amplificación de ruido debido al Horn Effect. Fuente [5].	6
Figura 8: A) Resonador Helmholtz. Fuente [5]. B) resonancia en las cavidades del neumático. Fuente [5].	6
Figura 9: Espectro de ruido de rodadura. Fuente [8].	8
Figura 10: Espectros del nivel de potencia sonora promedio. Fuente: [9].	8
Figura 11: Posiciones de los micrófonos para el ensayo CPX. Editado de [8].	9
Figura 12: Diferentes configuraciones Drum. De derecha a izquierda: A) Banco de ensayos tipo Drum de la Technical University of Gdansk, Polonia. B) Instalación tipo Drum del Federal Highway Research Institute (BASt), Alemania. C) Máquina de ensayo tipo Drum denominada Tire Pavement Apparatus Test en Purdue University, Estados Unidos.	11
Figura 13: Configuración empleada en los ensayos A-CPX. Fuente: [9].	11
Figura 14: Posiciones de los micrófonos en el ensayo A-CPX. Fuente [9].	12
Figura 15: Posiciones de los micrófonos ensayo A-Drum. Fuente: [11].	13
Figura 16: Distancias y medidas del ensayo Coast By. Editado de [8].	14
Figura 17: Esquema método Statistical Pass By. Fuente [4].	15
Figura 18: TPTA acondicionada para un ensayo. Editada de [14]	16
Figura 19: Máquina de ensayo tipo Drum de la Technical University of Gdansk (TUG). Fuente [16].	17
Figura 20: Esquema de las diferentes líneas de investigación para la determinación de la influencia de la curvatura del tambor en ensayo drum sobre la emisión y propagación sonora. Editado de: [18]	20
Figura 21: Instrumentación empleada en las medidas	21
Figura 22: Banco de ensayo de neumáticos UMH	23
Figura 23: Neumático Michelin Primacy 4 205/55 R16 91V empleado en los ensayos.	23
Figura 24: Calibración de los micrófonos	24
Figura 25: Grafica de la señal recibida por el micrófono durante el proceso de calibración	25
Figura 26: Grafica resultante de la medición simultánea de los micrófonos	25
Figura 27: Distribución micrófonos rotados 90º para ensayo A-Drum. Fuente: [11].	28
Figura 28: Distribución micrófonos ISO 3744	28
Figura 29: Neumático desplazado del eje tras montaje.	29
Figura 30: Posiciones definitivas de los micrófonos para el ensayo.	29
Figura 31: Montaje micrófonos sobre banco de ensayo.	30
Figura 32: montaje micrófonos sobre banco de ensayo con rejilla de protección.	31
Figura 33: Coordenadas Micrófonos A-CPX. Fuente: [9].	32
Figura 34: Esquema de un sonómetro. Fuente: [20].	33
Figura 35: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 40 Km/h	38
Figura 36: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 80 Km/h.	39
Figura 37: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 120 Km/h	39
Figura 38: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 km/h. Sentido inverso de giro.	43

<i>Figura 39: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h. Sentido inverso de giro.</i>	43
<i>Figura 40: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h.</i>	44
<i>Figura 41: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h.</i>	44
<i>Figura 42: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias.</i>	48
<i>Figura 43: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz.</i>	49
<i>Figura 44: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de los 315 a 5000 Hz. Sentido inverso de giro.</i>	49
<i>Figura 45: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro.</i>	50
<i>Figura 46: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 40 km/h.</i>	53
<i>Figura 47: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 80 km/h.</i>	53
<i>Figura 48: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 120 km/h.</i>	54
<i>Figura 49: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 40 km/h. Sentido inverso de giro.</i>	54
<i>Figura 50: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 80 km/h. Sentido inverso de giro.</i>	55
<i>Figura 51: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 120 km/h. Sentido inverso de giro.</i>	55
<i>Figura 52: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h para 5 posiciones de micrófono.</i>	59
<i>Figura 53: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h para 5 posiciones de micrófono.</i>	59
<i>Figura 54: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h para 5 posiciones de micrófono. Sentido inverso de giro.</i>	60
<i>Figura 55: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h para 5 posiciones de micrófono. Sentido inverso de giro.</i>	60
<i>Figura 56: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 40 Km/h.</i>	63
<i>Figura 57: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 80 Km/h.</i>	64
<i>Figura 58: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 120 Km/h.</i>	64
<i>Figura 59: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 40 Km/h. Sentido inverso de giro.</i>	65
<i>Figura 60: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 80 Km/h. Sentido inverso de giro.</i>	65
<i>Figura 61: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 120 Km/h. Sentido inverso de giro.</i>	66
<i>Figura 62: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. 5 micrófonos.</i>	67
<i>Figura 63: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz. 5 micrófonos.</i>	67
<i>Figura 64: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro. 5 micrófonos.</i>	68
<i>Figura 65: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 5 micrófonos.</i>	68
<i>Figura 66: Niveles de potencia sonora (dB) en ensayo A-CPX. Extraídos del estudio realizado por Campillo [9].</i>	69
<i>Figura 67: Niveles de potencia sonora (dB) en posiciones A-CPX.</i>	70

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS



Índice de Tablas:

Tabla 1: Coordenadas en metros de los micrófonos para el ensayo. _____	30
Tabla 2: Resultados globales del factor K1. _____	35
Tabla 3: Valores de K1 Insa Turbo Eco Saver 205 55 R16. _____	36
Tabla 4: Valores de K1 Insa Turbo 205 55 R16. _____	37
Tabla 5: Valor de K1 Michelin Energy Saver 205 55 R16. _____	37
Tabla 6: Valor de K1 Nexen 205 55 R16. _____	37
Tabla 7: Valores nivel presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava. 10 posiciones de medida. _____	40
Tabla 8: Valores nivel presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava para sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida. _____	41
Tabla 9: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. 10 posiciones de medida. _____	41
Tabla 10: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida. _____	41
Tabla 11: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango completo de frecuencias. 10 posiciones de medida. _____	42
Tabla 12: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida. _____	42
Tabla 13: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava. _____	45
Tabla 14: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para sentido inverso. _____	46
Tabla 15: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. _____	47
Tabla 16: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro. _____	47
Tabla 17: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango completo de frecuencias. _____	47
Tabla 18: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro. _____	47
Tabla 19: Coeficientes A y B. _____	48
Tabla 20: Valores de nivel de presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava. 5 posiciones de medida. _____	51
Tabla 21: Valores de nivel de presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava. Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida. _____	51
Tabla 22: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. 5 posiciones de medida. _____	52
Tabla 23: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida. _____	52
Tabla 24: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para todo el rango de frecuencias. 5 posiciones de medida. _____	52
Tabla 25: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida. _____	52
Tabla 26: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A). _____	56
Tabla 27: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A) para sentido inverso de giro. _____	57
Tabla 28: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A). Rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz. _____	57
Tabla 29: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A). Rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz. Sentido inverso de giro. _____	57
Tabla 30: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A). Rango completo de frecuencias. _____	58
Tabla 31: Desviación presión acústica superficial ΔL_{pf} en dB(A). Rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro. _____	58
Tabla 32: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para posiciones A-CPX. _____	61

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

<i>Tabla 33: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para posiciones A-CPX. Sentido inverso de giro.</i>	61
<i>Tabla 34: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 5000 Hz y 5 posiciones de medición.</i>	62
<i>Tabla 35: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 5000 Hz y 5 posiciones de medición. Sentido inverso de giro.</i>	62
<i>Tabla 36: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango completo de frecuencias y 5 posiciones de medición.</i>	62
<i>Tabla 37: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango completo de frecuencias y 5 posiciones de medición. Sentido inverso de giro.</i>	63
<i>Tabla 38: Promedio de la desviación de los valores globales de los niveles de potencia acústica en dB(A) entre 10 y 5 posiciones de medida.</i>	63
<i>Tabla 39: Coeficientes A y B. Posiciones de medición A-CPX.</i>	66
<i>Tabla 40: Tabla comparativa de los valores globales correspondientes a los niveles de potencia sonora en dB. Rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 4000Hz.</i>	70
<i>Tabla 41: Valores de K1 para neumático Insa Turbo Eco Saver 205-55 R16.</i>	74
<i>Tabla 42: Valores de K1 para neumático Nexen 205-55 R16.</i>	75
<i>Tabla 43: Valores de K1 para neumático Insa Turbo 205-55 R16.</i>	75
<i>Tabla 44: Valores de K1 para neumático Michelin Energy Saver 205-55 R16.</i>	76
<i>Tabla 45: Desviación de los resultados globales de Lps al considerar los valores a 5000 Hz. Posiciones A-Drum.</i>	77
<i>Tabla 46: Desviación de los resultados globales de Lps al considerar los valores a 5000 Hz. Posiciones A-CPX.</i>	77
<i>Tabla 47: Desviación de los resultados globales de Lw al considerar los valores a 5000 Hz. Posiciones A-Drum.</i>	78
<i>Tabla 48: Desviación de los resultados globales de Lw al considerar los valores a 5000 Hz. Posiciones A-CPX.</i>	78



1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES RUIDO DE RODADURA

A lo largo de los años se ha demostrado que el ruido es un factor que puede afectar negativamente a la salud de las personas. La exposición continuada a los diferentes ruidos de nuestro ambiente, ya no solo en nuestra residencia, sino durante nuestros desplazamientos diarios, puede dejarnos secuelas físicas y psicológicas [1]. Razón por la cual es de interés general el estudio de las diferentes fuentes sonoras de nuestro entorno, así como la mitigación de sus efectos.

Son muchos los focos de ruido con los que tenemos que lidiar en nuestro día a día, de los cuales un claro ejemplo son los automóviles, y más concretamente, los turismos.

En un coche hay diferentes fuentes generadoras de ruido, desde el motor y la transmisión, hasta el generado por los efectos aerodinámicos que se dan en el entorno del vehículo a diferentes velocidades. Sin embargo, está demostrado [2] que el ruido de rodadura causado por la interacción del neumático y el asfalto es la principal fuente de ruido causado por el tráfico de vehículos cuando estos circulan a velocidades superiores a los 50 km/h.

Para comprender mejor en qué consiste esta interacción, y por qué desencadena el ruido de rodadura, es necesario conocer las diferentes partes que componen la estructura de un neumático, así como los diferentes mecanismos de generación de ruido que tienen lugar.

Un neumático común está compuesto por los siguientes elementos [3]:

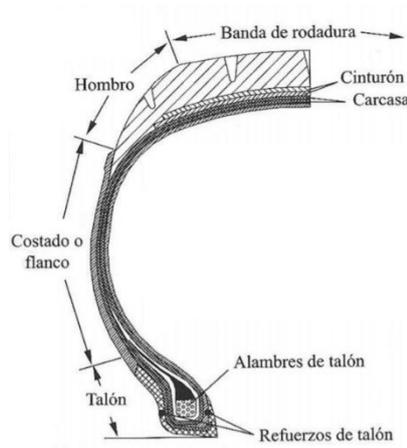


Figura 1: Sección transversal de un neumático. Fuente [3].

- Banda de rodadura: acorde con una definición generalista, es la capa más externa del neumático, la cual está destinada al contacto directo con la superficie. Está compuesta por caucho, y en su superficie podemos encontrar diferentes surcos y patrones que le confieren diferentes propiedades.
- Talón: parte inferior del neumático que se acomoda a las llantas, evitando así el deslizamiento entre ambos. Está compuesto por hilos de acero de alta resistencia.
- Flancos: Zona flexible que recubre la carcasa. Protege a la carcasa de impactos.
- Hombro: zona de transición entre la banda de rodadura los flancos. Permite disipar el calor producido durante la rodadura y sirven como protección contra choques laterales y roces.
- Carcasa: Aporta consistencia al neumático y está concebida para soportar la presión ejercida por el aire contenido en el neumático.

Respecto a los mecanismos que generan el ruido de rodadura, éstos son variados y nacen de la interacción ocasionada por el contacto de la banda de rodadura con la superficie sobre la que circula. Numerosos autores han escrito acerca de estos mecanismos como es el caso de [4] o [5]. En el siguiente apartado, se explican detalladamente los diferentes tipos de mecanismos de generación, así como su origen.

1.1.1. MECANISMOS GENERADORES Y DE PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

Vibración de la banda de rodadura:

Al girar un neumático, la superficie de este impacta constantemente contra el asfalto o superficie de contacto sobre la que se desplaza. Estas colisiones son habitualmente comparadas por diferentes autores con un pequeño martillo de goma golpeando el asfalto varias veces por segundo.

Los efectos de este impacto en combinación con el efecto de la carga del vehículo, que deforma y distorsiona el neumático, obligan a descomponer la vibración del neumático en una vibración radial de la banda de rodadura y una vibración lateral de la carcasa (Figura 2), siendo ambas una de las fuentes de ruido del ruido de rodadura.

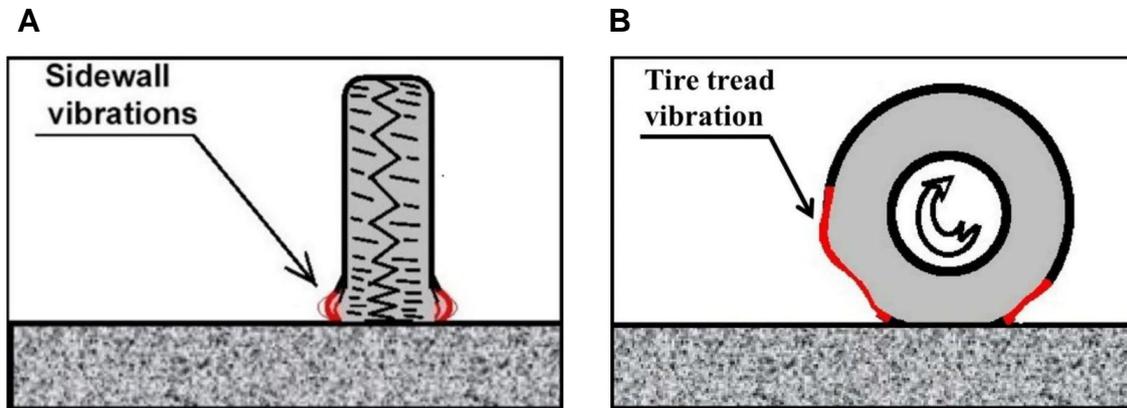


Figura 2: A) Vibraciones laterales. Fuente [5]. B) Vibraciones radiales. Fuente [5].

Bombeo de aire:

En la superficie de la banda de rodadura de un neumático se encuentran diferentes surcos y cavidades que conforman diferentes patrones en función del neumático y de las prestaciones requeridas. Entre la zona de contacto del neumático y carretera, hay aire que se queda dentro de estas cavidades. Cuando el neumático gira, este se deforma y comprime dichas cavidades, provocando que el aire contenido en ellas salga expulsado. Esto produce un flujo inestable de aire que provoca ruido (ver Figura 3).

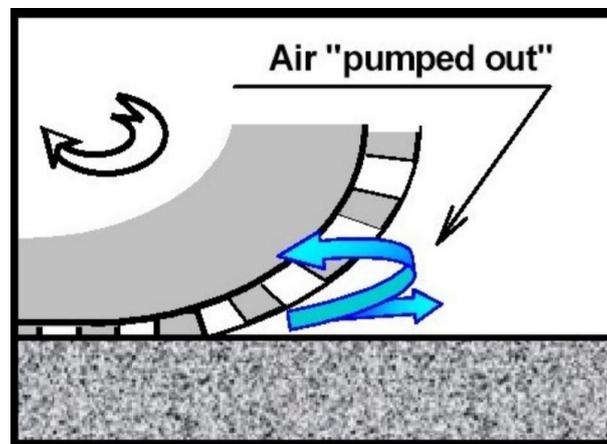


Figura 3: Flujo turbulento generado por el bombeo de aire. Fuente [5].

Cuando la zona del neumático en contacto con la superficie abandona el contacto con esta, la banda de rodadura, debido a las propiedades elásticas del neumático, recupera rápidamente su forma original, lo que produce que el volumen de las cavidades aumente y se cree una depresión que absorbe aire de nuevo (ver Figura 4), generando ruido también.

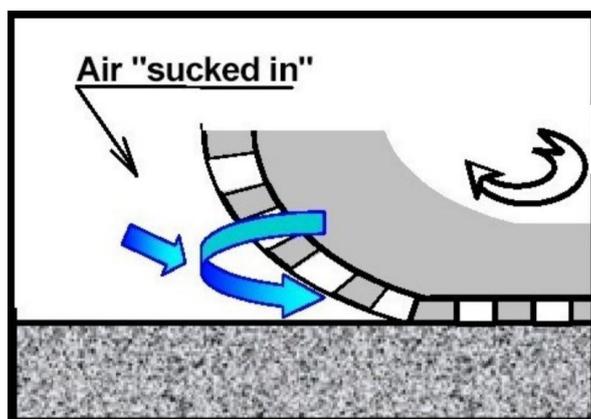


Figura 4: Absorción de aire. Fuente [5].

Slip-stick:

Este mecanismo de generación de ruido se da cuando las fuerzas de fricción entre el asfalto y el neumático no son suficientemente elevadas para compensar las fuerzas laterales originadas en la zona de contacto entre ambos, por los momentos de aceleración y deceleración propios de la conducción. Haciendo que el neumático patine ligeramente y se vuelva adherir al pavimento instantes después (ver Figura 5), lo que genera ruido y vibraciones.

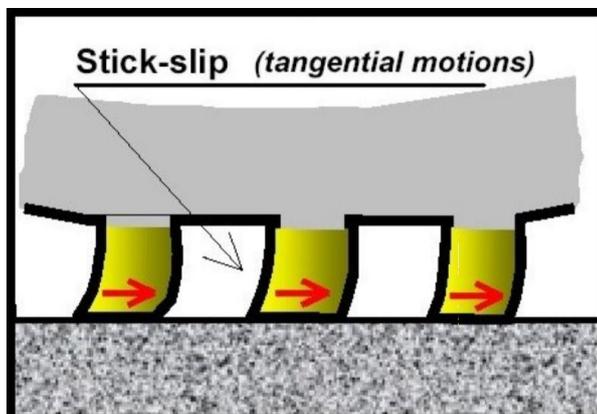


Figura 5: Efecto Stick-Slip. Fuente [5].

Stick-snap:

Debido a la compresión de la banda de rodadura contra la superficie de contacto, se produce una adhesión entre el neumático y el asfalto. Cuando el neumático gira y la parte en contacto con la superficie de despega (ver Figura 6), genera ruido y vibraciones. Es un mecanismo que también diferentes autores han comparado con objetos cotidianos, lo cual facilita la comprensión del fenómeno. En este caso lo compara con el efecto producido por un desatascador doméstico.

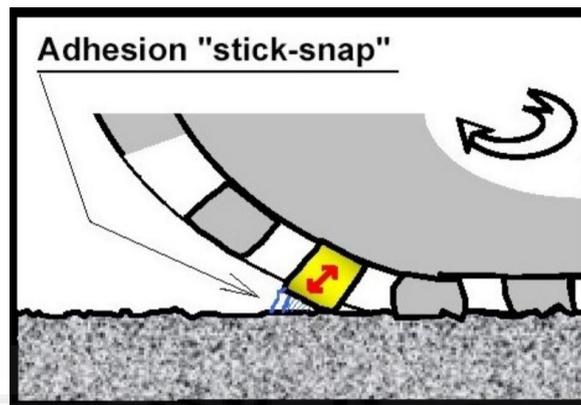


Figura 6: Efecto Stick-Snap debido a la adhesión. Fuente [5].

A parte de los mecanismos mencionados, existen diferentes factores que contribuyen a la propagación del ruido de rodadura, ya sea ampliándolo o reduciéndolo, los cuales los podemos clasificar como:

Horn Effect o Efecto Bocina:

Este efecto se produce debido a la geometría que conforman el neumático y el plano sobre el que se desliza. Se puede apreciar que tras la zona de contacto, encontramos un espacio similar a los cuernos de diferentes instrumentos musicales de viento: trompetas, clarinetes, oboes... Esto produce que, al igual que en dichos instrumentos, las ondas de ruido provenientes del neumático reflejen múltiples veces dentro de la estructura (ver Figura 7) y se concentren hacia la salida, amplificando así considerablemente el nivel sonoro emitido.

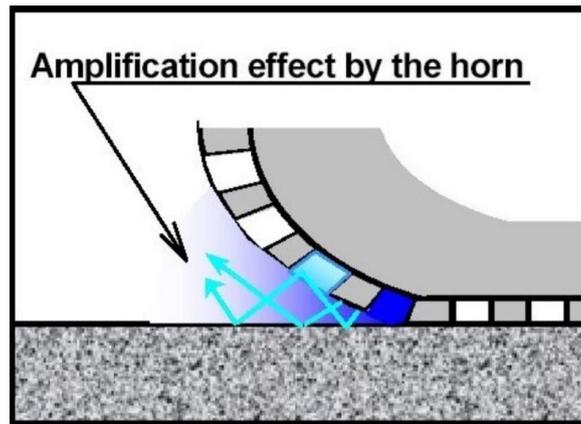


Figura 7: Amplificación de ruido debido al Horn Effect. Fuente [5].

Resonadores de Helmholtz y Resonancia en tubos:

Otros efectos que se dan en el entorno del neumático y que contribuyen a la amplificación del ruido de rodadura son los causados por la resonancia en las acanaladuras de la banda de rodadura y por el efecto Helmholtz, si bien es cierto que la contribución al ruido de rodadura de estos dos fenómenos es menor a la del Horn Effect descrita anteriormente [4].

Por un lado, cuando un vehículo circula a gran velocidad, parte del flujo de aire generado fluirá a través de las cavidades de la banda de rodadura. La estructura tubular de estas cavidades entrará en resonancia y amplificará el ruido generado por este flujo de aire (ver Figura 8.B). La magnitud de este efecto dependerá de diferentes factores como la longitud de la cavidad o el número de salidas de ésta.

Por otro lado, cuando el neumático gira y la zona de contacto se separa de la superficie, el aire de la zona de intersección del neumático con la carreta se comporta como un resorte (ver Figura 8.A), lo que produce vibraciones y puede llegar a amplificar considerablemente frecuencias específicas del sonido [4].

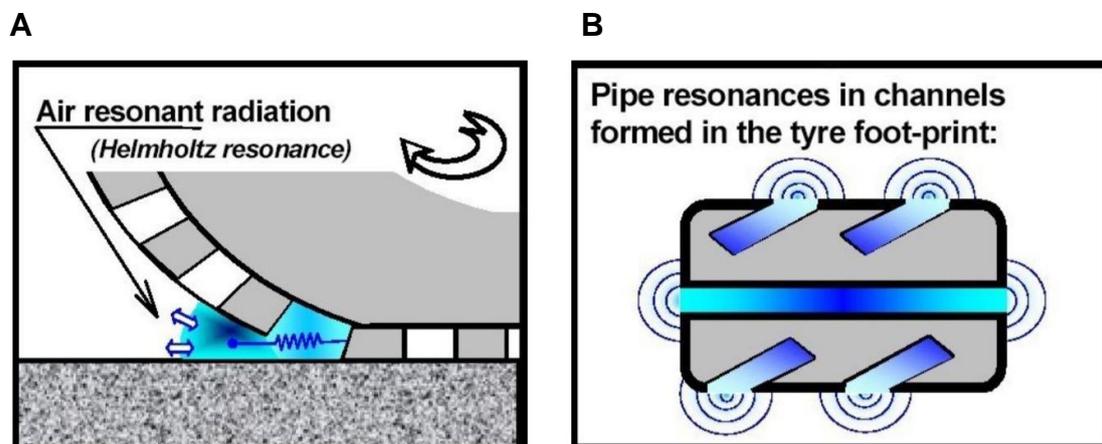


Figura 8: A) Resonador Helmholtz. Fuente [5]. B) resonancia en las cavidades del neumático. Fuente [5].

1.1.2. GRÁFICA RUIDO DE RODADURA

Un elemento fundamental en cualquier estudio acerca del ruido de rodadura es el análisis del espectro de ruido emitido.

Este espectro, el cual se suele representar en términos de potencia o presión sonora frente a la escala de frecuencia, depende de gran variedad de factores como la velocidad de rodadura, el tipo de neumático, la superficie de ensayo o la metodología empleada para realizar las mediciones. En consecuencia, en cada ensayo se obtendrán resultados con unos espectros únicos.

No obstante, hay ciertas características de los espectros del ruido de rodadura de los automóviles que se consideran comunes en la mayoría de los ensayos y que conviene conocer y tener en cuenta a la hora de procesar y analizar los resultados obtenidos. Estas son:

- Un pico predominante alrededor de los 1000 Hz, ocasionado por diferentes fenómenos como el “Horn Effect”, el patrón de la banda de rodadura o la resonancia del cinturón del neumático entre muchos otros, y el cual coincide con los valores de frecuencia frente a los que el ser humano presenta mayor sensibilidad. [6]
- Un pico con un nivel sonoro menor que el pico predominante debido a la frecuencia de impacto de los bloques de la banda de rodadura del neumático [7], el cual varía en función de factores como la velocidad o la banda de rodadura.

En la figura mostrada a continuación, correspondiente al espectro del ruido de rodadura de un ensayo realizado a 80 Km/h llevado a cabo por el grupo de investigación de Ingeniería Mecánica Aplicada, de la Universidad Miguel Hernandez de Elche, se pueden apreciar los dos picos característicos mencionados:

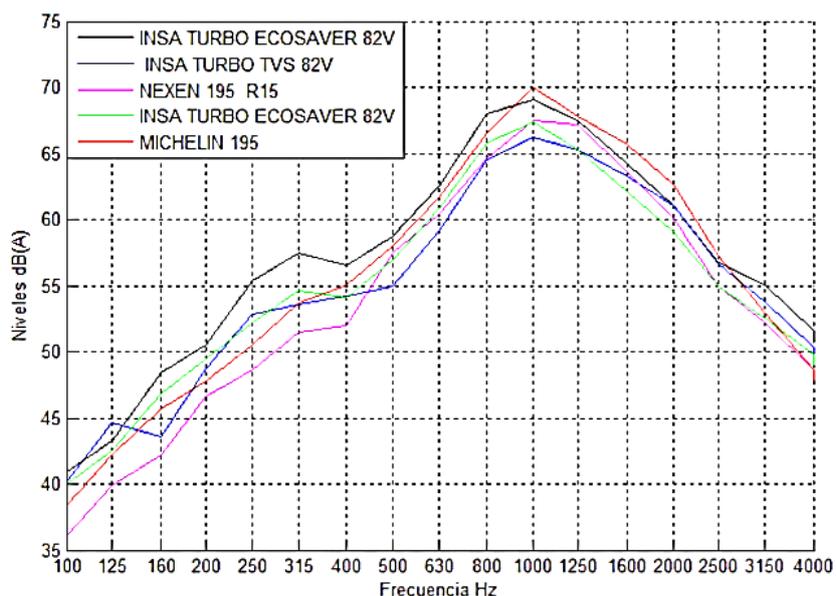


Figura 9: Espectro de ruido de rodadura. Fuente [8].

En la siguiente figura, extraída del estudio realizado por Campillo [9], se muestra el espectro del ruido de rodadura para un mismo neumático a diferentes velocidades, pudiéndose apreciar claramente la variación con la velocidad del pico debido a las frecuencias de impacto de los bloques de la banda de rodadura.

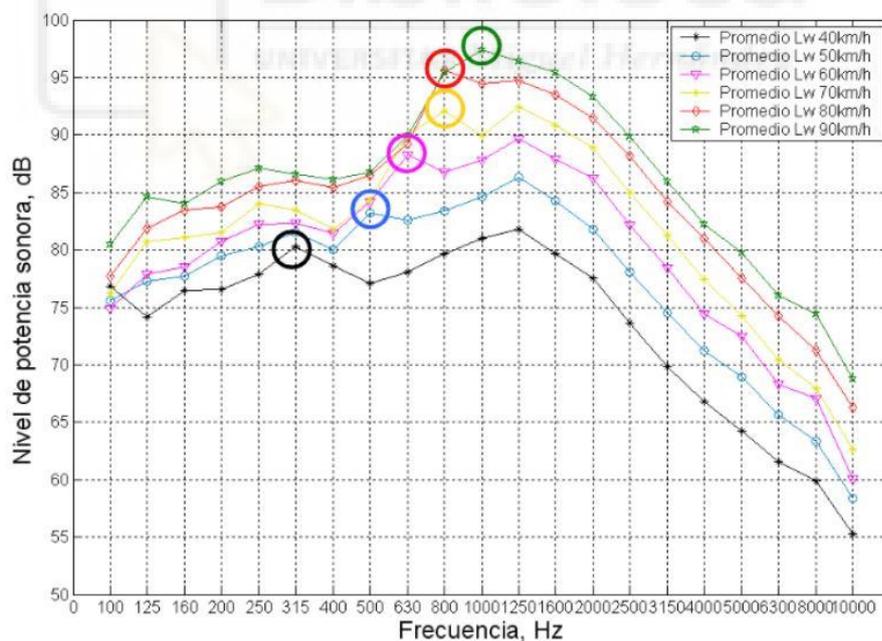


Figura 10: Espectros del nivel de potencia sonora promedio. Fuente: [9].

1.2. TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Una vez conocido en qué consiste el ruido de rodadura, sus mecanismos de generación, así como la necesidad de estudiar este fenómeno, se procederá a realizar un análisis de las principales técnicas empleadas para su medición.

Existe una gran variedad de técnicas, que se pueden clasificar de diferentes formas, siendo lo más habitual clasificar en función de si el objeto de estudio es el pavimento o el propio neumático. No obstante, para la tarea a desempeñar, se limitará la explicación a los métodos estrechamente relacionados con este trabajo, bien por ser los empleados en nuestro estudio o bien por ser la base en la que se fundamentan los métodos empleados. Siendo estos:

CPX

Método estandarizado muy extendido en el ámbito de la investigación, concebido especialmente para valorar la influencia de la carretera en el ruido de rodadura.

