

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO DE LA INCLUENCIA DE LA  
CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE  
CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE  
RODADURA DE NEUMÁTICOS  
EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

TRABAJO FIN DE GRADO

Enero -2024

AUTOR: Luis Cantos Siquier

DIRECTORES: Nuria Campillo Davó

Miguel Fabra Rodríguez

# ÍNDICE

## 1. Contenido

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
1.1	GENERALIDADES.....	3
1.2	CLASIFICACIÓN DEL SONIDO EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA.....	3
1.3	OBJETIVO DEL ESTUDIO.....	4
2.	GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE RUIDO .....	5
2.1	RUIDO PRODUCIDO POR UN VEHÍCULO.....	5
2.2	MECANISMOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA.....	7
2.3	MÉTODOS DE ENSAYO .....	10
3.	ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE .....	12
3.1	FUENTES SONORAS ARTIFICIALES .....	13
3.2	CÁMARA ACÚSTICA .....	17
3.3	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UMH CON LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.....	21
4.	MATERIALES Y PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	22
4.1	PUESTA EN MARCHA DE LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.....	22
4.2	PUESTA EN MARCHA DE LA CÁMARA ACÚSTICA. ....	25
4.3	ENSAYOS: MONTAJE Y DESCRIPCIÓN.....	25
5.	OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	31
5.1	RESULTADOS PARA FSA Y PARA NEUMÁTICO REAL A 80KM/H. ....	31
5.2	RESULTADOS PARA EL NEUMÁTICO REAL, CON EL DRUM GIRANDO A DISTINTAS VELOCIDADES. ....	44
6.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	60
6.1	INFLUENCIA DEL TIPO DE SUPERFICIE: ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA FSA Y PARA NEUMÁTICO REAL A 80KM/H. ....	60
6.2	ESTUDIO DEL RUIDO GENERADO POR EL NEUMÁTICO REAL GIRANDO EN EL DRUM A DISTINTAS VELOCIDADES .....	66
6.3	ESTUDIO DEL ESPECTRO SONORO GENERADO EN LOS ENSAYOS.....	71
7.	CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS .....	87
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	89

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

El ruido generado en las áreas urbanas, carreteras y autopistas cercanas a poblaciones es un fenómeno que al sobrepasar ciertos niveles puede causar alteraciones en el bienestar de la población e incluso tener efectos negativos en la salud de las personas, tales como la alteración del sueño, trastornos en la salud mental o incluso infartos, los cuales según la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), causa al año 16.600 muertes prematuras y más de 72.000 hospitalizaciones [1].

En particular, el ruido generado por los automóviles es uno de los más influyentes en áreas urbanas y otras zonas habitadas próximas a vías transitadas por vehículos.

El motor no es la única fuente sonora presente en el ruido de tráfico rodado. Sin embargo, a partir de ciertas velocidades, es el ruido producido por el contacto entre los neumáticos y el asfalto, llamado ruido de rodadura, el que genera una mayor cantidad de ruido. Por ello, la Universidad Miguel Hernández lleva años realizando estudios acerca del ruido de rodadura para tratar de encontrar métodos para reducir estas emisiones.

En Trabajos Finales de Grado previos se ha trabajado en la creación de una fuente de emisión de ruido de rodadura artificial con el fin de llevar a cabo ensayos de una manera menos aparatosa que ensayar todo un vehículo en movimiento y reducir la influencia de efectos ambientales en estos estudios, ya que con la fuente artificial los ensayos pueden llevarse a cabo dentro de un laboratorio, donde tenemos mayor control sobre factores externos como el ruido de fondo. Dicha fuente artificial fue creada por el alumno Jorge Martínez Rocamora y modificada por Adrián Rubio Rodríguez en sus respectivos trabajos finales.

### 1.2 CLASIFICACIÓN DEL SONIDO EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA

La frecuencia de las ondas sonoras es la que determina la tonalidad con la que se percibe un sonido.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

Mostramos a continuación cómo se clasifican los sonidos en base a su frecuencia en Hertzios (Hz) [2]:

<b>-20 Hz</b>	No escuchamos frecuencias por debajo de 20 Hz. Son los <b>infrasonidos</b> . Aunque sí los sentimos. Un ejemplo son las vibraciones que hacen temblar los cristales al pasar cerca un gran camión.
<b>20 Hz a 250 Hz</b>	Frecuencias <b>graves</b> . Por ejemplo, un tambor o un bajo eléctrico.
<b>250 Hz a 2000 Hz</b>	Frecuencias <b>medias</b> . Un ejemplo, la nota “La” o “A”(notación anglosajona). La cual se considera como el tono musical medio, con una frecuencia de 440 Hz.
<b>2000 Hz a 20000 Hz</b>	Sonidos <b>agudos</b> . Por ejemplo, los platillos de una batería.
<b>+ 20000 Hz</b>	Son los <b>ultrasonidos</b> . Estas frecuencias tampoco las pueden escuchar los seres humanos. Por ejemplo, un silbato de adiestramiento canino, el cual los perros pueden escuchar, pero nosotros no.

### 1.3 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El presente trabajo tiene como finalidad analizar la influencia que tiene el tipo de superficie sobre el ruido de rodadura y compararlo con el ruido generado por una fuente sonora artificial a través de la realización de ensayos con una cámara acústica.

Los ensayos que se llevan a cabo en el presente trabajo nos permiten sacar conclusiones de cómo se comportan los valores de presión sonora, así como la localización y propagación del ruido de rodadura, al ensayarse bajo ciertas circunstancias:

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

- Un neumático real montado sobre una máquina de ensayo de neumáticos (Drum)
- Una Fuente Sonora Artificial (FSA) montada sobre una máquina de ensayo de neumáticos.
- Una Fuente Sonora Artificial apoyado sobre una superficie plana reflectante.

Se llevarán a cabo ensayos colocando una fuente sonora artificial sobre una superficie plana reflectante en campo abierto y sobre la máquina de ensayo de neumáticos situada en el edificio Torreblanca de la Universidad, permitiendo así visualizar la propagación del ruido generado y la influencia que tiene cada tipo de superficie en esta.

En la máquina de ensayos de neumáticos se montará también un neumático real para comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos con la FSA.

Otra finalidad de este trabajo es aportar datos de partida que puedan ser de utilidad en investigaciones futuras de la UMH, como por ejemplo, la aplicación de distintos métodos de medida de niveles de ruido a la fuente sonora artificial con el objetivo de validar el funcionamiento de esta y poder llevar a cabo estudios más concretos en el futuro utilizando esta fuente, sin necesidad de hacer circular un vehículo.

## 2. GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE RUIDO

### 2.1 RUIDO PRODUCIDO POR UN VEHÍCULO

El ruido emitido por un automóvil es generado por cuatro mecanismos diferentes, cobrando cada uno de ellos mayor importancia dependiendo de las condiciones de vehículo o del régimen de funcionamiento en el que este se encuentre. Estas sub-fuentes sonoras son: el ruido del conjunto motor-transmisión, el ruido de escape, el ruido aerodinámico del vehículo y el ruido generado en el contacto entre neumático y pavimento, también llamado ruido de rodadura [3].

**-Ruido del conjunto motor-transmisión:** Es el principal mecanismo de emisión de ruido a **bajas velocidades**. El nivel de ruido puede variar según el tipo de vehículo, el tipo de combustible que utilice, la frecuencia de giro o la antigüedad del vehículo, ya que

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

últimamente se ha reducido en gran medida la emisión sonora de los motores, e incluso eliminado casi totalmente en el caso de los vehículos eléctricos.

**-Ruido de escape:** Tiene menor importancia relativa, salvo en el caso de vehículos con modificaciones en el escape. Este mecanismo de generación de ruido se puede incluir dentro del apartado anterior, constituyendo un mecanismo formado por la admisión, el bloque motor y el escape.

**-Ruido aerodinámico:** Este mecanismo de generación de ruido no llega a ser el predominante en ningún tipo de vehículo o régimen de funcionamiento. Sin embargo, cobra mayor importancia según se incrementa la velocidad, llegando a superar en importancia al ruido motor del vehículo a partir de velocidades mayores que 110 km/h.

**-Ruido de rodadura:** Es el principal mecanismo generación de ruido a partir de velocidades que superen los **50 km/h**. Puede llegar a cobrar mayor importancia al aumentar la carga del vehículo o circulando sobre ciertos tipos de asfalto.

A continuación, la Figura 1 muestra la contribución sonora de estos mecanismos al ruido total emitido para velocidades entre 50 km/h y 130 km/h:

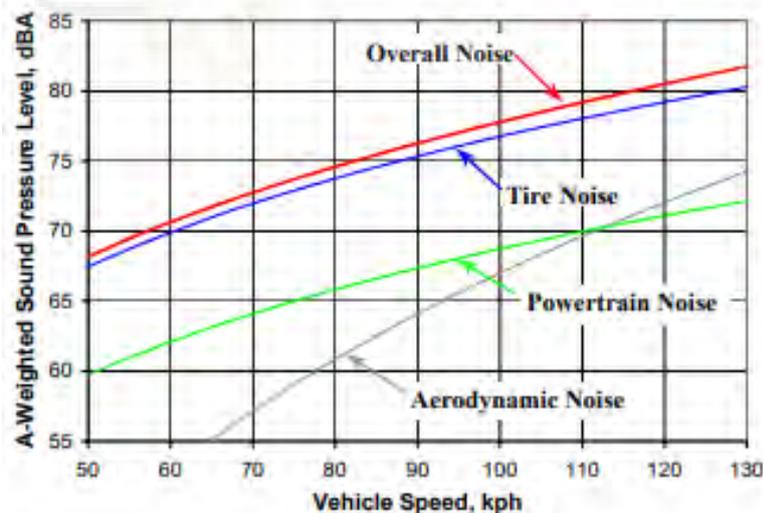


Figura 1: Contribución de los mecanismos de generación de ruido al ruido emitido total [3]

El presente trabajo se centrará en el estudio del ruido de rodadura, cuya forma de generación y propagación desde la fuente será descrita a continuación.

## 2.2 MECANISMOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

### 2.2.1 Generación del ruido de rodadura.

Los principales mecanismos de generación del ruido de rodadura son los descritos a continuación [3]:

**-Vibración de la banda de rodadura:** Los bloques de rodadura del neumático entran en contacto y se separan del asfalto conforme el neumático va girando. Esto provoca una vibración de la carcasa del neumático. La textura del asfalto y el dibujo de neumático pueden reducir la repetitividad de este impacto, cambiando el tipo de sonido. La Figura 2 esquematiza este mecanismo de generación de ruido.

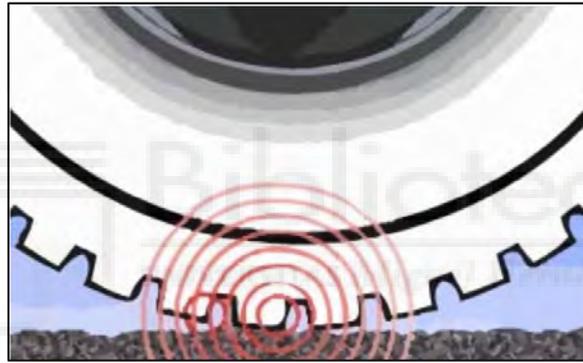


Figura 2: Generación de ruido por vibración de la banda de rodadura.[4]

**-Bombeo de aire:** El aire que se almacena en los surcos del neumático se comprime cuando los bloques de rodadura se comprimen debido al contacto con el asfalto. Debido a esta compresión, el aire se bombea hacia dentro y fuera de estos bloques desde la parte delantera y trasera del neumático respectivamente, según el sentido de la marcha. Estos efectos aerodinámicos generan el ruido por bombeo de aire. Este mecanismo se esquematiza a continuación, en la Figura 3.

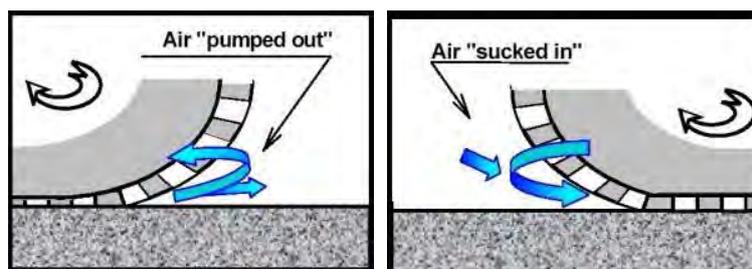


Figura 3: Generación de ruido por bombeo de aire [3].

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

**-Slip-stick:** En la banda de contacto se produce una fuerza de atracción entre el asfalto y los bloques de rodadura debido a los acelerones y los frenazos. La distorsión de la carcasa del neumático en la banda de contacto crea fuerzas horizontales en los bloques de rodadura. Si esta fuerza horizontal supera la fuerza de tracción, se produce un deslizamiento de los bloques que generará este ruido. La [Figura 4](#) muestra un conocido ejemplo de cómo se produce este sonido en otros ámbitos, además de un esquema del mecanismo de generación.

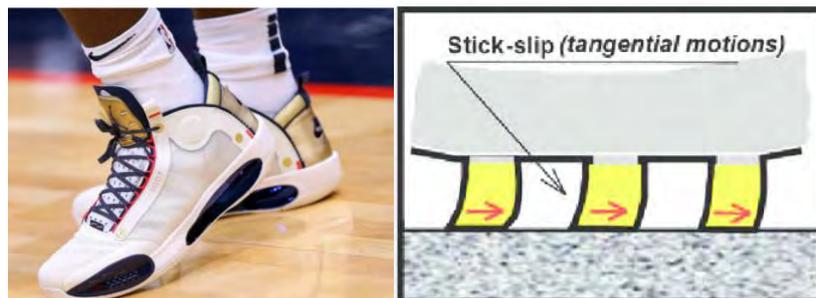


Figura 4: Generación de ruido por slip-stick [5] [3].

**-Stick-snap o adhesión-liberación:** Se produce una adhesión debido al contacto entre el bloque de rodadura y el asfalto. Cuando esa adhesión se libera, se produce energía y vibración que generan este ruido, esto se puede apreciar gráficamente en la [Figura 5](#).

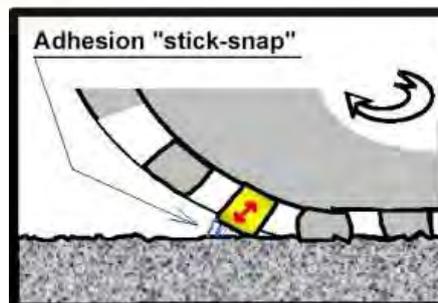


Figura 5: Generación de ruido por stick-snap o adhesión-liberación [3].

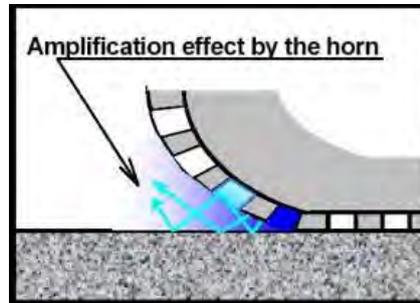
### 2.2.2 Mecanismos de propagación del ruido de rodadura

Existen diversas características del neumático y su contacto con el pavimento que favorecen la amplificación y propagación de ruido de rodadura. A continuación, se exponen algunas de ellas [3].

**-El efecto bocina:** La forma de garganta dibujada por el contacto entre el asfalto y la banda de rodadura, causa unos efectos de resonancia similares a los producidos por un

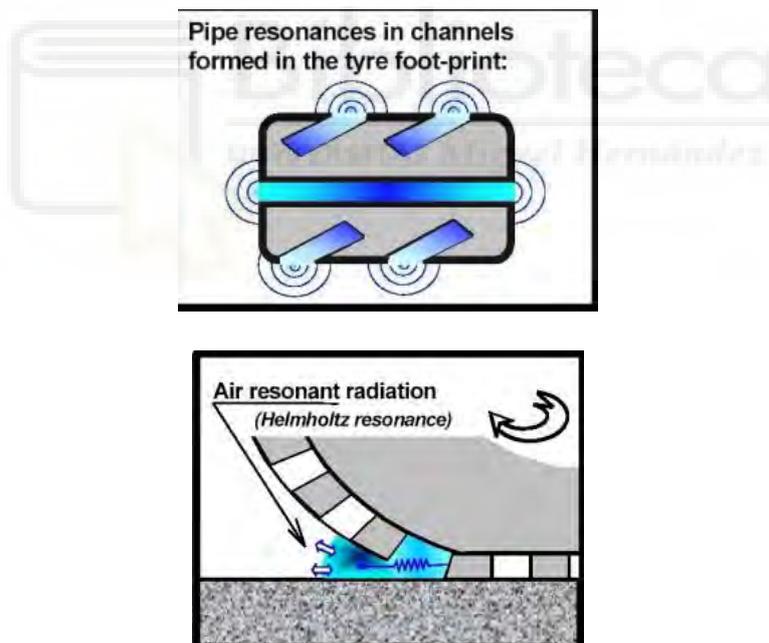
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

instrumento musical. Esto provoca una considerable amplificación del ruido generado en el punto de contacto del neumático. Este efecto se esquematiza en la [Figura 6](#).



[Figura 6](#): Propagación de ruido por efecto bocina [3].

**-Tubos de órgano y resonadores de Helmholtz:** Los surcos de los neumáticos en contacto con el asfalto crean una forma tubular la cual favorece la propagación de ruido. Los resonadores de Helmholtz tienen un mecanismo similar al del silbato producido al soplar en una botella. Estos mecanismos se esquematizan en la [Figura 7](#).



[Figura 7](#): a) Propagación de ruido por tubos de órgano. b) Propagación de ruido por resonadores del Helmholtz [3].

**-Vibración de la carcasa:** Las ondas vibratorias producidos en la interfaz del neumático y el asfalto se propagan por la carcasa del neumático. También vibran las paredes laterales del neumático cerca de la zona de rodadura. Se produce así una irradiación de sonido, según se ilustra en la [Figura 8](#).

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

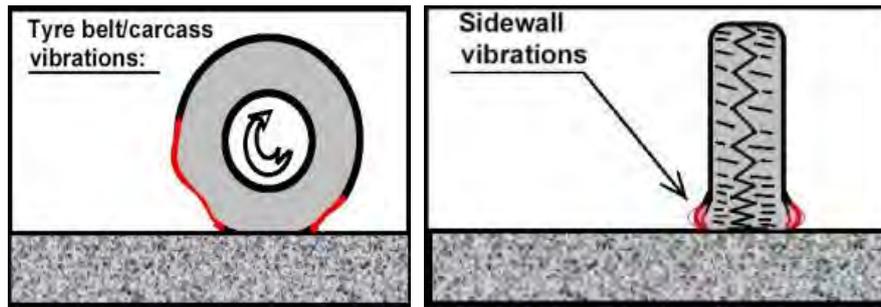


Figura 8: Propagación de ruido por vibración de la carcasa alrededor de la banda de rodadura y en las paredes laterales del punto de contacto con el asfalto [3].

**-Resonancia acústica interna:** El aire utilizado para hinchar el neumático es excitado por las vibraciones del propio neumático. En ocasiones se alcanza una frecuencia similar a la frecuencia natural del cerramiento toroidal en el que se encuentra el aire, haciendo resonar el aire y provocando así un efecto audible. Este fenómeno se ilustra en la Figura 8.

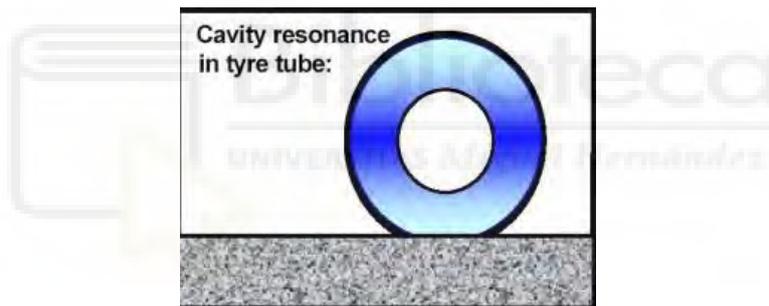


Figura 9: Propagación de ruido por resonancia acústica interna [3].

### 2.3 MÉTODOS DE ENSAYO

Para evaluar el nivel de ruido emitido por la rodadura de un automóvil existen métodos de medida específicos cuyos procedimientos y cálculos vienen detallados en sus respectivas normativas. Cada uno tiene sus particularidades, siendo importante la elección del método más apropiado a la hora de realizar un estudio. Estos métodos son los siguientes:

**-Acceleration Pass-By (APB):** Este método mide el ruido emitido por todo el conjunto del vehículo, sobre una superficie plana que cumpla con las características especificadas en la norma ISO 10844 [6]. Es decir, además del ruido de rodadura mide el ruido de los

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

elementos mecánicos y el ruido aerodinámico. Este método está recogido en la norma ISO 362 [7].

**- Método *Coast-By* (CB):** Es un método muy similar al anterior, con la diferencia de que en este método al llegar a la zona en la que se encuentran los micrófonos se apaga el motor del vehículo, con el fin de eliminar la influencia del ruido del motor en la medida registrada. Es decir, es un método específico para la medición del ruido de rodadura. Este método se encuentra también encuadrado en la norma ISO 362 [7].

**- Método *Statistical Pass-By* (SPB):** Es un método enfocado más bien a evaluar el efecto que tienen los diferentes tipos de asfalto en los niveles de ruido emitidos por los automóviles. Para ello se realizan mediciones individuales a un gran número de vehículos a distintas velocidades, tratando los datos de manera estadística para obtener resultados significativos. Este método está recogido en la norma UNE EN ISO 11819-1 [8].

**-Close Proximity Method (CPX):** Este ensayo consiste en testar ruido de rodadura del neumático rodando sobre la carretera o una pista de pruebas con micrófonos colocados en posiciones cercanas a superficie del neumático. Con este método se obtienen valores de presión sonora emitidos por varios neumáticos de referencia, medidos durante una distancia arbitraria o específica, a la velocidad a la que se quiera probar el neumático. Estos datos se recogen mediante al menos dos micrófonos situados cercanos al neumático. La metodología queda recogida en la norma ISO 11819-2 [9].

**-Método *Drum* (DR):** Consiste en montar el neumático en un banco de ensayo con forma de disco y entre 1,5 m y 2,5 m de diámetro. El disco rota sobre su eje, normalmente vertical, permitiendo al neumático girar libremente en una posición estática. Este banco de ensayo se utiliza a menudo para probar la adherencia o durabilidad de los neumáticos, pero también se utiliza para realizar ensayos acústicos del ruido de rodadura, utilizando una posición de los micrófonos similar a las del ensayo CPX, el cual se describe a continuación. La metodología se encuentra recogida en la norma ISO 20908 [10].

A continuación, se exponen brevemente los métodos de medida alternativos que han sido desarrollados por profesores de la UMH:

**-Alternative Coast by (A-CB):** Es un método de medida desarrollado por la doctora y profesora Nuria Campillo, de la UMH. El procedimiento a seguir, es el mismo que el utilizado en el método Coast By, pero en este caso se colocan los micrófonos en torno al

neumático en posiciones de campo lejano, permitiendo obtener los niveles de potencia sonora a partir de los niveles de presión sonora medidos, aplicando los procedimientos de cálculo de la norma ISO 3744 [11]. Se combina este procedimiento de cálculo con la metodología de ensayo de la Directiva 2001/43/EC para obtener valores de potencia sonora emitidos en la rodadura del neumático [12].