Fundamentado en la ISO 11819-2 [10], consiste en la medición del nivel de presión sonora emitido por el neumático al rodar. Esta medición se realiza mediante al menos 2 micrófonos ubicados en el campo cercano del neumático según indica la Norma, pudiendo aumentar el número de micrófonos opcionalmente hasta un total de 6 (ver Figura 11).

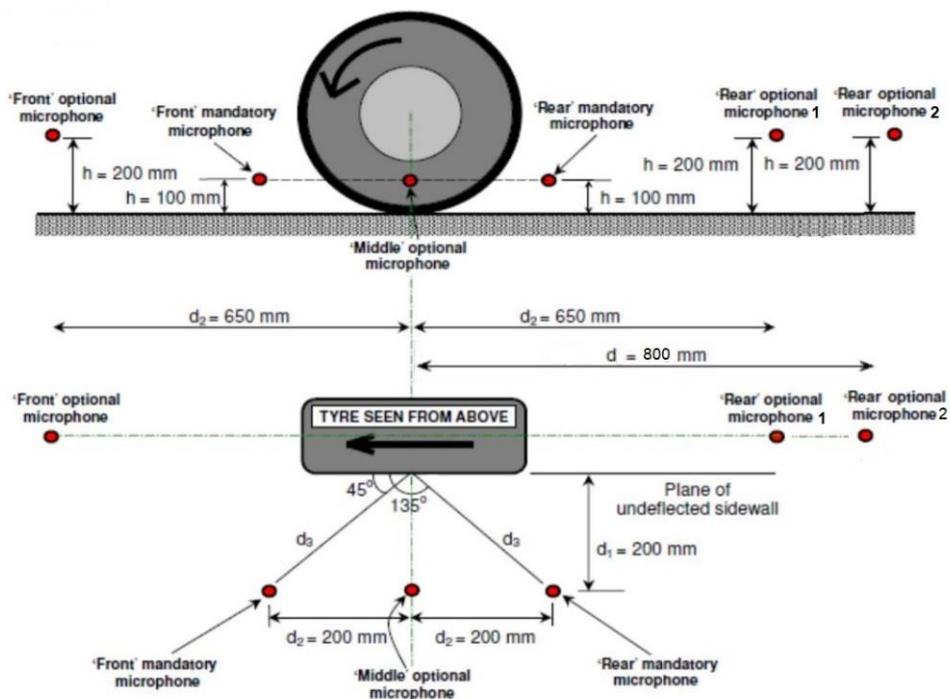


Figura 11: Posiciones de los micrófonos para el ensayo CPX. Editado de [8].

El ensayo presenta diferentes opciones constructivas a la hora de llevarlo a cabo, pudiéndose realizar directamente sobre un neumático del vehículo, sobre un neumático adicional estandarizado y el cual ha sido diseñado específicamente para este ensayo y que habría que montar o, por último, sobre un neumático alojado en el interior de una estructura montada sobre un remolque, la cual ofrecería un entorno de encapsulamiento que ejercería como cámara semianecoica.

La metodología de este ensayo se basa en la obtención del nivel de presión sonora de un neumático del vehículo, circulando a unas velocidades determinadas de 50, 80 y 110 Km/h a lo largo de un total de 200 metros de carretera. Estos 200 metros se pueden dividir en varios tramos de inferior longitud, que pueden ir de los 20 m a los 100 m.

A lo largo del tramo de ensayo no debe haber ningún elemento susceptible de reflejar el sonido como pueden ser las barreras protectoras o los elementos del terreno.

Drum

Es un ensayo de laboratorio cuyo fundamento se basa en hacer girar un neumático contra la superficie de un tambor, generalmente de acero y con un diámetro entre los 1,5 m y los 2,5 metros.

Pese a ser un método de ensayo muy extendido en diferentes campos de investigación, actualmente no hay una normativa que regularice los ensayos de este tipo para la medición del ruido de rodadura. No obstante, se formó un Comité ISO para desarrollar la norma ISO/CD 20908 “Tyre sound emission test – Methods of drum” con la finalidad de crear un método estandarizado para llevar a cabo los ensayos, pero todavía se encuentra bajo desarrollo.

Por otro lado, otros países fuera de la Unión Europea han desarrollado su propia normativa, como Japón y su JASO C606-81 o China con su normativa GB/T 32789-2016. Algunas empresas de automoción también han publicado sus propias normativas como Ford CETP 04 04-E-4002.

Existe una gran variedad de instalaciones tipo Drum con configuraciones muy variadas, las cuales se pueden clasificar en función de sus características constructivas:

- Tambores de rotación externa: configuración en la que un neumático fijo se apoya en la cara externa del tambor, el cual inicia el giro.
- Tambores de rotación interna: configuración en la que el neumático se apoya sobre la cara interna del tambor.
- Tambores estáticos: consiste en un tambor estacionario alrededor del cual gira el neumático apoyado en su cara externa.



Figura 12: Diferentes configuraciones Drum. De derecha a izquierda: A) Banco de ensayos tipo Drum de la Technical University of Gdansk, Polonia. B) Instalación tipo Drum del Federal Highway Research Institute (BASt), Alemania. C) Máquina de ensayo tipo Drum denominada Tire Pavement Apparatus Test en Purdue University, Estados Unidos.

Alternative Close-Proximity

Metodología de ensayo desarrollada por el grupo de investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche [9] a partir del ensayo CPX descrito anteriormente.

El objetivo de esta nueva metodología de ensayo es obtener los niveles de potencia sonoras del neumático a través de mediciones de presión sonora, para lo que combina lo indicado en la ISO 3744 y la ISO 11819-2.

Al igual que en el CPX tradicional, los micrófonos se instalan sobre el propio vehículo (ver Figura 13), el cual se desplazará a una velocidad constante.



Figura 13: Configuración empleada en los ensayos A-CPX. Fuente: [9].

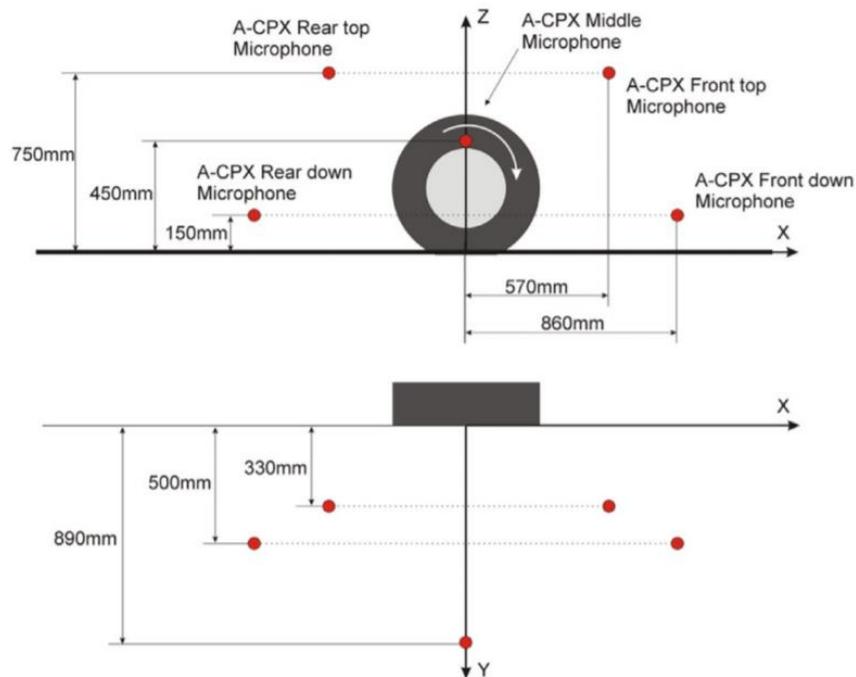


Figura 14: Posiciones de los micrófonos en el ensayo A-CPX. Fuente [9].

A-Drum:

Metodología de ensayo tipo Drum desarrollada por el grupo de investigación de la UMH [11] que nace con la finalidad de fundamentar en normativa estandarizada un método de ensayo de laboratorio tipo Drum.

La originalidad de este método dentro de los ensayos Drum radica en la aplicación de la ISO 3744 para medir los niveles de potencia sonora de un neumático al rodar.

Siguiendo las indicaciones de la ISO 3744, una nube de micrófonos envuelve al neumático apoyado sobre la máquina de ensayo (ver Figura 15), compuesta por un rodillo de superficie metálica de 170 cm de diámetro movido por un motor eléctrico, sobre el que se apoya el neumático.

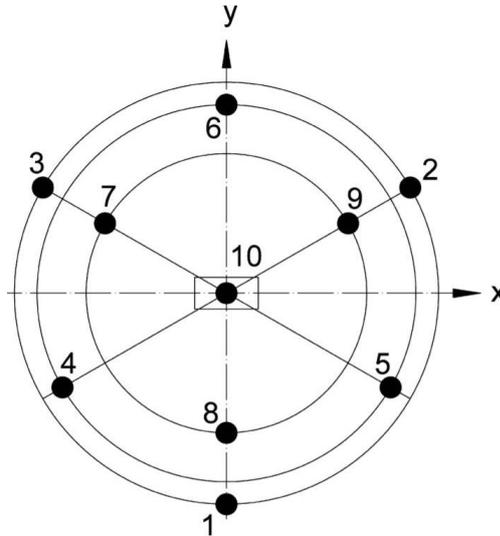


Figura 15: Posiciones de los micrófonos ensayo A-Drum. Fuente: [11].

A lo largo de los siguientes apartados se explicará detalladamente la metodología y las diferentes características del ensayo.

Como se ha indicado al inicio, en este apartado el análisis se ha limitado a las técnicas de medición directamente relacionadas con el presente trabajo. No obstante, existe una gran cantidad de ensayos de los cuales conviene conocer sus características más elementales, pues esto ayudará a contextualizar el contenido del mismo. Estos son:

Coast-By:

Metodología ampliamente extendida en diferentes ámbitos, siendo uno de ellos el ensayo de homologación al que se someten los neumáticos antes de ser lanzados al mercado de la Comunidad Europea.

El ensayo consiste en la medición del nivel de presión sonora de un vehículo que circula a una velocidad constante (80 km/h para turismos) en línea recta a lo largo de 20 metros. Distancia que el vehículo debe realizar con motor parado y el embrague en punto muerto para evitar la influencia de estos sistemas en la medición.

Los micrófonos deben colocarse a una distancia de 7,5 metros del eje longitudinal de la pista. Tal y como se muestra en la figura siguiente:

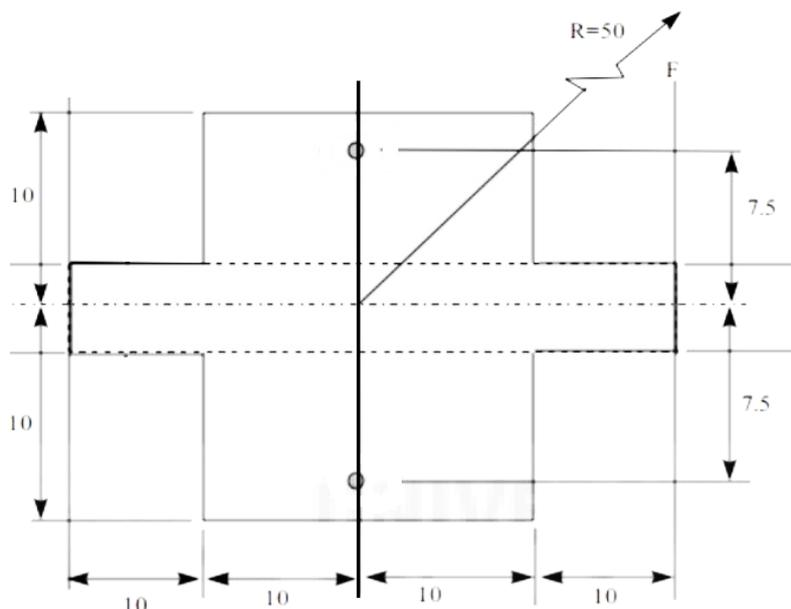


Figura 16: Distancias y medidas del ensayo Coast By. Editado de [8].

Los valores finales de la medición se obtienen mediante un análisis de regresión lineal de la velocidad y el ruido medio.

Statistical Pass-By

De forma homóloga al método Coast-By anteriormente descrito, el objetivo de este método normalizado [12] es obtener los niveles de presión sonora mediante micrófonos situados a ambos lados de la carretera a 7,5 metros de su eje longitudinal (ver Figura 17).

En este caso, los vehículos a los que se les aplica las mediciones forman parte del tráfico convencional, por lo que operan en condiciones normales de funcionamiento.

Pese a que es un método ampliamente utilizado para la caracterización de superficies y diseñado para que la variabilidad de emisiones de las diferentes clases de vehículos no le afecte, presenta ciertas desventajas como la necesidad de ausencia de obstáculos susceptibles de reflexión del ruido en un radio de 50 metros o que el pavimento sea totalmente plano.

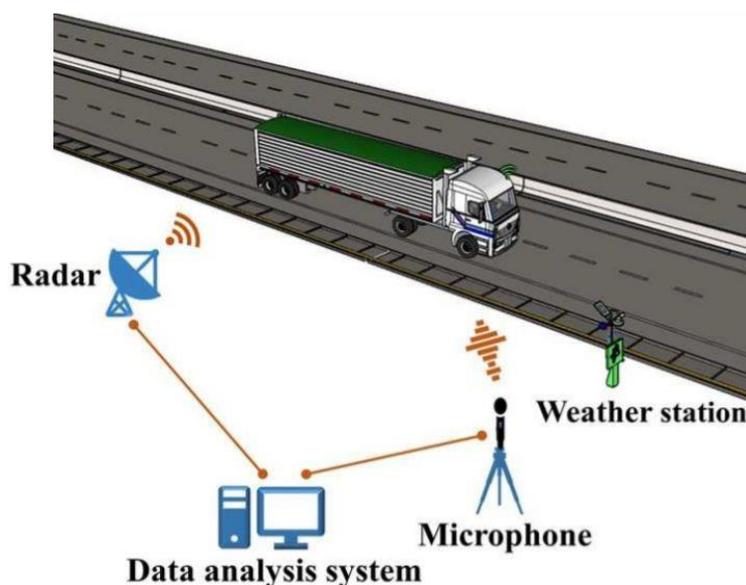


Figura 17: Esquema método Statistical Pass By. Fuente [4].

Controlled Pass-By

Similar al método Statistical Pass-By encontramos esta modalidad de ensayo, sobre la cual se ha desarrollado un trabajo de normalización [13].

La finalidad de este método es evaluar el ruido de diferentes pavimentos a partir del tráfico de vehículos previamente seleccionados. Las condiciones de aplicación son muy concretas, lo que puede dificultar el empleo del método.

1.3. ESTADO DEL ARTE

En el apartado anterior se han explicado de forma genérica algunas de las características constructivas de las instalaciones tipo Drum, donde se realizan ensayos para diferentes campos de estudio, entre los que resulta de especial interés para el presente trabajo los estudios llevados a cabo en el ámbito del ruido de rodadura. Sin embargo, la ausencia de una normativa que unifique criterios entorno a una metodología común para evaluar el ruido de rodadura en este tipo de instalaciones ha dado lugar a una gran variedad de grupos de investigación que emplea su propia metodología y máquinas para sus estudios.

La naturaleza heterogénea de estos ensayos dificulta la concreción de unas características comunes acerca de la metodología empleada a la hora de evaluar el ruido de rodadura en instalaciones Drum, no obstante, con la finalidad de matizar y comprender mejor los ensayos llevados en estas instalaciones, a continuación, se presentarán algunos de los trabajos realizados por diferentes grupos de investigación:

Purdue University's Tire-Pavement Test Apparatus (TPTA)

La Universidad de Purdue, Indiana, consta con una máquina de ensayos de características muy específica denominada TPTA, siglas de Tire-Pavement Test Apparatus, mostrada a continuación:

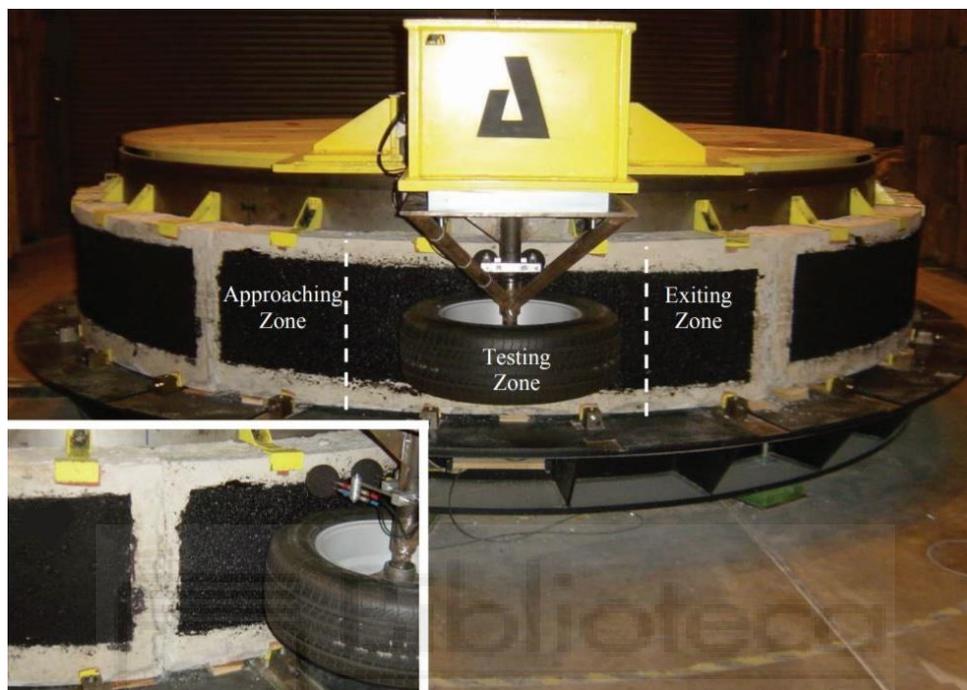


Figura 18: TPTA acondicionada para un ensayo. Editada de [14]

La máquina consta de dos neumáticos que giran alrededor del tambor fijo, el cual está recubierto por seis paneles que simulan el pavimento. Una de sus características principales consiste en la posibilidad de intercambiar los paneles que recubren el tambor, pudiéndose emplear así diferentes tipos de pavimentos, desde cemento o poliméricos hasta asfalto, lo que permite simular con mayor fidelidad las condiciones reales de rodadura.

La TPTA se ha empleado en diferentes estudios, como los llevados a cabo por Bernhard [15] en el año 2003 o Kowalski [14] en 2013, en los que se estudiaba el fenómeno de generación de ruido de rodadura en diferentes pavimentos, incluido asfalto.

La metodología empleada por cada autor se ajusta a las necesidades de cada estudio.

Por un lado, en [15], se evaluó el efecto de la carcasa del neumático en la generación del ruido de rodadura. Se empleó como superficie de rodadura cemento Portland, con velocidades de ensayo de 10, 20 y 30 millas por hora. Para las mediciones se emplearon cinco micrófonos, de los cuales 3 se ubicaron siguiendo lo indicado en la ISO 11819-2 [10], mientras que los dos últimos se ubicaron respectivamente a lo largo del eje central del neumático,

uno frente al neumático a 5 cm del eje principal de la huella de contacto y otro tras el neumático, a 5 cm del eje de la huella de contacto.

En [14], se evaluó el uso de la máquina TPTA para medir el ruido de rodadura generado por varios tipos de asfaltos. Para ello, los micrófonos se colocaron según lo indicado en la normativa On-Board Sound Intensity de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Universidad de Gdansk (TUG)

La Technical University of Gdansk ha participado en varios estudios relacionados con el ámbito del ruido de rodadura. Una de sus líneas de investigación se centra en el estudio de la influencia sobre el ruido de rodadura de un material con propiedades acústicas denominado PERS, siglas de Poroelastic Road Surface.

En 2013, la TUG participó en un estudio [16] donde se pretendía evaluar en condiciones de laboratorio cómo influía este material en el ruido de rodadura antes de proceder con ensayos a mayor escala en carretera. La máquina empleada para los diferentes ensayos se muestra en la figura a continuación:

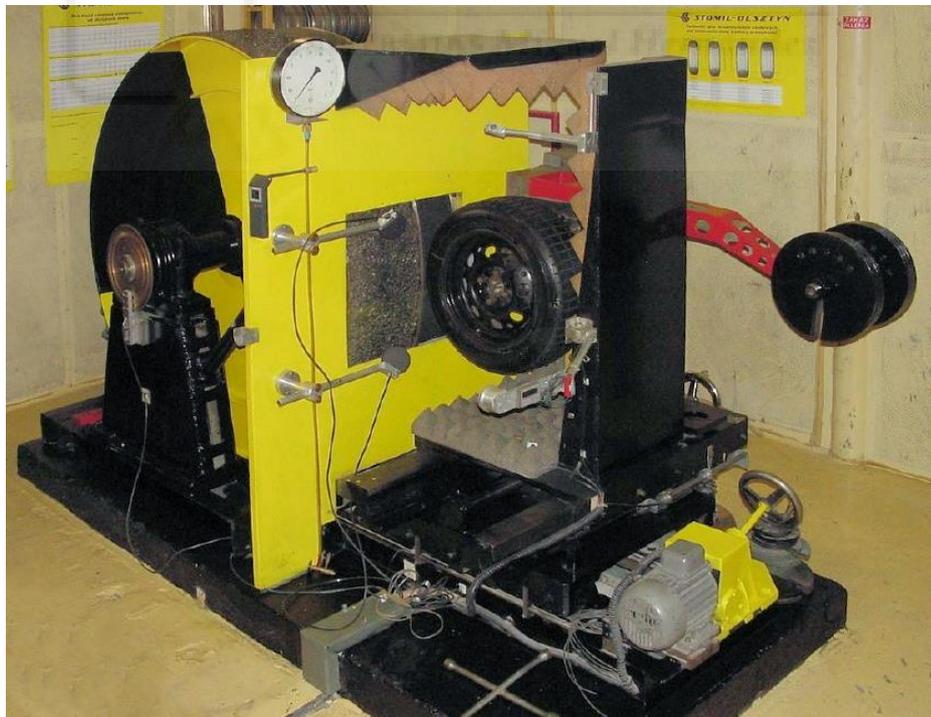


Figura 19: Máquina de ensayo tipo Drum de la Technical University of Gdansk (TUG). Fuente [16].

La máquina consta de un tambor de 1,7 metros de diámetro, accionado por un motor eléctrico, cuya cara externa puede ser recubierta por diferentes superficies.

La metodología empleada se basó en la ISO 11819-2, utilizando dos micrófonos para la realización de las mediciones. En la Figura 19, se puede apreciar la posición de los micrófonos para el ensayo. Para las medidas se consideraron niveles sonoros con ponderación A y en bandas de tercio de octava a lo largo de 60 segundos de medición. La preparación de los neumáticos también se hizo en base a lo indicado la norma CPX, con una carga de 3200 N y una presión de inflado de 200 KPa. Por último, las velocidades de ensayo fueron de 30, 50, 80 y 100 km/h.

Los resultados del estudio mostraron una reducción significativa de los niveles sonoros del PERS frente a otras superficies de ensayo.

1.4. OBJETIVOS

Como se ha podido observar hasta este punto, existe gran variedad de métodos de ensayo para la realización de medidas acústicas con la finalidad de analizar el ruido producido por la rodadura de los neumáticos de un vehículo.

Desde los ensayos en pista como el CPX, Coast-By o Pass-By, hasta los ensayos de laboratorio tipo Drum, presentan ventajas y desventajas en función de los objetivos que se persiguen. No obstante, en una comparativa entre ambas clasificaciones, pese a que los ensayos en pista han sido considerados en trabajos de estandarizados de diferentes organismos, los ensayos de laboratorio tipo drum presentan ciertas ventajas frente a los de pista. Entre estos, cabe destacar la metodología tipo A-Drum previamente introducida, la cual presenta unas características que la convierten en una fuente de estudio con gran potencial de desarrollo. Estas son, según se indica en [11]:

- Repetibilidad: ensayos realizados en el ámbito de laboratorio, lo que permite replicar las mismas condiciones de superficie, rugosidad, temperatura y velocidad a lo largo de diferentes ensayos, evitando así las posibles diferencias en los resultados que pudieran surgir si el ensayo se realizara en pista.
- Economía: utilización de un único neumático, lo que implica una reducción en los costes de ensayo frente a los diferentes ensayos en pista, los cuales requieren la utilización de un automóvil, suponiendo así el montaje de 4 ruedas con sus respectivas llantas.

- Rapidez en los ensayos: reducción del tiempo necesario para realizar las mediciones en comparación con los ensayos en pista regulados por la UNECE Regulation 117 [17], llegando a emplear cinco veces menos tiempo [11].
- Medición de potencia sonora: utilización de los niveles de potencia sonora como medida, en vez de los niveles de presión sonora. La potencia sonora es una magnitud de medida que es propia de cada fuente, por lo que no depende de factores ambientales o distancias de medición.

Como ya se ha indicado, en un ensayo A-Drum se obtienen los valores del nivel de potencia acústica a partir de los valores de presión registrados. Esto se debe a que es un método fundamentado en la ISO 3744, la cual permitirá calcular los niveles de potencia sonora en un campo libre a partir de los valores de presión sonora registrados por una serie de micrófonos colocados en unas posiciones determinadas por el tamaño de la fuente.

La norma 3744, a su vez, contempla la posibilidad de reducir el número de posiciones de medida, fundamentalmente en aquellos casos en los que la radiación de la fuente es simétrica y siempre y cuando la desviación en los niveles de presión acústica superficial entre el conjunto completo de posiciones y el reducido no supera los 0,5 dB. Actualmente el ensayo A-Drum está diseñado para un número de 10 posiciones de micrófono. Por ello, la posibilidad de reducir el número de posiciones sería una ventaja añadida al método A-Drum, puesto que permitiría reducir el tiempo de preparación del ensayo, así como el posterior procesado de las medidas.

De acuerdo con todo lo comentado anteriormente, el principal objetivo del presente trabajo es analizar la influencia del número de posiciones de medidas acústicas sobre el cálculo del nivel de potencia sonora del neumático en un ensayo A-Drum, y poder determinar así la viabilidad de una reducción en el número de posiciones de micrófono.

Para ello, se ensayará un neumático en el banco de ensayos de la Universidad Miguel Hernández con el fin obtener los niveles de potencia sonora para diferentes velocidades y sentidos de giro. Se analizarán los resultados obtenidos con el empleo de las 10 posiciones de medición del ensayo A-Drum y se compararán con los resultados obtenidos tras reducir a 5 las posiciones de medida.

Esta reducción de las posiciones de medida no se llevará a cabo de forma aleatoria, sino que se hará basándose en las posiciones indicadas en el ensayo a A-CPX [9], método en el cual también se emplea la potencia sonora como resultado y cuyas posiciones de medición coinciden en su totalidad con parte de las posiciones del ensayo A-Drum.

El presente trabajo de fin de grado forma parte de una línea de investigación más amplia (ver Figura 20), 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.

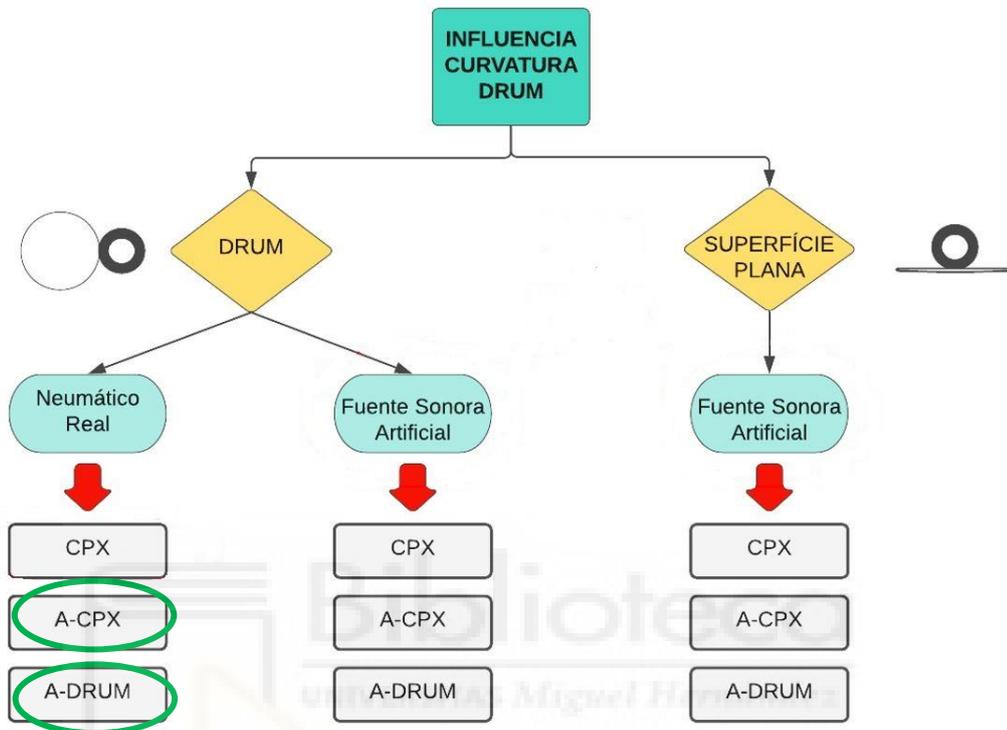


Figura 20: Esquema de las diferentes líneas de investigación para la determinación de la influencia de la curvatura del tambor en ensayo drum sobre la emisión y propagación sonora. Editado de: [18]

Los resultados obtenidos en el presente estudio, en conjunto con otros trabajos como [18], se emplearán en un trabajo futuro para diseñar la emisión sonora de una fuente sonora artificial que, apoyada tanto en la superficie cilíndrica del tambor del banco de ensayos, como en una superficie plana, permitirá caracterizar el efecto de la curvatura del tambor sobre la propagación sonora en el entorno del neumático.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se expondrán diferentes aspectos del ensayo realizado.

Por un lado, se dará a conocer la instrumentación, material y software empleados para realizar el ensayo, así como las diferentes verificaciones realizadas para garantizar el correcto funcionamiento de la instrumentación empleada.

Por último, se describirá detalladamente el entorno acústico, características del propio ensayo y la metodología empleada, lo que permitirá justificar el cumplimiento de los requisitos marcados por el método de ensayo A-Drum, fundamentado en la ISO 3744, para determinar los niveles de potencia acústica.

2.1. INSTRUMENTACIÓN Y SOFTWARE EMPLEADOS

2.1.1. DESCRIPCIÓN

Para la obtención del ruido de rodadura y su posterior tratamiento para la adquisición de los diferentes niveles de potencia sonora en los diferentes rangos de velocidad en los que gira el neumático se emplean diferentes instrumentos, máquinas y programas informáticos, como se muestra en la siguiente imagen (Figura 21):



Figura 21: Instrumentación empleada en las medidas

La medición de la presión acústica emitida se realiza mediante micrófonos de campo libre, los cuales están diseñados para no perturbar con su presencia el campo sonoro. Este tipo de micrófonos presentan una respuesta de frecuencia plana cuando se miden en campo libre con el ángulo de incidencia indicado por fábrica, el cual es habitualmente 0° .

Para la medición de los niveles de presión acústica emitidos por el neumático al rodar se han utilizado 10 micrófonos de campo libre:

- 6 micrófonos Bruel & Kjaer 4935 con una sensibilidad nominal de $5,6 \frac{mV}{Pa}$.
- 4 micrófonos Bruel & Kjaer 4957 con una sensibilidad nominal de $11,2 \frac{mV}{Pa}$.

Los micrófonos se conectan a los diferentes canales del sistema de adquisición de datos SCADA multicanal (LMS Pimento), el cual recopilará los datos de presión obtenidos por cada micrófono a lo largo del tiempo de medición.

La frecuencia de adquisición de datos del sistema SCADA se fija en 25000 Hz, ya que ésta debe ser al menos el doble de la máxima frecuencia que se espera medir. Debido a que se medirá ruido de rodadura, las frecuencias de interés van desde los 400 Hz a los 10000, por tanto, la frecuencia de muestreo del sistema SCADA debe ser al menos de 20000 Hz, siendo 25000Hz la opción que más se ajusta entre las posibilidades por el sistema.

Para procesar las señales obtenidas y realizar los cálculos pertinentes, se han empleado diferentes programas informáticos, como la interfaz del propio Pimento para el filtrado en tercios de octava, o Matlab para el cálculo de la potencia sonora emitida por el neumático.

El ensayo se realiza en el banco de ensayos de neumáticos tipo *Drum* ubicado en el Laboratorio de Neumáticos, ubicado en el Edificio Torreblanca de la Universidad Miguel Hernández, mostrado a continuación en la Figura 22:



Figura 22: Banco de ensayo de neumáticos UMH

El banco de ensayos está formado por un tambor de acero de 170 cm de diámetro, sobre el cual se apoya el neumático. El cilindro es accionado por un motor eléctrico de 380 V, 50 Hz y 100 Kw de potencia.

El neumático empleado durante el ensayo es un neumático de 205/55 R16 91V, de la Marca Michelin, modelo Primacy 4, montado en gran variedad de turismos (ver Figura 23)



Figura 23: Neumático Michelin Primacy 4 205/55 R16 91V empleado en los ensayos.

2.1.2. VERIFICACIONES

Para asegurar el correcto funcionamiento de los diferentes micrófonos, se realizaron una serie de comprobaciones.

Primero se comprobó que todos los micrófonos que se emplearían próximamente en el ensayo conservaban unos niveles de sensibilidad lo suficientemente próximos a los marcados por fábrica. Para ello, se conectó individualmente cada micrófono al sistema de adquisición de datos y se empleó el programa informático Text Express para poder visualizar los resultados, obteniendo unos niveles de sensibilidad aceptables.

El siguiente paso fue comprobar que los micrófonos estaban correctamente calibrados. Para ello, como se muestra en la Figura 24, se empleó un calibrador. Instrumento mediante el cual se emite un tono puro a una frecuencia de 1000 Hz, por tanto, la señal recogida por el micrófono que indicaría el correcto calibrado del mismo debe ser una onda senoidal de periodo 0,001 segundos.



Figura 24: Calibración de los micrófonos

Las gráficas obtenidas correspondientes a la señal de salida recogida por los diferentes micrófonos se corresponden con la gráfica mostrada en la Figura 25. Por tanto, se puede afirmar que todos los micrófonos están correctamente calibrados y listos para su uso.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

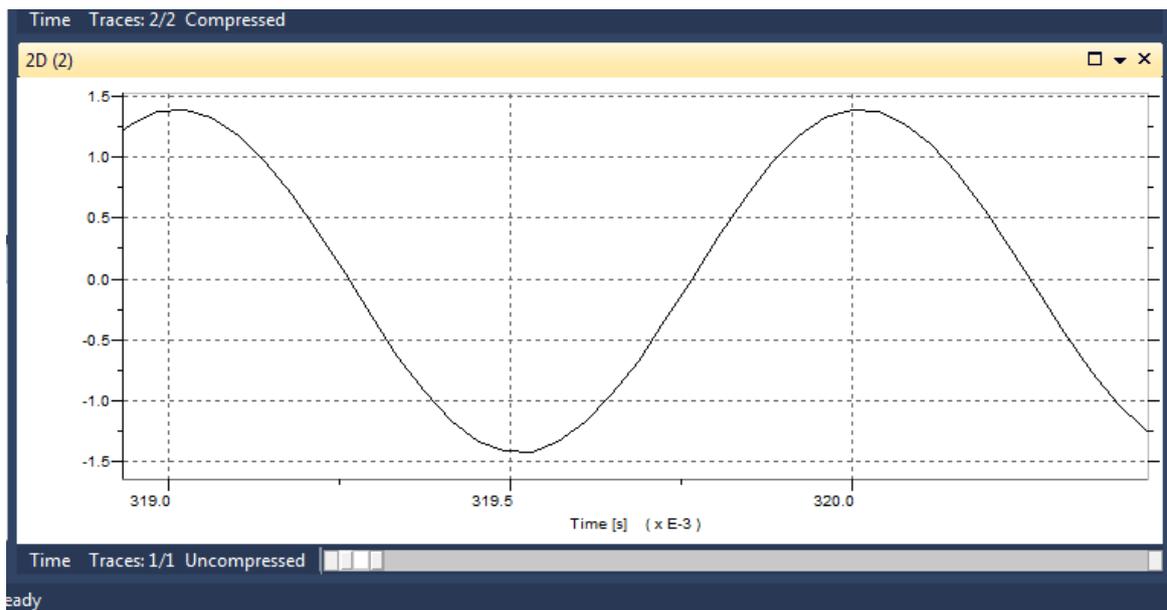


Figura 25: Grafica de la señal recibida por el micrófono durante el proceso de calibración

Por último, debido a que durante el ensayo se emplearán diferentes modelos de micrófono, es necesario comprobar que todos están en fase. Para ello, se mide simultáneamente con todos los micrófonos un tono puro de 1000 Hz, obteniendo el siguiente resultado:

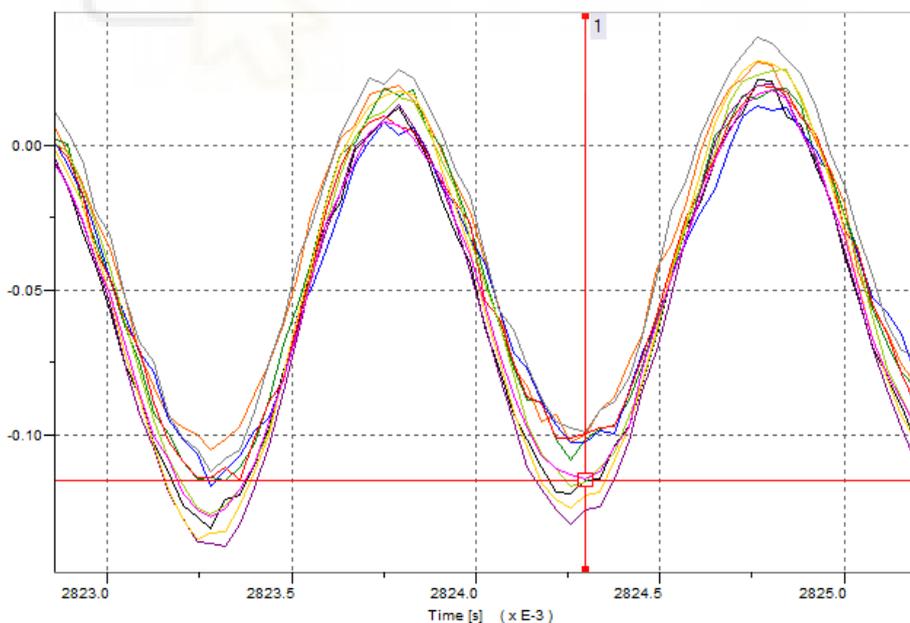


Figura 26: Grafica resultante de la medición simultánea de los micrófonos

La superposición de las gráficas demuestra que todos los micrófonos están en fase.

2.2. ENSAYO

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO DE ENSAYO

El banco de ensayos se encuentra en el interior de un cerramiento con materiales acústicamente absorbentes, el cual cuenta con una única puerta de acceso y dos ventanas para la supervisión del ensayo desde el exterior.

La temperatura a la que se realizaron los ensayos fue de 24°C, la cual se pudo mantener constante durante todo el proceso de medición gracias al sistema de climatización integrado en la sala.

Dado el entorno acústicamente absorbente proporcionado por el cerramiento de la sala de ensayo, se puede considerar un único plano reflectante principal formado por el rodillo metálico del banco, donde se apoyará el neumático y sobre el que rodará simulando la circulación de un turismo por una vía.

El suelo, la rejilla de protección o la estructura del banco también pueden ser considerados como planos reflectantes con menor influencia, lo que hace que la sala de ensayo no pueda ser considerada una cámara anecoica. No obstante, se ha demostrado en [11] que el entorno de ensayo es lo suficientemente favorable para la realización del ensayo A-Drum.

Un indicativo de la idoneidad del entorno de ensayo son los resultados obtenidos por Clar [11] referentes al factor de corrección K2. Este término, tal y como se indica en [19], considera la influencia del sonido reflejado o absorbido sobre el nivel de presión acústica sobre la superficie de medición.

Los valores de K2 obtenidos en [11] durante el proceso de diseño del ensayo A-Drum, realizado en las mismas instalaciones que las del presente ensayo, muestran valores muy por debajo a los 2 dB, el cual es el límite del grado de precisión marcado por la ISO 3744 [19].

Dichos resultados permiten considerar la posibilidad de despreciar el factor de corrección K2 en los cálculos, debido al carácter comparativo de los mismos, así como la escasa influencia de dicho factor sobre ellos. Estando K2 dentro de los valores de desviación típica considerados ($\sigma_r \leq 1,5 \text{ db}$) por el nivel de precisión del método.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO

Con la finalidad de obtener los diferentes niveles presión sonora emitidos por el neumático durante el ensayo de rodadura, se realiza un ensayo tipo Drum, fundamentado en la metodología de ensayo A-Drum desarrollada por Clar [11], miembro del grupo de investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Esta metodología de ensayo se basa en la Norma ISO 3744, sobre la que se hacen pequeñas modificaciones con la finalidad de adaptar lo prescrito en la Norma a las condiciones de ensayo propias, como en el caso de la posición de los micrófonos, explicada más adelante detalladamente.

2.2.2.1. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

Con la finalidad de comprobar en qué grado una reducción del número de micrófonos de ensayo afecta a los resultados obtenidos, se plantea una configuración basada en el ensayo A-Drum.

Para ello se emplearon 10 micrófonos con los cuales se realizaron varias medidas para diferentes velocidades del neumático y sentidos de giro del tambor.

Por un lado, con el tambor girando en sentido horario, se llevaron a cabo 6 medidas de 30 segundos para cada rango de velocidad, el cual abarca desde los 10 km/h hasta los 120 km/h en saltos de 10 km/h, correspondiéndose estas velocidades a la velocidad lineal a la que se desplazaría el neumático en la carretera.

Para el sentido de giro antihorario, se llevaron a cabo 3 medidas de 30 segundos cada una para el rango de velocidades que va desde los 10 km/h a los 120 km/h.

El neumático empleado para el ensayo, correspondiente a un Michelin Primacy 4 de dimensiones 205/55 R16 91V se infló a la presión nominal de 2 bar, con una carga aplicada de 482 daN, correspondiente al 80% del índice de carga según lo indicado en el ensayo A-Drum [11].

2.2.2.2. POSICIÓN DE LOS MICRÓFONOS A-DRUM

La posición de los micrófonos se verá modificada respecto a lo indicado en la ISO 3744 (ver Figura 28).

Partiendo de la distribución marcada por la ISO 3744 para una semiesfera de 1 metro de radio, y tomando el eje x como indicador de la dirección de desplazamiento del neumático si estuviera montado en un vehículo, se rotan todos los micrófonos en sentido antihorario 90° para evitar la mayor contribución de los micrófonos 1 y 6 debido a la directividad del ruido emitido por el neumático al rodar, tal y como se indica en [11]. Quedando la siguiente distribución:

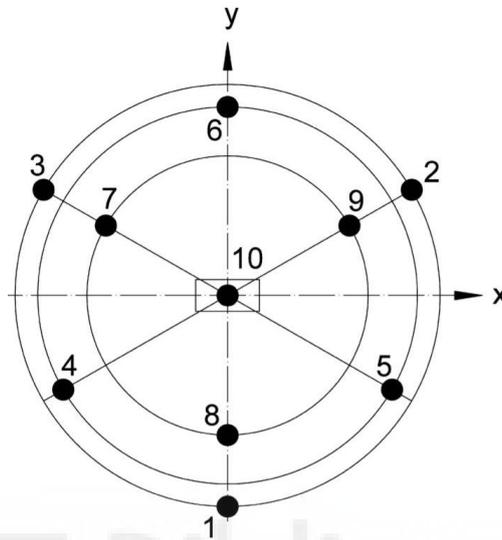


Figura 27: Distribución micrófonos rotados 90° para ensayo A-Drum. Fuente: [11].

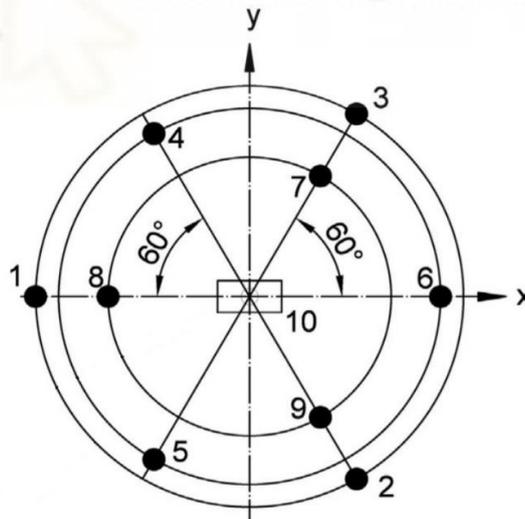


Figura 28: Distribución micrófonos ISO 3744

Con esta rotación se tendrían los micrófonos dispuestos para realizar el ensayo. No obstante, debido a cuestiones constructivas, fue necesario modificar de nuevo la posición de algunos micrófonos.

Tras el montaje del neumático sobre el banco de ensayos, éste queda desplazado 5 cm respecto al eje central del tambor (Figura 29), lo que dejaba fuera del cerramiento varios micrófonos. Por tanto, fue necesario desplazar simétricamente los micrófonos 3, 7, 6, 9 y 2 respecto al eje X del neumático. Quedando finalmente la distribución mostrada a continuación:



Figura 29: Neumático desplazado del eje tras montaje.

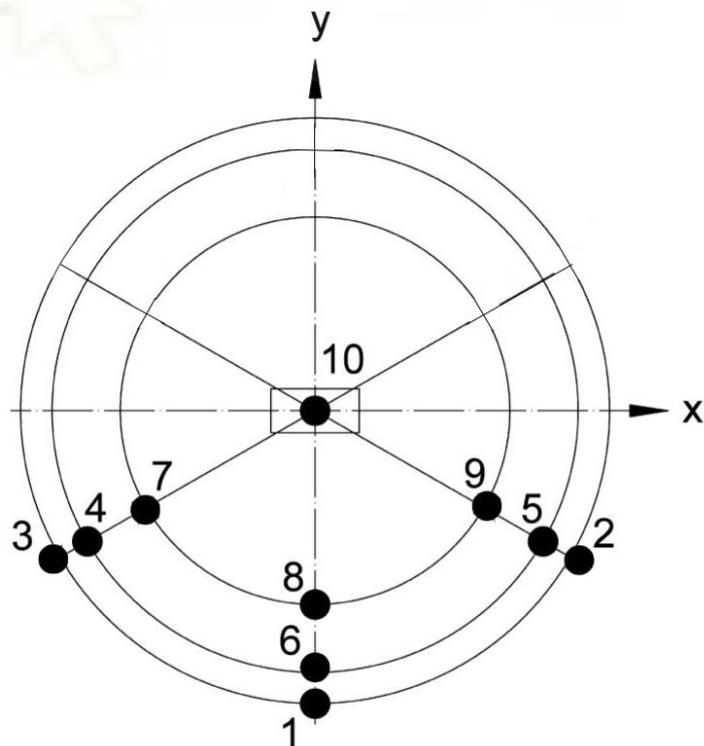


Figura 30: Posiciones definitivas de los micrófonos para el ensayo.

Las coordenadas de la posición final de los diferentes micrófonos, tomando como origen (0,0,0) el centro de la huella de contacto del neumático, correspondientes a la semiesfera de 1 metro de radio, se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 1: Coordenadas en metros de los micrófonos para el ensayo.

Micrófono	X	Y	Z
1	0	-0,99	0,15
2	-0,86	-0,5	0,15
3	0,86	-0,5	0,15
4	0,77	-0,45	0,45
5	-0,77	-0,45	0,45
6	0	-0,89	0,45
7	0,57	-0,33	0,75
8	0	-0,66	0,75
9	-0,57	-0,33	0,75
10	0	0	1

En las siguientes figuras se puede observar el montaje final sobre el banco de ensayos:



Figura 31: Montaje micrófonos sobre banco de ensayo.



Figura 32: montaje micrófonos sobre banco de ensayo con rejilla de protección.

2.2.2.3. POSICIÓN DE LOS MICRÓFONOS A-CPX

Tal y como se indica al inicio del presente trabajo, el objetivo principal es estudiar la viabilidad de una reducción en el número de posiciones de medida en el ensayo A-Drum.

Al trabajar con una fuente sonora simétrica, se considera reducir a la mitad el número de posiciones de micrófono. Por tanto, para analizar el sonido emitido por el neumático al rodar con tan solo 5 micrófono, se toma como base las posiciones de medición empleadas en el ensayo A-CPX, desarrollado por Campillo [9], miembro del grupo de investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

La elección de estas posiciones se ve reforzada por el hecho de que el ensayo A-CPX es un método, al igual que el A-Drum, concebido para medir los niveles de potencia sonora, para lo que también se fundamenta en la ISO 3744, cuyas coordenadas coinciden con las posiciones del ensayo A-Drum (ver Figura 33), lo que facilita considerablemente la labor de ensayo.

La distancia de estos micrófonos respecto al neumático es mayor que en el ensayo CPX tradicional, lo que garantiza que las mediciones tienen lugar en el campo lejano [9].

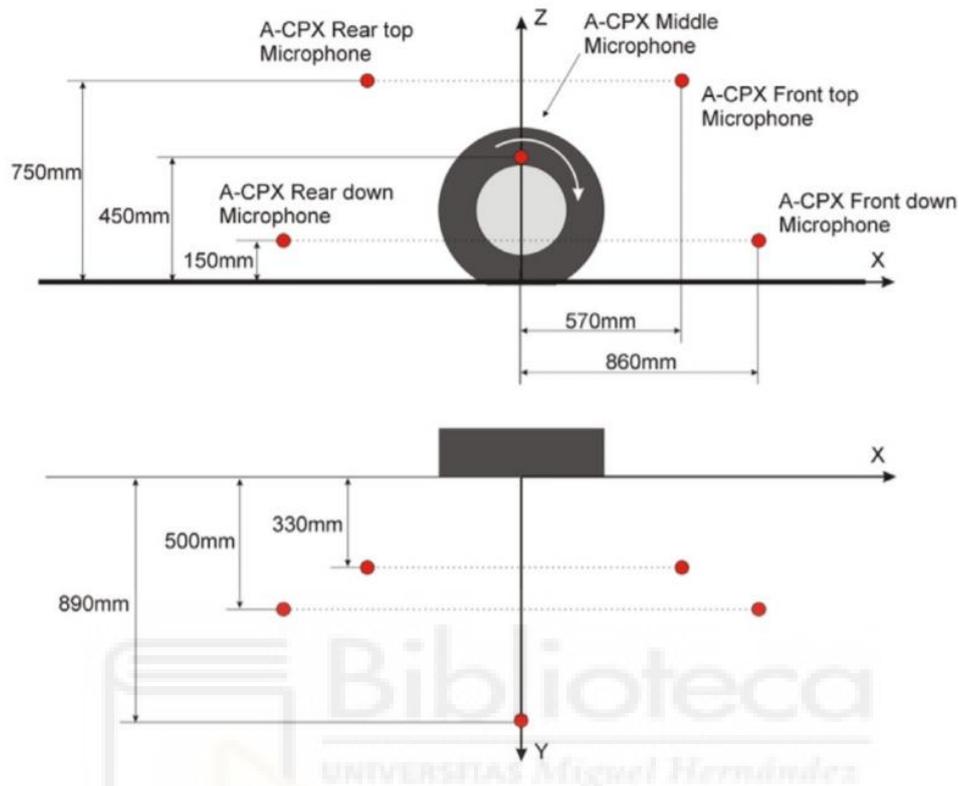


Figura 33: Coordenadas Micrófonos A-CPX. Fuente: [9].

Como se puede apreciar en la Figura 33, las posiciones se corresponden con la de los micrófonos 3, 7, 9, 2 y 6 de nuestro ensayo A-Drum.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado, se presentarán y analizarán los resultados de los diferentes ensayos, así como el procesado de datos llevado a cabo, lo que facilitará la comprensión los resultados obtenidos.

3.1. PROCESADO DE DATOS

Pese a que no se han empleado sonómetros para la realización de las mediciones del presente trabajo, para comprender el procesado de datos llevado a cabo a lo largo del proyecto es fundamental remitirse a su estructura más elemental.

Existe una gran variedad de sonómetros en función de la aplicación requerida, no obstante, todos comparten una estructura común:

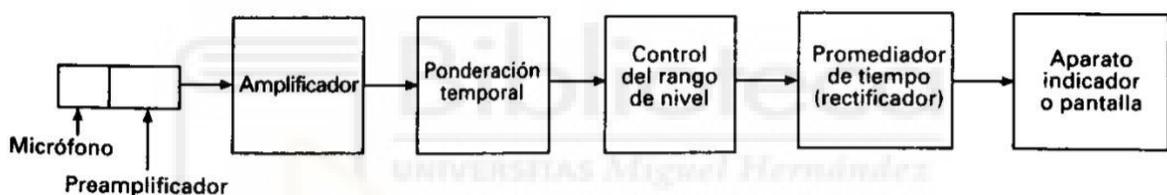


Figura 34: Esquema de un sonómetro. Fuente: [20].

En los ensayos del presente trabajo, la estructura mostrada en la Figura 34 se replicará por diferentes instrumentos.

Los 10 micrófonos serán los encargados de recoger la señal acústica, los cuales se conectarán a los diferentes canales del sistema de adquisición de datos SCADA (LMS Pimento).

LMS Pimento será el encargado de aplicar la ponderación temporal de las diferentes señales, así como un posterior filtrado en tercios de octava.

Por un lado, la ponderación temporal aplicada será la *fast*, cuya constante de tiempo es de 125 ms.

Por otro lado, el filtro en tercios de octava permitirá pasar de una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia, lo que facilitará en gran medida el análisis y los cálculos posteriores.

Los resultados obtenidos tras el procesado de las diferentes señales en Pimiento estarán en Pascales (Pa), los cuales, una vez exportados al software Matlab, se podrán pasar a decibelios y ponderarlos para el posterior cálculo del nivel continuo equivalente L_{pAeq} , a partir del cual se calcularán los niveles de potencia sonora, mediante la siguiente expresión:

$$L_w = \overline{L'_{pf}} + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (1)$$

Donde:

$\overline{L'_{pf}}$ es el nivel de presión acústica superficial.

S es el área de la superficie de medición.

S_0 es la superficie de referencia de $1m^2$

Para el cálculo de la presión acústica superficial se empleará la siguiente expresión:

$$\overline{L'_{pf}} = \overline{L'_p} - K_1 - K_2 \quad (2)$$

Donde:

$\overline{L'_p}$ es el nivel de presión acústica promediado sobre la superficie de medición.

K_1 es el factor de corrección por ruido de fondo.

K_2 es el factor de corrección por entorno acústico, cuya aplicación no es necesaria dada las características del entorno donde se realiza el ensayo.

Para el cálculo del nivel de presión acústica promediado sobre la superficie se procederá de la siguiente manera:

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L'_{pi}} \right] \quad (3)$$

Donde N se corresponde con el número de posiciones de micrófono y L'_{pi} hace referencia al nivel de presión acústica medida en la posición i del micrófono.

Como se puede apreciar en la fórmula, el nivel de presión acústica promedio depende principalmente del nivel de presión acústica media registrada por las diferentes posiciones de medición, por lo que será la ubicación de los micrófonos, y no su cantidad, la que determinará dicho nivel.

Por último, el proceso de cálculo del factor de corrección K_1 llevado a cabo se explicará detalladamente en el apartado a continuación.

3.2. FACTOR DE CORRECCIÓN K_1

El factor de corrección K_1 , según se indica en [19], es un factor de corrección que valora la influencia del ruido de fondo en el nivel de presión acústica superficial. Nunca debe superar los 1,3 dB y viene definido por la siguiente fórmula:

$$K_1 = 10 \cdot \log (1 - 10^{-0,1\Delta L}) \quad (4)$$

Donde ΔL se corresponde con la diferencia entre el nivel de presión acústica promediada sobre la superficie de medición con la fuente de ensayo funcionando y el ruido de fondo.

Para valorar la influencia del ruido de fondo sobre las mediciones de ensayo, se obtuvo el valor de K_1 para el rango de frecuencias donde se concentra la mayor parte de la energía sonora (315 a 5000 Hz) a unas velocidades de giro de 10 km/h y 120 km/h. Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2: Resultados globales del factor K_1 .

10 km/h	
ΔL (dBA)	K_1
1,1	6,5

120 km/h	
ΔL (dBA)	K_1
16,4	0,1

Estos resultados muestran que el factor K_1 , según lo indicado en la ISO 3744 [19], no se aplicará en ninguno de los casos.

Por un lado, a baja velocidad, el valor de ΔL es inferior al mínimo indicado por la norma para poder tomar en consideración la medida, por lo que debe ser descartada.

Por otro lado, a alta velocidad, el valor de ΔL es superior al valor límite a partir del cual no es necesario aplicar el factor de corrección por ruido de fondo.

No obstante, las medidas realizadas en el laboratorio no eran suficientes para poder extrapolar los resultados a todo el rango de velocidades medias, ni para indicar una tendencia del valor del factor de corrección K1.

Por ello, y con la finalidad de concluir si es necesario aplicar el factor K1 al resto de medidas del ensayo, se ha realizado un estudio basado en las mediciones realizadas por Clar [11] para el análisis del ruido de fondo durante el proceso de verificación del método de ensayo A-Drum, el cual se realizó en la misma sala y con la misma máquina de ensayo que en el presente trabajo.

Para ello, primero se procedió con el cálculo por frecuencias de los valores de K1 a partir de los valores de presión sonora de los ensayos de Clar facilitados.

Los resultados de este primer cálculo (ver apartado 6.1. *Valores de K1 por frecuencias* del Anexo) muestran que hay frecuencias en las que las medidas deben descartarse, ya que no cumplen con las condiciones indicadas en la ISO 3744. Esto sucede para frecuencias inferiores a 400 Hz y para las más altas, como es el caso de los 10.000 Hz.

Entre el rango de frecuencias más bajas y altas, cabe destacar el caso aislado de los valores para 5.000 Hz, los cuales tampoco cumplen con las condiciones determinadas por la norma. Esto es debido a la emisión del ruido de alta frecuencia del motor eléctrico que acciona el tambor [11]. No obstante, el impacto de dicha anomalía sobre los valores globales de niveles de presión y potencia sonora es tan escaso que podría considerarse despreciable (ver apartado 6.2. *Influencia sobre medidas de valores a 5000Hz* del Anexo).

Para concluir el análisis, poniendo el foco en las mediciones realizadas por Clar en las que emplea neumáticos con las mismas dimensiones que las del neumático empleado en el ensayo del presente trabajo, se calcula el valor global de los factores de corrección correspondientes a las diferentes velocidades de medición. Obteniendo los siguientes resultados para el rango de frecuencias de interés:

Tabla 3: Valores de K1 Insa Turbo Eco Saver 205 55 R16.