**-Alternative Close Proximity Method (A-CPX):** Es un método desarrollado también por la doctora Nuria Campillo, el cual procede de una manera similar al método CPX, cuya metodología está recogida en la norma ISO 11819-2 [9], pero colocando los micrófonos en el campo lejano del neumático para aplicar los procedimientos de la norma ISO 3744 [11] y obtener así los niveles de potencia sonora a partir de los valores de presión sonora. Se asume que la fuente sonora se encuentra posicionada sobre dos planos reflectantes: la superficie del asfalto y la carrocería del vehículo [12].

**-Alternative Drum Method (A-DR):** Tiene una naturaleza parecida a la del A-CPX. El método A-DR, desarrollado por el profesor David Clar García, combina la técnica del método *Drum* con la aplicación de la norma ISO 3744 [11] para obtener los niveles de potencia acústica a partir de los valores de presión acústica que se consiguen con el *Drum* tradicional en campo libre y sobre un plano reflectante. En la UMH, los neumáticos se montan en un tambor probador de 1700 mm de diámetro y es movido por un motor eléctrico de 110 kW controlando la velocidad de giro, además de controlar las condiciones ambientales de la sala de ensayo tales como la temperatura y la presión [12].

### 3. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Al llevar a cabo este trabajo, cabe destacar la importancia de otros trabajos previos, sin los cuales no hubiese sido posible desarrollar este estudio.

Por un lado, se han creado distintas fuentes sonoras artificiales desde que se empezó a estudiar la emisión sonora de los neumáticos de los vehículos, a las cuales se hace mención en el apartado 3.1.1. En la UMH, se construyó una fuente sonora artificial en el año 2013, la cual serviría como base para que posteriormente, en el año 2020, se hiciera ciertas modificaciones de diseño, creando un modelo mejorado de esta, que es la fuente que se utiliza en el presente trabajo para llevar a cabo los ensayos con la cámara acústica.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

También es importante la mención de la cámara acústica utilizada en los ensayos, desarrollada por Gfai Tech, así como sus utilidades y funcionamiento, además de los trabajos que ya han sido realizados con ella anteriormente.

### 3.1 FUENTES SONORAS ARTIFICIALES

Una fuente sonora artificial, según su definición, es cualquier fuente de sonido que no provenga de la naturaleza. Es decir, el ruido de un vehículo, un avión, una sirena, o un instrumento musical, pertenecerían a esta categoría.

Sin embargo, cuando en este trabajo nos referimos a “fuente sonora artificial” nos referimos a una máquina acústica cuya función es imitar el sonido de otra máquina (normalmente mecánica) o fenómeno.

La utilidad de estas fuentes sonoras artificiales es la de poder reproducir estos sonidos sin la necesidad de que se produzcan estos fenómenos, los cuales pueden ser de carácter impredecible, o evitar poner en funcionamiento la máquina real, lo cual en ocasiones puede requerir de importantes despliegues de medios.

En nuestro caso utilizamos a fuente sonora artificial para imitar el ruido de rodadura de un vehículo, sin necesidad de poner en un automóvil en funcionamiento, pudiendo así realizar los ensayos de una forma más cómoda, económica y controlada.

Mencionamos ahora algunas de las fuentes sonoras artificiales que han sido creadas para el estudio de la emisión sonora de neumáticos.

#### 3.1.1 Fuentes previas

Anteriores a las de la UMH, se desarrollaron otras fuentes sonoras artificiales que ya se encargaban de imitar el ruido de rodadura de los automóviles.

Cada una de ellas fue construida en un material distinto, pero todas ellas se parecían en lo esencial: conservar la forma del neumático real para recrear una correcta propagación del sonido, y la emisión del ruido mediante altavoces integrados en el propio neumático, situados en los puntos donde tienen lugar los principales mecanismos de emisión y propagación del ruido de rodadura. Esto se ilustra en la Figura 10.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

Estas fuentes son la “Tug’s Artificial Noise Source”[13], la “M+P Noise Source”[13] y la “Fuente artificial para los estudios SPERoN”[14], ilustradas en la Figura 10. No entramos en mayor detalle acerca de estas fuentes ya que se excederían los contenidos que se quieren incluir en este trabajo, pero sí que es importante destacar la importante influencia que tienen estas fuentes en la creación de las fuentes artificiales de la UMH, de las que hablamos a continuación.



Figura 10: Fuentes sonoras artificiales precias: TUG [13] – M+P [13] - SPERoN[14].

### 3.1.2 Fuentes sonoras artificiales de la UMH

A continuación, se exponen las fases por las que han pasado los procesos de diseño y construcción de ambas fuentes artificiales de la UMH, hasta convertirse en la fuente definitiva utilizada en los ensayos del este trabajo.

#### **-FSA UMH versión 1:**

Se parte de la idea de utilizar un neumático real como soporte, al que irán acoplados los altavoces, con la finalidad de poder cambiar los altavoces a otros neumáticos y poder estudiar las variaciones de los resultados en función del tipo de neumático empleado.

Para determinar la emisión sonora de los altavoces, se utilizó el programa EASE 4.3, en el cual diseñando un modelo del neumático en contacto con el asfalto y unos receptores situados en la posición del ensayo A-CPX, se simulan distintas configuraciones de posición de los altavoces.

Los resultados de presión sonora son comparados con los datos de presión sonora reales de un ensayo A-CPX real. Tras comparar los resultados de diferentes configuraciones de altavoces, se escoge una configuración de 7 altavoces: uno en cada uno de los cuernos y

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

5 en la cara frontal, 3 en la parte inferior y 2 en la parte superior de esta, según se indica en la Figura 11 [15].

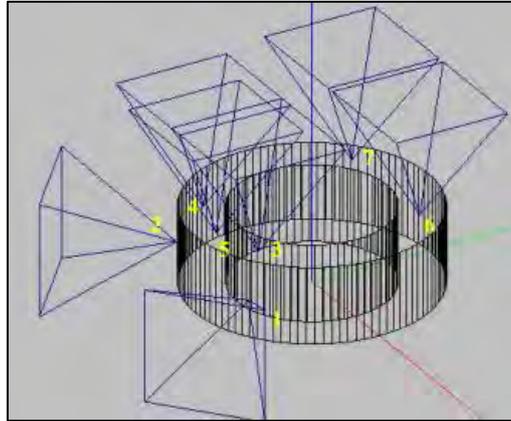


Figura 11: Diseño de configuración de altavoces de la FSA versión 1 [15].

Utilizando la Norma UNE-EN ISO 3744:2010, tomando datos para cada punto de medida y para cada altavoz, se determina el nivel de potencia sonora de cada altavoz.

También se determinan unos parámetros de ecualización para cada banda de tercio de octava de cada altavoz.

Para el montaje de la fuente se perforaron orificios en el neumático, donde se atornillaron los altavoces, pasando el cableado por el interior del neumático.

Para llevar a cabo la emisión controlada de los altavoces, se utilizaron 4 amplificadores y una tarjeta de sonido, pudiendo controlar la emisión de cada altavoz de forma independiente a través del programa Adobe Audition. Las configuraciones de las conexiones eran las siguientes, según indica las Figuras 12 y 13: [15]

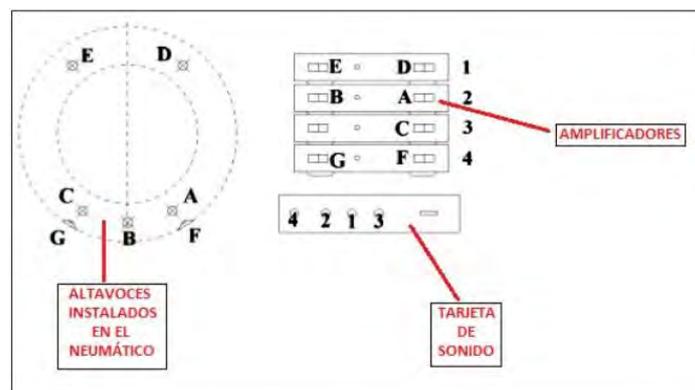


Figura 12: Esquema de las conexiones de la FSA UMH versión 1. [15]

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



Figura 13: Montaje completo de la FSA UMH versión 1.[15]

**-FSA UMH versión 2:**

Posteriormente, en el año 2020, se partió de la fuente desarrollada en el 2013 para crear la fuente definitiva con la que trabajamos en el presente estudio.

Se dispone un diseño con 12 altavoces, añadiendo 5 altavoces en la cara trasera del neumático colocados de forma simétrica a los de la cara anterior.

Con el fin de reutilizar los componentes de la fuente anterior, se conectan en serie a los amplificadores los altavoces que son simétricos entre sí, pudiendo ya que al aplicar a ambos los mismos parámetros de ecualización pueden ser emitidos por el mismo canal de pista. Según se indica en la Figura 14, quedan así las conexiones utilizadas para el funcionamiento de esta fuente [16]:

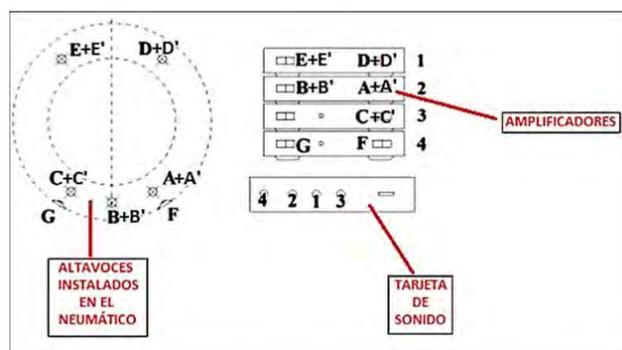


Figura 14: Esquema de las conexiones de la FSA UMH versión 2. [16]

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

El proceso de construcción fue similar al de la fuente previa, cambiando el neumático por uno conservado en mejores condiciones e instalando en él un mayor número de altavoces [16]. Se muestra fotografía en la Figura 15:



Figura 15: Montaje completo de la FSA UMH versión 2.[16]

### 3.2 CÁMARA ACÚSTICA

Utilizamos una cámara acústica como receptor del ruido emitido en los ensayos. Este instrumento comercializado por Gfai Tech, nos permite convertir la señal acústica en una imagen proyectada en el plano de la cámara, permitiéndonos así localizar las fuentes de ruido de una máquina o una industria, paso fundamental para la futura reducción o eliminación de los niveles de ruido que genera. En la Figura 16 se muestran los instrumentos utilizados para el empleo de la cámara acústica:



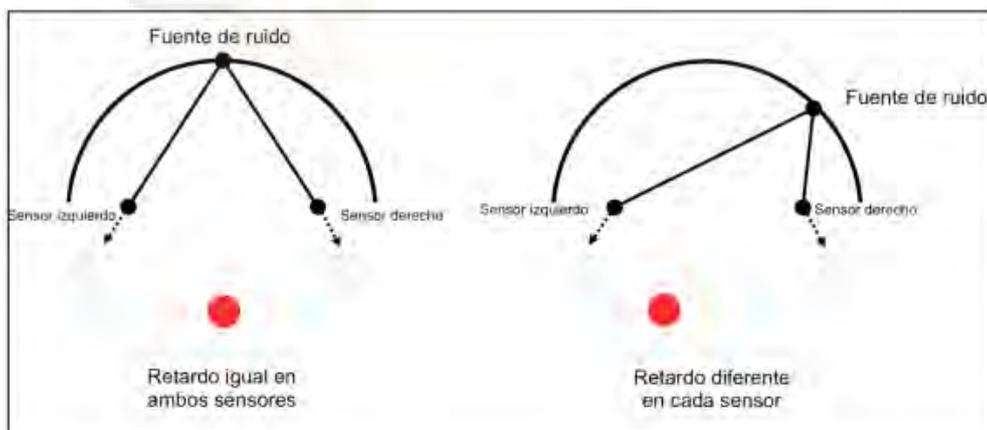
Figura 16: Array de micrófonos RING 48 AC PRO y sistema de adquisición de datos mcdRec [17].

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

Esta cámara acústica consta de una cámara de vídeo sujeta a un mástil y rodeada por un anillo de 48 micrófonos.

Para determinar la ubicación de una fuente emisora de ruido y poder localizarla en la imagen, la cámara acústica utiliza la diferencia del retardo en la señal captada por cada micrófono y las distancias entre la fuente sonora y cada micrófono, determinando así la posición de una fuente sonora en el plano de la imagen.

A continuación, se muestra un esquema del principio de funcionamiento de la cámara acústica. En este ejemplo, se está ubicando la fuente únicamente en el eje horizontal utilizando dos micrófonos, uno a cada lado. Cuando la fuente emisora se desplaza hacia la derecha, se observa cómo el micrófono de la izquierda tiene un retardo mayor que el de la derecha (representado por el punto rojo), por lo que se determina que la fuente está más cerca del micrófono de la derecha. Teniendo en cuenta que la cámara acústica cuenta con un array de micrófonos circular, se puede hacer una localización de la fuente en 2D en todo el plano de la imagen [17]. Este principio de funcionamiento se ilustra en la [Figura 17](#).



[Figura 17](#): Principio de funcionamiento de la cámara acústica. [15]

Una vez es procesada la señal captada por el sistema de adquisición de datos mcdRec de *Gfai Tech*, mediante el software NoiseImage 4.13.4, el sistema es capaz de mostrar los niveles de presión sonora mediante una escala de colores superpuesta a la imagen captada por la cámara de vídeo [15], según muestra la [Figura 18.7](#)

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

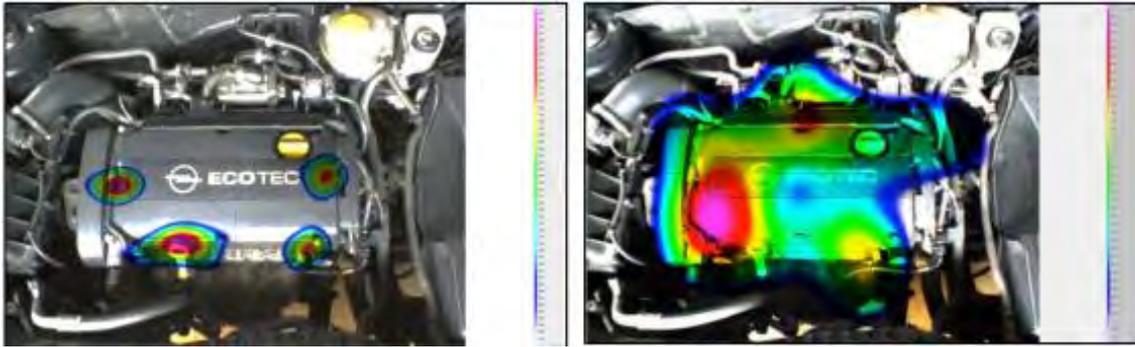


Figura 18: Localización de fuentes de ruido en un motor utilizando la cámara acústica. [17]

Ya se han realizado diversos estudios con la cámara acústica con el fin de localizar fuentes de ruido en máquinas y procesos industriales. A continuación, se comentan algunos de ellos [17].

### **-Localización sonora en drones mediante Acoustic Camera:**

Este estudio fue llevado a cabo por Pablo Alloza y Benjamin Vornhein y tenía como objetivo reducir el ruido emitido por los drones, tanto para reducir los niveles de ruido por motivo de salud cuando son pilotados ceca de personas como para minimizar el ruido en situaciones en las que un dron precise no ser detectado [17]. En la Figura 19 aparecen ejemplos de imágenes tomadas en estos ensayos:

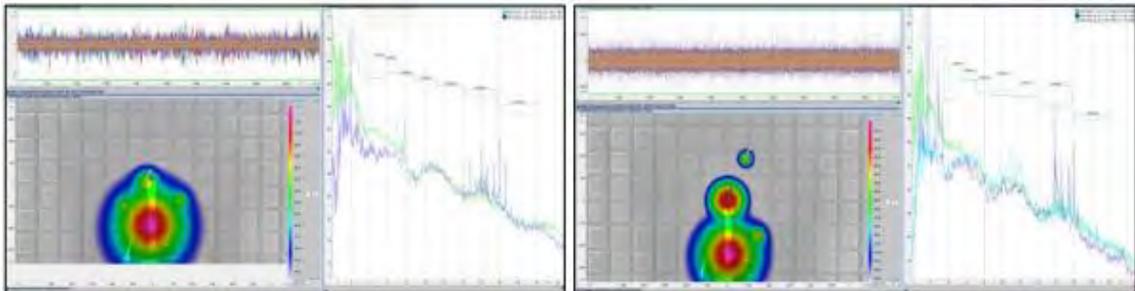


Figura 19: Imágenes de algunos de los resultados del estudio de localización sonora en drones con la Acoustic Camera. [17]

### **-Evaluación de la emisión acústica de los alerones y retrovisores de un vehículo en el interior del túnel de viento:**

En este trabajo llevado a cabo por los mismos autores se utilizaron 3 arrays de micrófonos paralelos a los laterales y techo del vehículo para evaluar la influencia de las distintas partes del coche en la generación de ruido aerodinámico del automóvil [17]. En la Figura 20 aparecen ejemplos de imágenes tomadas en estos ensayos:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



Figura 20: Imágenes del estudio de localización sonora de ruido aerodinámico de vehículos en túnel de viento [17].

**-Análisis sonoro de la circulación de un vehículo eléctrico sobre resaltos:**

Este análisis fue llevado a cabo en la UMH por el alumno Elicio Manuel Mora Saura en su Trabajo de Fin de Grado, haciendo circular un vehículo eléctrico sobre un resalto y captando la emisión de ruido con la cámara acústica. La ventaja del empleo del vehículo eléctrico es la reducción casi por completo de la emisión de ruido del motor, pudiendo así captar de forma más limpia el ruido de rodadura [18]. En la Figura 21 aparece un ejemplo de imagen tomada en estos ensayos:



Figura 21: Imagen del Análisis sonoro de la circulación de un vehículo eléctrico sobre resaltos [18].

### 3.3 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE LA UMH CON LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.

El trabajo realizado con la fuente sonora artificial forma parte de un trabajo de investigación de la UMH.

Esta línea de investigación consiste en utilizar datos recogidos en ensayos CPX, A-CPX y A-DRUM aplicados a la FSA y a neumáticos reales situados tanto sobre una superficie plana como montados en la máquina de ensayo de neumáticos Drum para poder así observar el comportamiento de la FSA para darle validez y además estudiar la influencia que tiene la curvatura de la superficie de la máquina de neumáticos sobre los resultados de estos experimentos como resultado de una distinta propagación del sonido.

Tras surgir la oportunidad de utilizar la Acoustic Camera en la Universidad, se decidió incorporar su utilización a la investigación. En este Trabajo Final de Grado se contribuye a la línea de investigación anteriormente citada tomando imágenes acústicas de la FSA montada en la máquina de ensayo de neumáticos y sobre una superficie plana reflectante, con el fin de comparar la propagación del ruido en una superficie y en otra, según se muestra en la [Figura 22](#) (en color verde se muestran los ensayos que son objeto del presente trabajo):

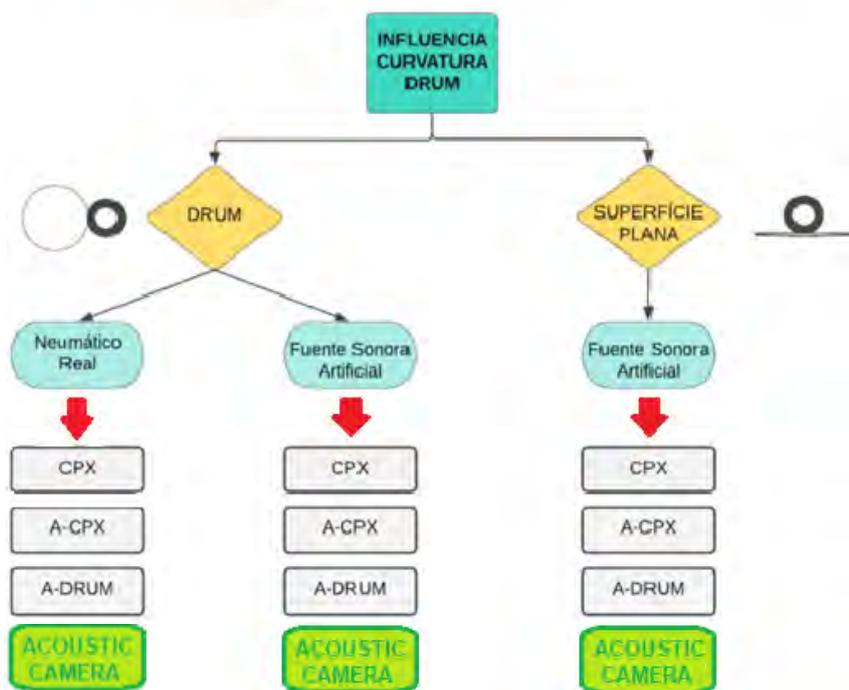


Figura 22: Línea de investigación de la UMH utilizando la Acoustic Camera.

## 4. MATERIALES Y PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

### 4.1 PUESTA EN MARCHA DE LA FUENTE SONORA ARTIFICIAL.

El conjunto que hace funcionar fuente sonora artificial consta de las siguientes partes fundamentales:

**-Fuente emisora:** Es la parte que se encarga de emitir el sonido de la fuente sonora artificial. Consta del neumático (cuerpo) y los altavoces (emisores) que van acoplados en él. Se muestra fotografía de la fuente emisora en la [Figura 23](#):



[Figura 23](#): Neumático con altavoces emisores montados.

**- Hardware y conexiones:** Esta es la parte en la que la señal de salida de audio generada mediante software se procesa para que salga en forma de sonido por los altavoces. Consta de una tarjeta de sonido, 4 amplificadores y el cableado.

Se conecta cada una de las cuatro salidas de la tarjeta de sonido a uno de los amplificadores, con capacidad para alimentar independientemente un total de 8 altavoces (dos por amplificador).

Puesto que altavoces A-A', B-B', C-C', D-D' y E-E' están dispuestos simétricamente en la envolvente del neumático, requieren de los mismos parámetros de audio (ecualización), por lo que se conecta cada pareja de altavoces homónimos a una misma salida del amplificador.

Esto nos permite controlar todos los altavoces mediante las 8 salidas de las que disponemos en los amplificadores, controladas por las 4 salidas de la tarjeta de sonido.

El Hardware y las conexiones utilizadas se muestran en la [Figura 24](#):

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

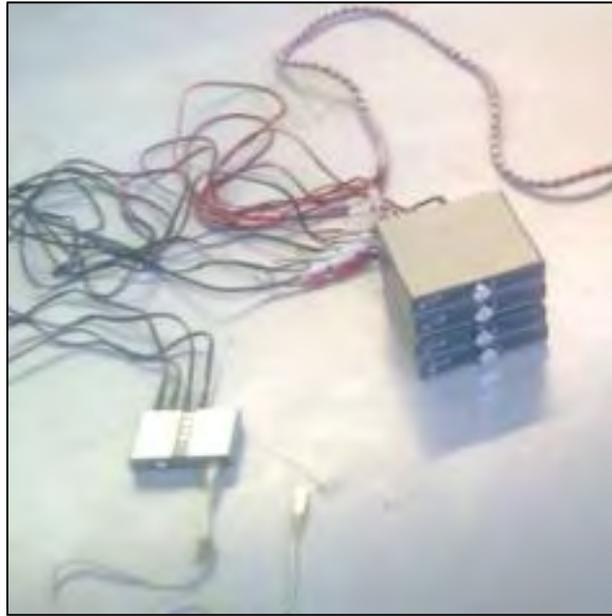


Figura 24: Hardware y conexiones de la FSA.

**-Software:** Conjunto de programas informáticos que se encargan de crear la señal de audio y asignarla a los canales de la tarjeta de sonido.

Se utiliza el programa Audicity para crear una pista de ruido rosa y mediante el programa Adobe Audition se modifica y se asigna a los canales de audio.

Durante el desarrollo de la primera versión de la FSA, se diseñaron unos parámetros de ecualización para cada uno de los siete altavoces de la que esta disponía, es decir, en cada altavoz se aplicaban ganancias a cada banda de tercio de octava para crear el ruido de rodadura deseado. Estos parámetros de ecualización eran los siguientes.

Faltarían los parámetros de ecualización de los altavoces A', B', C', D' y F' de la nueva fuente a los cuales se les aplican los parámetros de los altavoces A, B, C, D, E y F para conseguir una emisión simétrica. Queda así configurada la fuente sonora artificial para la realización de los experimentos. Los parámetros de ecualización quedan reflejados en la Tabla 1:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

<b>Ecuación (dB)</b>							
<b>Frecuencia (Hz)</b>	Altavoz F	Altavoz G	Altavoz A-A'	Altavoz C-C'	Altavoz B-B'	Altavoz D-D'	Altavoz E-E'
<b>315</b>	-29.5	-30.2	-24.5	-30.5	-30.5	-30.5	-29
<b>400</b>	-28	-33	-26.5	-32.5	-32.5	-31.3	-31
<b>500</b>	-26.4	-32	-25	-31	-31	-29	-32
<b>630</b>	-23.2	-25.7	-16.3	-22.3	-22.3	-23.8	-25.8
<b>800</b>	-15.3	-19.7	-8.7	-14.7	-14.7	-17.7	-17.8
<b>1000</b>	-15	-19	-10	-16	-16	-16.5	-19.6
<b>1250</b>	-13	-14	-9	-15	-15	-17	-19
<b>1600</b>	-14	-15.5	-11	-17	-17	-18	-20
<b>2000</b>	-14	-16	-14	-20	-20	-17	-20
<b>2500</b>	-17	-18	-15	-21	-21	-19	-21
<b>3150</b>	-19.2	-21	-16.8	-22.8	-22.8	-21	-23
<b>4000</b>	-21	-24.3	-19	-25	-25	-23	-25
<b>5000</b>	-23.3	-24.3	-20	-26	-26	-24	-26
<b>6300</b>	-24.2	-25	-19.8	-25.8	-25.8	-25	-27.8
<b>8000</b>	-23	-25	-20	-26	-26	-23.3	-29
<b>10000</b>	-26	-30	-24	-30	-30	-27	-32

Tabla 1: Parámetros de ecualización del TFG de Adrián Rubio [15].

Emitiremos con la fuente sonora artificial 3 pistas de audio distintas:

- Ruido rosa: Este ruido se define como un sonido con un espectro de banda estrecha cae 3dB/octava, y tiene un espectro de banda de octava plana y 1/3 de octava [19].
- Ruido ecualizado 15: Es el sonido que se obtiene al aplicarle al Ruido rosa, los parámetros de ecualización de la figura 23 y reproducirlo al 15% de la capacidad total del equipo de audio.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

- Ruido ecualizado 25: Es el sonido que se obtiene al aplicarle al Ruido rosa, los parámetros de ecualización de la figura 23 y reproducirlo al 25% de la capacidad total del equipo de audio.

## 4.2 PUESTA EN MARCHA DE LA CÁMARA ACÚSTICA.

En primer lugar, se coloca el array de micrófonos en la posición deseada. Es importante que el plano del array de micrófonos sea paralelo al plano en el que queremos visualizar la imagen.

Se utilizan varias posiciones para cada ensayo, con el fin de visualizar cómo se comporta la emisión acústica en diferentes planos.

Mediante el sistema de adquisición de datos mcdRec se almacena la señal captada por cada micrófono del array, así como la imagen captada por la cámara. Estas señales son guardadas para su posterior procesado.

## 4.3 ENSAYOS: MONTAJE Y DESCRIPCIÓN.

Los ensayos que realizamos se enfocan principalmente en el estudio de la influencia de la superficie sobre la que se apoya el neumático y a la comparación entre el comportamiento acústico de la FSA y el de un neumático real.

Realizamos por tanto mediciones con la cámara acústica a la fuente sonora artificial montada en la máquina de ensayo de neumáticos y colocada sobre una superficie plana reflectante en campo abierto. En la máquina de ensayo de neumáticos, también se realizarán ensayos con un neumático real girando a distintas velocidades, para poder comparar los resultados con los obtenidos con la FSA.

Los ensayos se realizan de la forma más análoga posible teniendo en cuenta las dimensiones del espacio disponible y los obstáculos dentro de la sala de ensayo de neumáticos.

Se realizan en primer lugar los ensayos en la sala de ensayo de neumáticos. Para ello, montamos la FSA sobre el eje de la máquina de ensayo neumáticos como si se tratara de un neumático real.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

Mientras es sujeta con los altavoces en su posición correcta, se le aplica una carga controlada con el pistón de carga de la máquina de ensayos para crear una huella de contacto y simular las condiciones de un ensayo con un neumático real, el cual también es ensayado girando a distintas velocidades y en ambos sentidos. Para evitar el mal posicionamiento de la fuente durante los ensayos, se bloquea el Drum de la máquina de ensayo. Este posicionamiento de la FSA queda ilustrado en la [Figura 25](#):



[Figura 25](#): Fuente sonora artificial montada sobre la máquina de ensayo de neumáticos.

En la máquina de ensayo de neumáticos utilizamos dos posiciones para colocar el array de micrófonos de la cámara acústica. Las posiciones de array más interesantes para el estudio son: paralelo a la huella de contacto y paralelo al lateral del neumático. En ambos casos conviene que esté lo más alineado posible con el centro del neumático.

Sin embargo, debido a las condiciones de la sala, no ha sido posible esta colocación del array y se ha colocado lo más cerca posible de las posiciones mencionadas.

Se utiliza la misma posición del array para los ensayos con la FSA y para los ensayos con el neumático real, haciendo girar el Drum a velocidades de 10 km/h, 40 km/h, 80 km/h y 120 km/h; con el neumático apoyado sobre él y con la máquina girando en vacío y en ambos sentidos de giro.

En las [Figuras 26 a 29](#), se muestra la posición del array de micrófonos para los ensayos en el Drum:

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

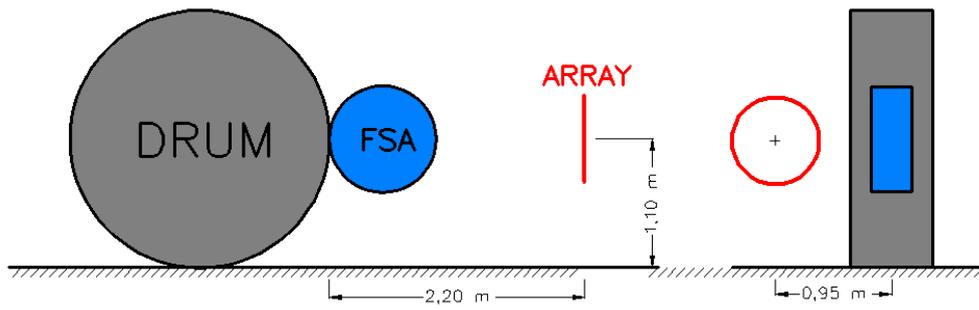


Figura 26: Esquema de la primera posición del array de micrófonos en el drum.



Figura 27: Fotografía de la primera posición del array de micrófonos en el drum.

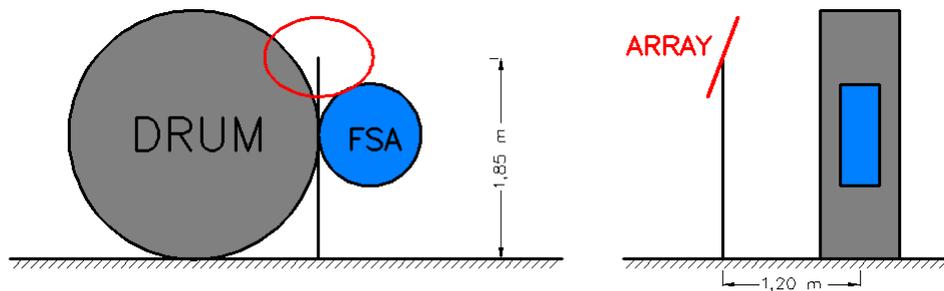


Figura 28: Esquema de la segunda posición del array de micrófonos en el drum.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



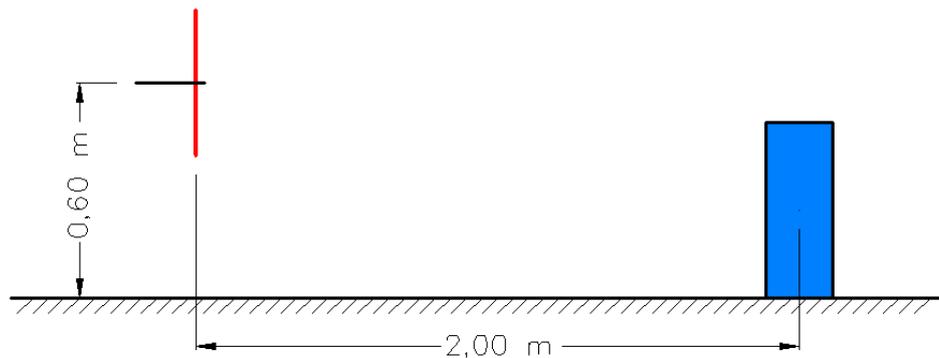
Figura 29: Fotografía de la segunda posición del array de micrófonos en el drum.

En los ensayos con la FSA apoyada sobre una superficie plana reflectante, no disponemos de los medios necesarios para aplicar una carga sobre el neumático, por lo que no es posible crear una huella de contacto más allá de la que genera la FSA por su propio peso en estos ensayos.

Se coloca el array en las posiciones ortogonales y paralela al plano de lateral del neumático, quedando el array centrado sobre éste. Tenemos así las posiciones llamadas: **frontal, perfil y superior.**

Estas posiciones se detallan esquemáticamente en la Figura 30:

a)



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



b)



ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

c)



Figura 30: Fotografía de la posición frontal (a), perfil (b) y superior (c) del array de micrófonos sobre una superficie plana reflectante.

Las fotografías acústicas son creadas a partir de grabaciones de 6 segundos de duración, que es la duración que se suele utilizar en procesos industriales estacionarios. Se escoge esta duración de la medida debido a que el ruido a medir es uniforme, es decir, sus características no varían durante el intervalo de tiempo en el que es reproducido.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

Se realizan varias medidas en cada ensayo y se eliminan aquellas que presentan anomalías, con el fin de obtener valores lo más fiables posibles al obtener el valor medio de los valores que no han sido descartados.

## 5. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Los resultados se procesan utilizando el programa “Noise Image”, partiendo de un archivo del tipo “NoiseImage Channel File”, que se compone de una grabación de vídeo y las pistas de audio captadas por cada uno de los micrófonos del array.

Estos archivos se cargan en el programa, apareciendo una señal de audio en la pantalla.

En primer lugar, se selecciona la totalidad de la pista de audio grabada, ya que las condiciones del ensayo se mantienen constantes durante todo el tiempo de medición. Para obtener la imagen acústica, hacemos “click” con el botón derecho del ratón sobre esta señal de audio y seleccionamos la opción “Photo 2D”. Creamos así una imagen acústica para el espectro completo de frecuencias (posteriormente se llevarán a cabo ensayos seleccionando ciertas bandas de frecuencia para analizar éstas en particular), que se muestra como una escala de colores correspondientes a los distintos niveles de presión acústica registrados sobre el plano del array. La localización de estos niveles acústicos se obtiene mediante el principio de funcionamiento de la cámara acústica descrito en el apartado 3.2.

Los resultados obtenidos para el rango completo de frecuencias, tanto para el neumático real como para fuente sonora artificial, se exponen a continuación.

### 5.1 RESULTADOS PARA FSA Y PARA NEUMÁTICO REAL A 80KM/H.

En este conjunto de resultados aparecen las fotografías acústicas de la FSA emitiendo ruido rosa, ruido ecualizado 15 y ruido ecualizado al 25. Estas pistas de audio son las que se han descrito en el apartado 4.1.

En las fotografías vemos una imagen de la fuente emisora (FSA y neumático real) en la que aparece superpuesta una escala de colores que muestra los distintos niveles de presión sonora en decibelios en cada punto del plano de la imagen.

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

Para el neumático real, se muestran los resultados obtenidos con la máquina de ensayos girando a 80 km/h en ambos sentidos, con el neumático montado sobre esta (RUEDA 80) y con la máquina funcionando sin apoyar el neumático (VACÍO 80).

Vemos en este ensayo cómo se comportan las pistas de audio generadas en la FSA y cómo afecta el sentido de giro y el ruido de fondo de la máquina de ensayo de neumáticos al ruido emitido por el neumático real.

Se utilizan los ensayos realizados a 80 km/h para este análisis, ya que la influencia del ruido de fondo de la máquina en estos ensayos tiene menor importancia relativa que en los ensayos a menores velocidades. Los ensayos realizados con el neumático real girando a 120 km/h no se utilizan en este apartado por ser sus niveles de presión sonora muy distantes de los niveles de presión sonora captado por la cámara acústica en los ensayos con la fuente sonora artificial. El estudio de la influencia de la velocidad no es objeto de este apartado, por lo que los ensayos realizados a otras velocidades se acometerán en apartados posteriores del presente trabajo.

### ENSAYOS EN EL DRUM (Figuras 31 a 44):

#### -Primera posición FSA:

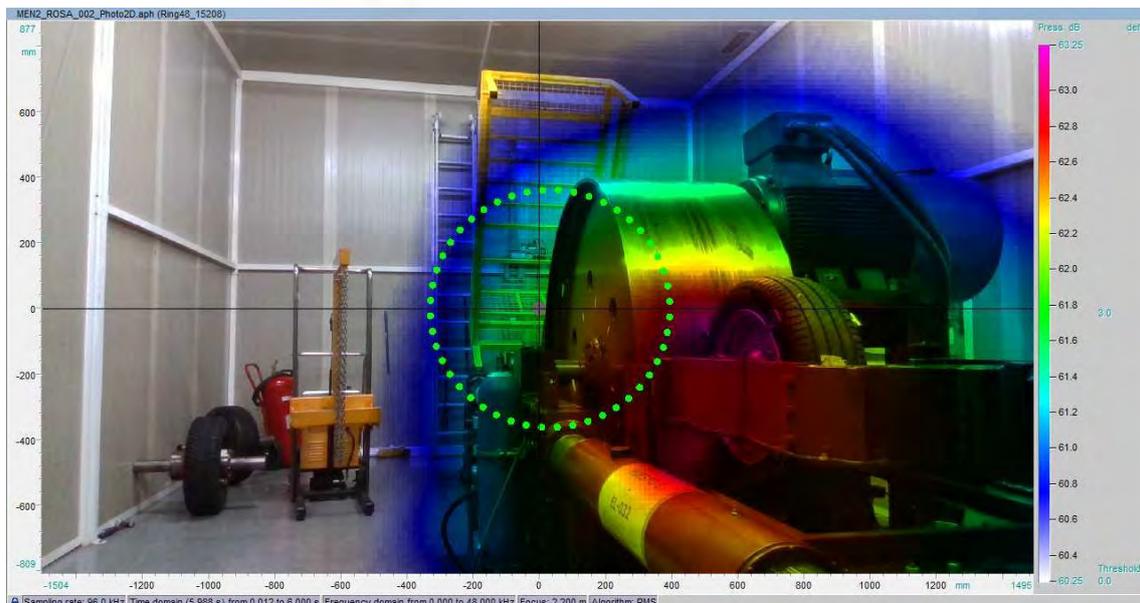


Figura 31: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con la FSA en el Drum, primera posición con ruido rosa.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

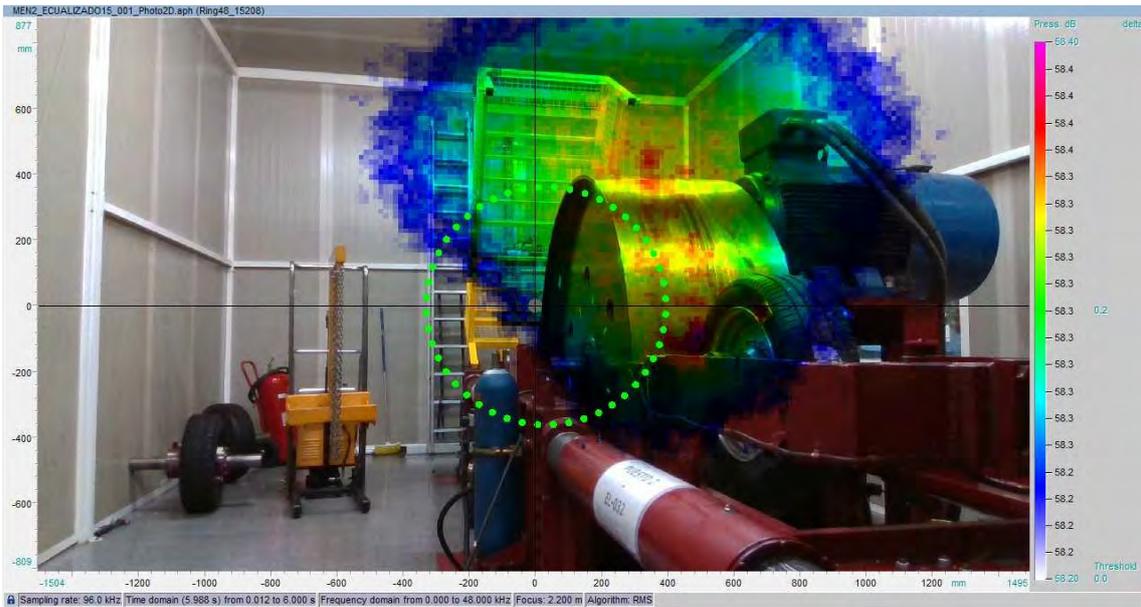


Figura 32: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con la FSA en el Drum, primera posición con ruido ecualizado 15.

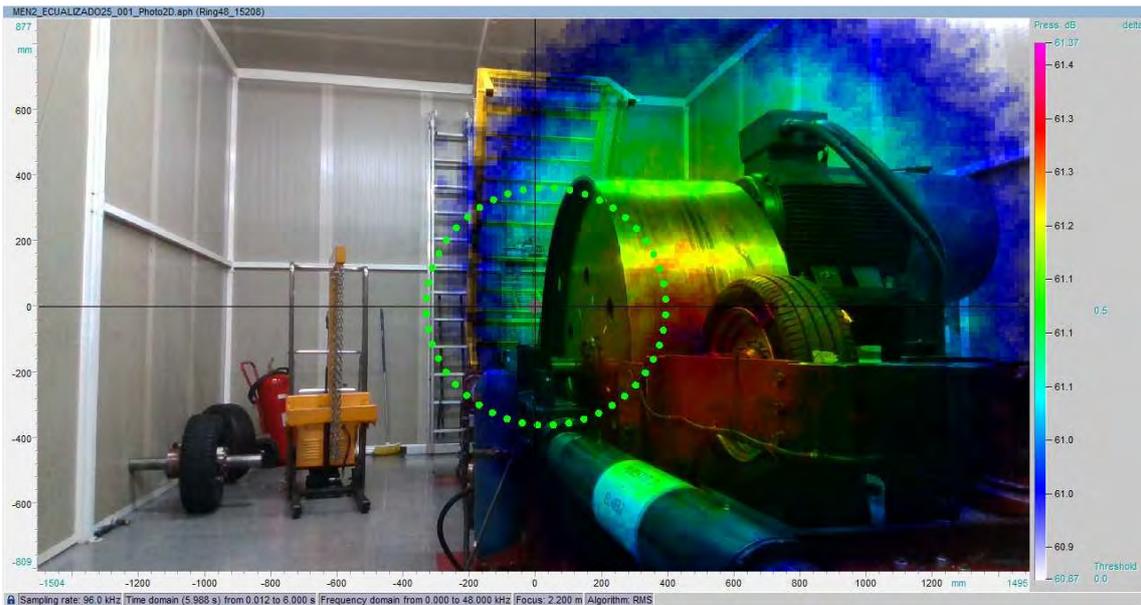


Figura 33: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con la FSA en el Drum, primera posición con ruido ecualizado 25.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

**-Primera posición Neumático real a 80 km/h:**



Figura 34: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real en vacío .

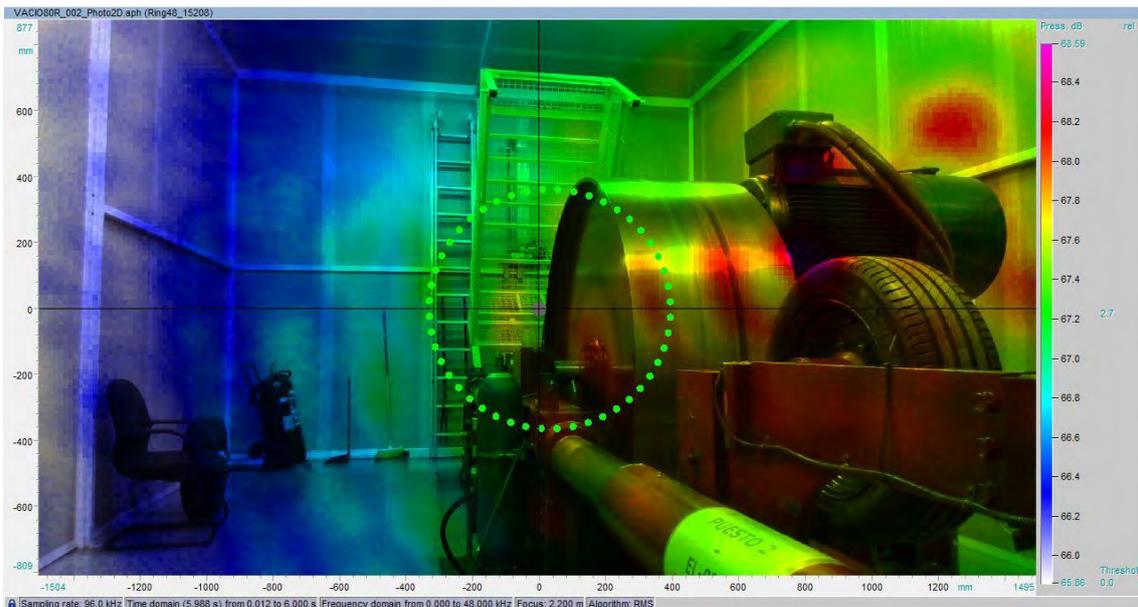


Figura 35: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario , primera posición y neumático real en vacío .

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

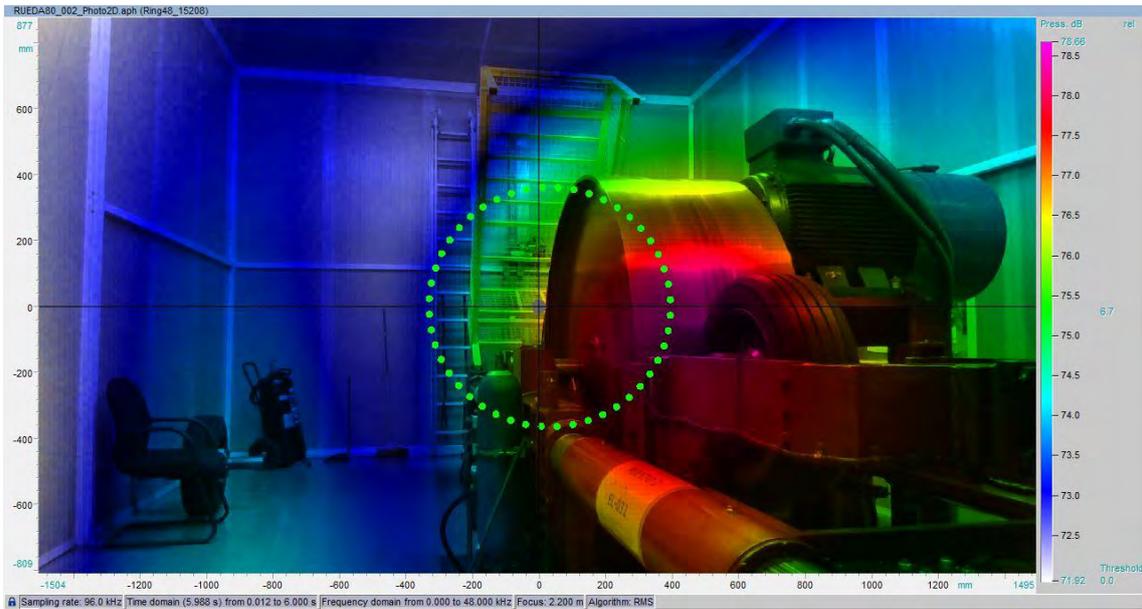


Figura 36: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal , primera posición y neumático real girando.