Insa Turbo Eco Saver 205 55 R16	
Velocidad (km/h)	K1
40	0,1
50	0,1
60	0,1
70	0,04
80	0,03
90	0,02
100	0,03
110	0,03
120	0,03

Tabla 4: Valores de K1 Insa Turbo 205 55 R16.

Insa Turbo 205 55 R16	
Velocidad (km/h)	K1
40	0,2
50	0,1
60	0,1
70	0,05
80	0,03
90	0,04
100	0,03
110	0,03
120	0,03

Tabla 5: Valor de K1 Michelin Energy Saver 205 55 R16.

Michelin Energy Saver 205 55 R16	
Velocidad (km/h)	K1
40	0,1
50	0,2
60	0,1
70	0,1
80	0,1
90	0,05
100	0,1
110	-
120	0,1
(-) valor no disponible	

Tabla 6: Valor de K1 Nexen 205 55 R16.

Nexen 205 55 R16	
Velocidad (km/h)	K1
40	0,2
50	0,2
60	0,2
70	0,1
80	0,1
90	0,1
100	0,1
110	-
120	-
(-) valor no disponible	

Los resultados indican que los valores de K1 obtenidos a lo largo del rango de velocidades, son lo suficientemente bajos como para que su influencia frente al valor total de la medición pueda ser considerada despreciable, más siendo un ensayo de Tipo 2 [19], el cual tiene un propio margen de error de 1,5 dB.

Para bajas velocidades, inferiores a 40 km/h, los valores obtenidos de ΔL obligan a desestimar la mayoría de los resultados, por lo que no serán considerados en el presente proyecto.

3.3. RESULTADO ENSAYO A-DRUM

Para poder garantizar un correcto análisis de los de los resultados obtenidos, primero es necesario estudiar el comportamiento de los diferentes micrófonos en el entorno de ensayo, comprobando que no se produzcan reflexiones debidas a la propia estructura de la máquina o interferencias de cualquier otro elemento de la sala.

En las figuras mostradas a continuación se pueden observar los diferentes espectros del neumático a diferentes velocidades obtenidos por los micrófonos durante el ensayo del neumático a una velocidad a diferentes velocidades:

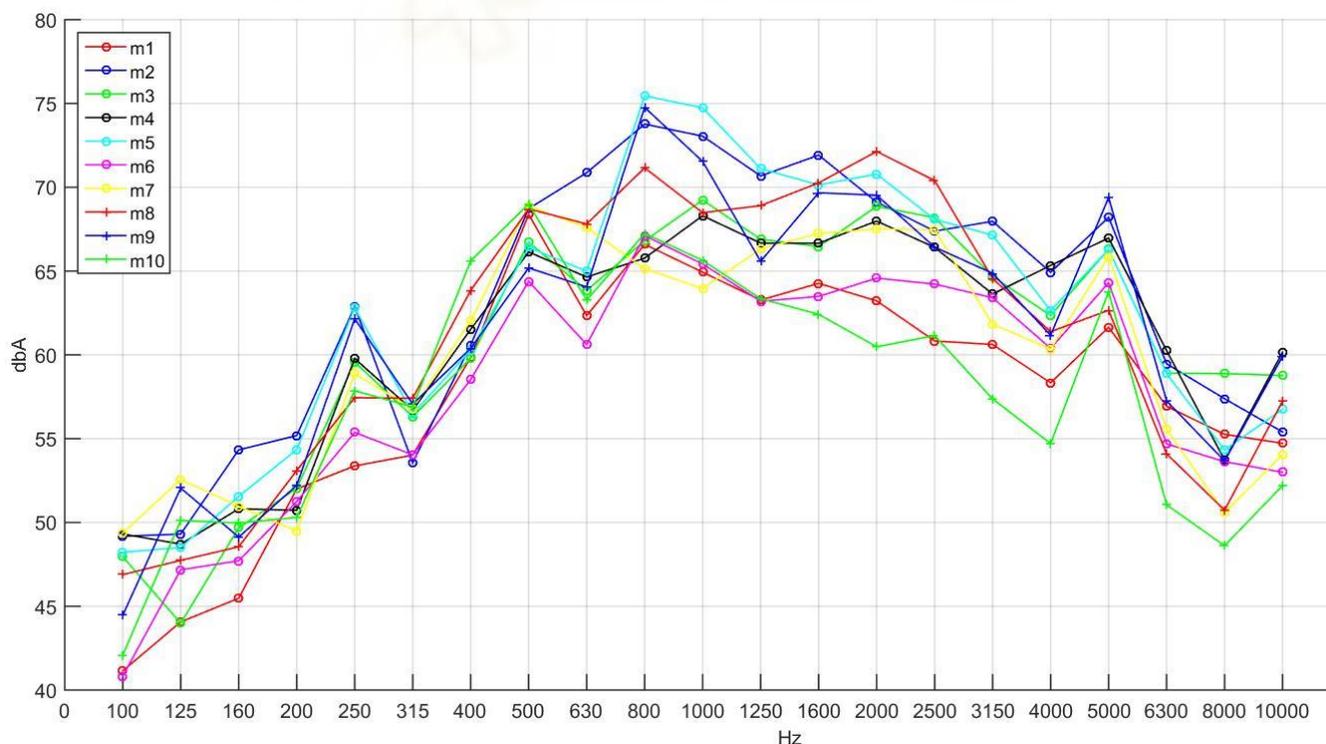


Figura 35: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 40 Km/h

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
 NEUMÁTICOS

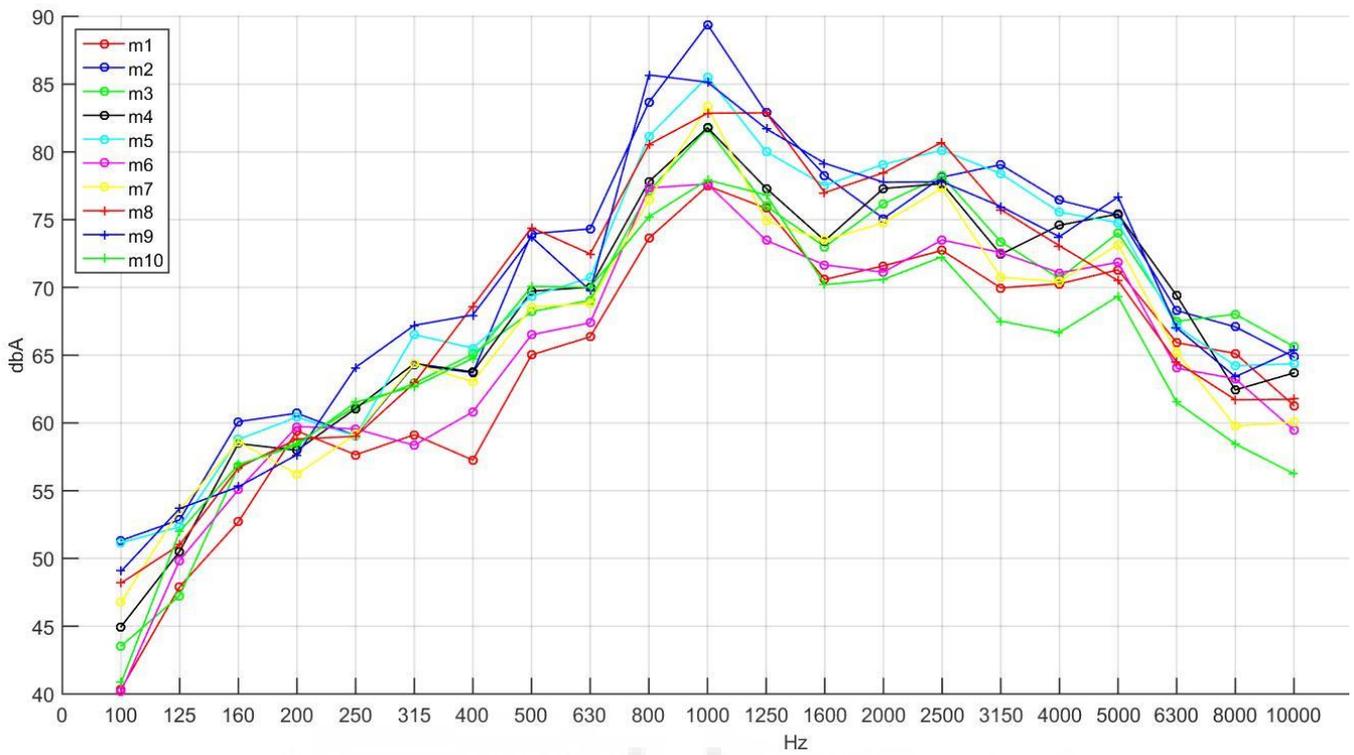


Figura 36: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 80 Km/h.

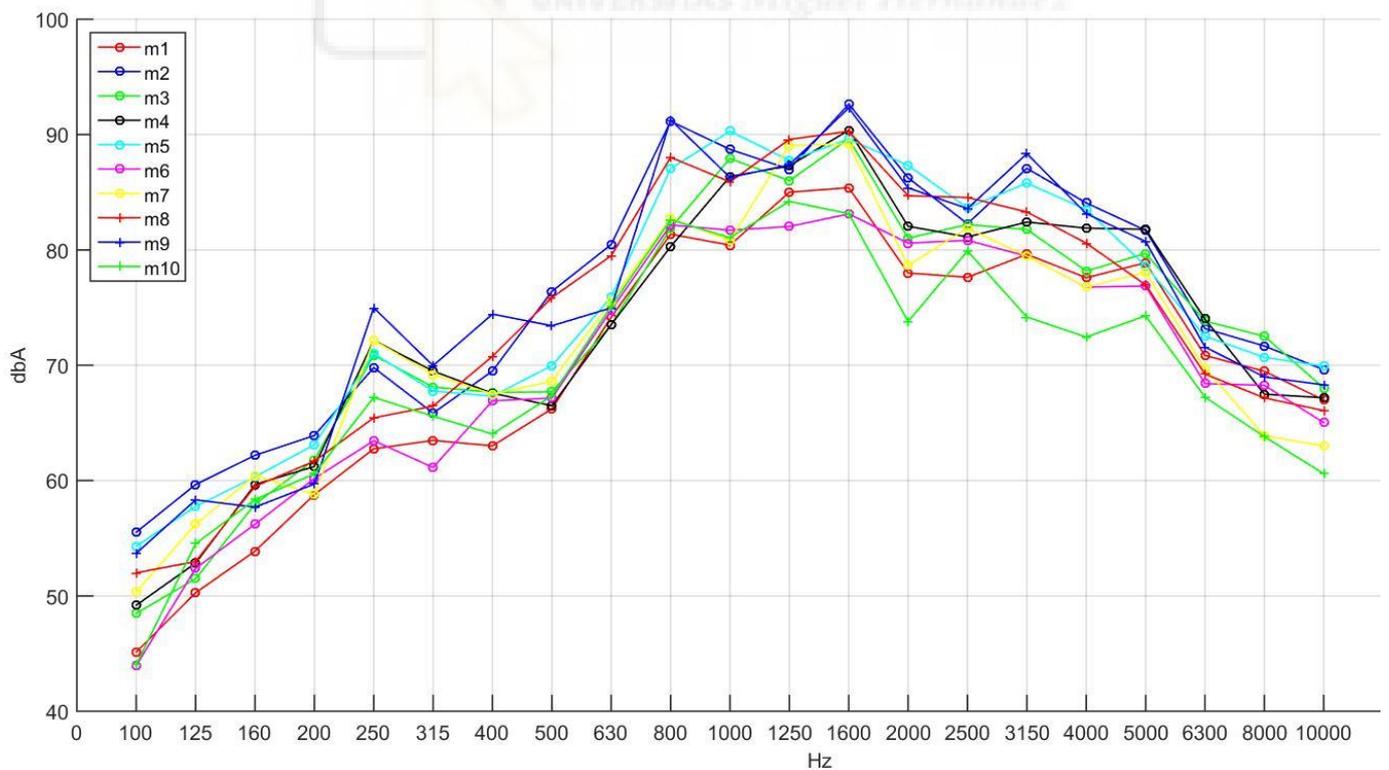


Figura 37: Niveles de presión sonora registrados por los diferentes micrófonos para una velocidad de ensayo lineal de 120 Km/h

Los resultados obtenidos para las diferentes velocidades muestran comportamientos que se ajustan a los espectros habituales del ruido de rodadura, con gran concentración de energía entre las frecuencias centrales y picos sonoros alrededor de los 1000 Hz, incrementándose los niveles sonoros con la velocidad. No obstante, se puede apreciar una anomalía respecto a los espectros sonoros habituales a la frecuencia de 5000 Hz, donde se muestra un pico. Este se acentúa a bajas velocidades y es ocasionado por la emisión de ruido de alta frecuencia del motor eléctrico [11]. Pese a esta anomalía, se puede afirmar que el comportamiento de los micrófonos es estable.

Una vez comprobada la estabilidad de los diferentes micrófonos, se procederá a analizar, tanto los niveles de presión acústica superficial, como los valores de nivel de potencia sonora obtenidos para el neumático ensayado (Michelin Pimacy 4, 205/55 R16 91V).

Por un lado, los niveles de presión acústica superficial serán los que determinen si es viable, de acuerdo con lo especificado en [19], una reducción en el número de posiciones de medición, marcando como límite los 0,5 decibelios de diferencia entre las mediciones del conjunto original y las mediciones del conjunto reducido. En las tablas a continuación se muestran los diferentes resultados obtenidos para los niveles de presión sonora superficial con las 10 posiciones de medida originales del ensayo A-Drum:

Tabla 7: Valores nivel presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava. 10 posiciones de medida.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	47,0	47,6	43,5	43,8	47,4	47,9	49,6	51,3	51,4
125	49,2	49,9	50,4	50,2	51,6	52,7	53,5	53,5	55,7
160	50,4	50,7	53,9	55,9	57,4	57,2	58,1	58,4	59,1
200	52,4	53,3	53,9	55,1	59,0	62,2	61,9	62,4	61,3
250	59,9	56,7	59,6	59,6	60,5	61,8	64,9	67,6	70,5
315	56,1	61,1	61,3	62,9	64,0	63,4	64,9	65,4	67,4
400	61,8	62,4	66,9	67,7	65,0	68,1	67,6	68,9	69,1
500	67,5	70,0	67,1	69,8	71,0	71,2	71,3	71,6	71,7
630	66,0	71,2	72,3	70,3	70,5	73,0	77,2	78,7	76,4
800	71,1	74,0	78,5	80,9	80,5	81,6	83,9	84,1	86,7
1000	70,0	71,0	75,8	81,0	83,9	85,1	83,3	84,3	86,2
1250	67,5	70,6	72,3	71,6	79,4	83,1	86,3	86,2	87,0
1600	68,2	73,3	75,1	75,1	75,5	76,6	83,3	87,2	89,6
2000	68,5	72,8	75,1	76,1	76,1	77,3	80,1	79,3	83,4
2500	66,9	69,8	73,4	73,8	77,7	79,4	80,3	82,5	82,1
3150	64,5	68,4	71,1	73,7	74,9	75,9	79,7	82,1	83,8
4000	62,0	68,3	71,0	72,8	73,1	76,7	78,2	78,3	80,8

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

5000	66,1	68,9	71,1	72,3	73,8	75,2	75,8	78,1	79,3
6300	57,4	60,8	63,1	65,2	66,6	68,4	69,9	70,7	71,6
8000	54,7	58,1	60,6	62,6	64,2	65,7	66,8	67,8	69,2
10000	57,0	59,1	61,0	62,3	63,1	64,1	65,3	66,1	67,2

Tabla 8: Valores nivel presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava para sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	45,6	46,6	46,8	49,5	49,1	49,7	48,7	50,7	51,1
125	47,4	49,3	52,3	50,5	50,9	51,0	53,9	53,9	55,7
160	51,1	51,3	54,8	57,1	57,8	56,6	57,5	59,5	60,2
200	52,7	54,3	54,1	56,3	59,6	63,0	64,2	61,5	61,8
250	59,9	57,5	60,3	58,5	60,5	63,2	66,2	68,2	71,8
315	54,7	60,3	60,2	62,9	61,3	60,8	64,7	68,5	69,1
400	62,3	60,1	65,0	64,8	64,7	66,3	66,0	67,1	68,9
500	69,0	67,9	66,1	67,4	71,6	70,8	69,5	70,6	70,4
630	64,7	70,2	69,9	67,7	69,2	71,3	74,2	76,3	76,2
800	70,9	74,0	78,4	78,7	79,5	80,3	83,1	82,2	84,1
1000	68,2	71,8	76,8	80,3	82,6	83,3	83,3	83,5	85,0
1250	68,1	68,7	72,2	71,6	78,1	84,5	84,7	86,3	86,6
1600	66,4	70,7	73,2	77,0	77,2	77,7	82,9	86,4	88,7
2000	67,2	71,5	72,4	76,7	77,6	78,4	80,7	78,9	82,4
2500	67,4	68,2	73,5	72,7	76,2	78,2	79,3	82,5	82,6
3150	66,6	68,7	70,4	72,5	74,8	74,8	78,3	82,1	84,0
4000	66,4	69,1	71,8	73,1	73,7	76,5	78,7	79,7	81,8
5000	70,2	71,6	75,0	76,0	75,6	78,7	79,5	81,5	84,0
6300	61,6	63,2	66,0	68,7	71,2	72,0	73,9	75,8	77,2
8000	60,5	61,3	63,9	65,5	67,4	69,0	70,3	70,2	73,0
10000	61,8	62,2	64,2	64,8	65,6	66,9	67,4	68,4	69,8

Tabla 9: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. 10 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,3	81,7	84,5	86,5	88,3	90,1	92	93,3	95,1

Tabla 10: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,6	81,1	84,3	86,1	87,8	89,9	91,4	93	94,5

Tabla 11: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango completo de frecuencias. 10 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,4	81,8	84,5	86,6	88,4	90,1	92,1	93,3	95,1

Tabla 12: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro. 10 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,9	81,3	84,5	86,2	88	90	91,6	93,1	94,7

Como se puede observar, los valores recogidos en las tablas muestran los resultados obtenidos para diferentes sentidos de giro del neumático, así como para diferentes rangos de frecuencia. Esto, por un lado, permitirá determinar la influencia del sentido de giro sobre los diferentes niveles de presión superficial, mientras que, por otro lado, se podrá comparar fácilmente la influencia del rango de frecuencias de estudio sobre los resultados.

Los resultados obtenidos serán comparados en el próximo apartado con los niveles de presión acústica superficial obtenidos tras la reducción en el número de posiciones.

También se estudiará cómo afecta esta reducción a los niveles de potencia acústica. En las figuras a continuación se pueden apreciar los valores de los niveles de potencia sonora con ponderación A en bandas de tercio de octava registrados en todo el rango de velocidades, tanto para el sentido de giro habitual del neumático, como para el inverso:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE NEUMÁTICOS

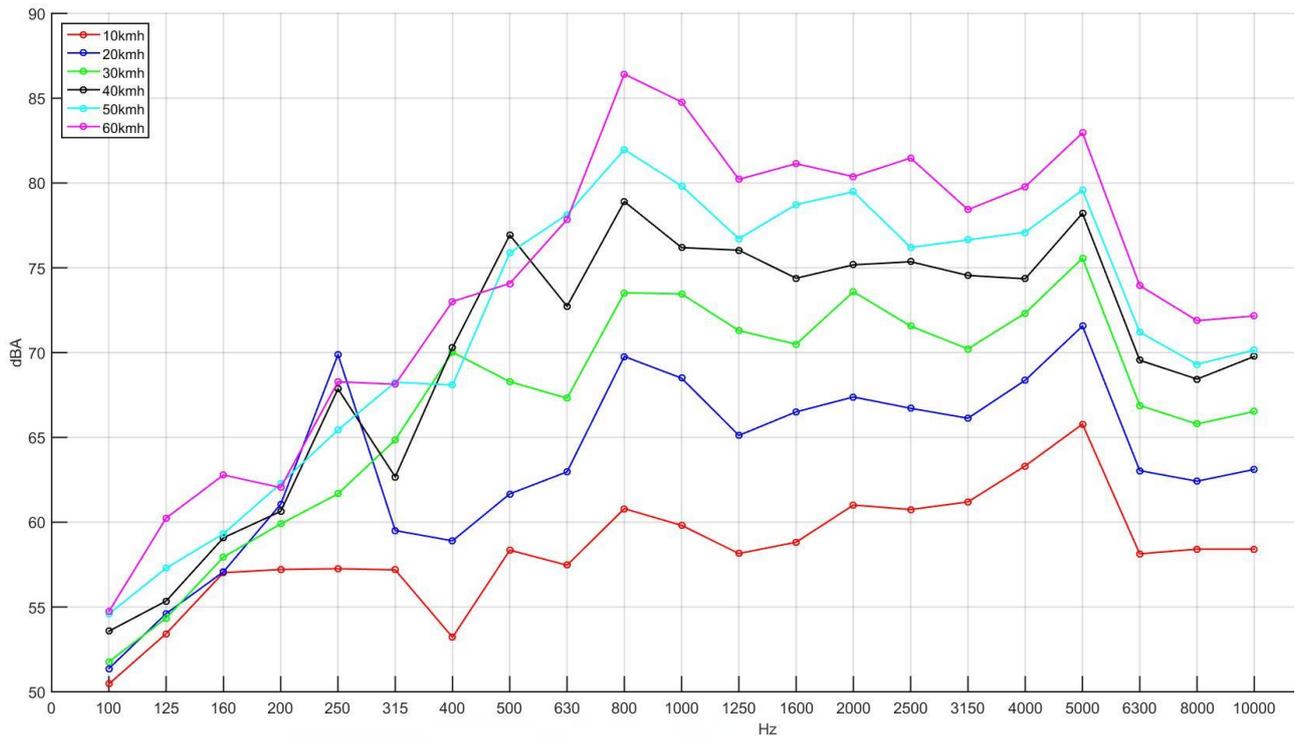


Figura 38: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 km/h. Sentido inverso de giro.

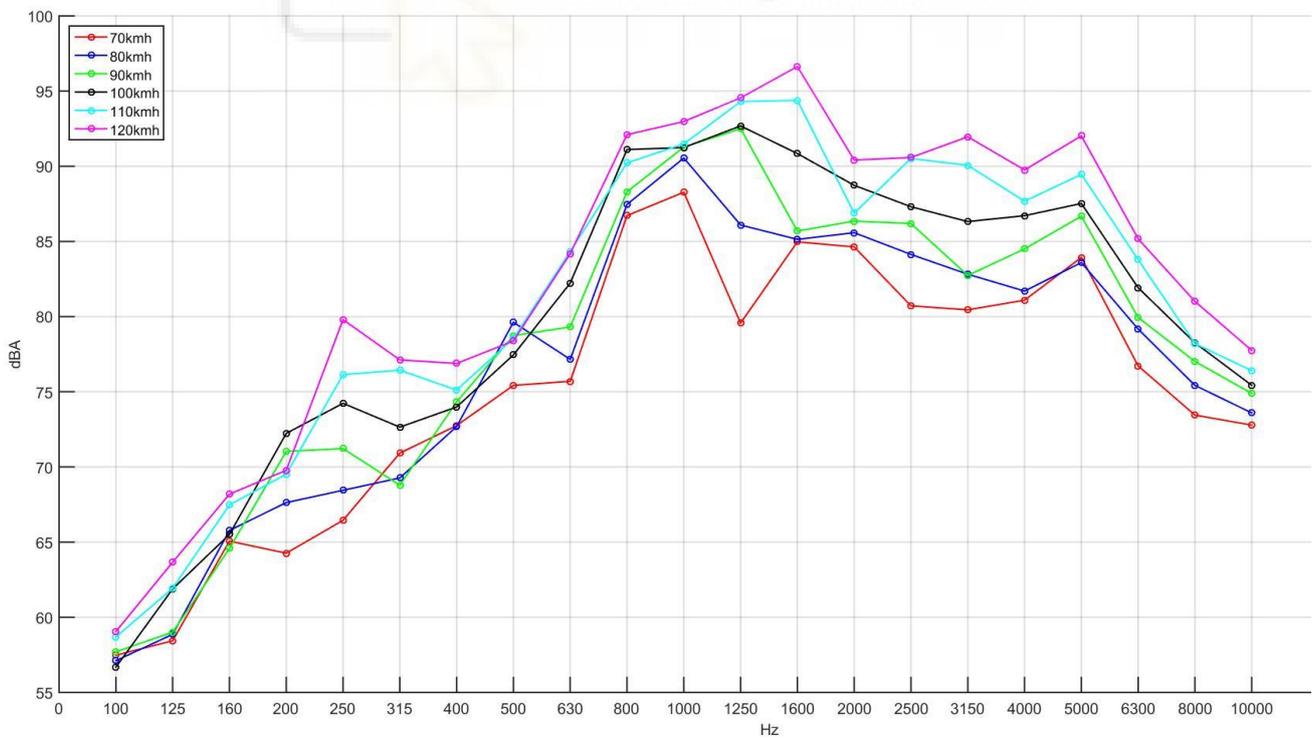


Figura 39: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h. Sentido inverso de giro.

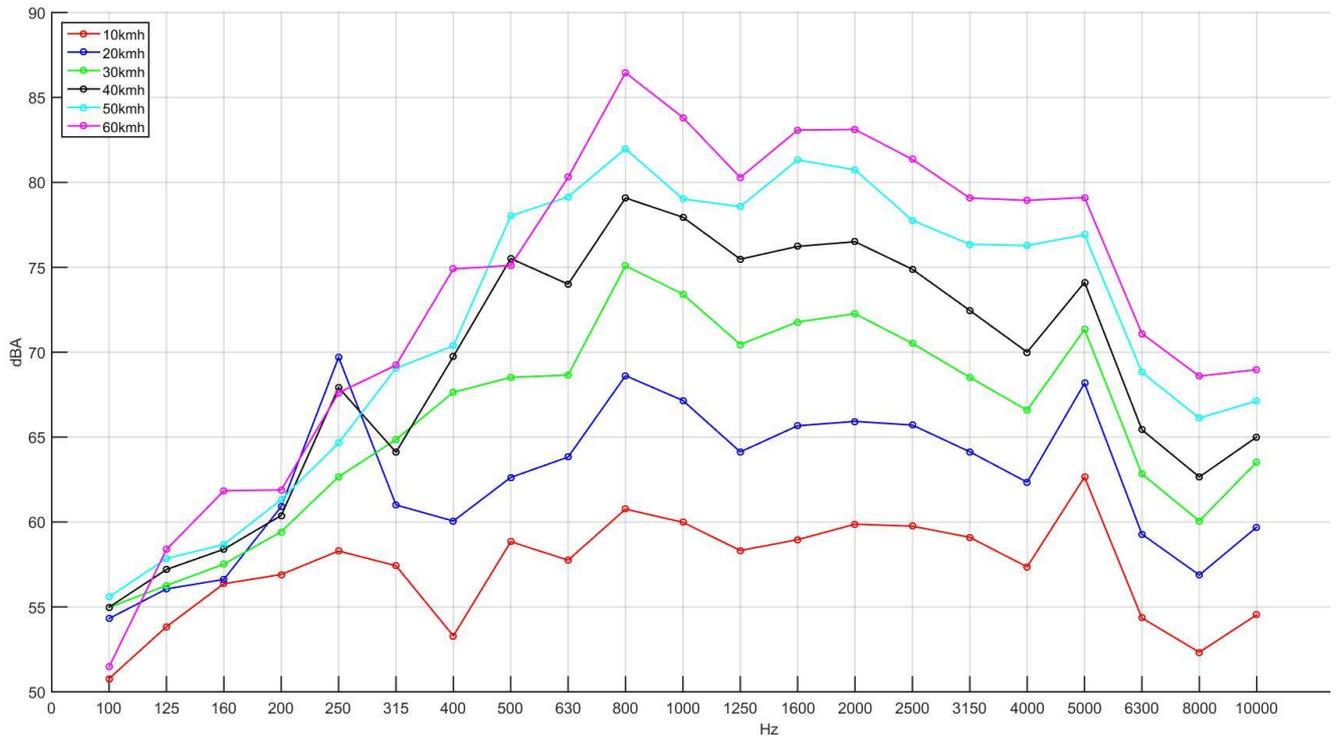


Figura 40: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h.