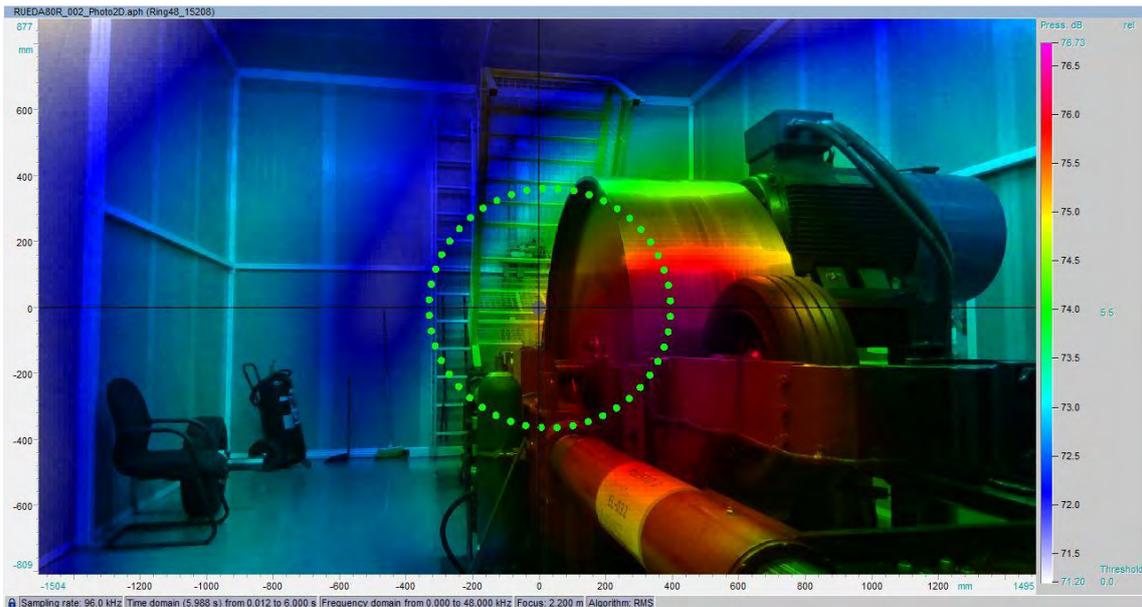


Figura 37: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario , primera posición y neumático real girando.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

**-Segunda posición FSA:**

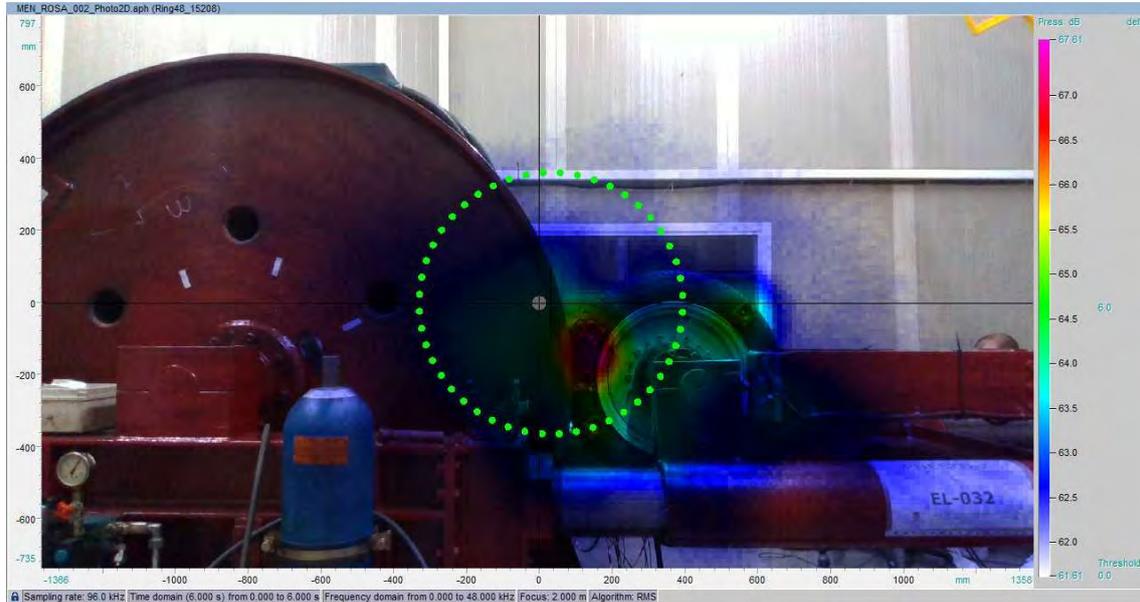


Figura 38: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con la FSA en el Drum, segunda posición con ruido rosa.

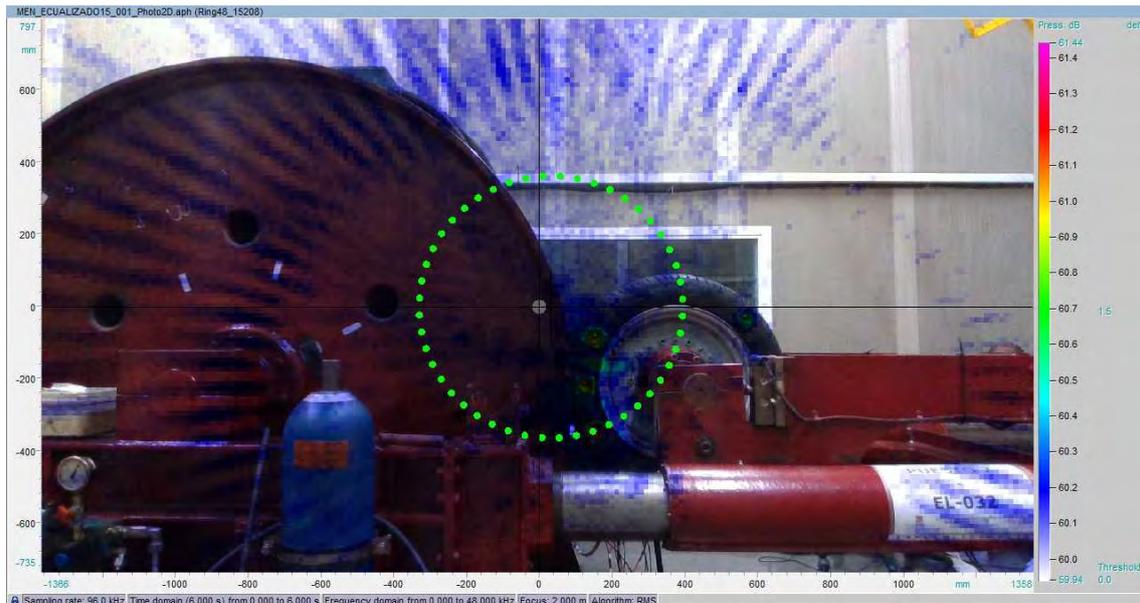


Figura 39: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con la FSA en el Drum, segunda posición con ruido ecualizado 15.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

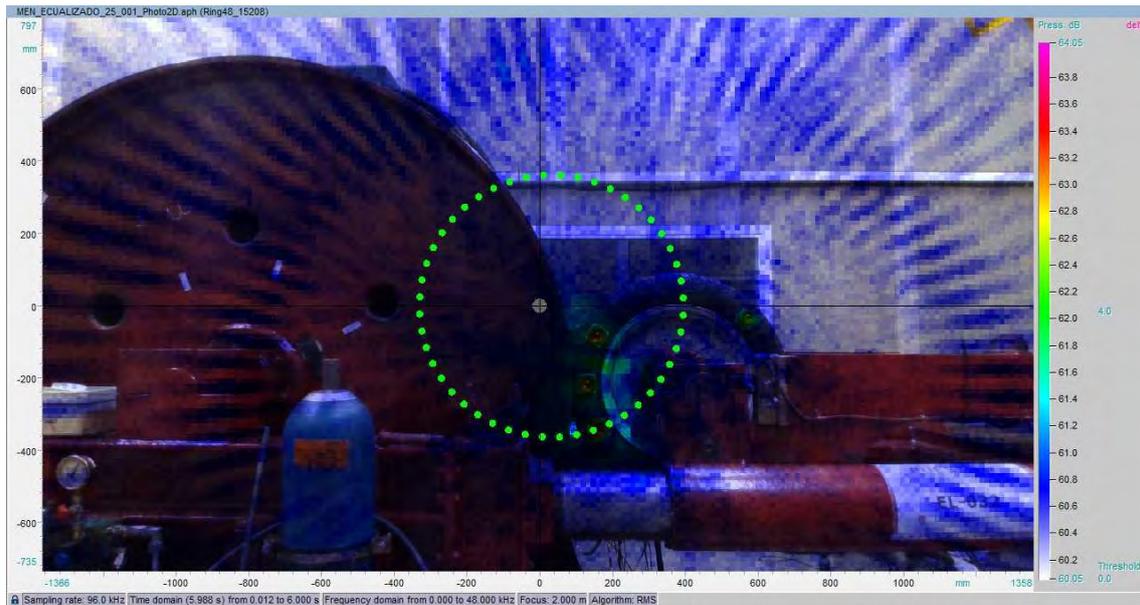


Figura 40: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con la FSA en el Drum, segunda posición con ruido ecualizado 25.



**-Segunda posición Neumático real a 80 km/h**

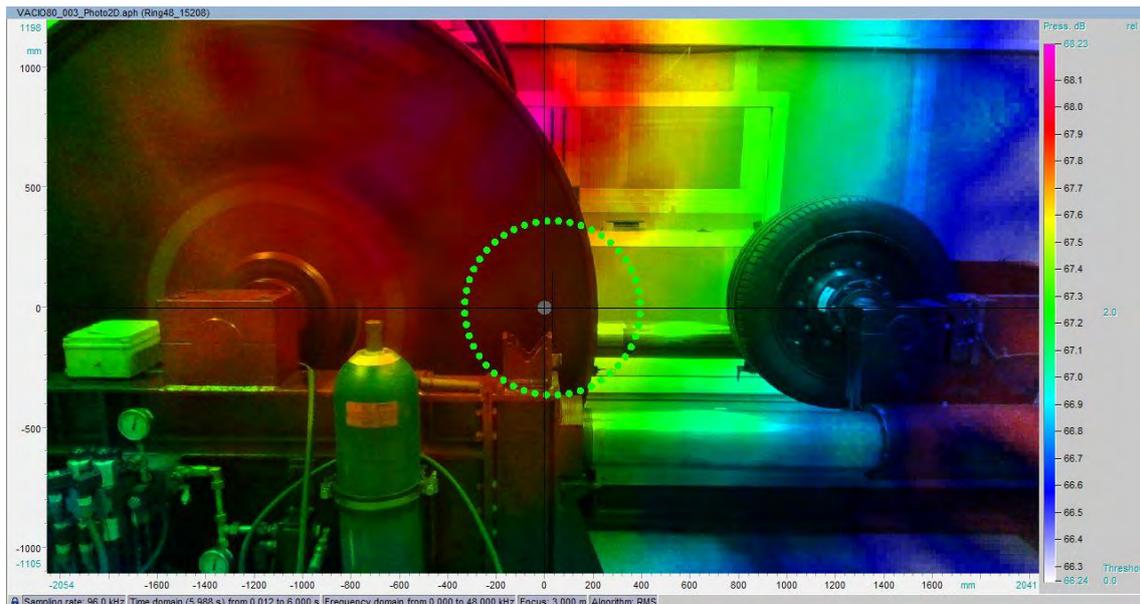


Figura 41: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

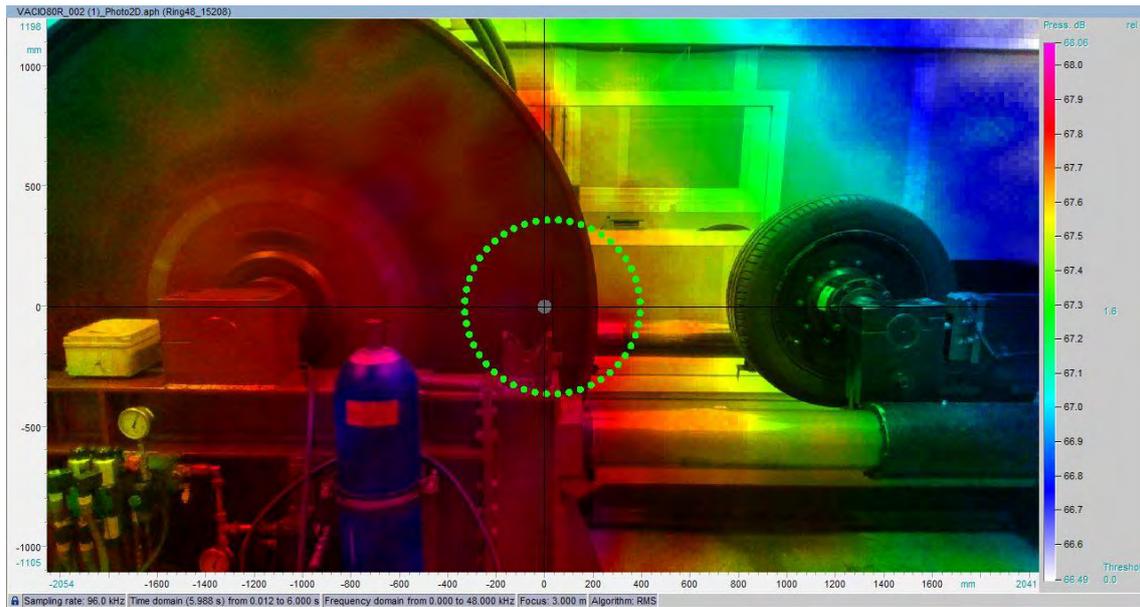


Figura 42: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario , segunda posición y neumático real en vacío.

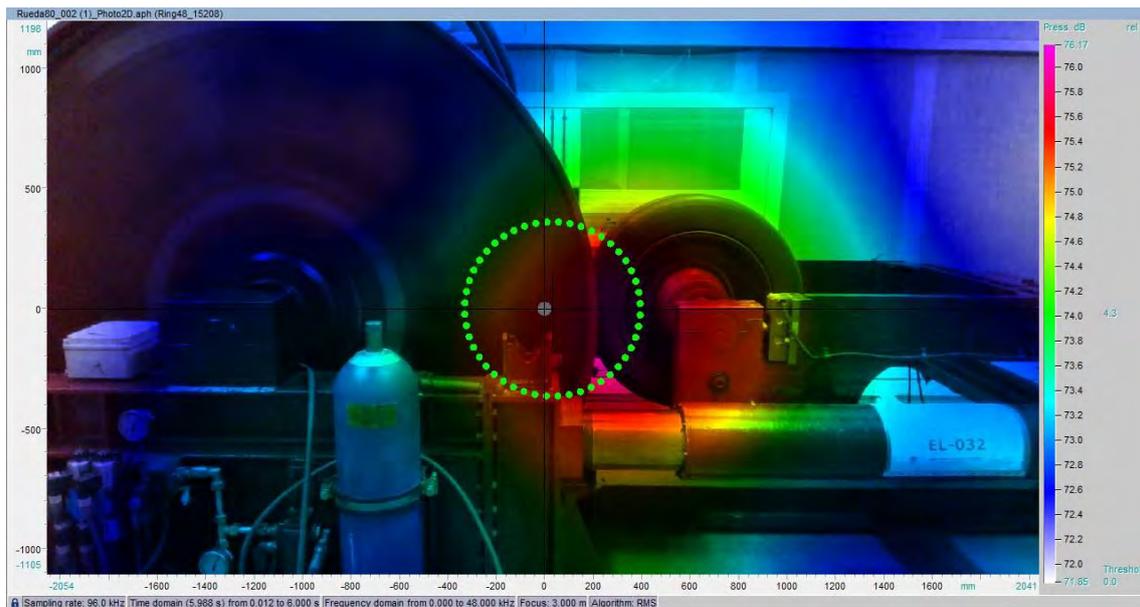
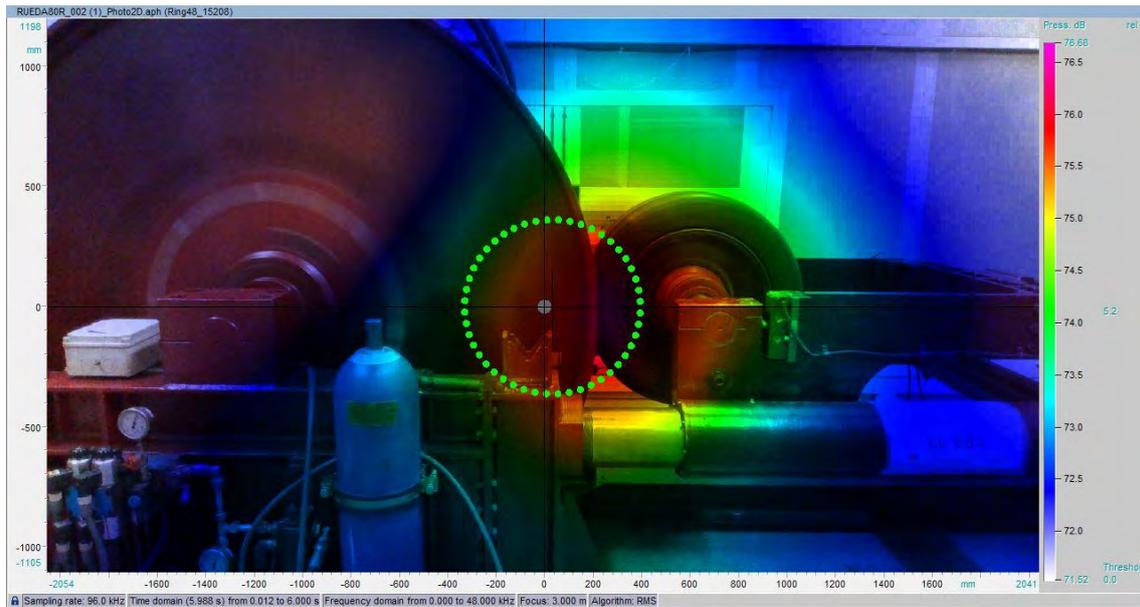


Figura 43: Fotografía 2D de la Acoustic Camera, el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real girando.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

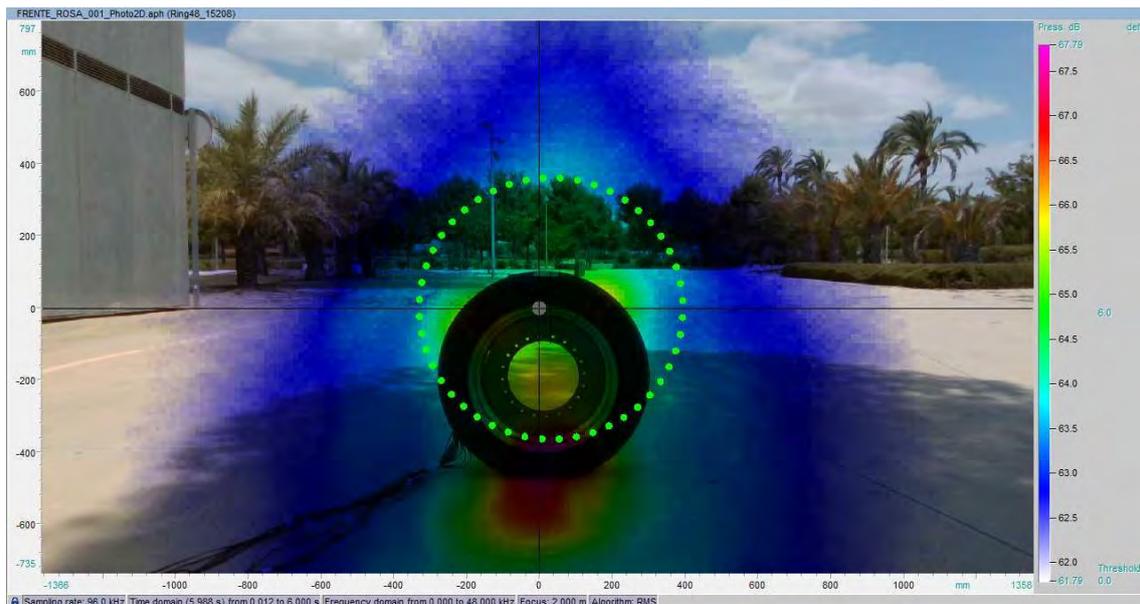


**Figura 44:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera, el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real girando.



**ENSAYOS SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA REFLECTANTE (Figuras 45 a 53):**

**-Posición frontal:**



**Figura 45:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición frontal con ruido rosa.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

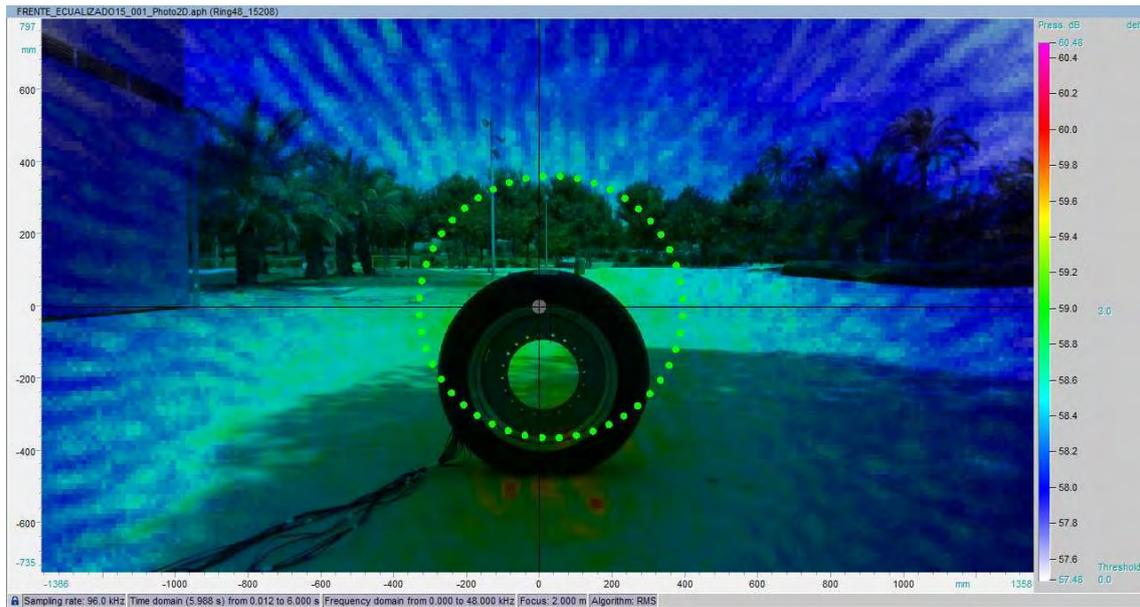


Figura 46: Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición frontal con ruido equalizado 15.