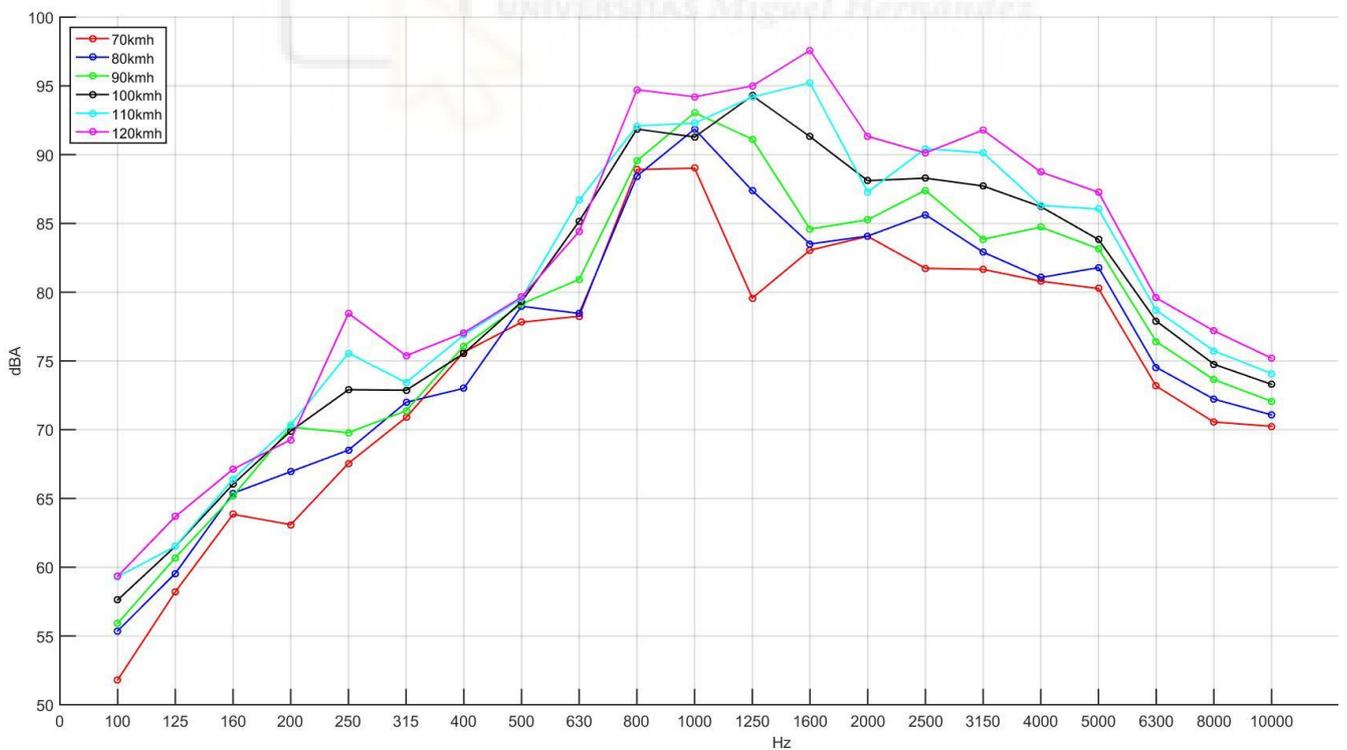


Figura 41: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h.

Los espectros muestran los resultados para velocidades que van de los 10 a los 120 km/h, así como el espectro a lo largo de todo el rango de frecuencias, sin embargo, según indica el análisis del ruido de fondo realizado en apartados anteriores, siguiendo lo indicado en [19], no todas las mediciones deben ser consideradas. Por ello, para analizar los resultados obtenidos se considerarán velocidades a partir de los 40 km/h, incluidos estos, donde el ruido de fondo no afecta a los resultados de las mediciones obtenidas, así como en el rango de frecuencias que va desde los 315 a los 5000 Hz, donde se encuentra la mayor parte de la energía sonora tal y como se indica en [10].

Dentro de estas acotaciones, se puede afirmar que los resultados obtenidos corresponden con los espectros típicos de ruido de rodadura, y son muy similares a los obtenidos por Clar en su investigación [11]. Mostrando unos espectros donde el nivel de potencia sonora aumenta con la velocidad, con picos predominantes alrededor de los 1000 Hz y picos a los 5000 Hz debido al ruido parasitario del motor eléctrico encargado de accionar la máquina.

También se pueden apreciar picos máximos relativos a frecuencias inferiores a los 1000 Hz que se desplazan hacia frecuencias mayores conforme aumenta la velocidad, siendo este un fenómeno descrito por Clar durante su investigación [11], el cual es debido al aumento de la frecuencia de impacto de los tacos de la banda de rodadura con la velocidad.

Tras este primer análisis de los resultados obtenidos, también se puede confirmar la escasa influencia del sentido de giro del neumático sobre los niveles de presión y potencia acústica superficial promedio. Esto se debe, principalmente, al hecho de que las medidas no se realizan en el campo cercano, ni se consideran posiciones de micrófono discretas.

Los gráficos ofrecen una visión global de los espectros objeto de estudio, sin embargo, para comparar datos de forma precisa, es conveniente conocer el valor numérico exacto. En las siguientes tablas se recogen los valores en dB(A) del nivel de potencia sonora en función de la velocidad tanto en bandas de frecuencia como en valores globales:

Tabla 13: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	55,0	55,6	51,5	51,8	55,4	55,9	57,6	59,3	59,3
125	57,2	57,9	58,4	58,2	59,6	60,7	61,5	61,5	63,7
160	58,4	58,7	61,8	63,8	65,4	65,2	66,0	66,4	67,1
200	60,4	61,3	61,9	63,1	66,9	70,2	69,9	70,4	69,3
250	67,9	64,6	67,6	67,6	68,5	69,8	72,9	75,6	78,5
315	64,1	69,1	69,2	70,9	72,0	71,4	72,9	73,4	75,4

400	69,7	70,4	74,9	75,6	73,0	76,1	75,5	76,9	77,0
500	75,5	78,0	75,1	77,8	79,0	79,1	79,3	79,5	79,6
630	74,0	79,2	80,3	78,3	78,5	80,9	85,2	86,7	84,4
800	79,1	82,0	86,5	88,9	88,4	89,6	91,9	92,1	94,7
1000	77,9	79,0	83,8	89,0	91,9	93,1	91,3	92,3	94,2
1250	75,5	78,6	80,3	79,6	87,4	91,1	94,3	94,2	95,0
1600	76,2	81,3	83,1	83,1	83,5	84,6	91,3	95,2	97,6
2000	76,5	80,7	83,1	84,1	84,1	85,3	88,1	87,3	91,3
2500	74,9	77,8	81,4	81,7	85,6	87,4	88,3	90,4	90,1
3150	72,5	76,4	79,1	81,7	82,9	83,8	87,7	90,1	91,8
4000	70,0	76,3	78,9	80,8	81,1	84,7	86,2	86,3	88,7
5000	74,1	76,9	79,1	80,3	81,8	83,2	83,8	86,0	87,3
6300	65,4	68,8	71,1	73,2	74,5	76,4	77,9	78,7	79,6
8000	62,7	66,1	68,6	70,6	72,2	73,6	74,8	75,7	77,2
10000	65,0	67,1	69,0	70,3	71,1	72,1	73,3	74,1	75,2

Tabla 14: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para sentido inverso.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	53,6	54,6	54,7	57,5	57,1	57,7	56,7	58,7	59,0
125	55,4	57,3	60,2	58,4	58,9	59,0	61,9	61,9	63,7
160	59,1	59,3	62,8	65,1	65,8	64,6	65,5	67,5	68,2
200	60,6	62,3	62,0	64,3	67,6	71,0	72,2	69,5	69,8
250	67,9	65,4	68,3	66,5	68,4	71,2	74,2	76,1	79,8
315	62,7	68,3	68,1	70,9	69,3	68,8	72,6	76,4	77,1
400	70,3	68,1	73,0	72,7	72,7	74,3	74,0	75,1	76,9
500	76,9	75,9	74,1	75,4	79,6	78,7	77,5	78,5	78,4
630	72,7	78,1	77,8	75,7	77,2	79,3	82,2	84,3	84,2
800	78,9	82,0	86,4	86,7	87,5	88,3	91,1	90,2	92,1
1000	76,2	79,8	84,8	88,3	90,5	91,3	91,2	91,5	93,0
1250	76,0	76,7	80,2	79,6	86,1	92,5	92,7	94,3	94,6
1600	74,4	78,7	81,1	85,0	85,1	85,7	90,8	94,4	96,6
2000	75,2	79,5	80,4	84,6	85,6	86,4	88,7	86,9	90,4
2500	75,4	76,2	81,5	80,7	84,1	86,2	87,3	90,5	90,6
3150	74,5	76,6	78,4	80,4	82,8	82,7	86,3	90,1	92,0
4000	74,4	77,1	79,8	81,1	81,7	84,5	86,7	87,7	89,8
5000	78,2	79,6	83,0	83,9	83,6	86,7	87,5	89,5	92,0
6300	69,5	71,2	74,0	76,7	79,2	79,9	81,9	83,8	85,2
8000	68,4	69,3	71,9	73,4	75,4	77,0	78,3	78,2	81,0
10000	69,8	70,1	72,2	72,8	73,6	74,9	75,4	76,4	77,8

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

Tabla 15: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,3	89,7	92,4	94,5	96,3	98,1	100	101,3	103

Tabla 16: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,6	89,1	92,3	94,1	95,8	97,9	99,4	100,9	102,5

Tabla 17: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango completo de frecuencias.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,4	89,7	92,5	94,6	96,8	98,1	100	101,3	103,1

Tabla 18: Valores globales nivel de potencia sonora dB(A) para rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,9	89,3	92,5	94,2	96	98	100	101	102,7

Por último, en la literatura referente al estudio del ruido de rodadura es habitual encontrar los niveles de ruido de rodadura modelizados en función del logaritmo de la velocidad mediante la siguiente expresión:

$$L = A + B \cdot \log(v) \quad (5)$$

Donde v hace referencia a la velocidad del vehículo y A y B hacen referencia a dos coeficientes que definen la ecuación.

Estos coeficientes varían en función del ensayo. Para un ensayo CPX en pista como en [21] se obtuvieron valores de A y B que iban de los 21,9 a los 27,9 respectivamente o de los 32,9 a los 39,9. En [11], en un ensayo tipo Drum se obtuvieron valores que iban de los 22,2 a los 17,8 o de los 9,1 a los 20,5. Por tanto, se puede afirmar que los valores de los coeficientes A y B toman habitualmente valores positivos y de escasas decenas.

Los valores obtenidos de A y B se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 19: Coeficientes A y B.

	A	B
Lw Global (sentido giro normal)	38,5	30,6
Lw Global de 315 a 5000 Hz (sentido giro normal)	36,5	31,5
Lw Global (sentido inverso)	42,3	28,4
Lw Global de 315 a 5000 Hz, sentido inverso)	40,5	29,3

Como se puede observar, los diferentes coeficientes están dentro de los resultados habitualmente mostrados en la literatura. A partir de ellos, se conforman las diferentes ecuaciones que definen el trazado de la regresión logarítmica que mejor se ajusta a cada situación de análisis. Dando lugar a las siguientes gráficas:

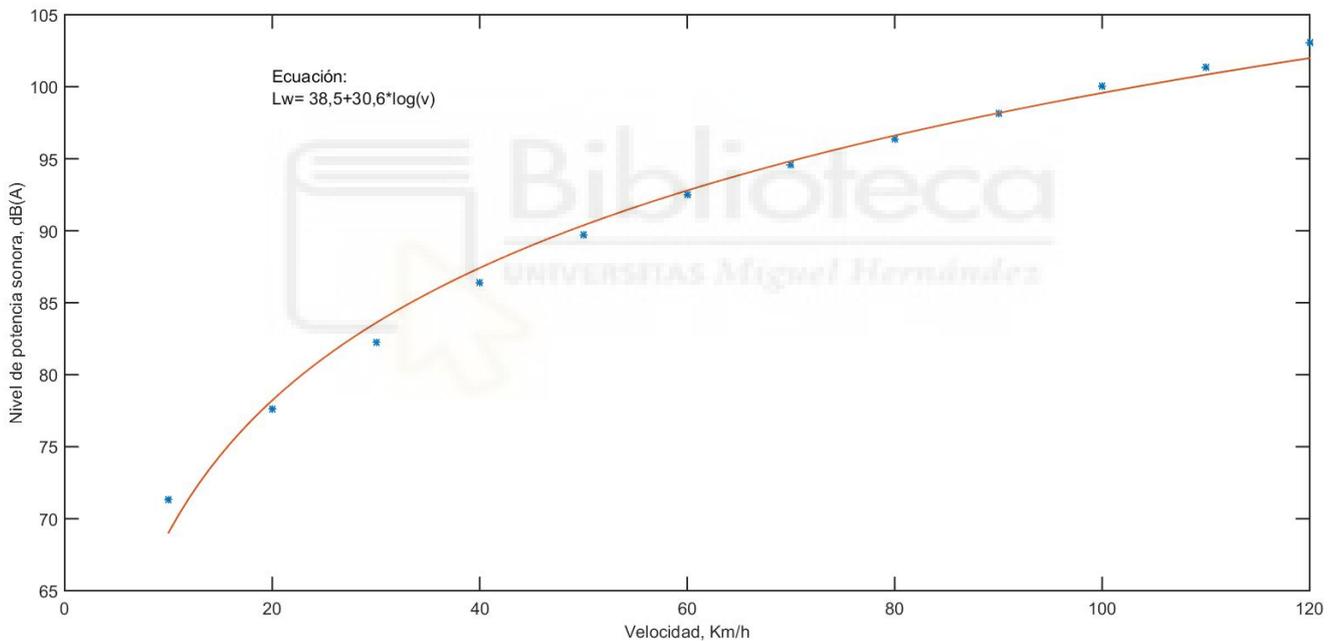


Figura 42: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
 NEUMÁTICOS

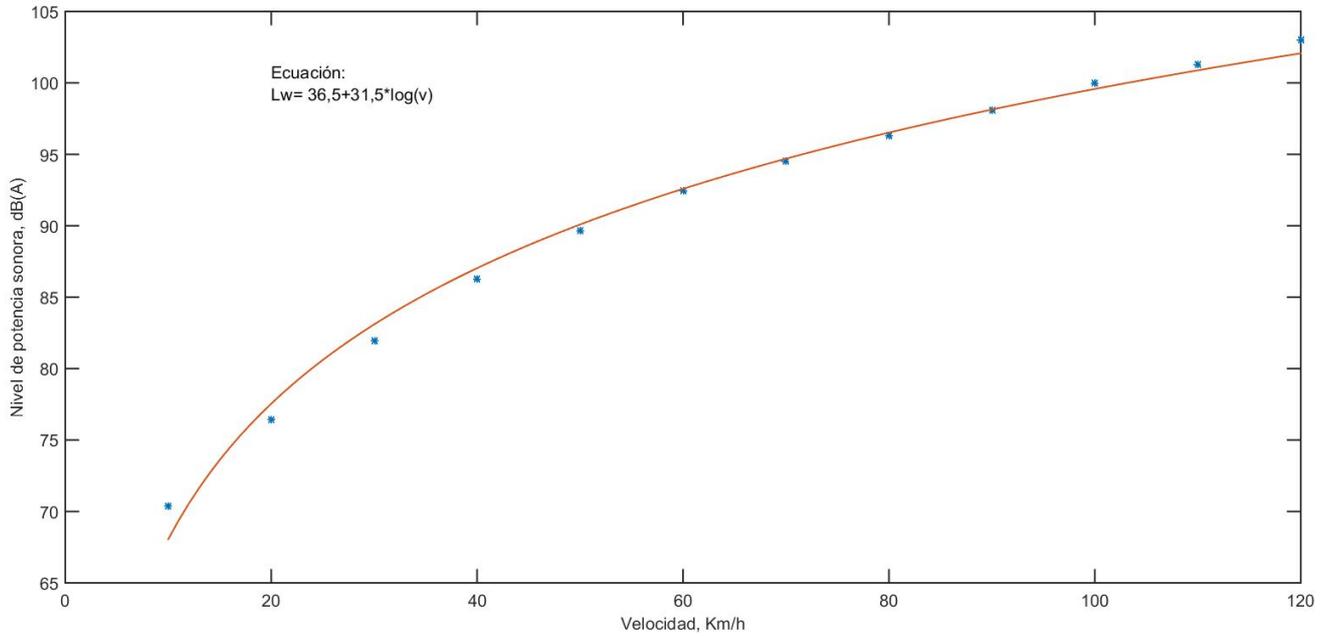


Figura 43: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz.

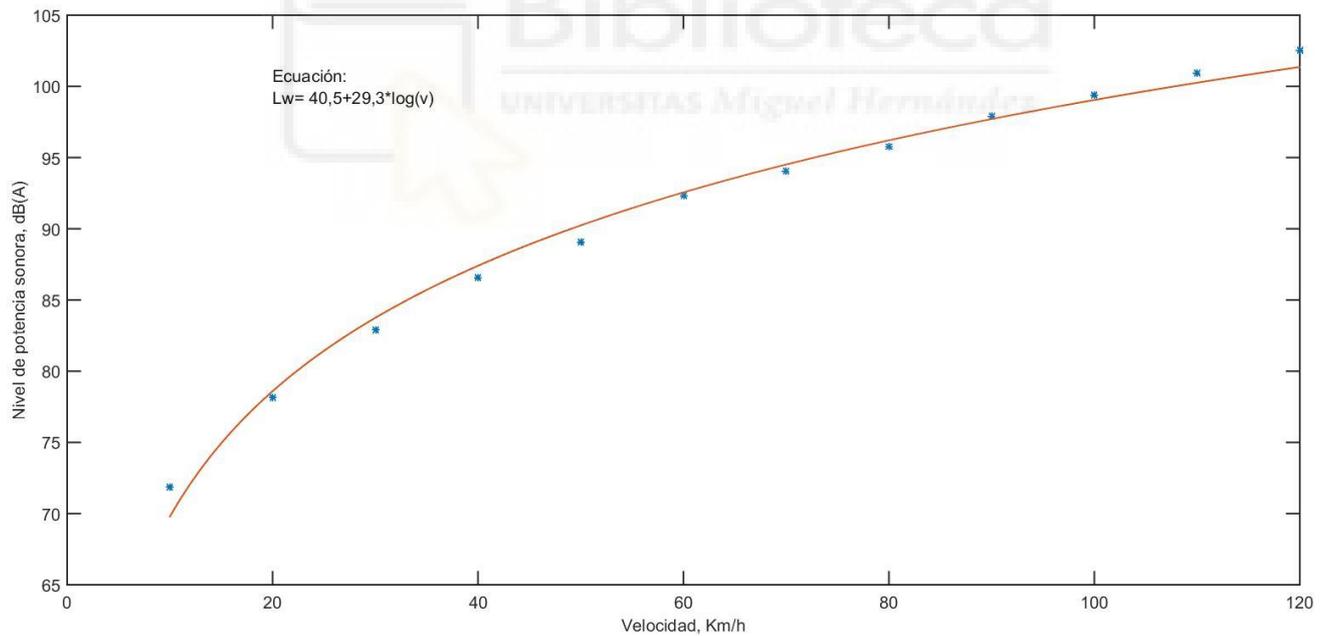


Figura 44: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de los 315 a 5000 Hz. Sentido inverso de giro.

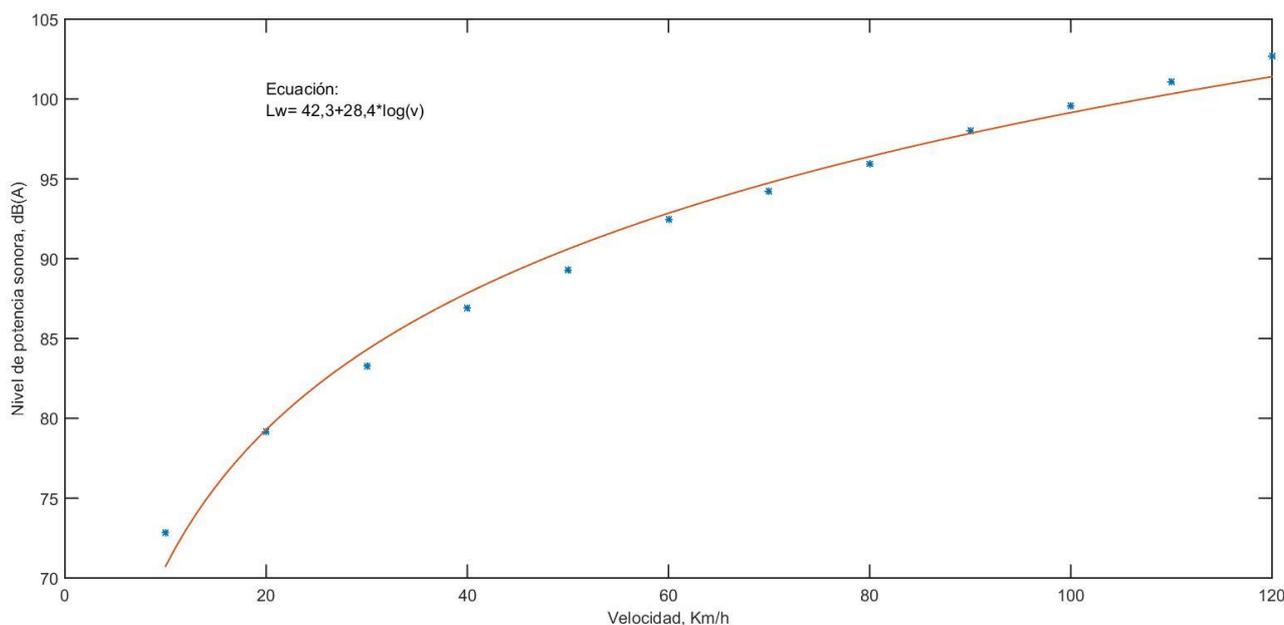


Figura 45: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro.

Todo lo visto en este apartado confirma la coherencia de los resultados con el tipo de ensayo realizado, estando, por tanto, en condiciones de ser comparados con los resultados obtenidos de las mediciones en las posiciones A-CPX.

3.4. RESULTADO POSICIONES A-CPX

Como se ha indicado en el apartado anterior, para que una reducción en el número de posiciones de medición sea viable, es fundamental que la diferencia entre los valores de presión acústica superficial para las diferentes configuraciones de las posiciones de medición no supere los 0,5 decibelios indicados en [19]. En el apartado anterior ya se calcularon los valores tanto de presión acústica superficial, como los niveles de potencia acústica para las 10 posiciones de medición correspondientes al ensayo A-Drum. A lo largo del presente apartado se mostrarán y compararán los resultados obtenidos tras reducir a 5 el número de posiciones medición.

En las tablas a continuación se mostrarán los valores obtenidos, por frecuencias y globales, de los niveles de presión sonora superficial promedio para las diferentes velocidades de ensayo cuando se consideran 5 micrófonos para la medición:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

Tabla 20: Valores de nivel de presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava.
5 posiciones de medida.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	47,4	48,0	43,5	44,4	47,7	48,7	50,7	52,3	52,0
125	50,0	50,7	51,1	50,7	52,1	53,6	54,6	54,7	56,7
160	51,0	51,2	54,3	56,0	57,6	57,3	58,3	59,0	59,4
200	52,4	53,4	54,1	55,2	58,8	62,4	62,0	62,6	61,3
250	60,5	57,2	60,2	60,0	61,1	62,1	65,9	68,5	71,6
315	55,8	61,3	61,0	62,8	64,3	63,6	65,0	65,3	67,8
400	60,4	62,6	67,2	68,7	64,8	68,8	68,5	70,2	70,3
500	67,1	69,7	67,8	70,3	71,2	71,6	71,6	72,1	72,3
630	66,8	71,2	72,0	70,3	70,6	73,2	77,6	78,9	76,7
800	71,3	74,7	79,1	81,5	81,8	82,4	85,0	84,5	88,0
1000	69,9	70,9	76,2	82,2	85,1	85,4	83,7	84,5	86,1
1250	67,3	69,9	72,1	71,8	79,4	83,0	86,1	85,9	86,8
1600	68,7	73,5	75,6	75,2	76,2	77,2	84,5	88,4	90,4
2000	68,2	72,7	74,9	76,1	75,5	77,6	79,7	79,1	83,3
2500	66,9	69,8	73,8	73,4	77,3	79,3	80,2	81,7	82,2
3150	65,0	68,6	71,4	74,1	75,4	75,3	79,7	82,9	84,8
4000	62,2	68,6	71,2	73,0	73,1	77,0	78,2	78,5	81,0
5000	67,2	69,7	71,7	73,2	74,5	75,9	76,7	78,7	79,7
6300	57,6	60,9	63,1	65,3	66,7	68,3	69,8	71,0	71,8
8000	55,8	59,3	61,7	63,5	65,2	66,7	67,9	68,6	70,0
10000	57,0	59,0	61,4	63,1	63,8	64,8	65,8	66,3	67,4

Tabla 21: Valores de nivel de presión acústica superficial dB(A) en bandas de 1/3 de octava.
Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	45,6	46,3	47,0	49,6	49,5	50,0	48,9	51,6	52,3
125	47,7	49,4	52,2	50,4	50,8	50,9	53,9	54,1	55,7
160	51,3	51,5	54,7	56,8	57,4	56,7	57,5	59,3	60,0
200	52,7	54,4	54,0	56,4	59,9	63,6	65,0	62,3	62,4
250	60,2	58,7	61,2	59,4	60,9	63,9	67,5	69,5	72,8
315	54,5	60,5	60,0	63,1	61,7	61,2	64,8	68,5	69,4
400	62,2	60,2	65,5	65,3	65,0	67,2	66,5	68,4	69,7
500	68,9	68,2	66,6	67,7	72,4	71,8	70,5	71,6	71,0
630	65,6	70,6	70,4	68,0	70,3	72,0	75,1	77,4	76,9
800	71,4	74,8	79,4	79,4	80,2	81,1	83,8	82,5	84,8
1000	68,2	72,3	77,5	80,0	82,0	83,5	83,6	83,5	84,7
1250	68,4	68,3	72,1	71,5	78,1	83,5	84,7	85,6	86,8
1600	66,7	71,0	73,6	77,3	77,7	78,4	83,2	87,4	89,5
2000	67,2	71,1	72,4	76,3	77,3	78,5	80,7	78,6	82,5

2500	67,4	68,3	73,6	72,9	76,4	78,8	79,6	82,8	82,6
3150	66,9	69,2	70,8	73,2	75,3	75,4	78,7	82,5	84,8
4000	66,5	69,4	72,0	73,5	73,7	77,3	78,9	80,2	81,9
5000	71,1	72,2	75,9	76,5	76,6	79,8	80,1	82,5	84,9
6300	61,6	63,2	65,9	68,8	71,4	72,4	73,9	76,1	77,4
8000	61,1	61,9	64,4	66,0	68,2	69,7	71,0	71,0	73,7
10000	62,8	62,4	65,0	65,2	66,2	67,3	68,0	69,3	70,4

Tabla 22: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. 5 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,4	81,8	84,8	87,1	89,1	90,3	92,4	93,7	95,6

Tabla 23: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para rango de frecuencias de los 315 a los 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,9	81,5	84,9	86,3	87,9	90,1	91,7	93,3	95

Tabla 24 Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para todo el rango de frecuencias. 5 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
78,6	81,9	84,9	87,2	89,1	90,4	92,5	93,7	95,6

Tabla 25: Valores globales nivel de presión acústica superficial dB(A) para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro. 5 posiciones de medida.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
79,3	81,7	85,1	86,4	88,1	90,2	91,9	93,4	95,2

Una vez presentados los diferentes valores de presión acústica superficial, se procederá con el análisis de la desviación entre resultados para las diferentes configuraciones de medición.

Los gráficos a continuación muestran a simple vista la diferencia en los niveles de presión sonora superficial promedio registrados para diferentes velocidades representativas y en ambos sentidos de giro:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
 NEUMÁTICOS

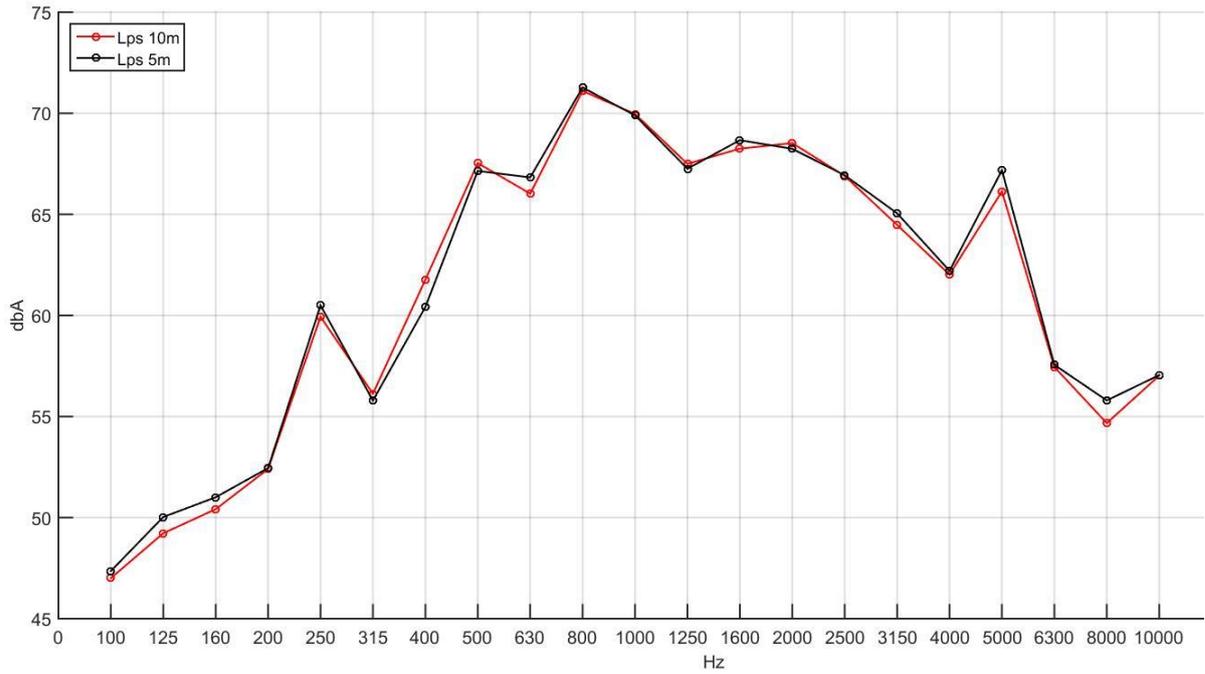


Figura 46: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 40 km/h.

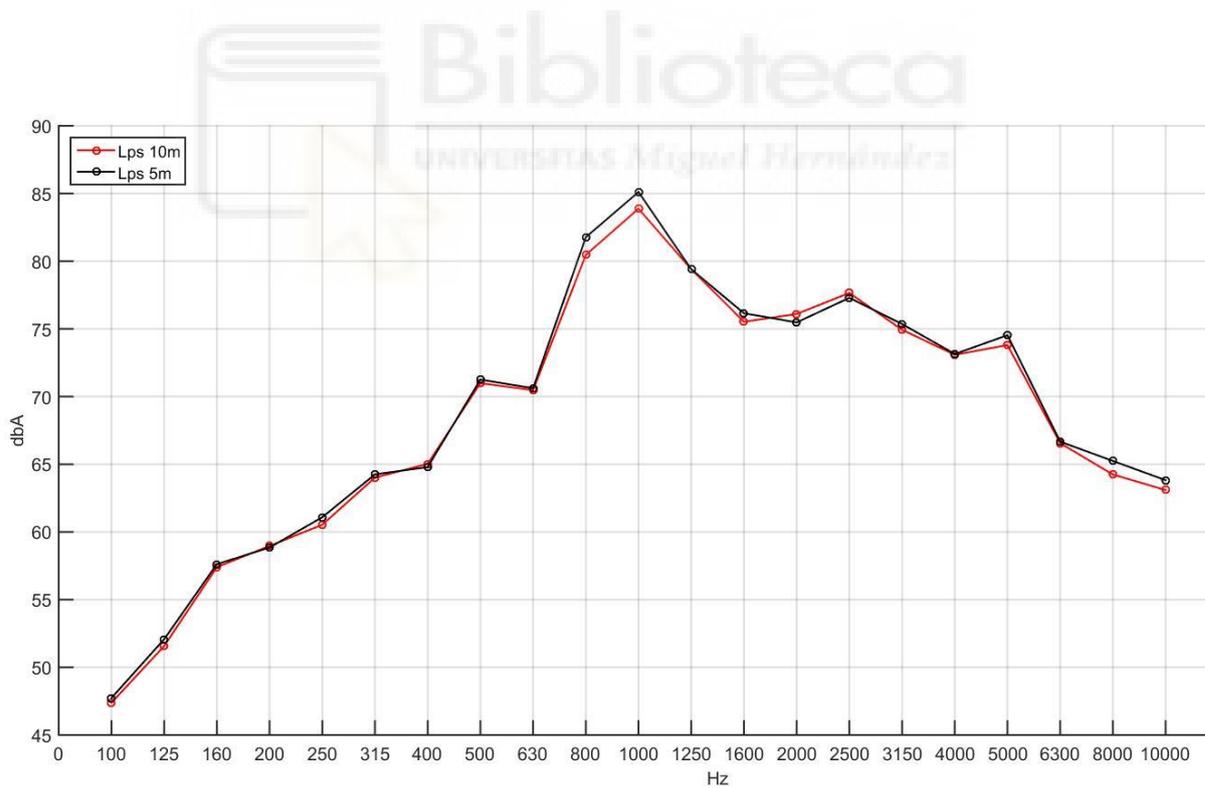


Figura 47: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 80 km/h.

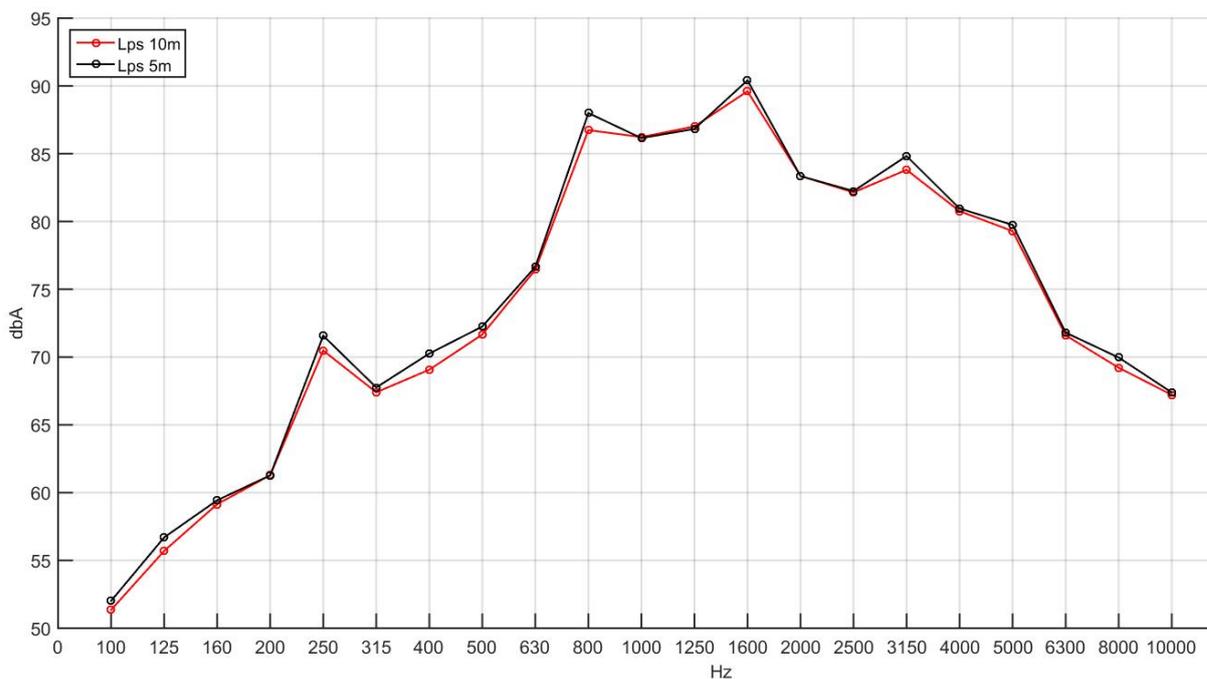


Figura 48: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 120 km/h.

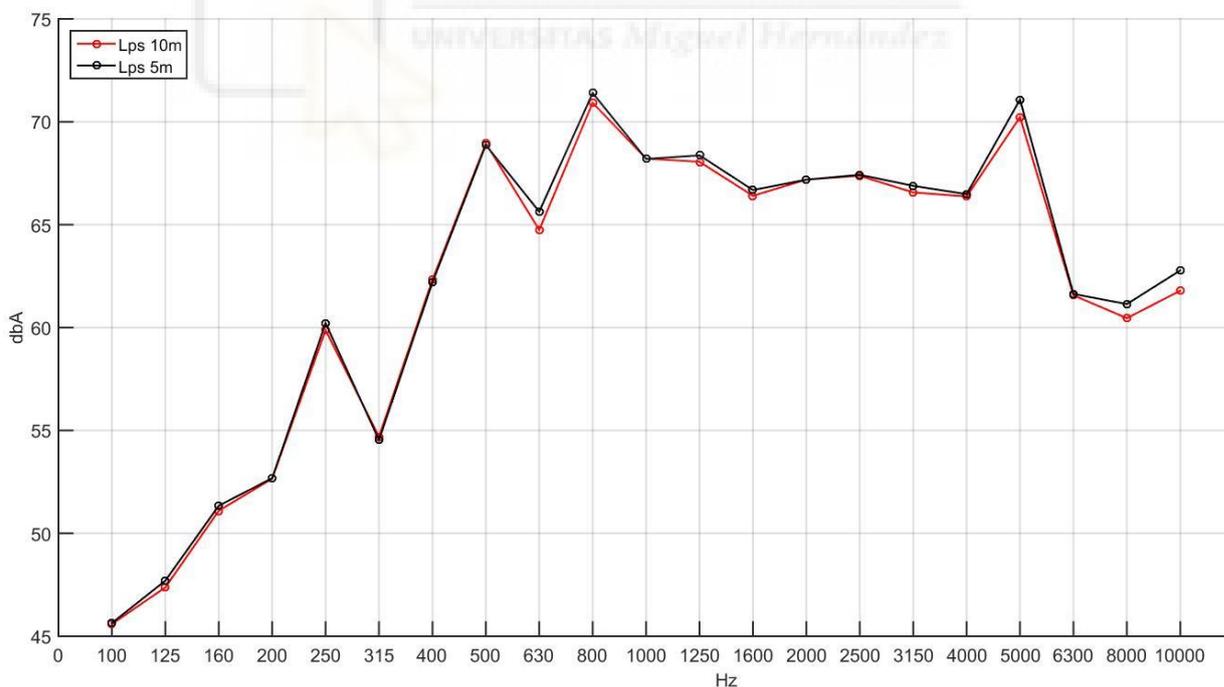


Figura 49: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 40 km/h. Sentido inverso de giro.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
 SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
 NEUMÁTICOS

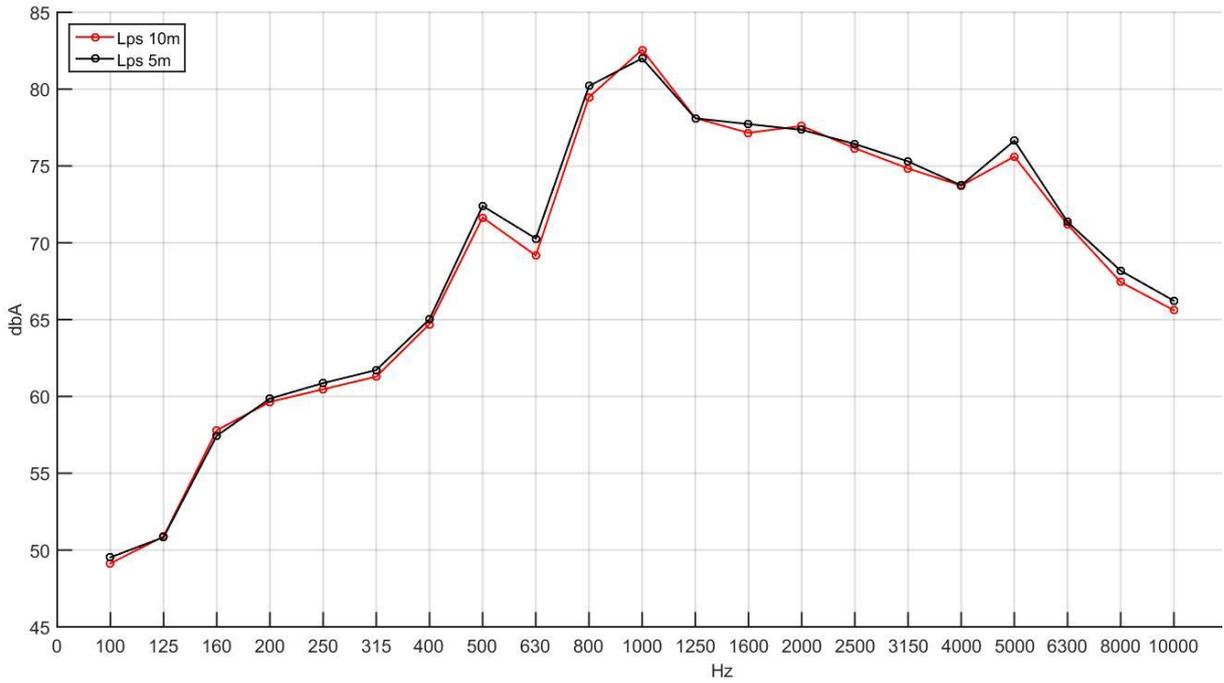


Figura 50: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 80 km/h. Sentido inverso de giro.

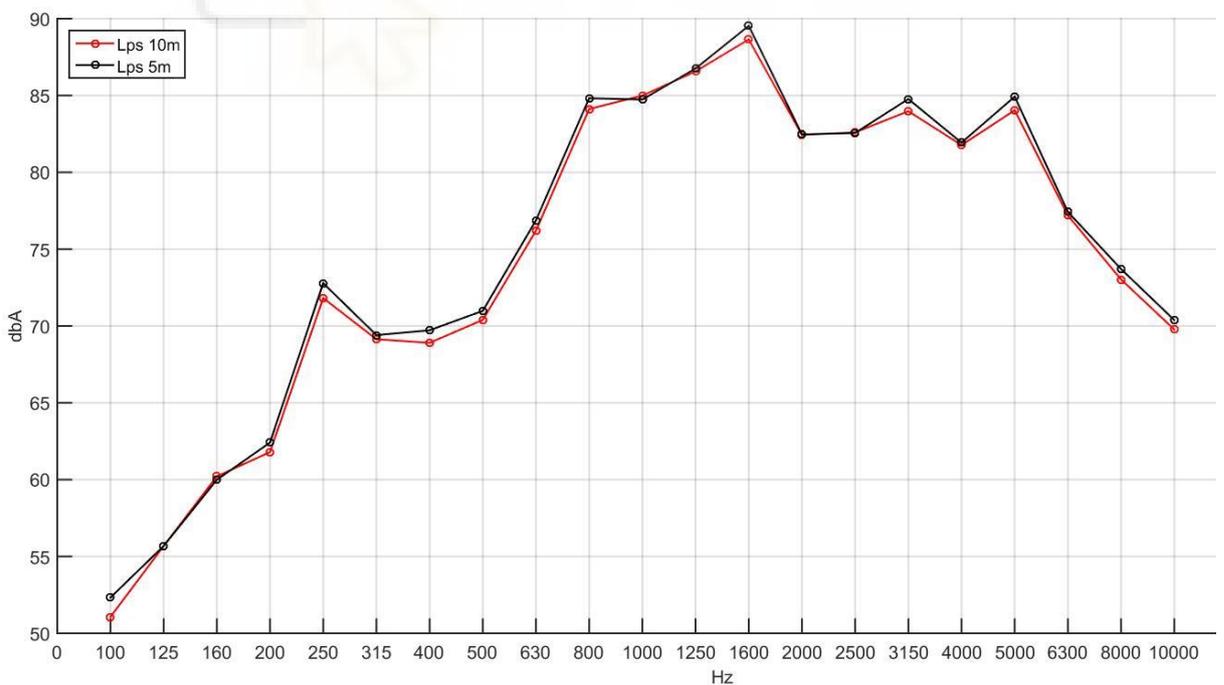


Figura 51: Comparativa de los niveles de presión sonora promedio para una velocidad de ensayo de 120 km/h. Sentido inverso de giro.

Como se puede observar, los gráficos obtenidos son muy similares, llegando a solaparse en varios puntos a lo largo del espectro. Esto es indicativo de la escasa influencia de la reducción del número de posiciones de medida a la hora de evaluar los niveles de presión sonora promedio. No obstante, para poder extraer conclusiones, es necesario un análisis más detallado de los resultados obtenidos. Para ello, en las tablas a continuación, se recogen los valores de la desviación entre ambas configuraciones:

Tabla 26: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L_{pf}}$ en dB(A).

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	0,4	0,4	0,0	0,6	0,3	0,8	1,1	1,0	0,7
125	0,8	0,8	0,7	0,4	0,5	0,9	1,1	1,1	1,0
160	0,6	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5	0,3
200	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2	0,0
250	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,3	1,0	0,9	1,1
315	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4
400	1,3	0,2	0,3	1,1	0,2	0,7	0,9	1,3	1,2
500	0,4	0,3	0,7	0,5	0,3	0,4	0,2	0,5	0,6
630	0,8	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2
800	0,2	0,7	0,7	0,6	1,3	0,8	1,2	0,4	1,3
1000	0,1	0,1	0,4	1,1	1,2	0,3	0,4	0,2	0,1
1250	0,2	0,7	0,2	0,2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2
1600	0,4	0,2	0,5	0,1	0,6	0,6	1,2	1,2	0,8
2000	0,3	0,0	0,2	0,0	0,6	0,3	0,4	0,2	0,0
2500	0,0	0,1	0,4	0,3	0,4	0,2	0,1	0,7	0,1
3150	0,6	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,1	0,8	1,0
4000	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,2
5000	1,0	0,7	0,6	0,9	0,7	0,7	0,9	0,7	0,5
6300	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2
8000	1,1	1,2	1,1	0,9	1,0	1,1	1,1	0,8	0,8
10000	0,0	0,1	0,4	0,9	0,7	0,7	0,5	0,2	0,2

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

Tabla 27: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L}_{pf}$ en dB(A) para sentido inverso de giro.

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	0,1	0,3	0,2	0,1	0,4	0,3	0,2	0,9	1,3
125	0,3	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
160	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2
200	0,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,8	0,6
250	0,3	1,2	0,9	0,9	0,4	0,7	1,3	1,4	1,0
315	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4	0,2	0,1	0,3
400	0,1	0,1	0,4	0,5	0,3	0,9	0,5	1,2	0,8
500	0,1	0,3	0,5	0,3	0,8	1,1	1,1	1,1	0,6
630	0,9	0,5	0,6	0,3	1,1	0,7	0,8	1,1	0,7
800	0,5	0,8	0,9	0,7	0,7	0,8	0,7	0,3	0,7
1000	0,0	0,5	0,7	0,3	0,6	0,2	0,3	0,0	0,3
1250	0,3	0,4	0,1	0,1	0,0	1,0	0,0	0,7	0,2
1600	0,3	0,3	0,5	0,3	0,6	0,7	0,4	1,0	0,9
2000	0,0	0,4	0,0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,0
2500	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,2	0,3	0,0
3150	0,3	0,5	0,3	0,8	0,5	0,7	0,3	0,4	0,8
4000	0,1	0,3	0,2	0,4	0,0	0,8	0,2	0,5	0,2
5000	0,9	0,6	0,9	0,5	1,0	1,1	0,5	1,0	0,9
6300	0,1	0,0	0,1	0,0	0,2	0,4	0,0	0,3	0,2
8000	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7
10000	1,0	0,2	0,8	0,4	0,6	0,4	0,5	0,9	0,6

Tabla 28: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L}_{pf}$ en dB(A). Rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
0,1	0,1	0,3	0,6	0,7	0,3	0,4	0,4	0,5
Valor promedio desviación: 0,4 dB(A)								

Tabla 29: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L}_{pf}$ en dB(A). Rango de frecuencias de 315 Hz a 5000 Hz. Sentido inverso de giro.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
0,3	0,4	0,6	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5
Valor promedio desviación: 0,3 dB(A)								

Tabla 30: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L_{pf}}$ en dB(A). Rango completo de frecuencias.

Velocidad lineal de desplazamiento (km/h)								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
0,1	0,2	0,3	0,6	0,7	0,3	0,4	0,4	0,5
Valor promedio desviación: 0,4 dB(A)								

Tabla 31: Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L_{pf}}$ en dB(A). Rango completo de frecuencias. Sentido inverso de giro.

Desviación presión acústica superficial $\Delta \overline{L_{pf}}$ (dB(A))								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
0,3	0,4	0,6	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5
Valor promedio desviación: 0,3 dB(A)								

Un análisis de los resultados obtenidos confirma el cumplimiento de los requisitos establecidos por la ISO 3744 a lo largo de los diferentes espectros. Si bien es cierto que existen frecuencias determinadas en las que los valores de desviación son mayores a los exigidos por la norma, como es el caso de los 5000 Hz y los 800 Hz para ambos sentidos de giro, estos se muestran realmente próximos los requeridos, teniendo escasa repercusión sobre los valores globales, los cuales muestran desviaciones promedio inferiores a los 0,5 decibelios para las diferentes condiciones de ensayo.

Una vez comprobada la viabilidad de la reducción del número de posiciones de medición, se procederá a realizar el análisis de su influencia sobre los valores de los niveles de potencia acústica finales.

Para ello, a continuación, se mostrarán los espectros de los niveles de potencia acústica correspondientes a las 5 posiciones de medición del ensayo A-CPX. Los resultados corresponden a los valores del nivel de potencia sonora con ponderación A y en bandas de tercios de octava para todo el rango de velocidades:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE NEUMÁTICOS

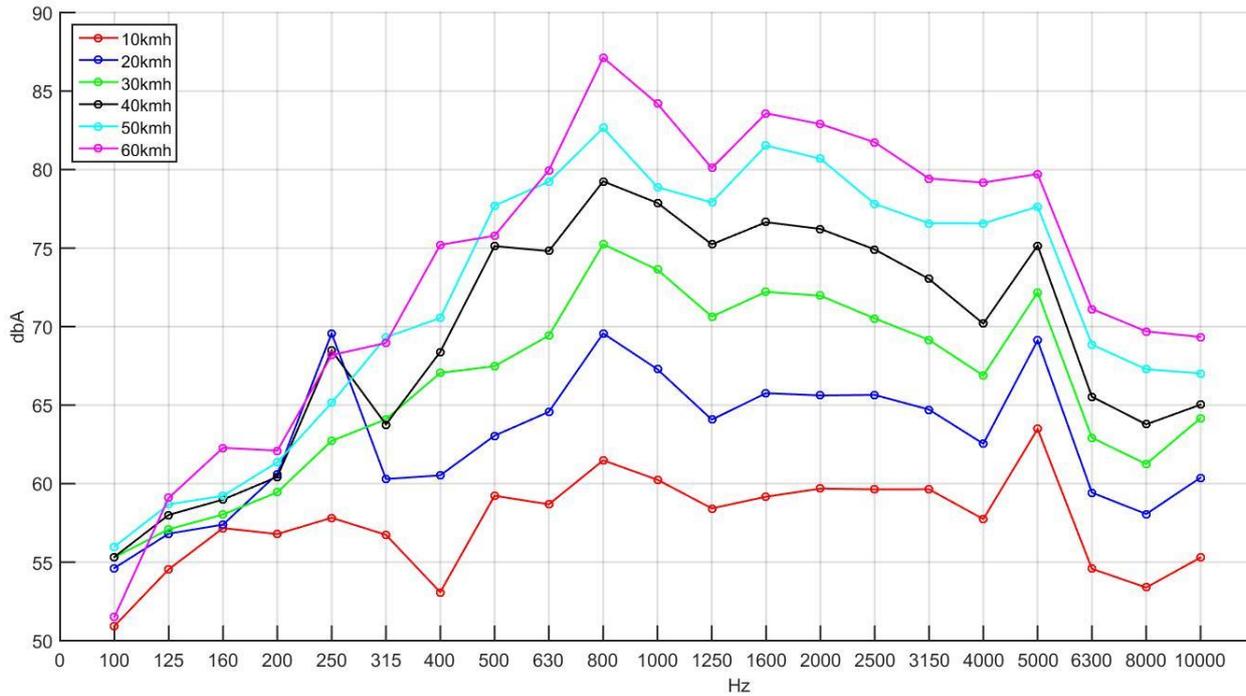


Figura 52: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h para 5 posiciones de micrófono.

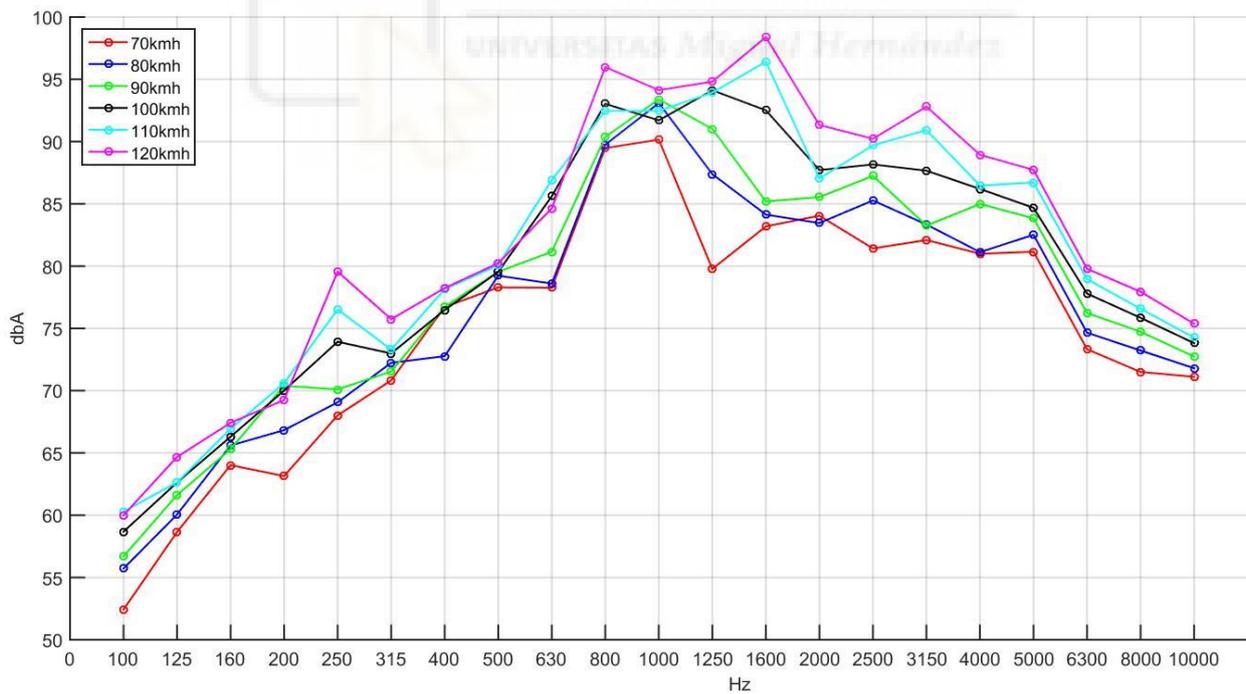


Figura 53: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h para 5 posiciones de micrófono.

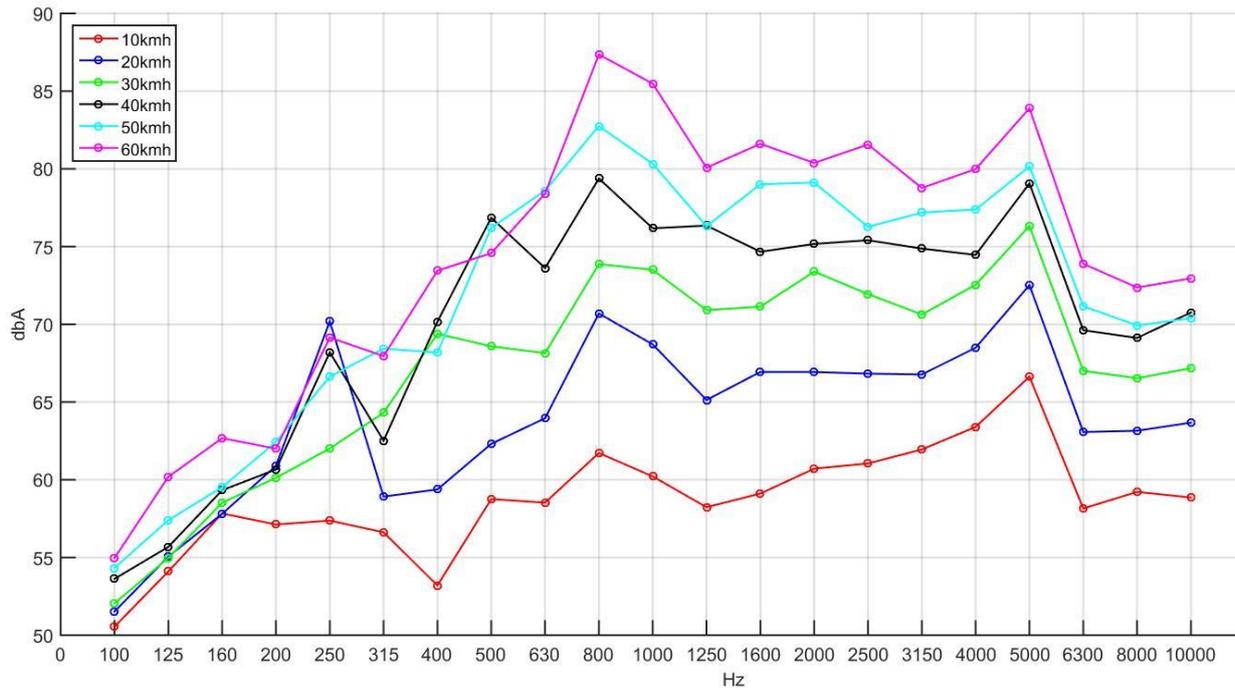


Figura 54: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 10 a 60 Km/h para 5 posiciones de micrófono. Sentido inverso de giro.

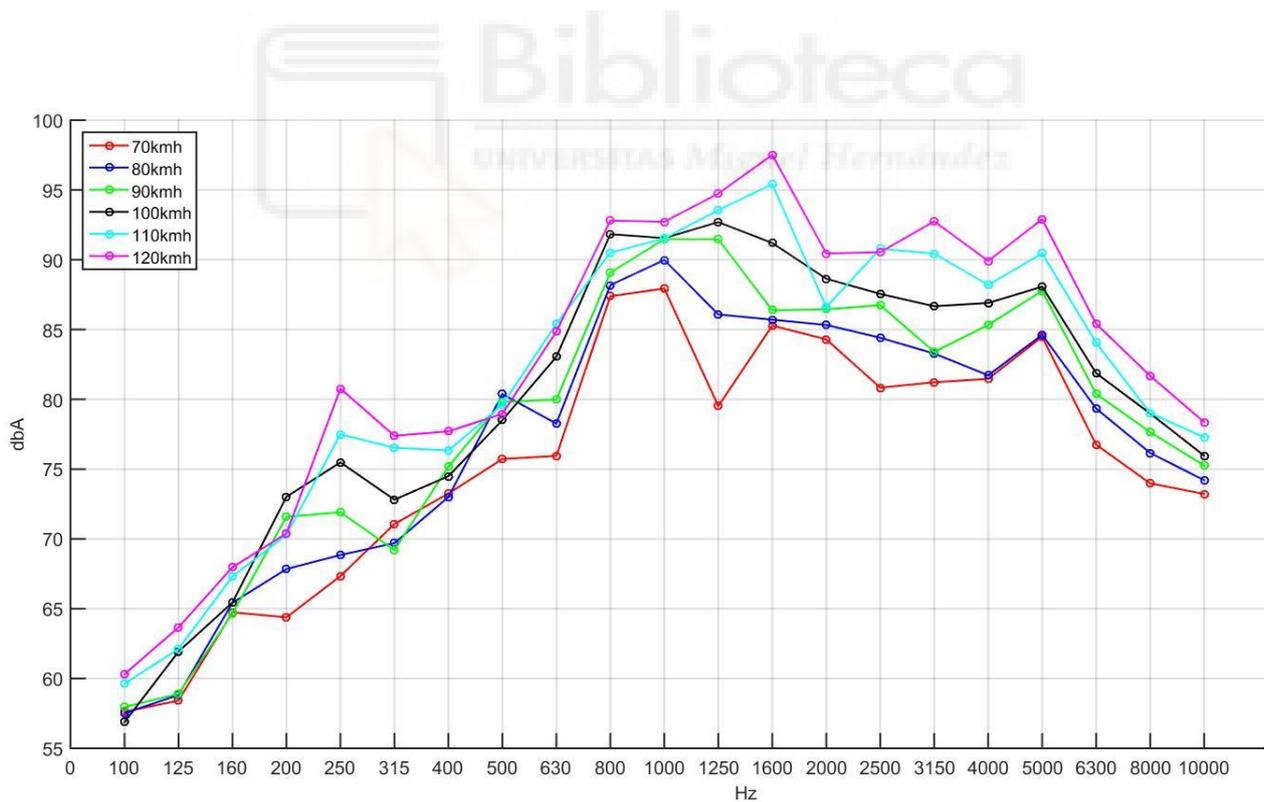


Figura 55: Nivel de potencia sonora para rango de velocidades de 70 a 120 Km/h para 5 posiciones de micrófono. Sentido inverso de giro.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

Un primer análisis de los espectros obtenidos muestra a simple vista una gran similitud con los niveles de potencia obtenidos para las diez posiciones del ensayo A-Drum.