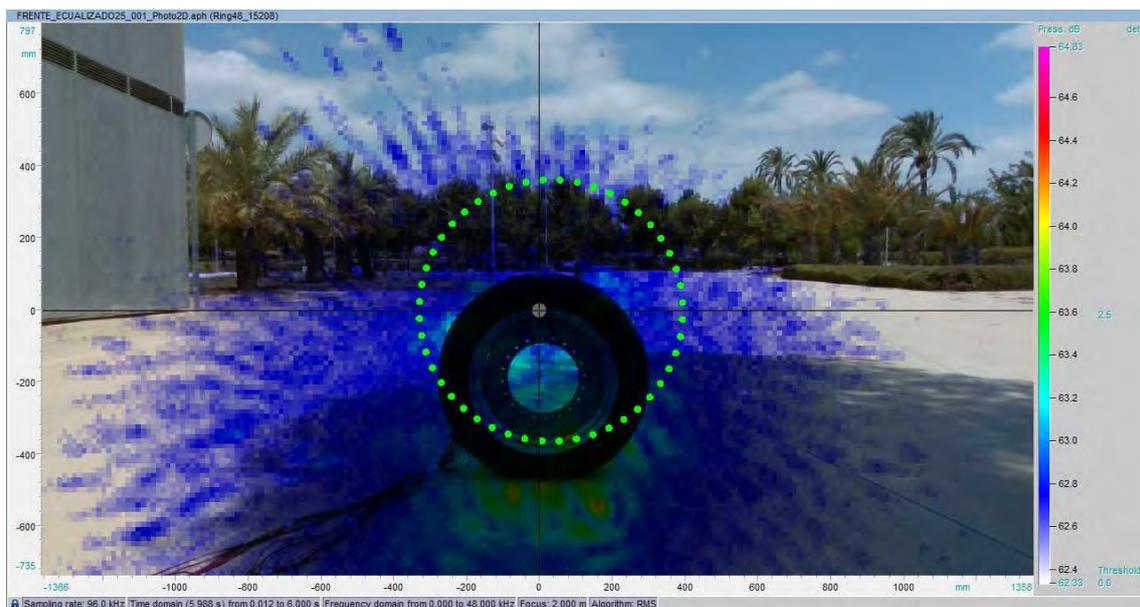
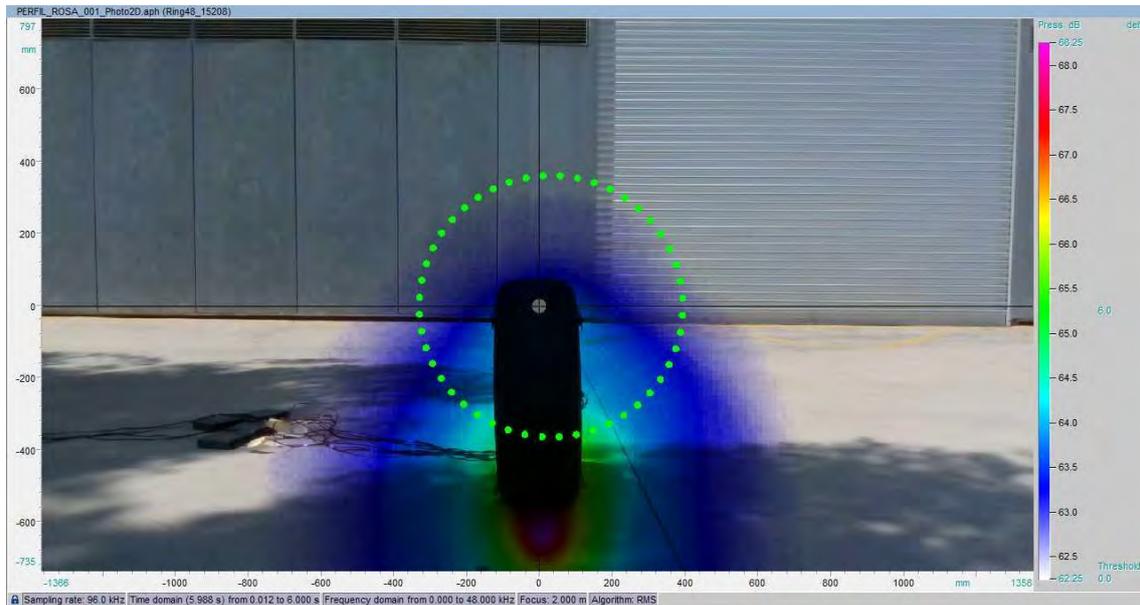


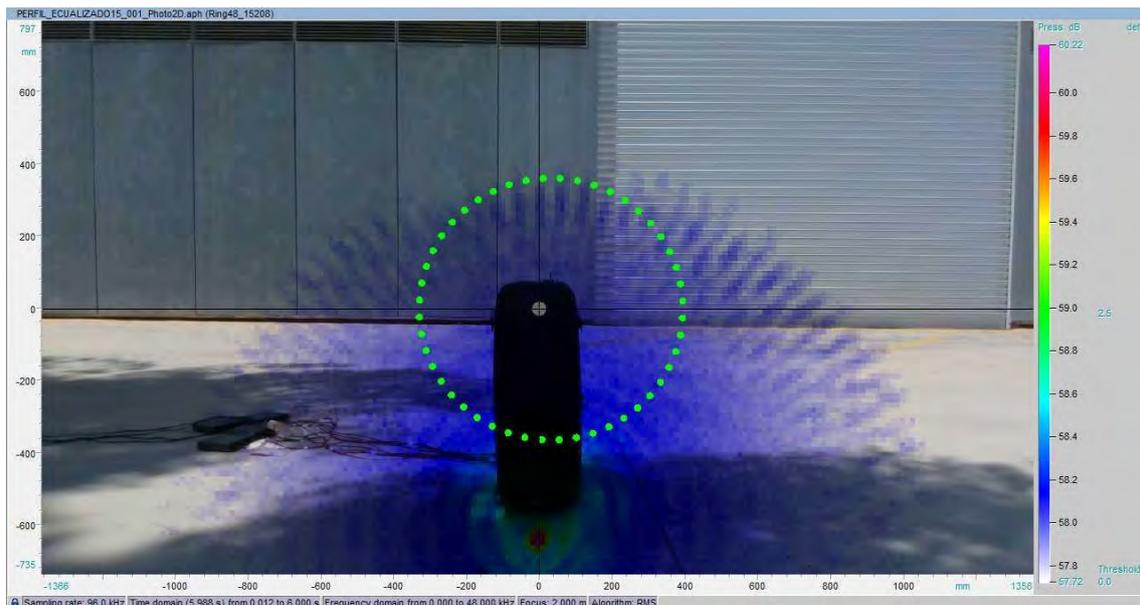
Figura 47: Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición frontal con ruido equalizado 25.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

**-Posición perfil:**

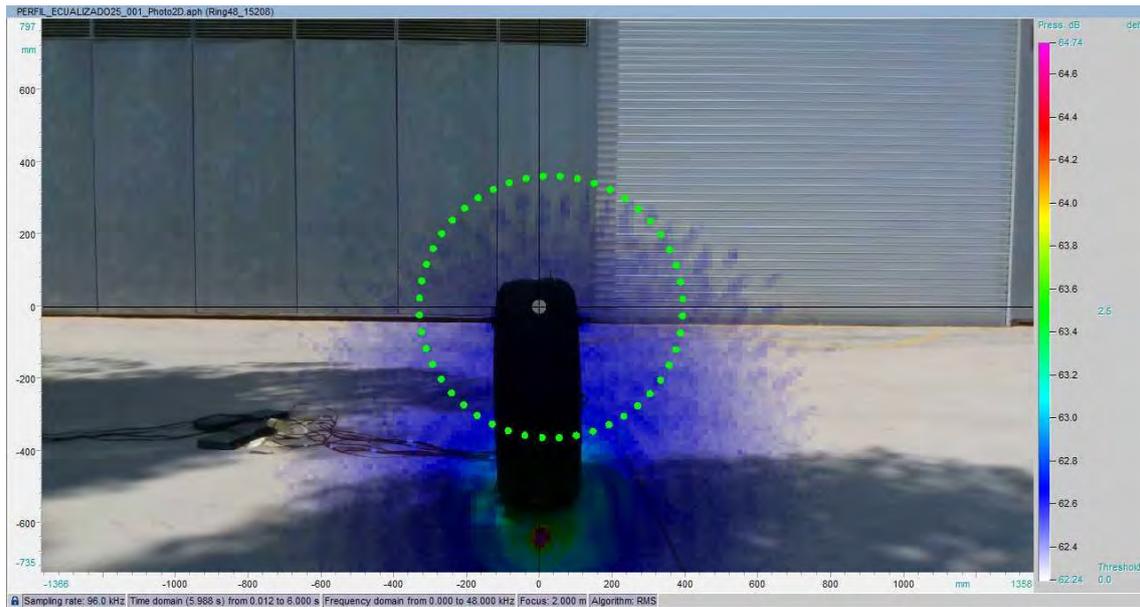


**Figura 48:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición perfil con ruido rosa.



**Figura 49:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición perfil con ruido ecualizado 15.

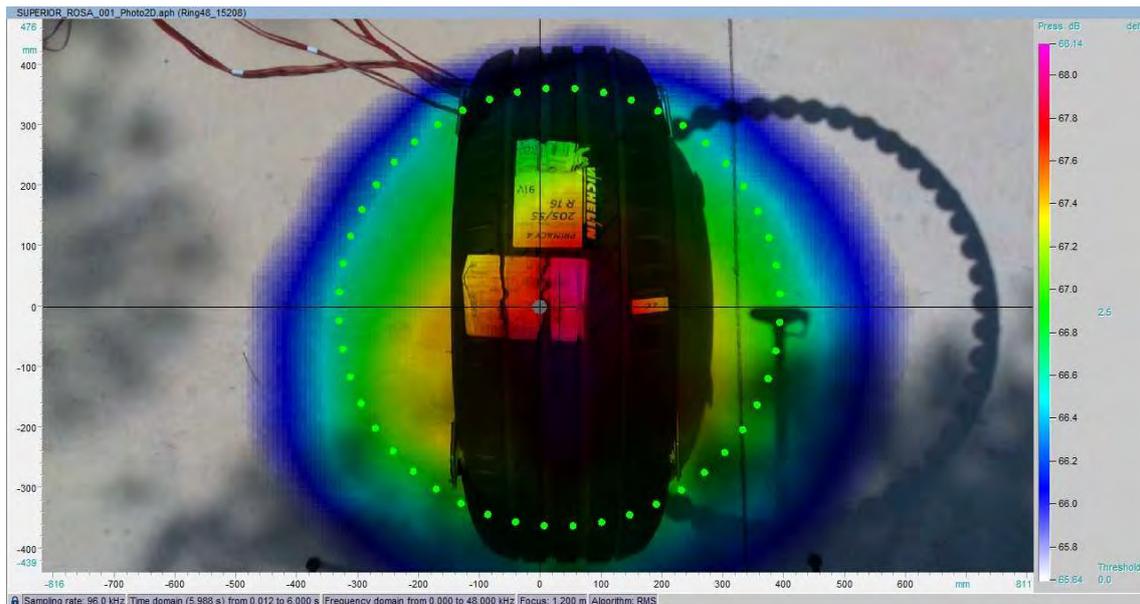
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 50:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición perfil con ruido ecualizado 25.



**-Posición superior:**



**Figura 51:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición superior con ruido rosa.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

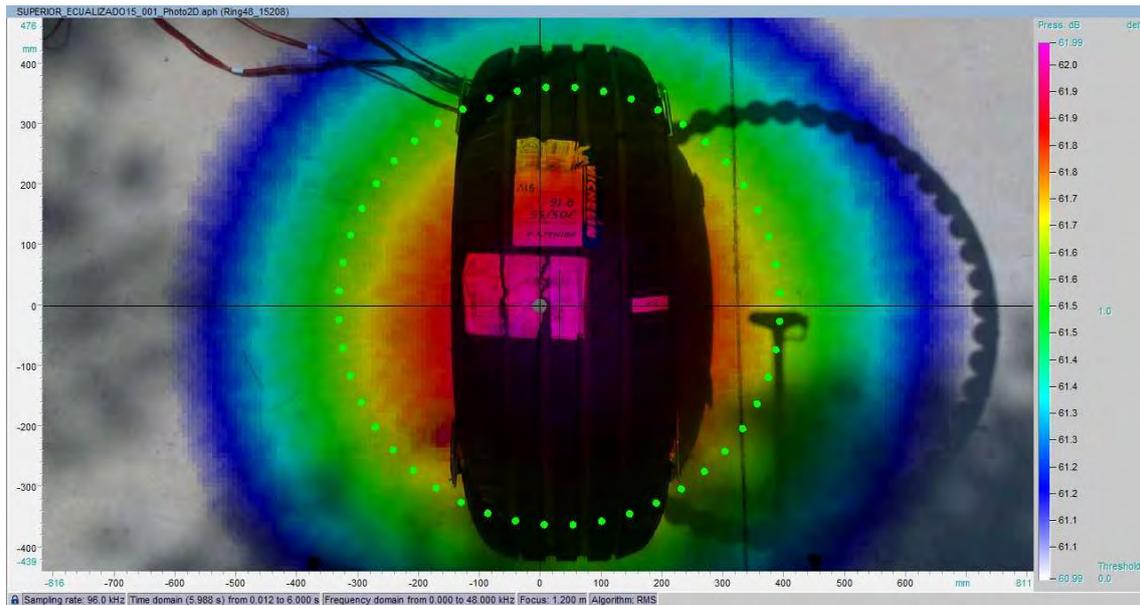


Figura 52: Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición superior con ruido ecualizado 15.

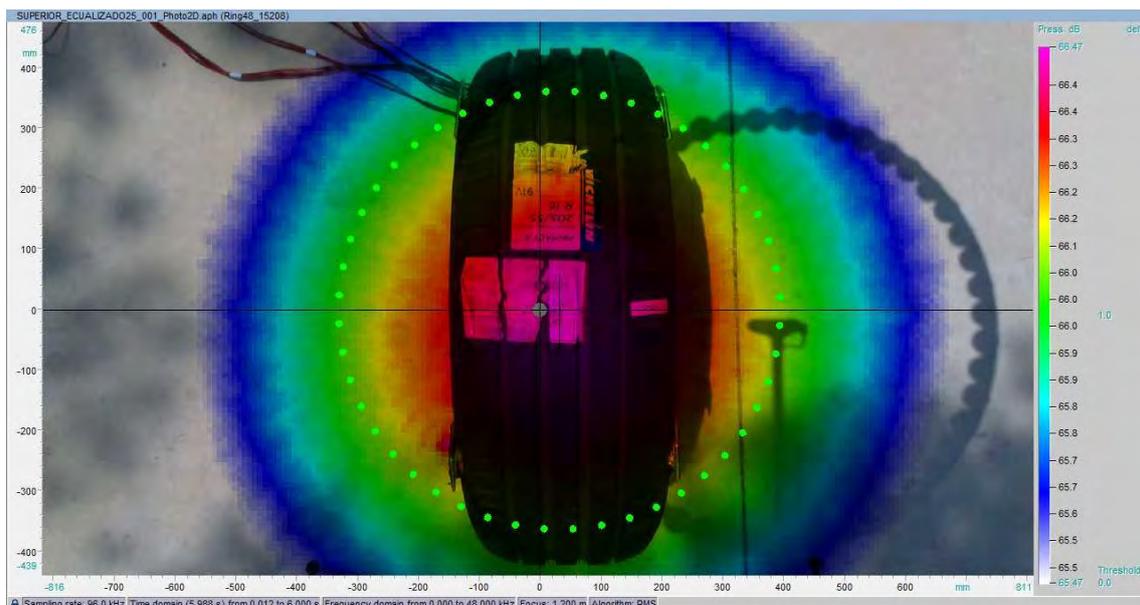


Figura 53: Fotografía 2D de la Acoustic Camera en campo abierto y FSA sobre una superficie plana reflectante, posición superior con ruido ecualizado 25.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

## 5.2 RESULTADOS PARA EL NEUMÁTICO REAL, CON EL DRUM GIRANDO A DISTINTAS VELOCIDADES.

Este ensayo se lleva a cabo para poder estudiar cómo varía la generación de ruido en función de la velocidad de giro del neumático.

Al igual que con los ensayos a 80 km/h, se obtienen las imágenes de ruido emitido en los dos sentidos de giro, con la máquina funcionando en vacío y con el neumático girando sobre esta, para las velocidades de 10 km/h, 40 km/h, y 120 km/h.

Se exponen a continuación, en las Figuras 54 a 85, los resultados, junto con los anteriormente obtenidos para 80 km/h, para observar la variación en el ruido emitido:

### -Primera posición (Neumático real a 10 km/h):

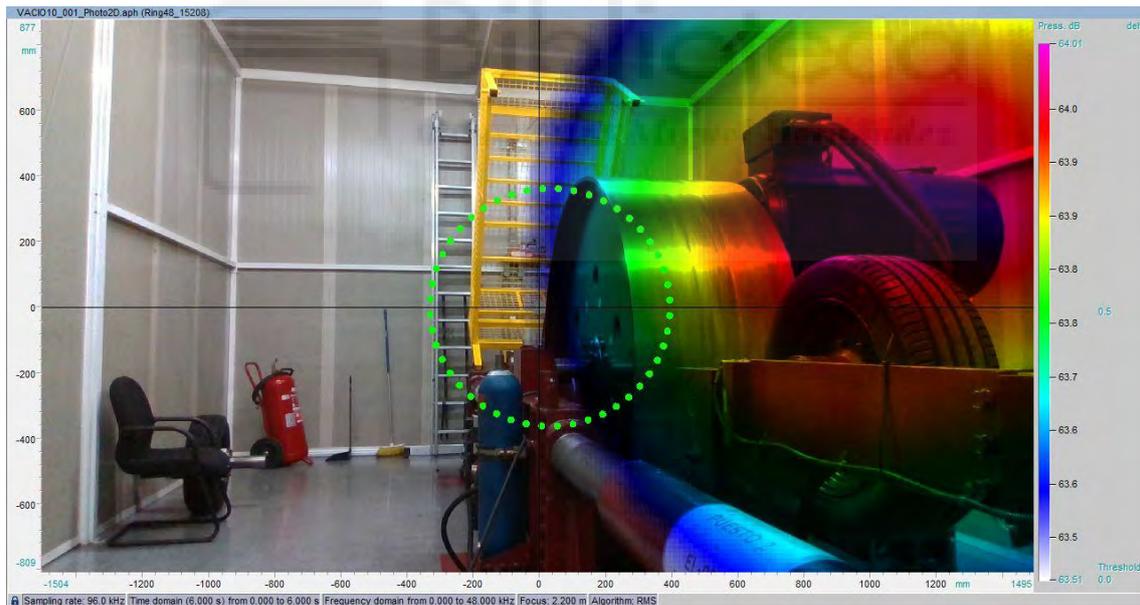


Figura 54: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

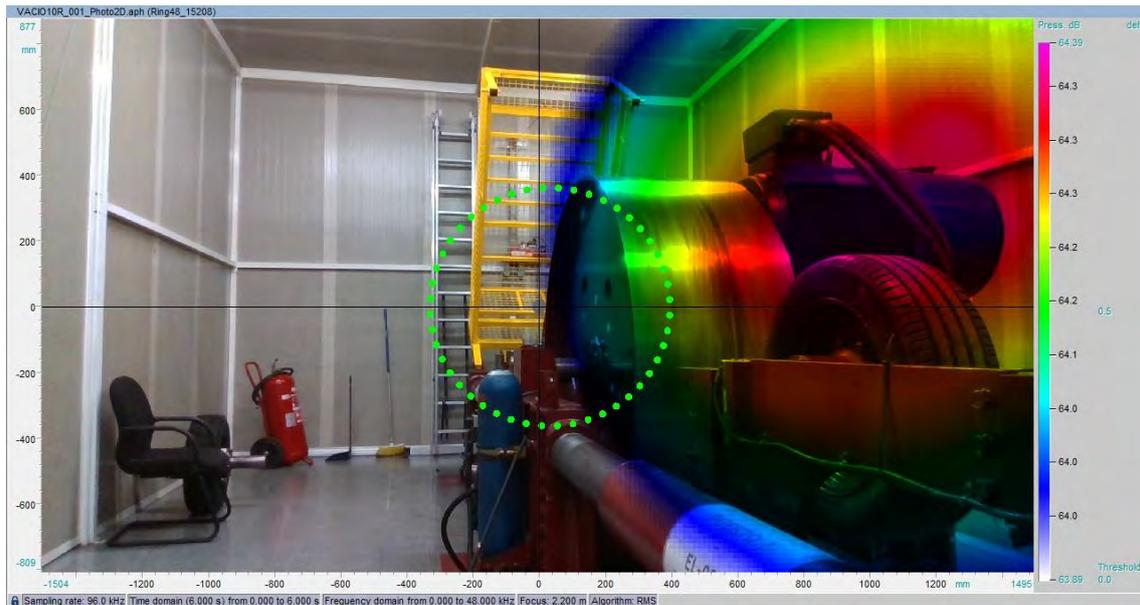


Figura 55: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real en vacío.

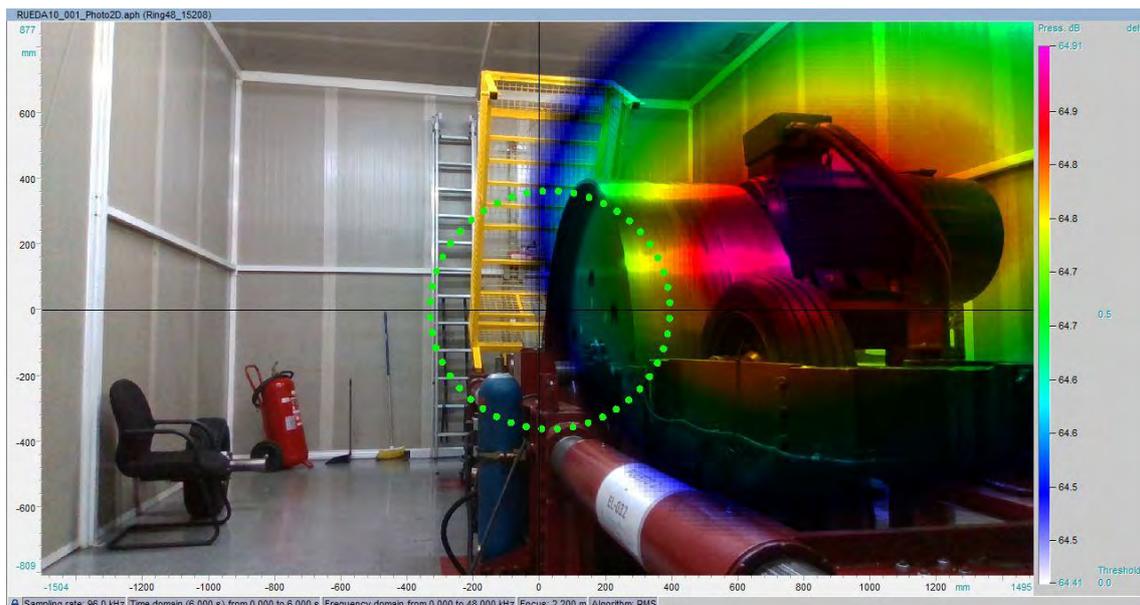
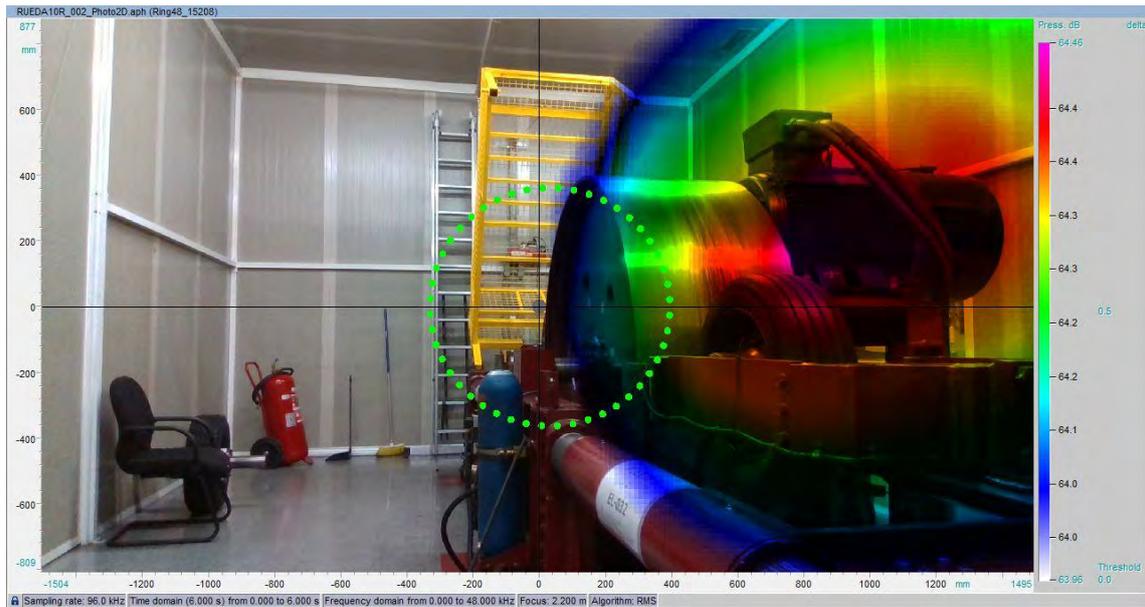


Figura 56: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real girando.