No obstante, para poder determinar de forma precisa en qué grado varían los resultados, es necesario conocer cada uno de los valores que conforman el espectro.

En las siguientes tablas se muestran los valores en dB(A) del nivel de potencia sonora en función de la velocidad tanto en bandas de frecuencia como en valores globales:

Tabla 32: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para posiciones A-CPX.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	55,3	56,0	51,5	52,4	55,7	56,7	58,7	60,3	60,0
125	58,0	58,7	59,1	58,7	60,1	61,6	62,6	62,6	64,7
160	59,0	59,2	62,3	64,0	65,6	65,3	66,3	66,9	67,4
200	60,4	61,4	62,1	63,1	66,8	70,4	70,0	70,6	69,3
250	68,5	65,1	68,2	68,0	69,1	70,1	73,9	76,5	79,6
315	63,8	69,3	69,0	70,8	72,2	71,5	73,0	73,3	75,7
400	68,4	70,5	75,2	76,7	72,8	76,7	76,5	78,1	78,2
500	75,1	77,7	75,8	78,3	79,2	79,5	79,5	80,1	80,2
630	74,8	79,2	80,0	78,3	78,6	81,2	85,6	86,9	84,6
800	79,3	82,7	87,1	89,5	89,8	90,4	93,0	92,5	96,0
1000	77,9	78,9	84,2	90,2	93,1	93,4	91,7	92,5	94,1
1250	75,2	77,9	80,1	79,8	87,4	91,0	94,1	93,9	94,8
1600	76,6	81,5	83,6	83,2	84,1	85,2	92,5	96,4	98,4
2000	76,2	80,7	82,9	84,0	83,5	85,5	87,7	87,0	91,3
2500	74,9	77,8	81,7	81,4	85,3	87,2	88,2	89,7	90,2
3150	73,0	76,6	79,4	82,1	83,3	83,3	87,7	90,9	92,8
4000	70,2	76,6	79,2	81,0	81,1	85,0	86,2	86,5	88,9
5000	75,2	77,6	79,7	81,2	82,5	83,8	84,7	86,7	87,7
6300	65,5	68,9	71,1	73,3	74,7	76,2	77,8	78,9	79,8
8000	63,8	67,3	69,7	71,5	73,2	74,7	75,9	76,6	77,9
10000	65,0	67,0	69,3	71,1	71,8	72,7	73,8	74,3	75,4

Tabla 33: Valores nivel de potencia sonora dB(A) en bandas de 1/3 de octava para posiciones A-CPX. Sentido inverso de giro.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	53,6	54,3	55,0	57,6	57,5	58,0	56,9	59,6	60,3
125	55,7	57,4	60,2	58,4	58,8	58,9	61,9	62,1	63,7
160	59,3	59,5	62,7	64,7	65,4	64,6	65,4	67,3	68,0
200	60,7	62,4	62,0	64,4	67,8	71,6	73,0	70,3	70,4
250	68,2	66,6	69,1	67,3	68,8	71,9	75,5	77,5	80,8

315	62,5	68,4	68,0	71,1	69,7	69,2	72,8	76,5	77,4
400	70,2	68,2	73,4	73,2	73,0	75,2	74,5	76,3	77,7
500	76,9	76,2	74,6	75,7	80,4	79,8	78,5	79,6	79,0
630	73,6	78,6	78,4	75,9	78,3	80,0	83,0	85,4	84,9
800	79,4	82,8	87,4	87,4	88,2	89,1	91,8	90,5	92,8
1000	76,2	80,3	85,5	87,9	90,0	91,5	91,6	91,5	92,7
1250	76,4	76,3	80,1	79,5	86,1	91,5	92,7	93,6	94,7
1600	74,7	79,0	81,6	85,3	85,7	86,4	91,2	95,4	97,5
2000	75,2	79,1	80,4	84,3	85,3	86,5	88,6	86,6	90,4
2500	75,4	76,3	81,6	80,8	84,4	86,7	87,6	90,8	90,5
3150	74,9	77,2	78,8	81,2	83,3	83,4	86,7	90,4	92,8
4000	74,5	77,4	80,0	81,5	81,7	85,3	86,9	88,2	89,9
5000	79,1	80,1	83,9	84,5	84,6	87,8	88,1	90,5	92,9
6300	69,6	71,2	73,9	76,8	79,3	80,4	81,9	84,0	85,4
8000	69,1	69,9	72,4	74,0	76,2	77,7	79,0	79,0	81,7
10000	70,8	70,4	73,0	73,2	74,2	75,3	76,0	77,3	78,4

Tabla 34: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 5000 Hz y 5 posiciones de medición.

km/h								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,4	89,8	92,8	95,1	97,0	98,3	100,4	101,7	103,6

Tabla 35: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 5000 Hz y 5 posiciones de medición. Sentido inverso de giro.

km/h								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,9	89,4	92,9	94,2	95,9	98,0	99,7	101,3	103,0

Tabla 36: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango completo de frecuencias y 5 posiciones de medición.

km/h								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
86,6	89,9	92,9	95,2	97,1	98,4	100,4	101,7	103,6

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE NEUMÁTICOS

Tabla 37: Valores globales de potencia sonora en dB(A) para rango completo de frecuencias y 5 posiciones de medición. Sentido inverso de giro.

km/h								
40	50	60	70	80	90	100	110	120
87,2	89,7	93,0	94,4	96,1	98,2	99,9	101,4	103,2

Los resultados muestran valores de niveles de potencia acústica prácticamente idénticos a los obtenidos con las diez posiciones de los micrófonos del ensayo A-Drum, variando en su mayoría décimas a lo largo de todo el espectro y de las diferentes velocidades de ensayo, no llegando a superar nunca los 1,5 decibelios de diferencia, y obteniendo los siguientes valores globales promedio para las diferentes condiciones de ensayo:

Tabla 38: Promedio de la desviación de los valores globales de los niveles de potencia acústica en dB(A) entre 10 y 5 posiciones de medida.

	Rango de frecuencias	
	315 - 5000 Hz	100 -10000 Hz
Lw Global	0,4	0,4
Lw Global (sentido inverso de giro)	0,3	0,3

En las siguientes gráficas comparativas se puede apreciar visualmente esta escasa diferencia entre los espectros de ambos ensayos a bajas, medias y altas velocidades:

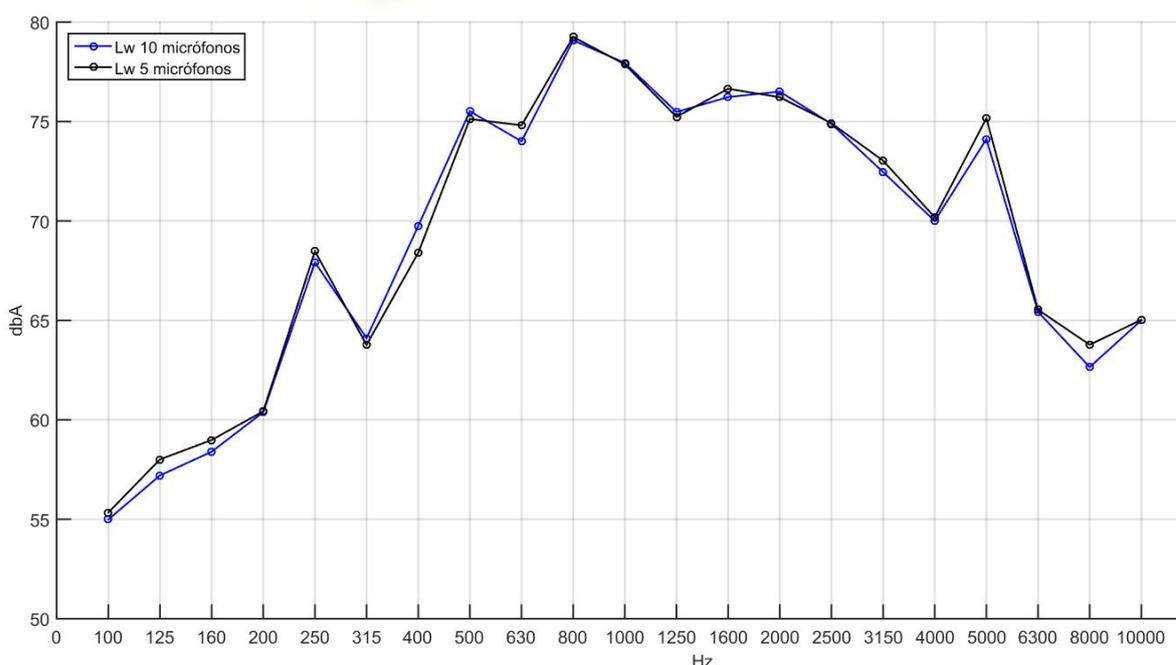


Figura 56: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 40 Km/h.

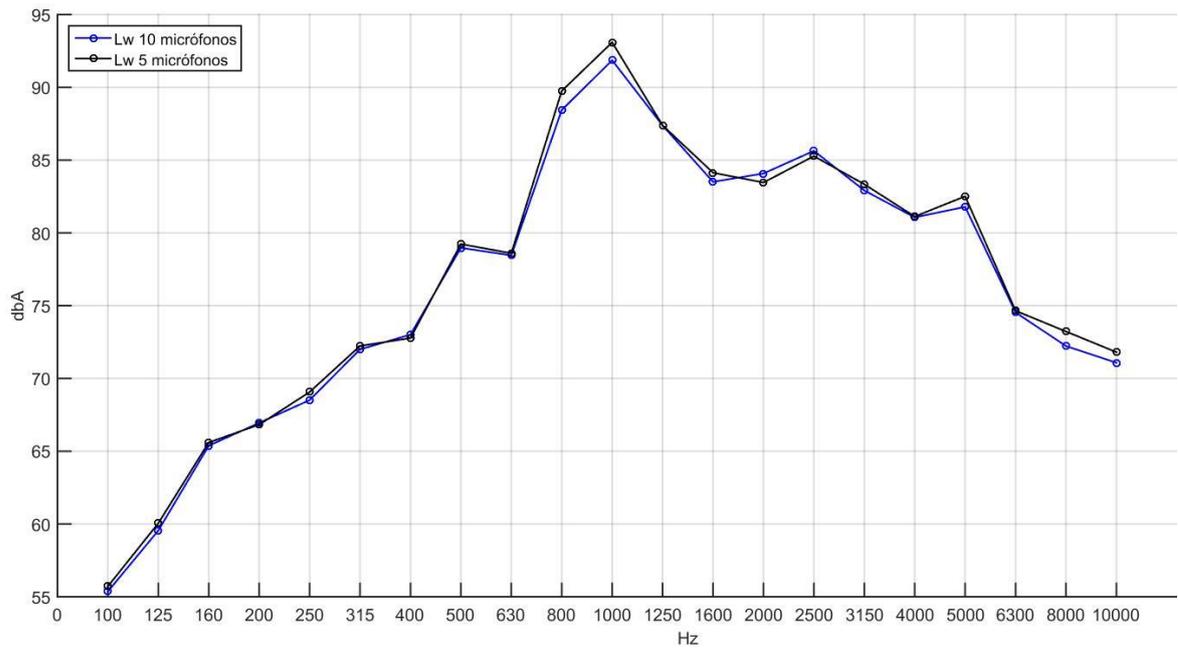


Figura 57: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 80 Km/h.

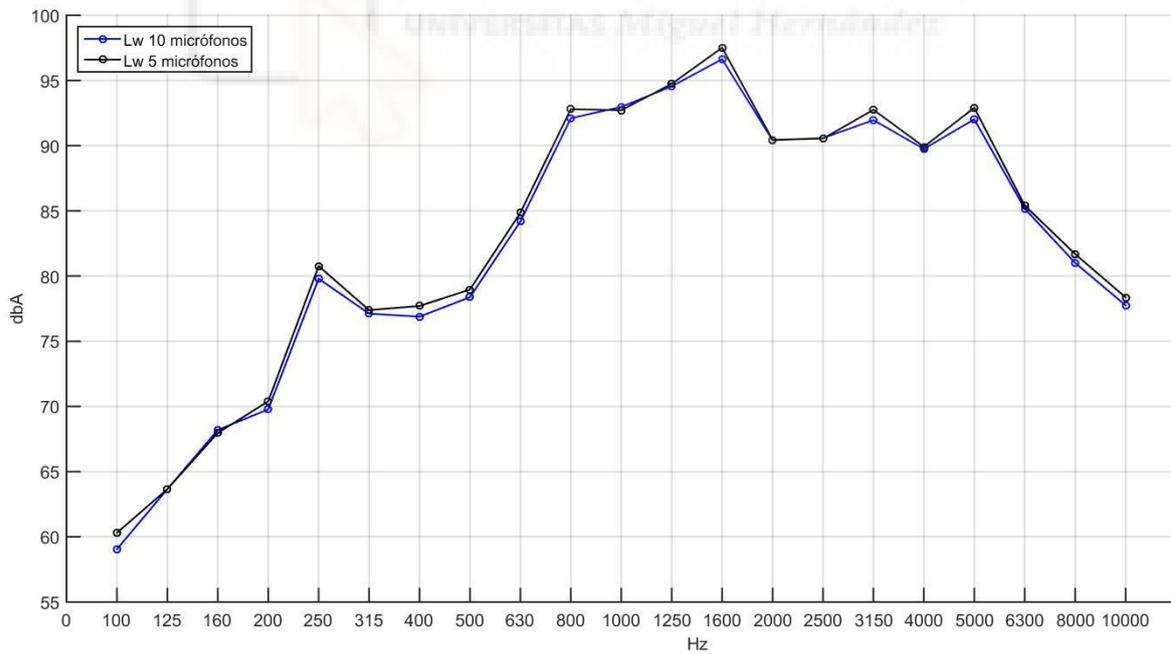


Figura 58: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 120 Km/h.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE NEUMÁTICOS

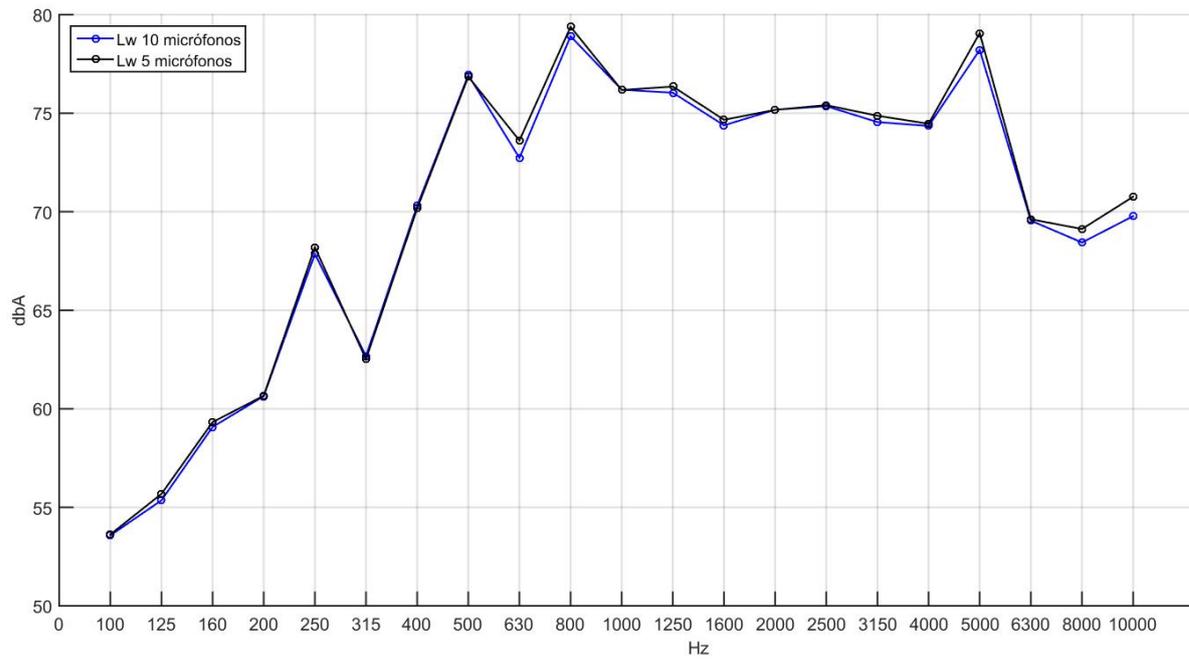


Figura 59: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 40 Km/h. Sentido inverso de giro.

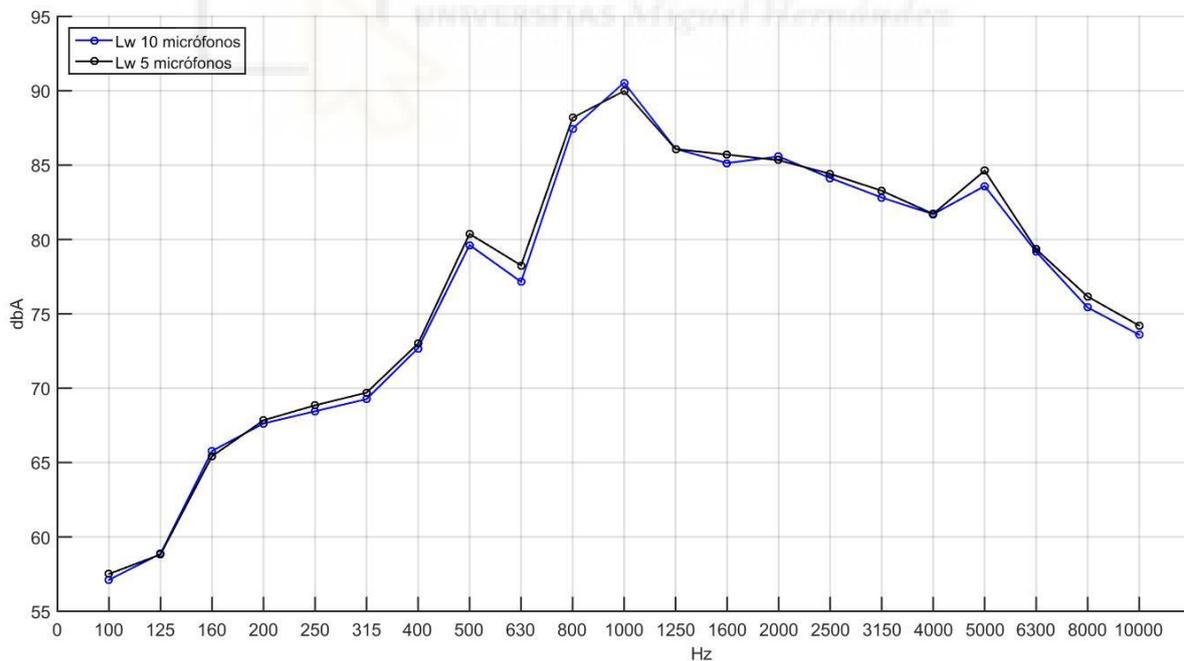


Figura 60: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 80 Km/h. Sentido inverso de giro.

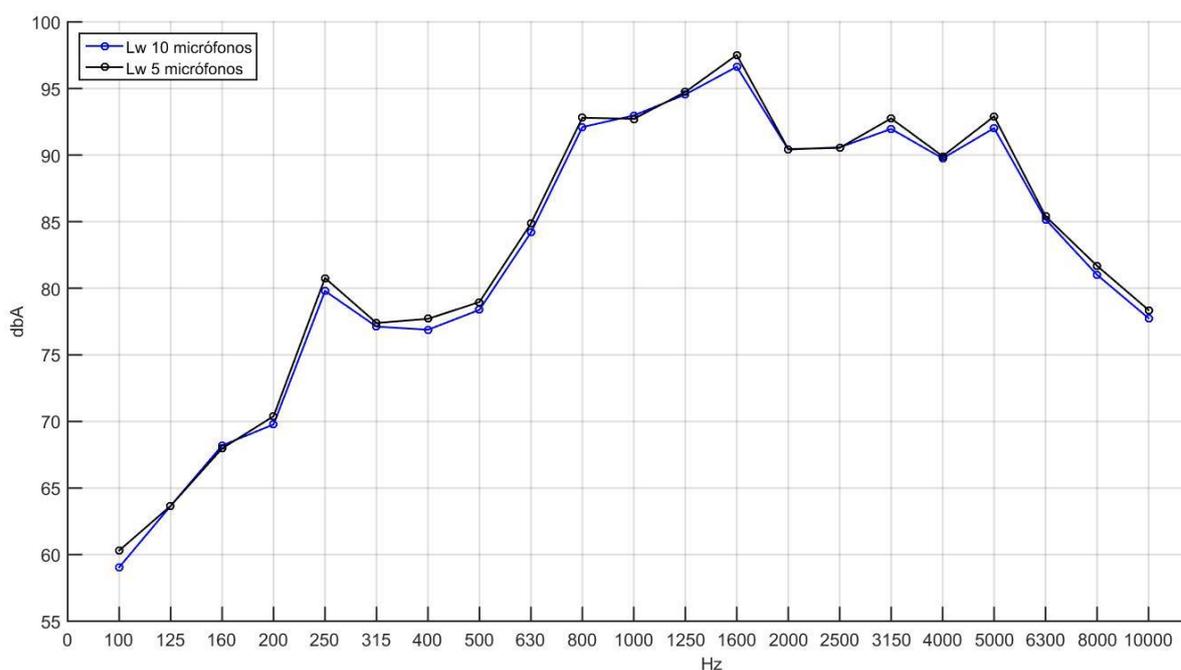


Figura 61: Comparativa de los niveles de potencia acústica para una velocidad de ensayo de 120 Km/h. Sentido inverso de giro.

Esta escasa desviación entre los diferentes niveles de potencia acústica obtenidos es un indicativo del peso de la ubicación de las diferentes posiciones de medida alrededor de la fuente sonora frente al número de posiciones de medida, pudiendo llegar a obtener resultados realmente similares con un número inferior de micrófonos.

Otro elemento a tener en cuenta en esta comparativa son las ecuaciones que definen los niveles de potencia sonora en función de la velocidad. Como se ha explicado en el apartado anterior, estas ecuaciones vienen determinadas por dos coeficientes, A y B. En la tabla a continuación se pueden apreciar los valores de A y B que rigen las ecuaciones del análisis de las posiciones A-CPX:

Tabla 39: Coeficientes A y B. Posiciones de medición A-CPX.

	A	B
Lw Global (sentido giro normal)	35,4	30,8
Lw Global de 315 a 5000 Hz (sentido giro normal)	33,5	31,7
Lw Global (sentido inverso)	39,8	28,3
Lw Global de 315 a 5000 Hz, sentido inverso)	38,1	29,3

Dando lugar a las siguientes gráficas:

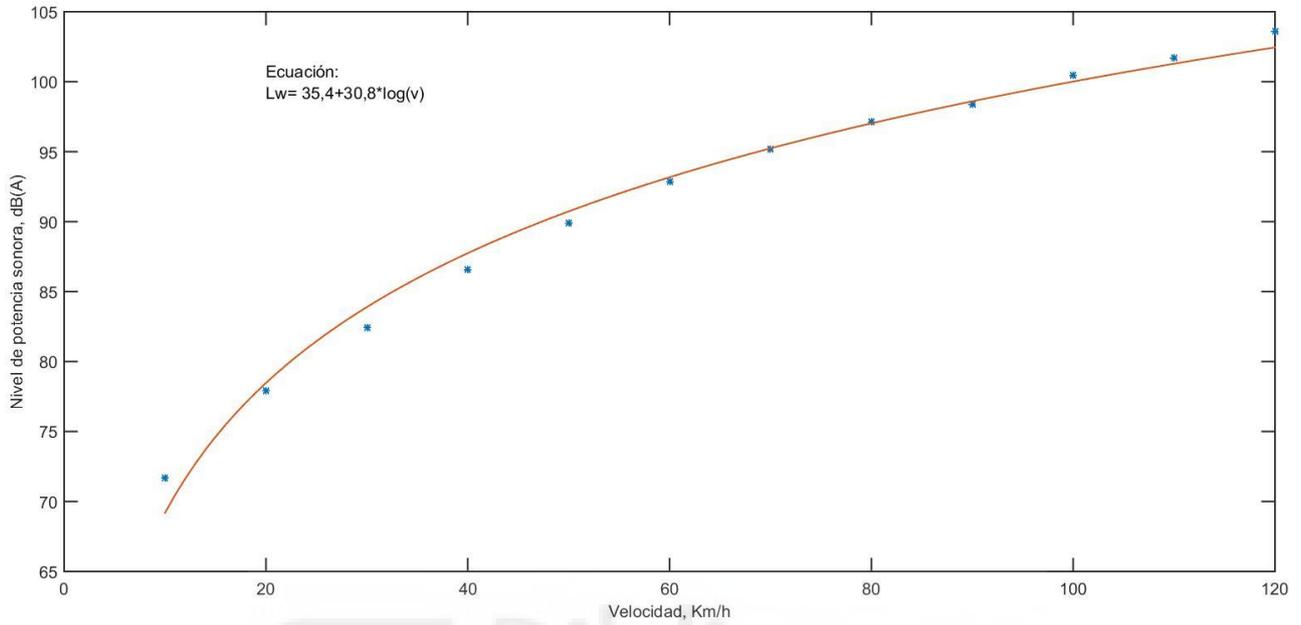


Figura 62: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. 5 micrófonos.

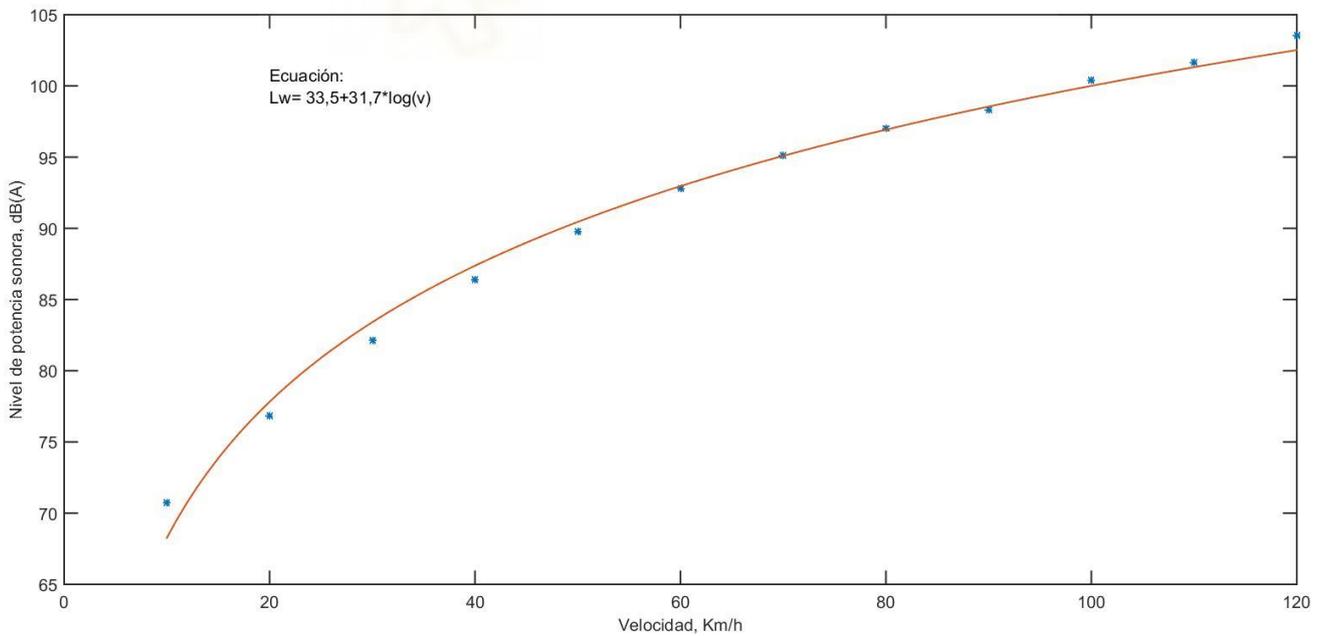


Figura 63: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz. 5 micrófonos.