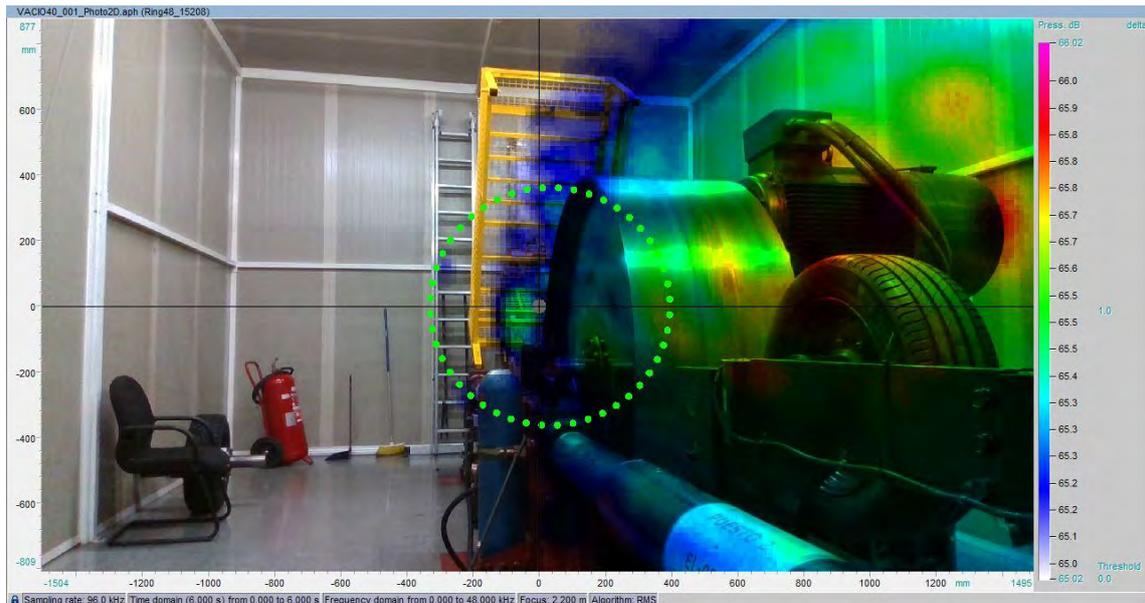
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 57:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real girando.



**-Primera posición (Neumático real a 40 km/h):**



**Figura 58:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

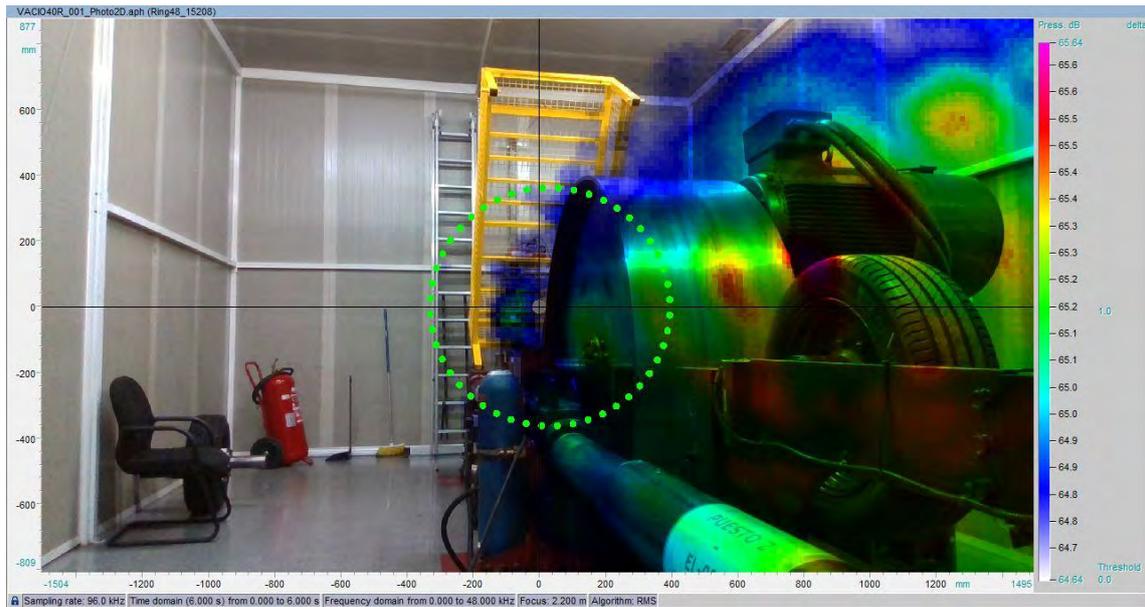


Figura 59: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real en vacío.

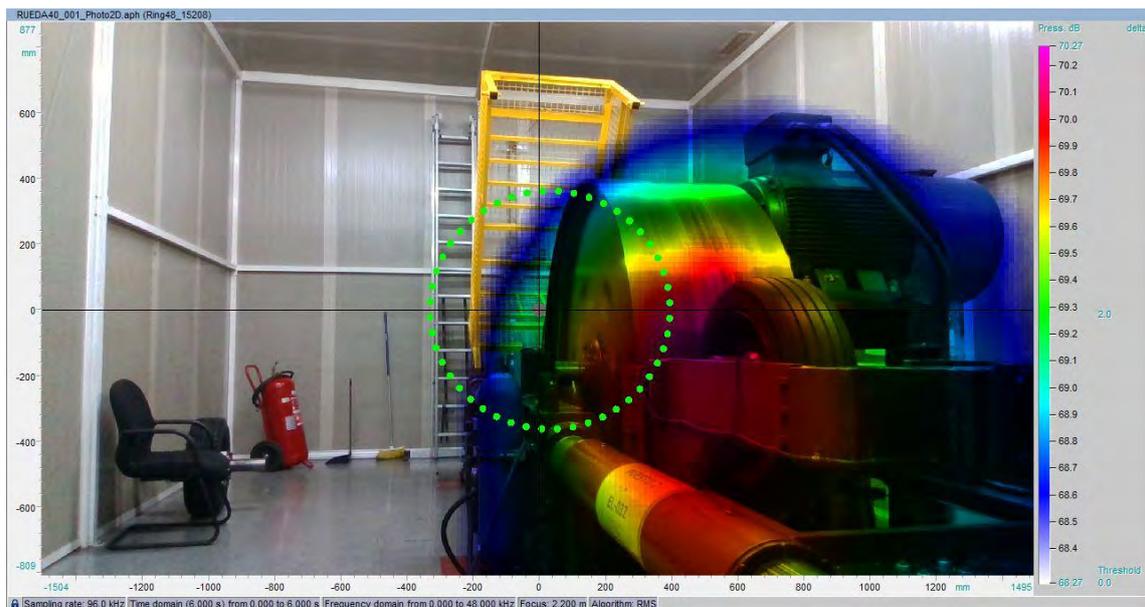


Figura 60: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real girando.

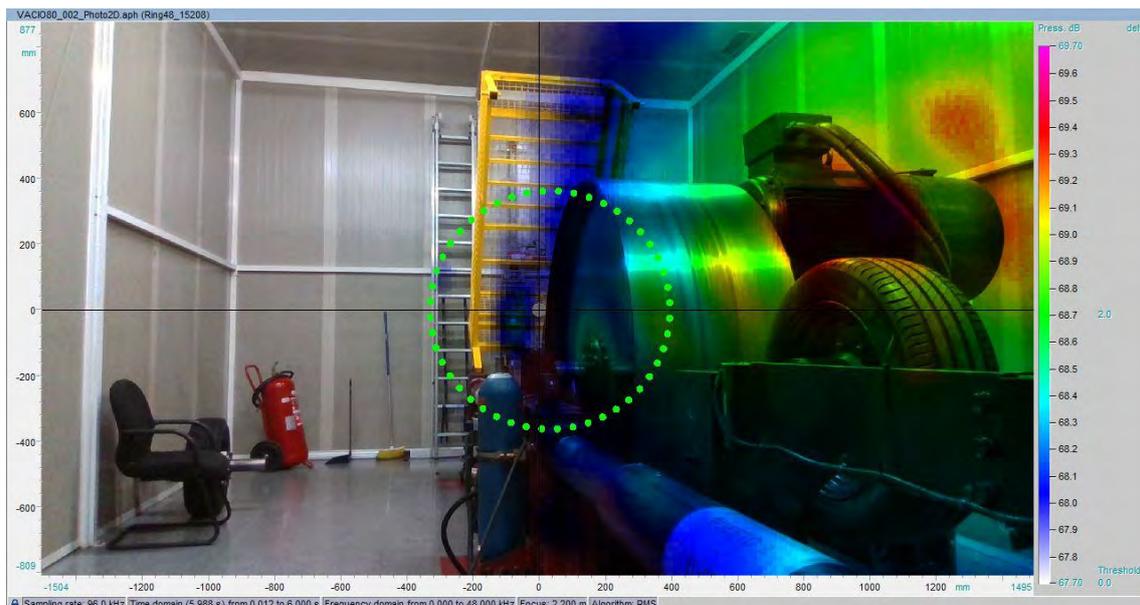
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 61:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real girando.

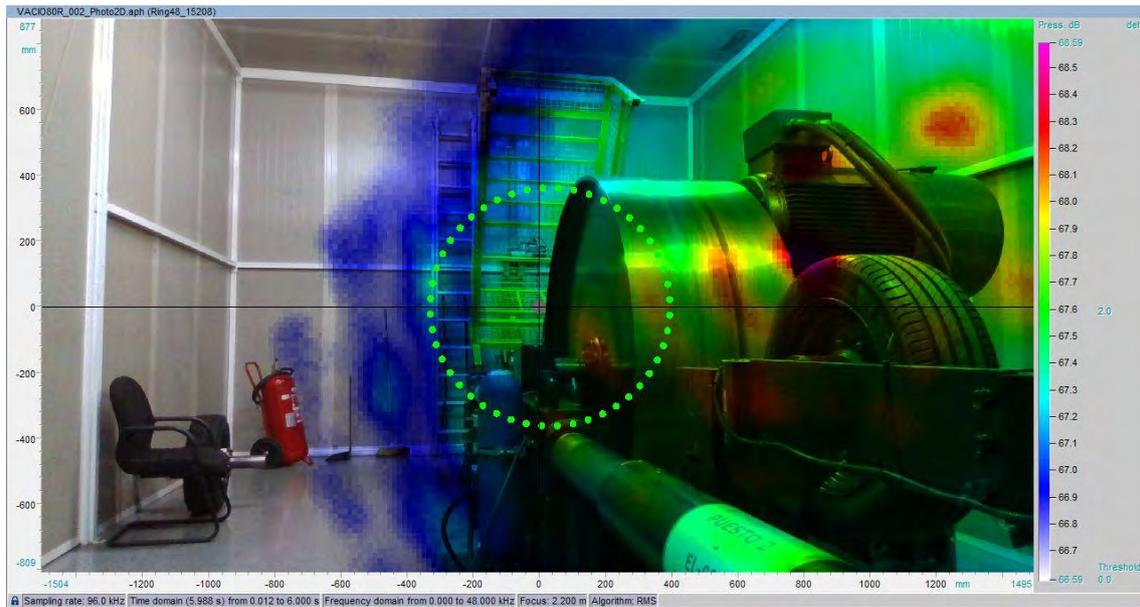


**-Primera posición (Neumático real a 80 km/h):**

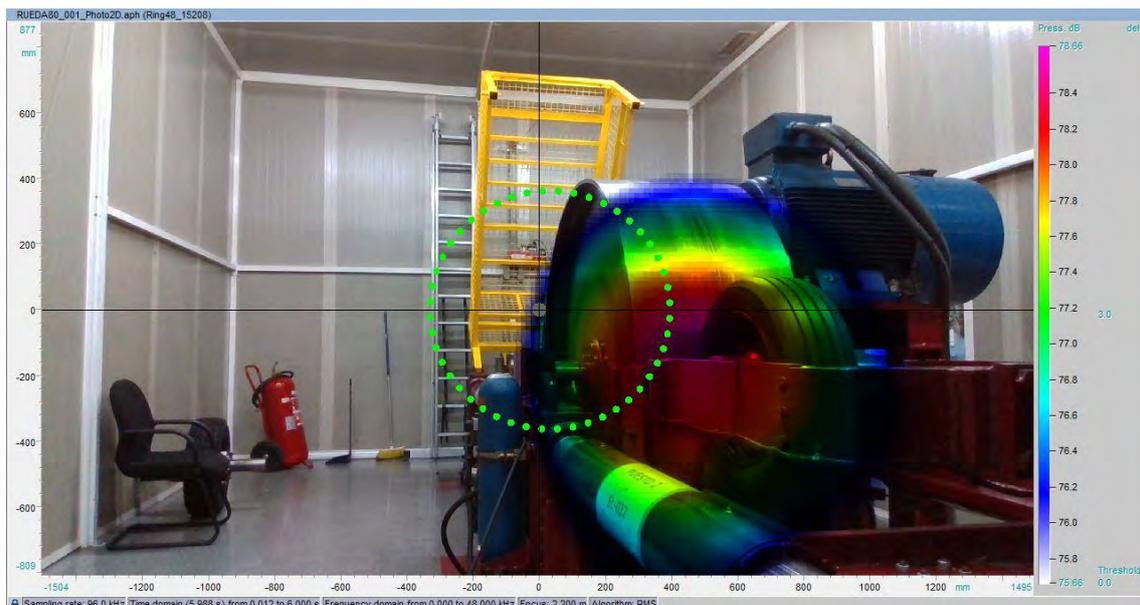


**Figura 62:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 63:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real en vacío.



**Figura 64:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real girando.

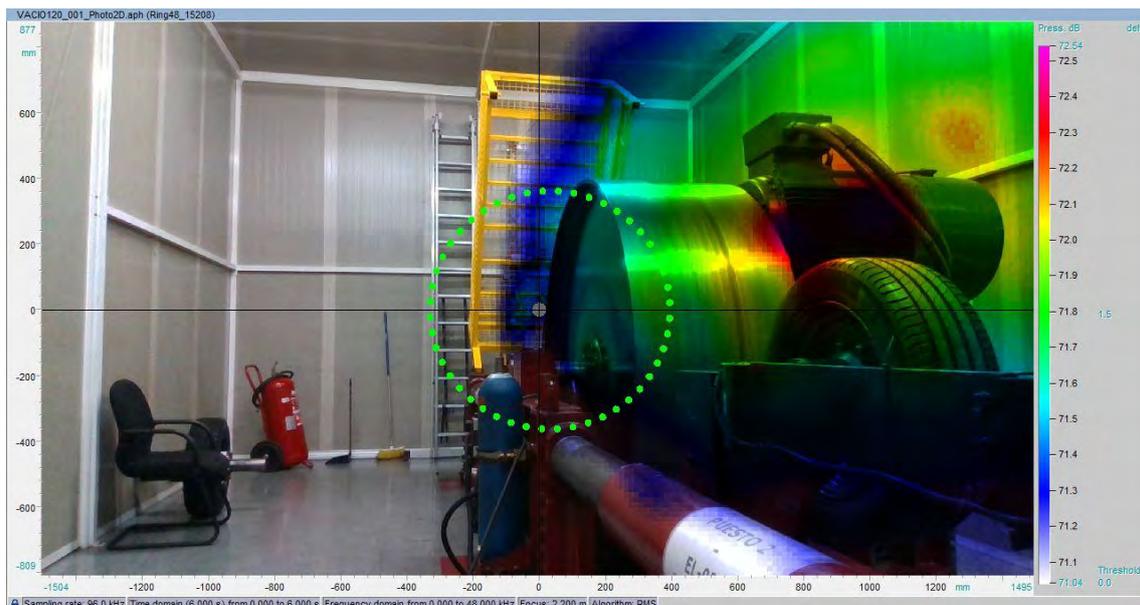
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 65:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real girando.



**-Primera posición (Neumático real a 120 km/h):**



**Figura 66:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

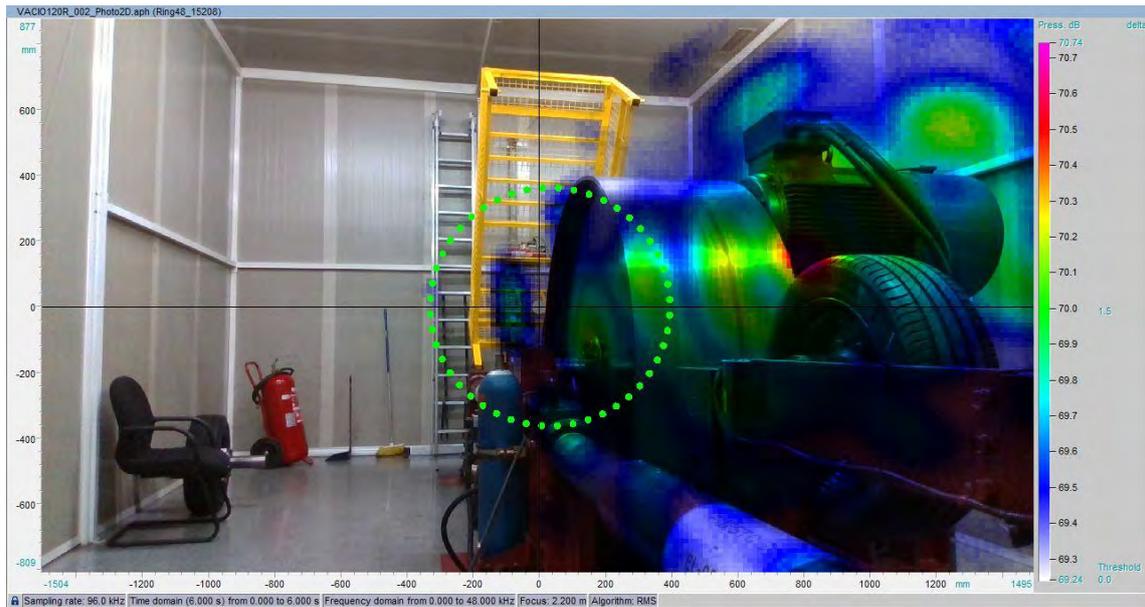


Figura 67: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real en vacío.

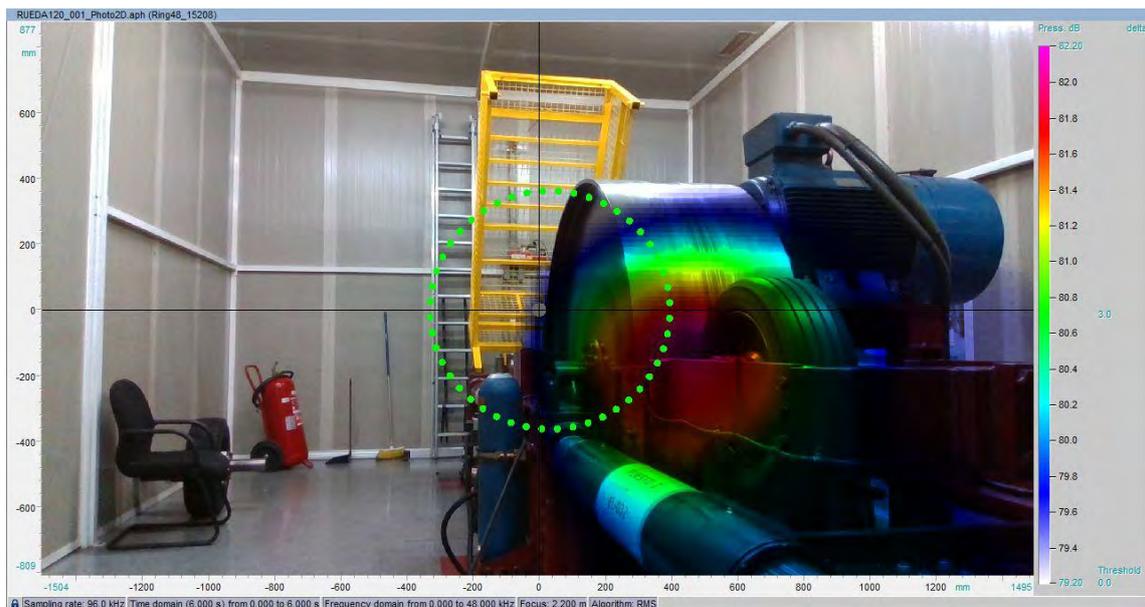
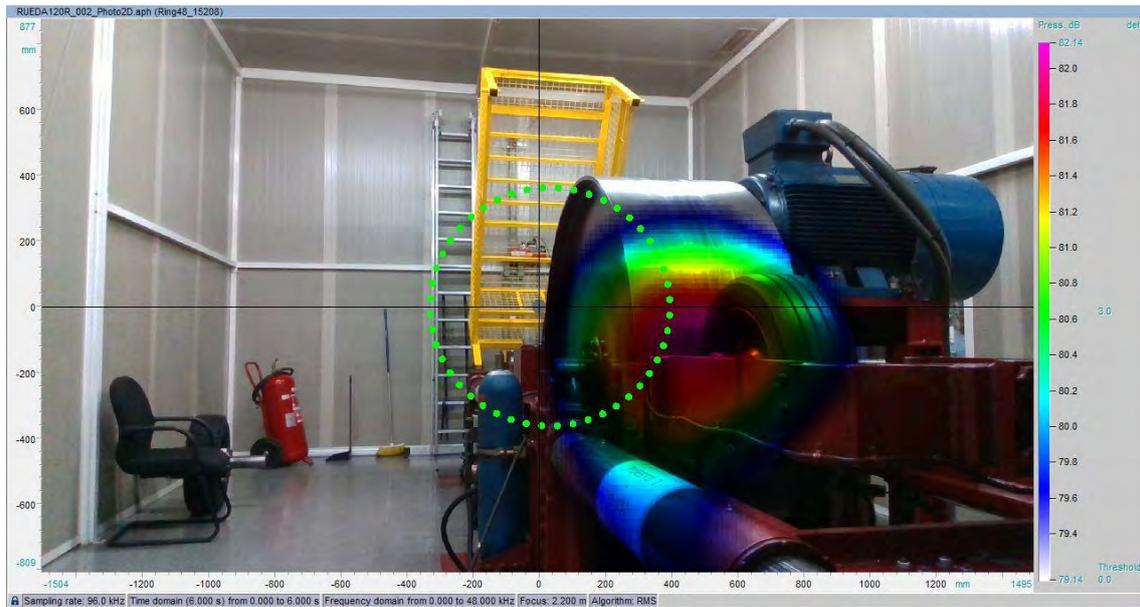


Figura 68: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido normal, primera posición y neumático real girando.

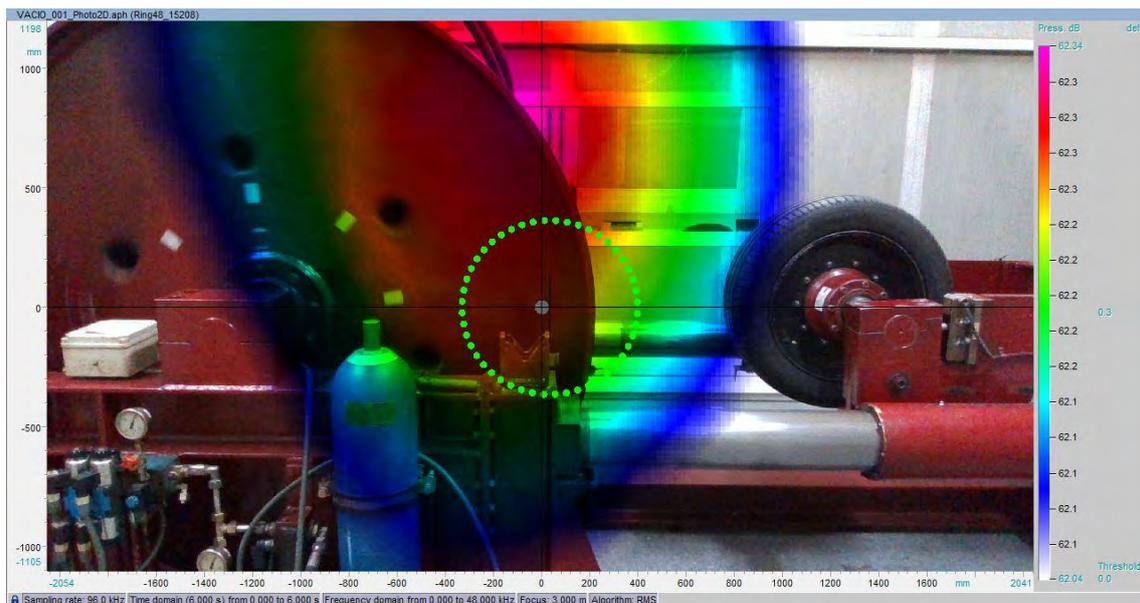
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 69:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido contrario, primera posición y neumático real girando.

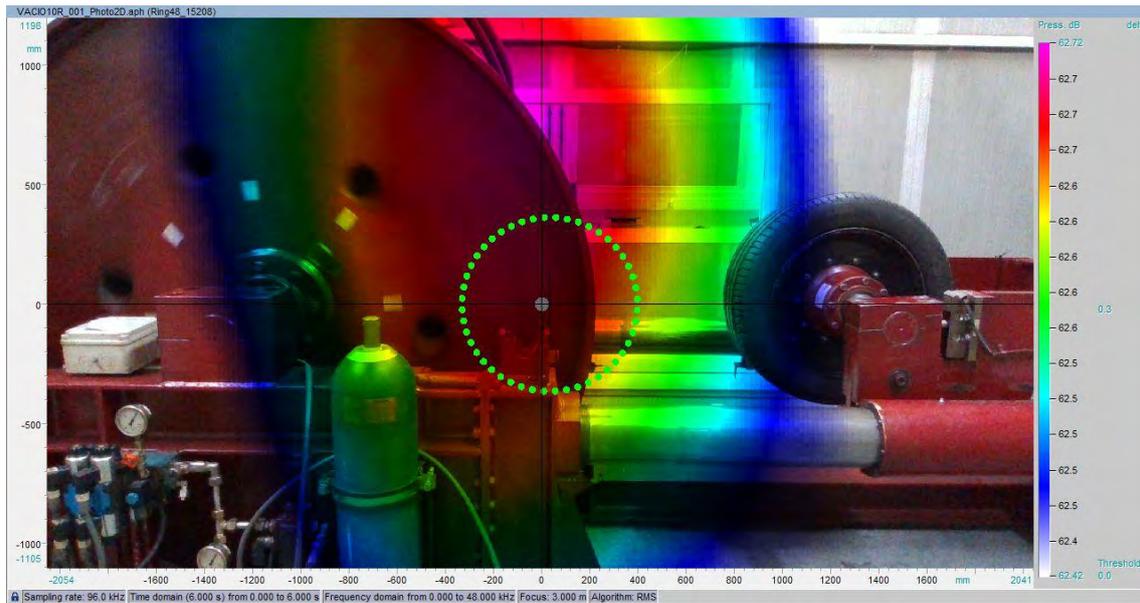


**-Segunda posición (Neumático real a 10 km/h):**

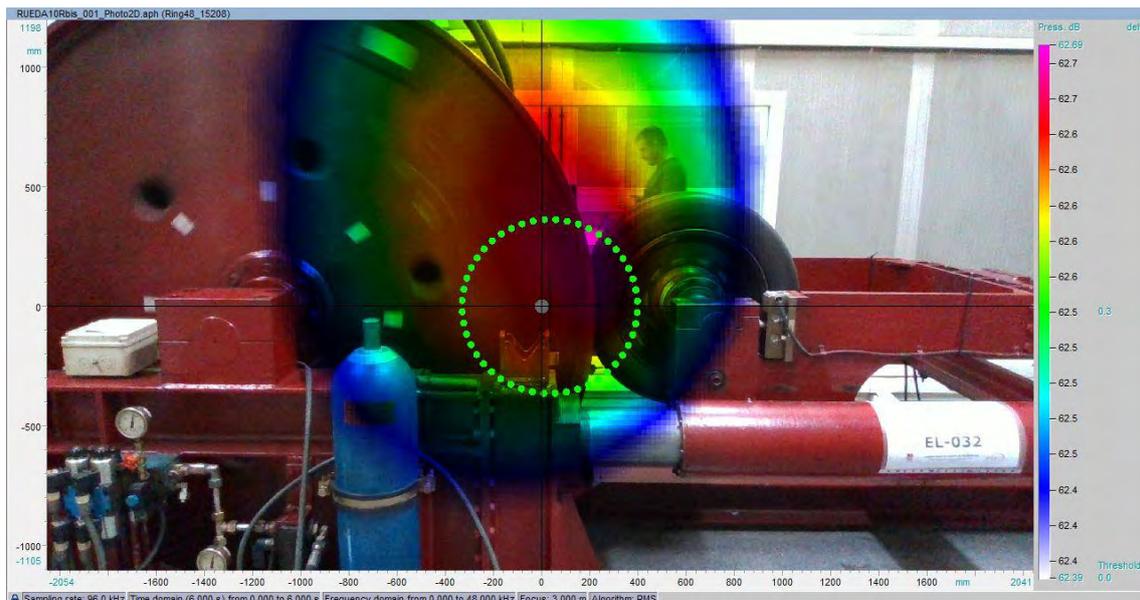


**Figura 70:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

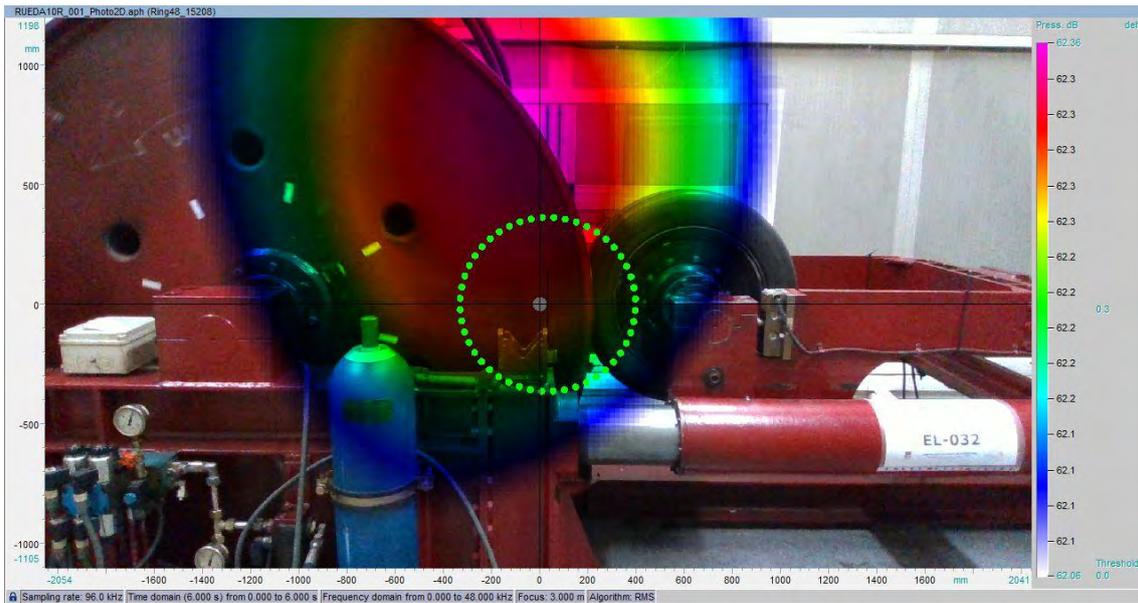


**Figura 71:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real en vacío.



**Figura 72:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real girando.

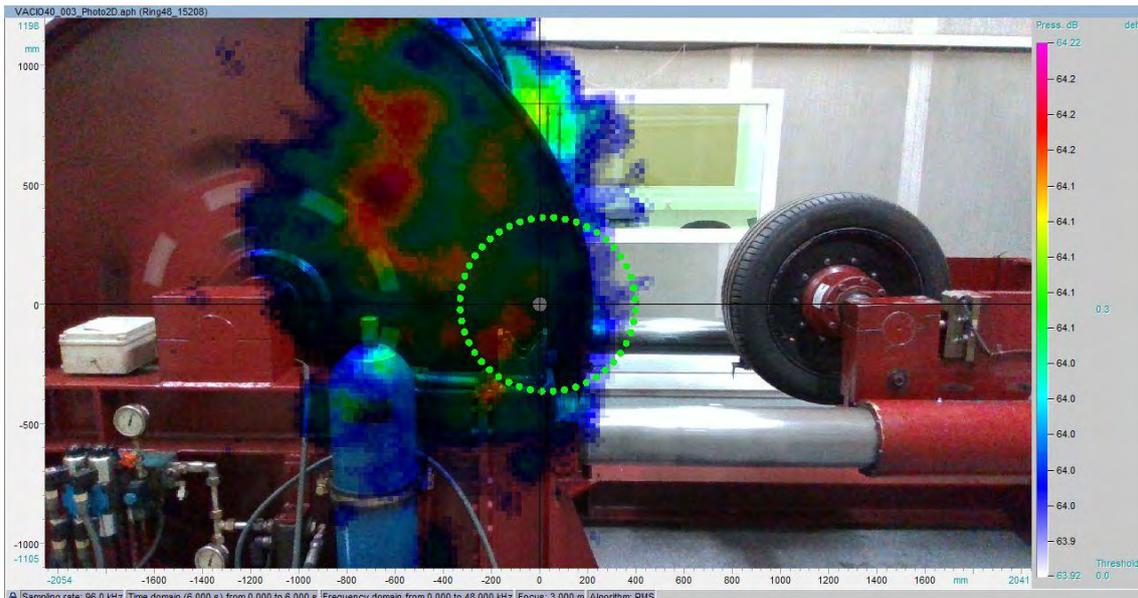
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura73:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 10 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real girando.

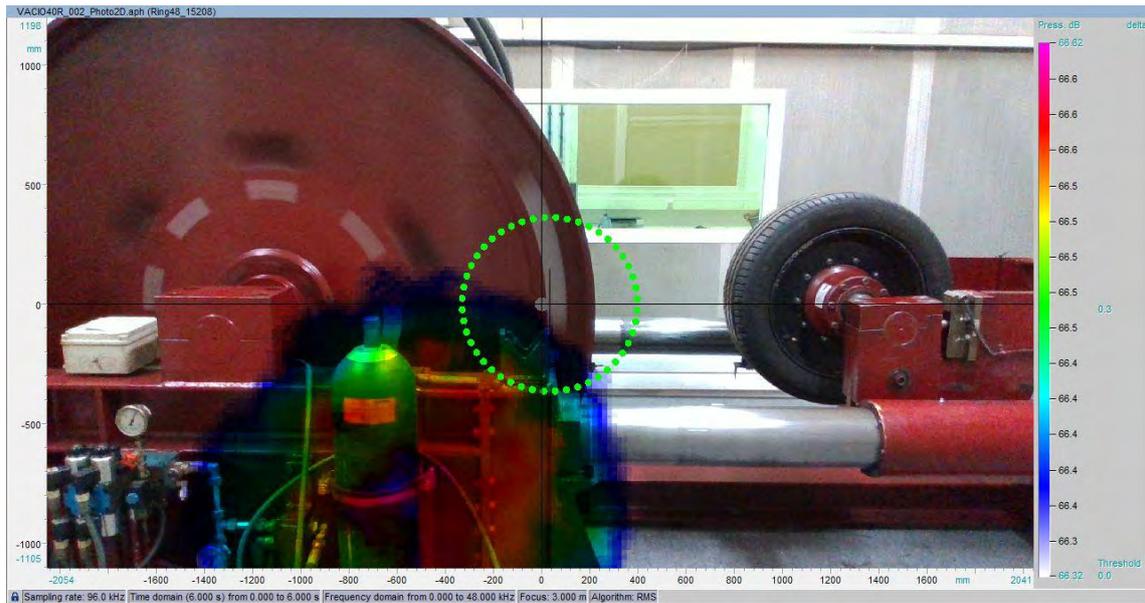


**-Segunda posición (Neumático real a 40 km/h):**



**Figura 74:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



. Figura 75: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real en vacío.

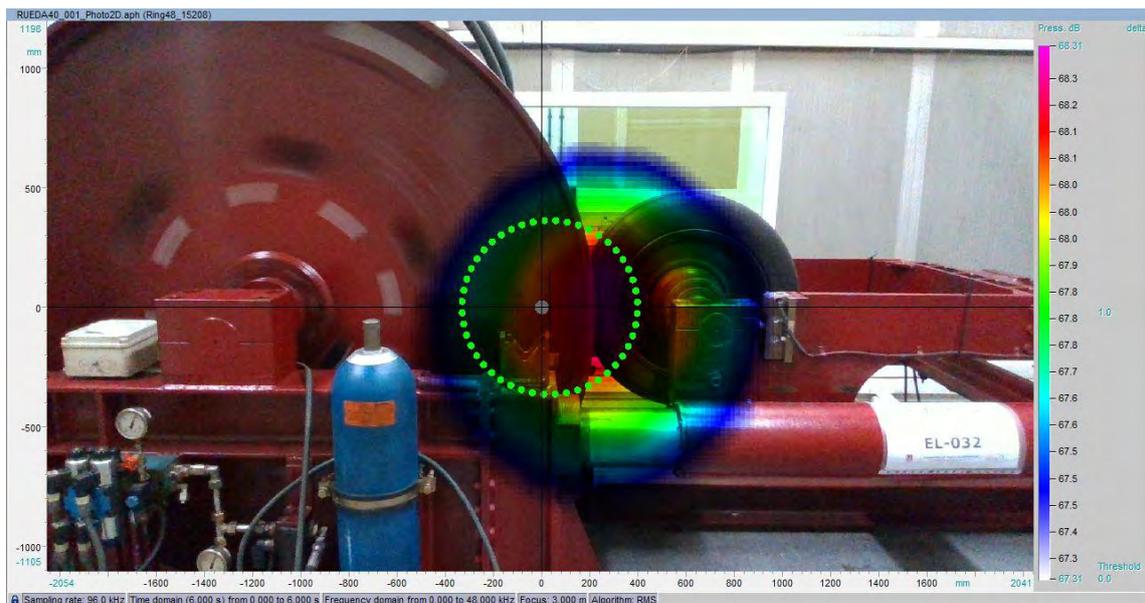
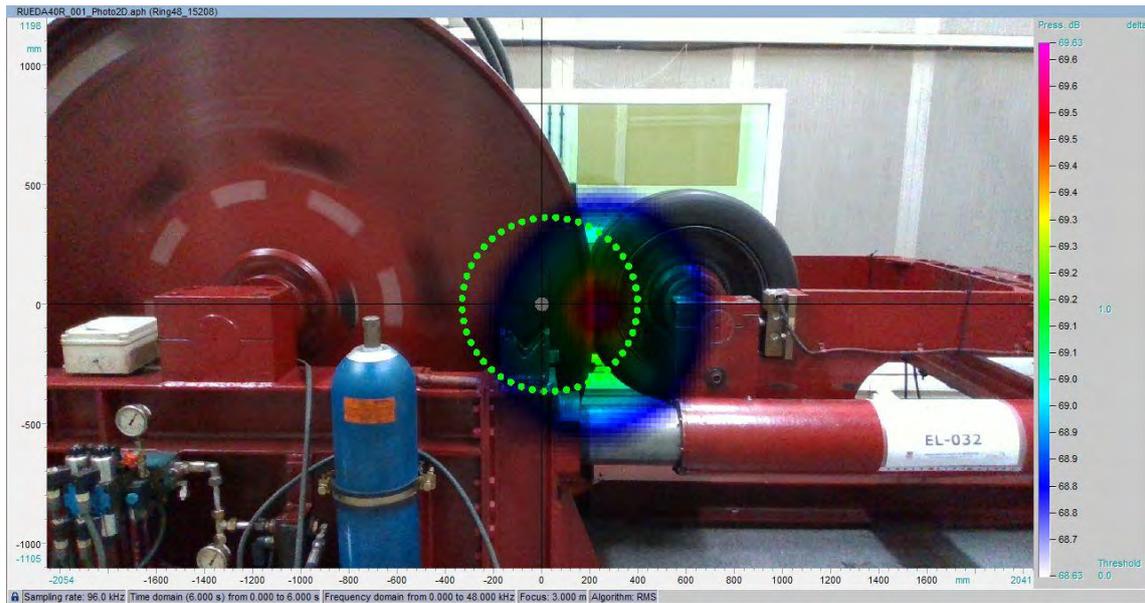


Figura 76: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real girando.

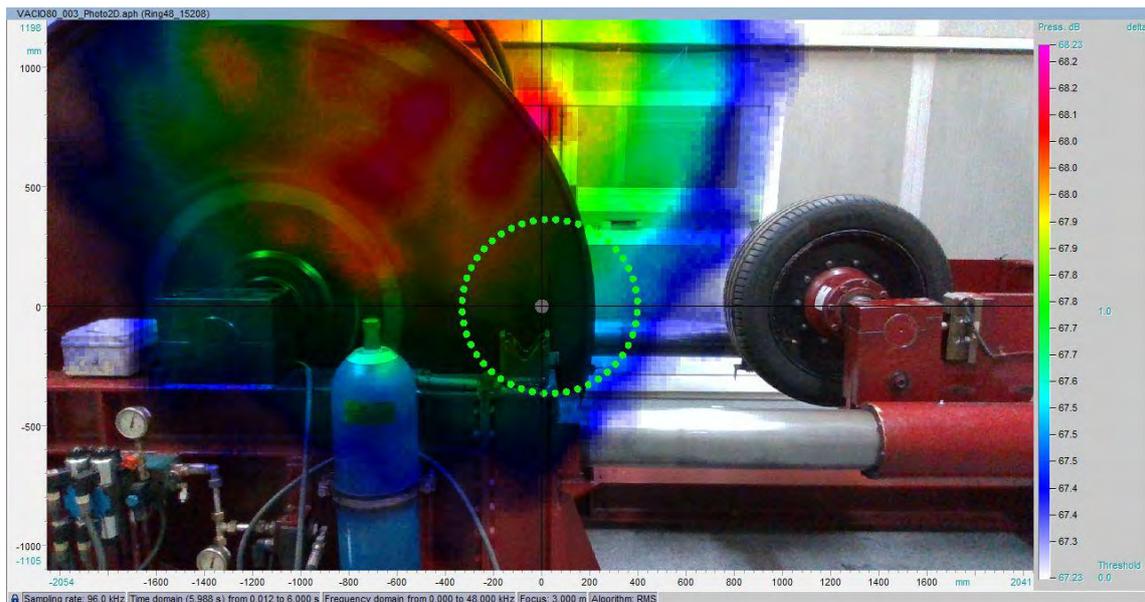
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 77:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 40 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real girando.



**-Segunda posición (Neumático real a 80 km/h):**



**Figura 78:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

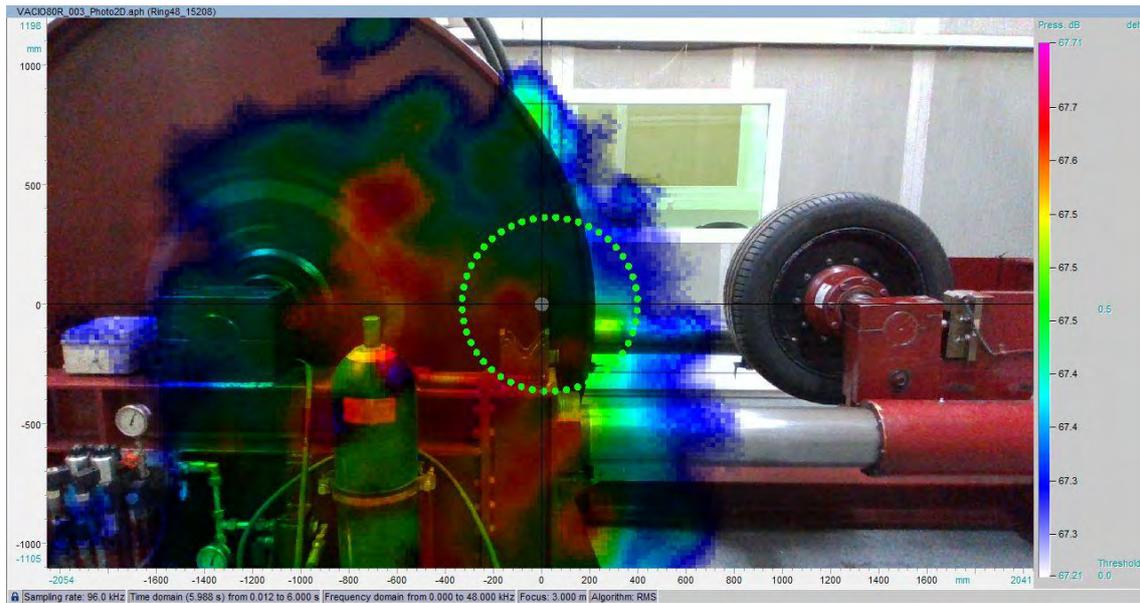


Figura 79: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real en vacío.