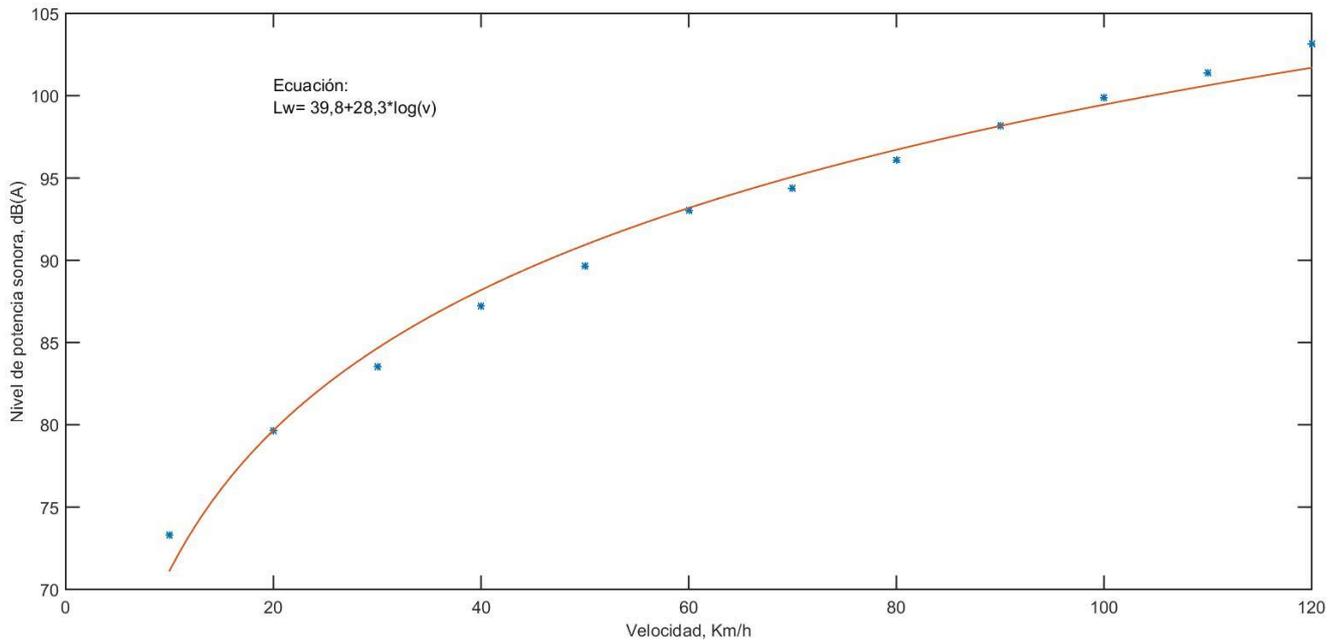


Figura 64: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para todo el rango de frecuencias. Sentido inverso de giro. 5 micrófonos.

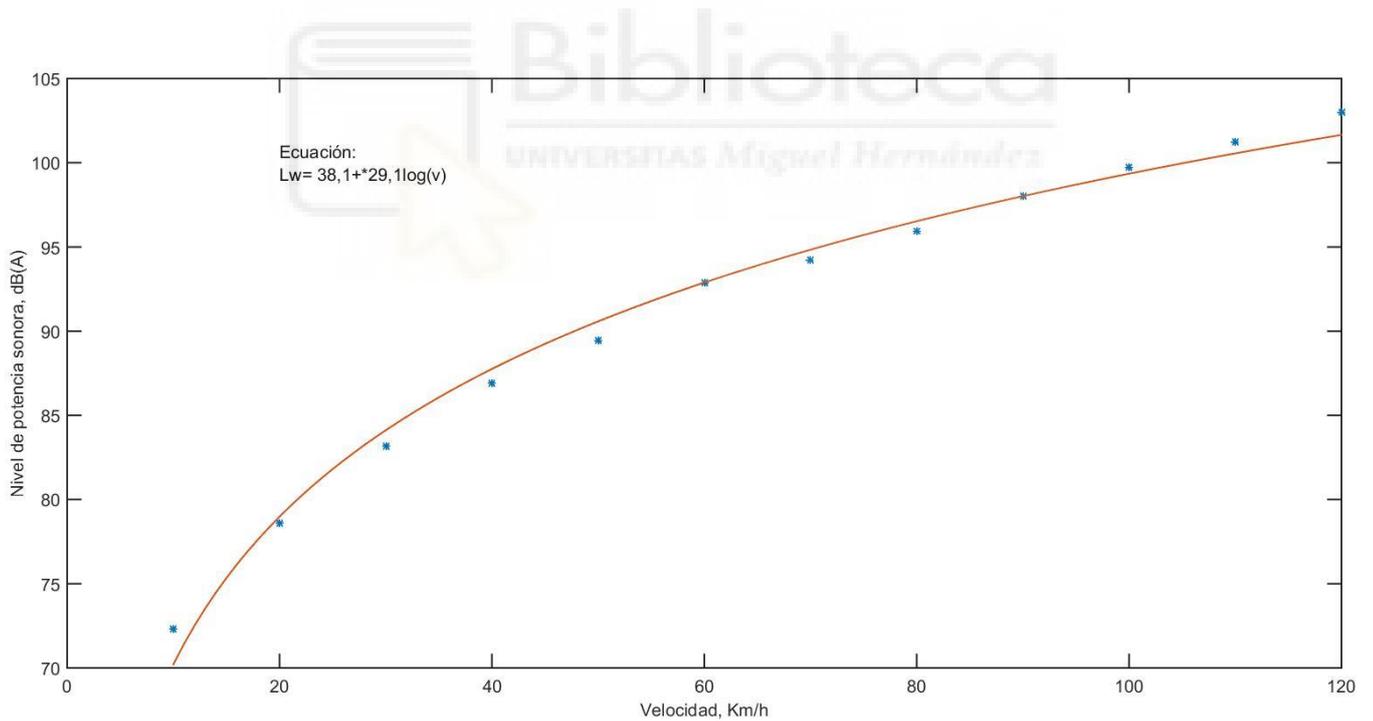


Figura 65: Nivel de potencia sonora como función logarítmica de la velocidad. Para rango de frecuencias de 315 a 5000 Hz. Sentido inverso de giro. 5 micrófonos.

Como se puede observar, los coeficientes obtenidos son del orden de magnitud de los mostrados en la literatura y similares a los obtenidos en el análisis de las posiciones A-Drum.

Por último, para concluir con el análisis, es interesante comparar los resultados obtenidos con estudios similares. Para ello, se realizará una comparación con los resultados procedentes del estudio realizado por Campillo [9], en el cual modeliza y valida el ensayo A-CPX, donde se han realizado mediciones sobre un vehículo en marcha, en las mismas posiciones respecto a la fuente sonora que en el presente trabajo, obteniendo los siguientes niveles de potencia sonora:

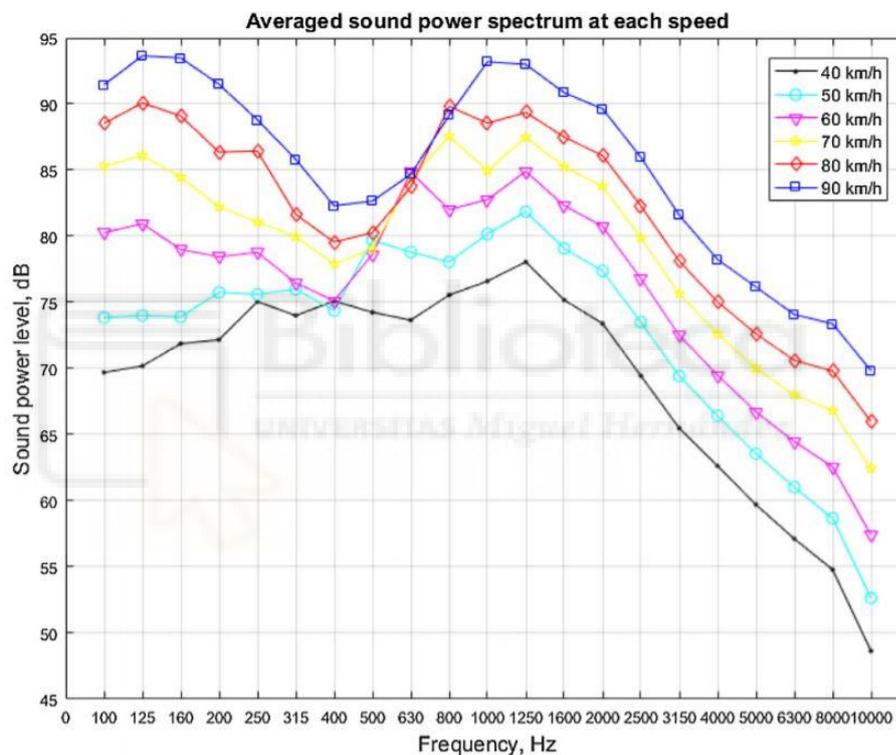


Figura 66: Niveles de potencia sonora (dB) en ensayo A-CPX. Extraídos del estudio realizado por Campillo [9].

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en dB de los niveles de potencia acústica durante en proceso de ensayo del presente trabajo para velocidades de 40, 50, 60, 70, 80 y 90 Km/h:

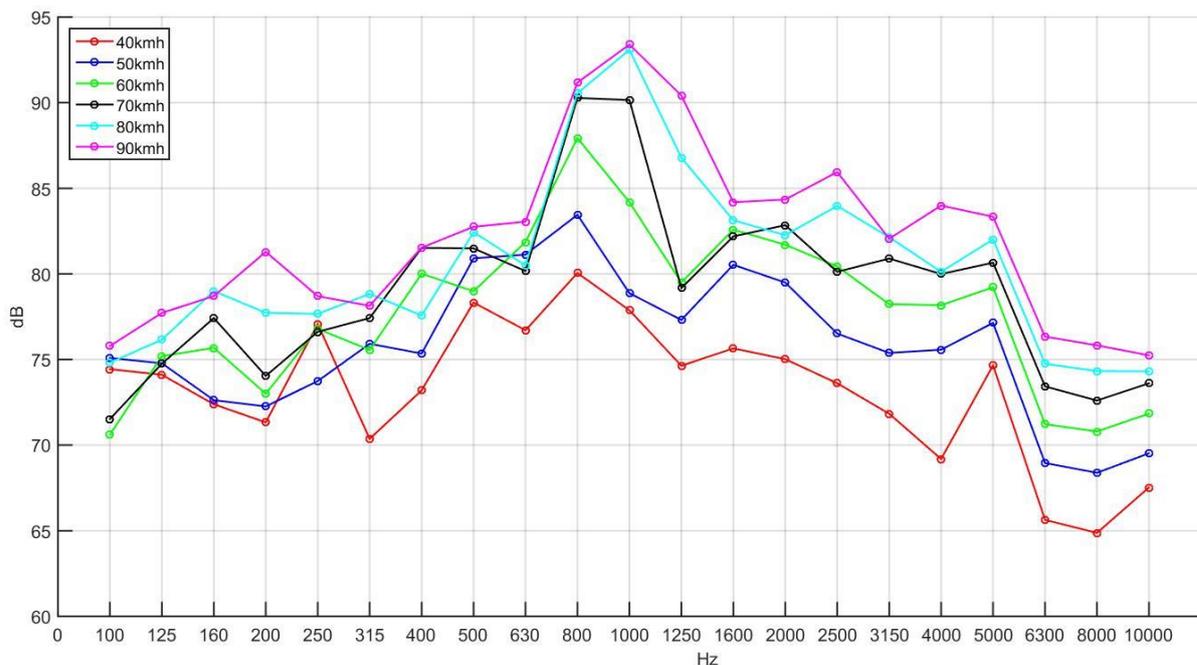


Figura 67: Niveles de potencia sonora (dB) en posiciones A-CPX.

Tabla 40: Tabla comparativa de los valores globales correspondientes a los niveles de potencia sonora en dB. Rango de frecuencias comprendido entre los 315 y los 4000Hz.

	km/h					
	40	50	60	70	80	90
1	83,0	86,5	89,5	92	93,9	95,1
2	86,8	90,2	93,0	95,3	97,1	98,3

1: Valores del ensayo propio en las posiciones A-CPX
 2: Valores obtenidos por Campillo en ensayo A-CPX durante su estudio [9].

Aunque a simple vista puede parecer que los valores de Campillo distan de los resultados obtenidos, hay que tener en cuenta diversos factores.

Para comparar estos datos se debe tener en cuenta la naturaleza de ambos ensayos. El ensayo del presente trabajo se ha llevado a cabo en un laboratorio, donde el entorno puede ser controlado. El ensayo A-CPX llevado a cabo en el estudio de Campillo [9] es un ensayo de pista en el cual, factores como el viento, pueden influir en las medidas obtenidas. Otros factores a tener en cuenta son los neumáticos empleados y las superficies de rodadura y medición consideradas.

Por un lado, los neumáticos empleados por Campillo en su estudio fueron unos Pirelli P3000 175/70 R13 82T, los cuales difieren de los empleados en el presente trabajo, tanto en tamaño, como en el dibujo de la banda de rodadura, siendo estos factores influyentes en las características acústicas del neumático.

Por otro lado, los neumáticos del ensayo A-CPX de Campillo rodaban sobre asfalto liso y se toma como superficie de medición un 1/4 de esfera, mientras que el neumático empleado en ensayo A-Drum se apoyaba sobre la superficie curva del tambor de ensayo y se toma como superficie de medición una semiesfera, lo cual afecta tanto al proceso de medición, como al posterior cálculo de potencia.

Teniendo en cuenta lo indicado, pese a las diferencias obtenidas, se puede afirmar que los resultados de ambos ensayos muestran un comportamiento similar, difiriendo escasos decibelios en el rango de frecuencias indicado.



4. CONCLUSIONES

Un análisis de los resultados del presente trabajo permite concluir que, para ensayos A-Drum realizados en el banco de ensayo del Laboratorio de Neumáticos de la Universidad Miguel Hernández, es viable una reducción en el número de puntos de medición, garantizando el cumplimiento de los requisitos de desviación de los valores de presión acústica superficial establecidos en la Norma ISO 3744 y con una precisión muy próxima a la obtenida con las diez posiciones originales de ensayo para los diferentes valores de los niveles potencia acústica.

Además, cabe destacar la escasa influencia del sentido de giro del neumático demostrada en el ensayo A-Drum, tanto para la configuración de posiciones de medida completa, como para la reducida.

Los datos obtenidos también reflejan que es posible una acotación del rango de velocidades objeto de estudio, confirmando que para velocidades inferiores a 40 km/h los resultados obtenidos no cumplen en su mayoría con los requisitos establecidos por el ensayo. Indicando así la conveniencia de toma de medidas para velocidades superiores a 40 km/h, siendo esta incluida en el rango.

Lo mismo ocurre con el rango de frecuencias de los espectros sonoros objeto de estudio, donde un análisis de los valores de la diferencia de niveles sonoros confirma que, para determinados rangos de frecuencias, los valores obtenidos no cumplen con los requisitos del ensayo A-Drum. Este hecho permite acotar los análisis directamente al rango de frecuencias donde, según la normativa, se acumula mayor energía sonora durante la rodadura de un neumático. Quedando un rango de interés comprendido entre los 315 Hz y los 5000 Hz.

Dicho rango, pese a contemplar la frecuencia de 5000 Hz, coincidente con las interferencias producidas por las emisiones de alta frecuencia del motor eléctrico que acciona la máquina de ensayo, puede ser considerado en los diferentes análisis sin que esto suponga una gran repercusión, debido al escaso impacto que representa sobre los valores globales del estudio.

Por último, ha quedado demostrado que los factores de corrección K1 y K2 indicados en la norma ISO 3744 son lo suficientemente bajos en las condiciones en las que el ensayo se lleva a cabo, estando siempre por debajo del margen de error admisible por la norma, como para que su efecto sobre los resultados finales pueda ser considerados despreciables, siempre y cuando la velocidad de ensayo sea superior a los 40 km/h.

Todas estas conclusiones llevan a que una reducción en el número de posiciones de medida permite una optimización, tanto del proceso de ensayo, como del análisis posterior, del ensayo A-Drum. Suponiendo una reducción considerable de tiempo y material.

5. FUTUROS TRABAJOS.

Las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo podrían resultar el punto de partida para nuevos estudios en el ámbito del ruido de rodadura. Algunas de estas nuevas líneas de investigación son:

Una mayor reducción en el número de posiciones de medición:

Una vez demostrada la viabilidad de la reducción del número de posiciones de medición a 5 en el ensayo A-Drum, se puede considerar la posibilidad de reducir a 3 las posiciones de medición, lo que supondría una mayor reducción en los tiempos de montaje y procesado de datos.

Desarrollo de una fuente sonora artificial:

El presente trabajo, en combinación con otros estudios enmarcados dentro del ámbito del ruido de rodadura como el llevado a cabo por Martínez [18], sientan las bases para el desarrollo de una fuente sonora artificial para medidas en banco de neumáticos que permita, entre otras cosas, estudiar la influencia de la curvatura del tambor de ensayo en las mediciones.

6. ANEXOS

6.1. VALORES DE K1 POR FRECUENCIAS

Tabla 41: Valores de K1 para neumático Insa Turbo Eco Saver 205-55 R16.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	5,26	10,62	1,65	2,31	2,63	-	1,33	2,67	1,99
125	7,48	2,54	2,18	2,76	0,87	2,16	1,00	3,68	4,37
160	3,15	3,74	1,37	1,95	2,87	1,89	2,03	4,60	5,98
200	2,37	3,22	2,78	1,03	0,73	2,65	0,96	1,72	0,54
250	0,37	1,59	2,12	1,96	1,18	0,97	0,35	0,40	0,48
315	1,60	1,74	1,90	0,70	0,61	1,54	1,09	1,29	1,30
400	0,17	0,48	0,38	0,48	0,27	0,20	0,17	0,10	0,09
500	0,29	0,47	0,61	0,39	0,33	0,30	0,30	0,13	0,09
630	0,29	0,10	0,11	0,11	0,11	0,06	0,09	0,14	0,14
800	0,10	0,08	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
1000	0,02	0,05	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00
1250	0,07	0,04	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
1600	0,14	0,09	0,05	0,06	0,06	0,05	0,07	0,04	0,03
2000	-	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,07	0,10	0,10
2500	-	0,07	0,06	0,05	0,08	0,06	0,05	0,08	0,11
3150	-	-	0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03
4000	-	-	-	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
5000	-	-	-	-	9,03	3,88	2,24	1,88	1,31
6300	-	-	0,60	0,23	0,11	0,06	0,05	0,03	0,02
8000	-	-	-	0,29	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01
10000	6,62	6,14	6,12	5,22	2,35	1,05	0,56	0,18	0,05

(-): valores no disponibles para el análisis

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL NÚMERO DE PUNTOS DE MEDICIÓN SONORA
SOBRE LA EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA EN ENSAYOS EN BANCO DE
NEUMÁTICOS

Tabla 42: Valores de K1 para neumático Nexen 205-55 R16.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	7,02	-	15,34	4,62	11,90	-	1,13	-	-
125	-	-	6,14	-	3,93	5,83	1,38	-	-
160	-	4,00	5,46	5,30	5,61	7,56	6,88	-	-
200	7,04	13,56	7,43	3,68	2,95	8,88	1,89	-	-
250	1,58	9,73	-	-	5,22	3,96	1,86	-	-
315	1,05	3,74	12,54	3,25	5,22	17,92	5,44	-	-
400	0,34	0,22	0,52	3,63	1,55	1,61	2,56	-	-
500	1,99	0,82	0,41	0,37	1,72	2,43	2,38	-	-
630	0,30	0,90	0,67	0,24	0,24	0,20	0,68	-	-
800	0,07	0,06	0,15	0,20	0,13	0,04	0,04	-	-
1000	0,15	0,07	0,04	0,04	0,06	0,06	0,02	-	-
1250	0,35	0,24	0,13	0,06	0,04	0,08	0,13	-	-
1600	0,41	0,24	0,32	0,20	0,14	0,10	0,16	-	-
2000	-	0,16	0,17	0,11	0,12	0,13	0,15	-	-
2500	-	0,33	0,36	0,31	0,33	0,31	0,28	-	-
3150	-	-	0,32	0,15	0,14	0,13	0,16	-	-
4000	-	-	-	0,23	0,12	0,12	0,08	-	-
5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6300	-	-	1,53	0,74	0,52	0,40	0,37	-	-
8000	-	-	-	0,79	0,50	0,42	0,25	-	-
10000	5,00	3,76	7,66	5,35	3,68	2,58	2,34	-	-

(-): valores no disponibles para el análisis

Tabla 43: Valores de K1 para neumático Insa Turbo 205-55 R16.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	5,36	2,17	0,72	0,59	2,26	13,28	1,06	2,27	4,44
125	-	1,70	1,53	1,19	1,01	1,25	0,89	2,21	5,62
160	6,17	3,84	0,97	1,10	0,99	1,60	0,88	1,48	4,25
200	1,58	2,70	1,92	0,42	0,85	0,85	0,44	1,01	0,49
250	0,33	0,66	2,12	2,80	1,03	0,26	0,17	0,16	0,18
315	1,98	0,99	1,11	0,26	0,96	2,83	1,50	0,59	0,38
400	0,33	0,41	0,25	0,29	0,11	0,10	0,29	0,33	0,14
500	0,70	0,52	0,61	0,37	0,18	0,23	0,15	0,07	0,13
630	0,40	0,20	0,12	0,11	0,11	0,07	0,04	0,08	0,09
800	0,15	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
1000	0,08	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

1250	0,09	0,06	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
1600	0,19	0,10	0,10	0,08	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03
2000	-	0,12	0,11	0,09	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06
2500	-	0,29	0,21	0,21	0,20	0,27	0,18	0,16	0,15
3150	-	-	0,21	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,07
4000	-	-	-	0,34	0,14	0,15	0,09	0,08	0,07
5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6300	-	-	1,56	1,13	0,45	0,33	0,24	0,21	0,14
8000	-	-	-	1,50	0,77	0,63	0,28	0,23	0,16
10000	-	11,57	-	-	4,92	3,03	2,50	1,36	0,54

(-): valores no disponibles para el análisis

Tabla 44: Valores de K1 para neumático Michelin Energy Saver 205-55 R16.

Hz	km/h								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
100	3,76	4,83	2,51	1,12	5,05	-	6,16	-	5,25
125	9,71	9,59	4,58	3,68	2,62	3,16	2,19	-	5,91
160	10,96	6,78	3,23	3,21	3,64	6,14	3,14	-	4,14
200	4,55	5,25	4,04	2,45	1,45	1,92	1,03	-	1,82
250	0,91	5,47	4,22	4,59	1,91	1,40	0,41	-	0,31
315	5,20	2,68	3,07	2,83	2,02	3,27	1,62	-	1,12
400	0,53	0,95	0,63	1,42	0,79	0,79	0,48	-	0,39
500	0,45	1,12	1,20	0,94	1,00	0,74	0,93	-	0,69
630	0,65	0,18	0,18	0,24	0,56	0,26	0,18	-	0,89
800	0,18	0,34	0,07	0,02	0,04	0,08	0,10	-	0,11
1000	0,14	0,22	0,12	0,03	0,01	0,01	0,01	-	0,02
1250	0,25	0,22	0,21	0,16	0,08	0,03	0,01	-	0,02
1600	0,21	0,19	0,14	0,17	0,17	0,17	0,16	-	0,04
2000	-	0,16	0,13	0,17	0,16	0,14	0,21	-	0,47
2500	-	0,19	0,20	0,28	0,35	0,30	0,23	-	0,29
3150	-	-	0,06	0,07	0,07	0,05	0,08	-	0,07
4000	-	-	-	0,15	0,07	0,06	0,04	-	0,05
5000	-	-	-	-	-	9,38	5,69	-	4,45
6300	-	-	0,79	0,49	0,26	0,14	0,14	-	0,11
8000	-	-	-	0,48	0,15	0,11	0,08	-	0,06
10000	5,74	5,96	4,51	3,68	1,60	0,90	0,78	-	0,21

(-): valores no disponibles para el análisis

6.2. INFLUENCIA SOBRE MEDIDAS DE VALORES A 5000 Hz.

En las tablas mostradas a continuación, se recoge la desviación existente entre los valores globales, tanto de niveles de presión acústica promedio, como de potencia acústica, al considerar los valores obtenidos a la frecuencia de 5000 Hz:

Tabla 45: Desviación de los resultados globales de Lps al considerar los valores a 5000 Hz.
 Posiciones A-Drum.

Velocidad lineal (Km/h)	Posiciones A-Drum (10 micrófonos)		
	Lps (315-4000 Hz)	Lps (315-5000 Hz)	Δ (dBA)
40	78,0	78,3	0,3
50	81,4	81,7	0,3
60	84,3	84,5	0,2
70	86,4	86,5	0,1
80	88,2	88,3	0,1
90	89,9	90,1	0,2
100	91,9	92	0,1
110	93,2	93,3	0,1
120	94,9	95,1	0,2

Tabla 46: Desviación de los resultados globales de Lps al considerar los valores a 5000 Hz.
 Posiciones A-CPX.

Velocidad lineal (Km/h)	Posiciones A-CPX (5 micrófonos)		
	Lps (315-4000 Hz)	Lps (315-5000 Hz)	Δ (dBA)
40	78,0	78,4	0,4
50	81,5	81,8	0,3
60	84,6	84,4	0,2
70	86,9	87,1	0,2
80	88,9	89,1	0,2
90	90,2	90,3	0,1
100	92,3	92,4	0,1
110	93,5	93,7	0,2
120	95,5	95,6	0,1

Tabla 47: Desviación de los resultados globales de L_w al considerar los valores a 5000 Hz.
Posiciones A-Drum.

Velocidad lineal (Km/h)	Posiciones A-Drum (10 micrófonos)		
	L_w (315-4000 Hz)	L_w (315-5000 Hz)	Δ (dBA)
40	86,0	86,3	0,3
50	89,4	89,7	0,2
60	92,2	92,4	0,2
70	94,3	94,5	0,2
80	96,2	96,3	0,2
90	97,9	98,1	0,1
100	99,9	100,0	0,1
110	101,1	101,3	0,1
120	102,9	103,0	0,1

Tabla 48: Desviación de los resultados globales de L_w al considerar los valores a 5000 Hz.
Posiciones A-CPX.

Velocidad lineal (Km/h)	Posiciones A-CPX (5 micrófonos)		
	L_w (315-4000 Hz)	L_w (315-5000 Hz)	Δ (dBA)
40	86,0	86,3	0,3
50	89,5	89,8	0,3
60	92,6	92,8	0,2
70	94,9	95,1	0,2
80	96,9	97,0	0,2
90	98,2	98,3	0,2
100	100,3	100,4	0,1
110	101,5	101,7	0,1
120	103,4	103,6	0,1

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Ma, C. Li, M.-P. Kwan, L. Kou y Y. Chai. *Assessing personal noise exposure and its relationship with mental health in Beijing based on individuals' space-time behavior*. 2020.
- [2] P. R. Donovan y M. J. Crocker. *Handbook of Noise and Vibration Control*. John Wiley and Sons Inc Editorial Board. 2007.
- [3] P. Luque, D. Álvarez y C. Vera. *Ingeniería del Automóvil. Sistemas y Comportamiento Dinámico*. Thomson Ediciones. Madrid, España. 2005.
- [4] S. Ling, F. Yu, D. Sun, G. Sun y L. Xu. *A comprehensive review of tire-pavement noise: generation mechanism, measurement methods and quiet asphalt pavement*. Journal of Cleaner Production. Elsevier, 2020.
- [5] U. Sandberg y J. A. Ejsmont. *Tyre / Road Noise. Reference Book*. Informex. Kisa, Suecia. 2002.
- [6] U. Sandberg. *The Multi - Coincidence Peak around 1000 Hz in Tyre/Road Noise Spectra*. EURONOISE 2003. Nápoles, Italia.
- [7] T. Li. *Automotive Tire Noise and Vibrations. Analysis, Measurement, and Simulation. Chapter 3 - Influence of tread pattern on tire / road noise*. 2020.
- [8] H. Campello Vicente. *Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche, España. 2014.
- [9] N. Campillo. *Modelización experimental del ruido de rodadura en ensayo de homologación de neumáticos*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche, España. 2013.
- [10] ISO 11819-2. *Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2: "The Close Proximity Method"*,

- International Organisation for Standardization. Geneva, Switzerland. 2017.
- [11] D. Clar. *Metodología de ensayo en laboratorio para mediciones del ruido de rodadura de neumáticos*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche, España. 2017.
- [12] ISO 11819-1. *Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: "The Statistical Pass-By Method"*. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. 1997.
- [13] NFS 31-119-2. *Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – Procédure «Véhicules Maîtrisés»*. National French Standard, AFNOR. Paris. 2001.
- [14] K. Kowalski, T. Dare, R. McDaniel, J. Olek y R. Bernhard. *Research on a laboratory technique for tire-pavement noise assessment of asphalt mixes*. Lix. 2013.
- [15] R. Bernhard, W. Thornton y J. Bauman. *The Effects of Varying the Tire Cap Ply, Sidewall Filler Height and Pavement Surface Texture on Tire/Pavement Noise Generation*. Institute for Safe, Quiet and Durable Highways. Purdue University. West Lafayette, Indiana. 2003.
- [16] S. Ulf, B. Swiecko, J. A. Ejsmont y G. Ronowski. *Tyre/road noise reduction of poroelastic road surface tested in a laboratory*. Victor Harbour, Australia. 2013.
- [17] UNECE Regulation 117. *Uniform provisions concerning the approval of tyres with regard to rolling emissions and to adhesion on wet surfaces*. 2007.
- [18] J. Martínez Rocamora. *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. Universidad Miguel Hernández de Elche. Elche, España. 2020.
- [19] A. ISO 3744. *Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure. Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane*. International Organisation for Standardization. Geneva, Switzerland. 2010.

- [20] C. M. Harris. *Manual de mediadas acústicas y control del ruido*. Mc Graw Hill Interamericana de España, S. A. Madrid. 1995.
- [21] K. Mak, S. Lee, K. Ho y W. Hung. *Developing instantaneous tyre/road noise profiles: A note*, Hong Kong: Elsevier, 2010.