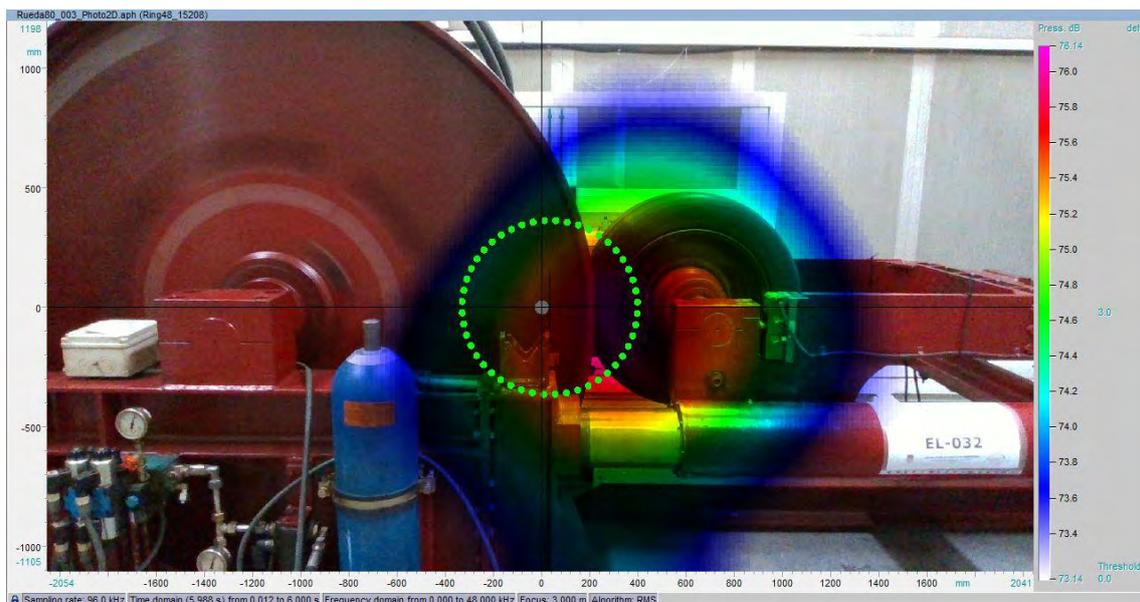
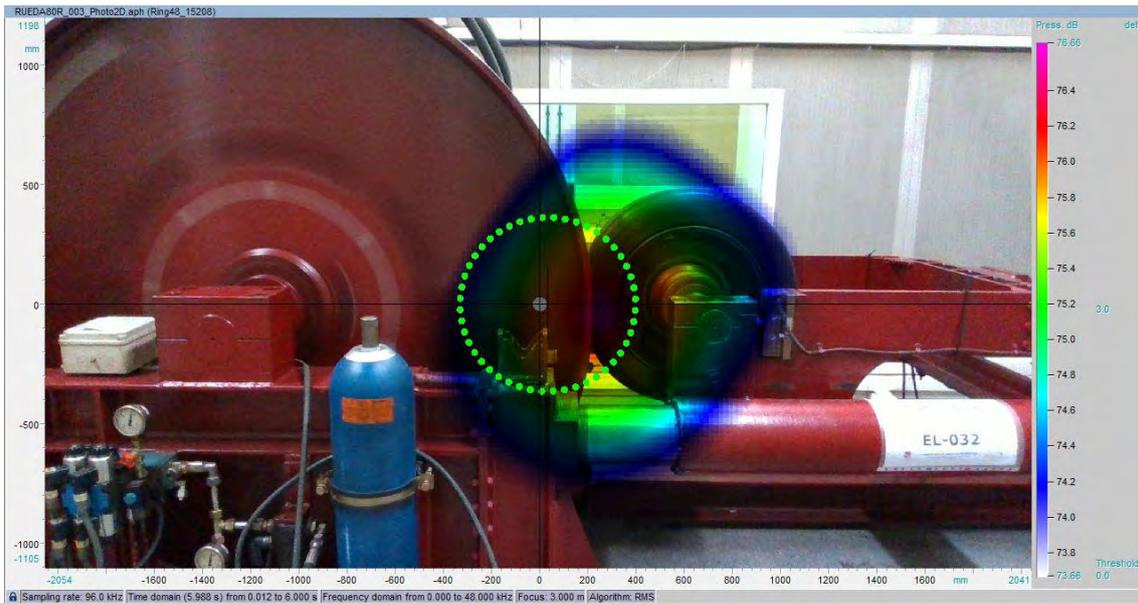


Figura 80: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real girando.

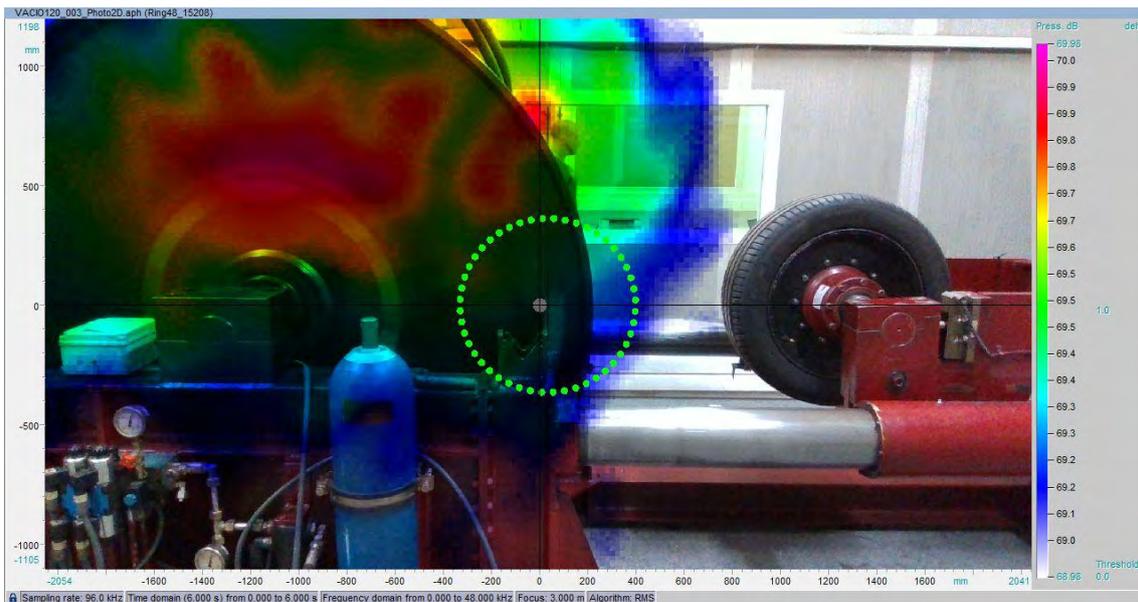
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA



**Figura 81:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 80 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real girando.



**-Segunda posición (Neumático real a 120 km/h):**



**Figura 82:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real en vacío.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

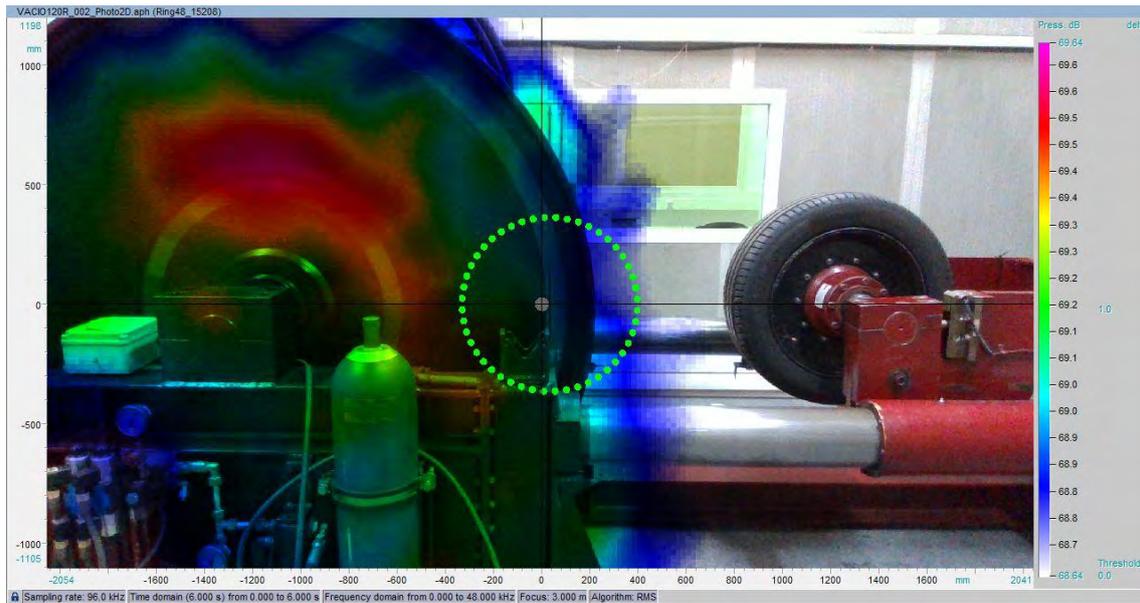


Figura 83: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real en vacío.

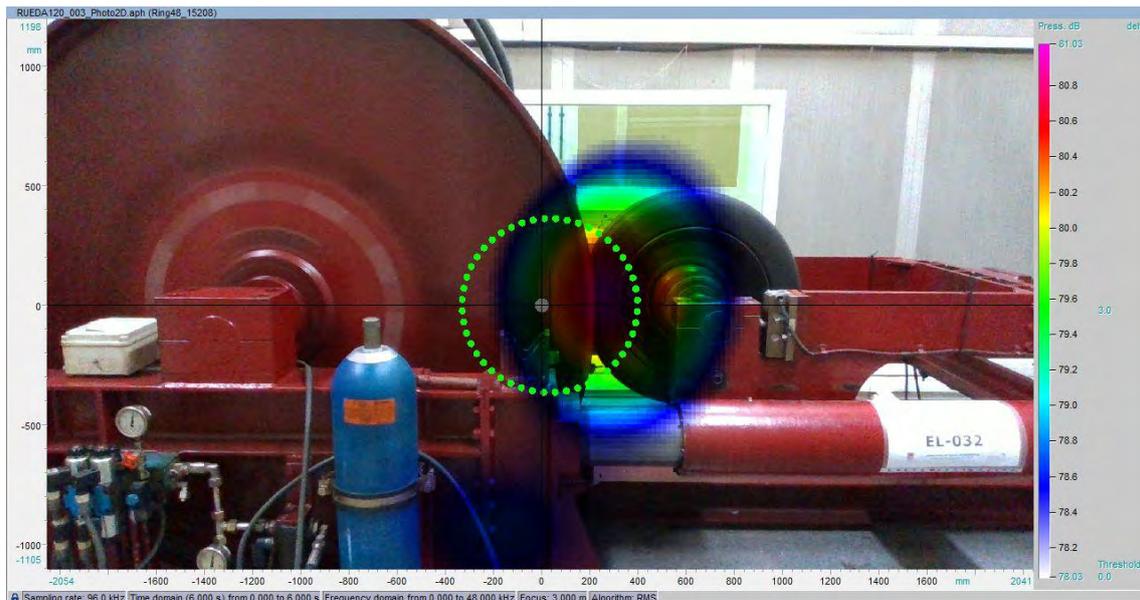
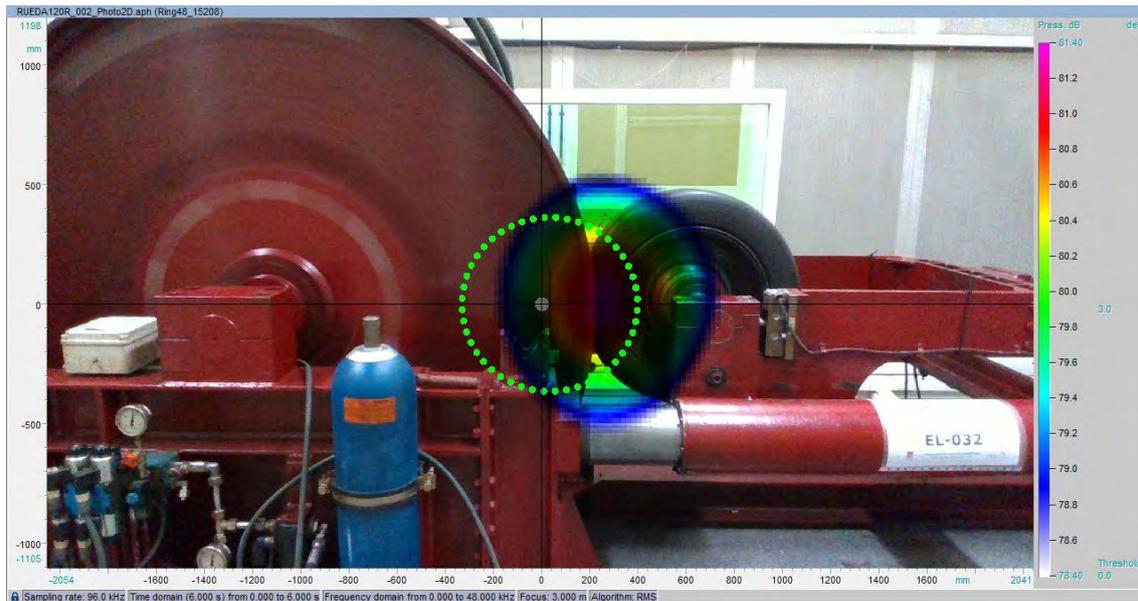


Figura 84: Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido normal, segunda posición y neumático real girando.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA



**Figura 85:** Fotografía 2D de la Acoustic Camera con el Drum girando a 120 km/h en sentido contrario, segunda posición y neumático real girando.

## 6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

A la hora de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos con la cámara acústica, por un lado, se estudiará la influencia de la superficie en la que se encuentra apoyada la fuente emisora y por otra parte, el las características del ruido generado por un neumático real girando en el Drum a distintas velocidades.

### 6.1 INFLUENCIA DEL TIPO DE SUPERFICIE: ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA FSA Y PARA NEMÁTICO REAL A 80KM/H.

Para estudiar la influencia del tipo de superficie sobre los niveles de presión sonora, se estudiarán los resultados en función de tres variables o aspectos:

**-Valor máximo de presión sonora.**

**-Localización.**

**-Forma de propagación.**

Se expresan lo valores de los niveles acústicos con 2 cifras decimales, a pesar de que la Norma solamente requiere la expresión con un decimal, para aprovechar el máximo nivel de precisión que tenemos con la cámara acústica y así poder distinguir entre pequeñas variaciones de niveles de ruido.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

6.1.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN FUNCIÓN DEL  
VALOR MÁXIMO:

Los valores obtenidos corresponden con los valores de presión sonora percibidos en el plano de la cámara. Esto significa que estos valores dependen de la distancia entre la fuente sonora artificial y los micrófonos de la cámara acústica o el neumático.

Para obtener el valor medio de los niveles máximos de presión sonora de cada ensayo, utilizamos la media logarítmica, definida por la Ecuación 1. Los resultados se muestran en las Tablas 2 y 3:

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{0.1 \cdot L'_{pi}} \right] \quad (1)$$

FSA	VALOR MÁXIMO DE PRESIÓN SONORA (dB)				
	DRUM		SUP. PLANA REFLECTANTE		
	Posición 1	Posición 2	Frente	Perfil	Superior
<b>RUIDO ROSA</b>	63,25	67,48	67,79	68,25	68,14
	63,39	67,61	67,60	68,12	68,30
	63,39	67,58	67,91	68,30	68,19
	<b>63,34</b>	<b>67,55</b>	<b>67,77</b>	<b>68,22</b>	<b>68,21</b>
<b>RUIDO ECUALIZADO 15</b>	58,40	61,44	60,48	60,22	61,99
	58,60	61,50	60,31	60,20	62,12
	58,43	61,17	60,52	60,31	61,93
	<b>58,48</b>	<b>61,37</b>	<b>60,44</b>	<b>60,24</b>	<b>60,01</b>
<b>RUIDO ECUALIZADO 25</b>	61,37	64,05	64,83	64,74	66,47
	61,58	64,10	64,88	64,79	66,60
	61,42	64,28	64,71	64,65	66,41
	<b>61,46</b>	<b>61,14</b>	<b>64,81</b>	<b>64,73</b>	<b>66,49</b>

Tabla 2: Tabla con los valores de presión sonora en cada ensayo con la FSA. En amarillo aparecen los valores promedio en escala logarítmica.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

NEUMÁTICO REAL	VALOR MÁXIMO DE PRESIÓN SONORA (dB)			
	PRIMERA POSICIÓN		SEGUNDA POSICIÓN	
RUEDA 80	78,66	<b>78,62</b>	76,26	<b>76,19</b>
	78,66		76,17	
	78,54		76,14	
RUEDA 80 R	76,67	<b>76,70</b>	76,67	<b>76,67</b>
	76,73		76,68	
	76,69		76,66	
VACÍO 80	69,64	<b>69,67</b>	68,04	<b>68,24</b>
	69,70		68,23	
	69,68		68,44	
VACÍO 80 R	68,43	<b>68,50</b>	67,76	<b>67,91</b>
	68,59		68,06	
	68,48		67,71	

Tabla 3: Tabla con los valores de presión sonora en cada ensayo con el neumático real a 80 km/h. En amarillo aparecen los valores promedio en escala logarítmica.

Para obtener el **valor neto** de presión sonora generada por la rodadura, se restan logarítmicamente los valores de “VACÍO” a los de “RUEDA”, quedando así el valor de rodadura pura. Utilizamos la Ecuación 2 para obtener los resultados que se exponen en la Tabla 4:

$$L_{p2} = 10 \log \left[ 10^{\frac{L_{pt}}{10}} - 10^{\frac{L_{p1}}{10}} \right] \quad (2)$$

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

VALOR NETO DE PRESIÓN SONORA (dB)	GIRO NORMAL	GIRO INVERSO
1ª POSICIÓN	78,03	75,99
2ª POSICIÓN	75,43	76,05

Tabla 4: Tabla con los valores de presión sonora neta para cada posición del array y para cada sentido de giro.

Los valores máximos de presión sonora se corresponden con los producidos por el ruido rosa, ya que, en las pistas ecualizadas, los parámetros de ecualización se corresponden con ganancias negativas.

No se puede llegar a la conclusión de que un sentido de giro provoque una mayor emisión de ruido que el otro, ya que, para cada posición, se obtiene un valor mayor en un sentido de giro distinto.

Además, observando las imágenes sonoras obtenidas, podemos apreciar, por ejemplo, en las figuras 44, 45 y 46, que en los ensayos en los que se reproducen pistas ecualizadas 15 y 25, existen anomalías en las imágenes obtenidas al procesarse la señal captada por los micrófonos del Array de la cámara acústica en estos ensayos. Esto se resume en la Figura 86:

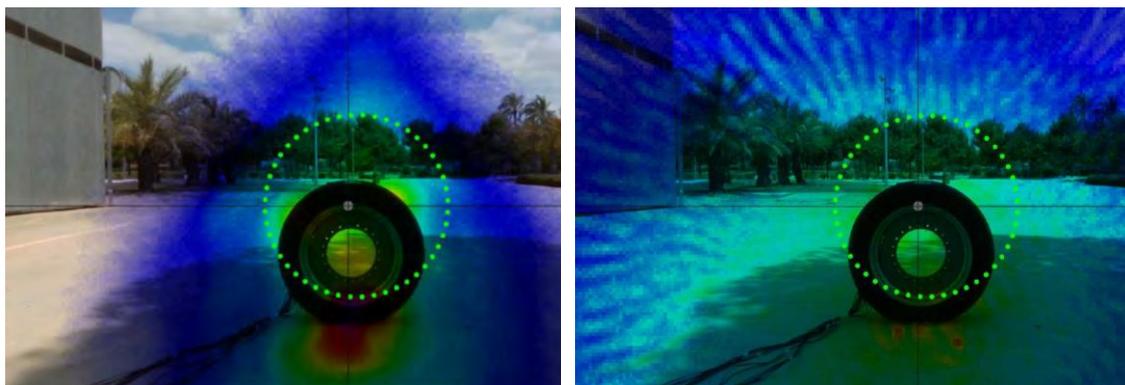


Figura 86: Ejemplo de la anomalía en la imagen de los ensayos ecualizados. Arriba, ensayo con ruido rosa; abajo, ensayo con ruido ecualizado 15.

Teniendo en cuenta esto, llegamos a la conclusión de que los datos obtenidos de los ensayos con ruido rosa son los más adecuados para comparar los resultados en cada tipo de superficie y los resultados del Drum con FSA y neumático real.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

6.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN FUNCIÓN DE LA  
LOCALIZACIÓN:

Para poder comparar la localización del sonido en un tipo de superficie y otro, se deben analizar los resultados de cada ensayo en el Drum con los análogos de los ensayos sobre la superficie plana reflectante. Estas correspondencias serán: **primera posición Drum – posición superior en superficie plana** y **segunda posición drum – posición frontal en superficie plana**.

Visualizamos cada conjunto de resultados con ruido rosa para sacar conclusiones en cuanto a la localización.

Cambiamos la escala de colores, seleccionando un mayor rango del nivel de ruido para una misma variación de la escala cromática. Para hacer esto seleccionamos la opción “Delta” dentro del menú de escala y jugamos con este valor para obtener la visualización deseada, este valor se cambiará en función de las variaciones de la presión sonora captadas por la cámara en cada ensayo.

Podemos así centrarnos en estudiar la localización de la generación de ruido, según se muestra en las Figuras 87 y 88:

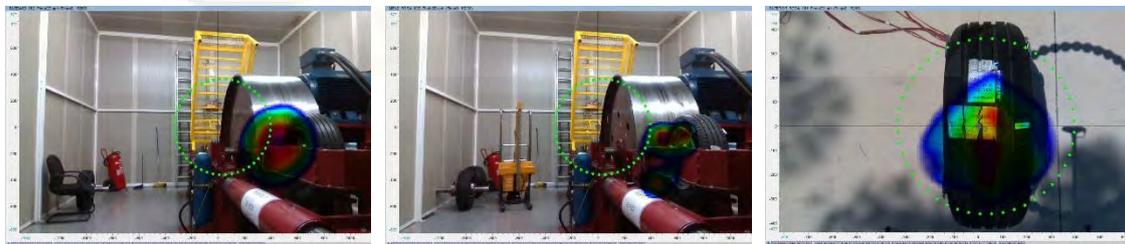


Figura 87: Primera posición de comparación con ruido rosa entre localización de ruido con neumático real (1) y FSA (2) en Drum y FSA sobre superficie plana reflectante (3).

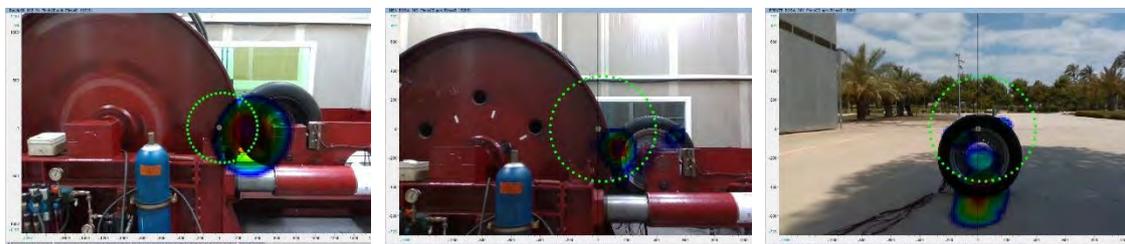


Figura 88: Segunda posición de comparación con ruido rosa entre localización de ruido con neumático real (1) y FSA (2) en Drum y FSA sobre superficie plana reflectante (3).

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

De estas comparaciones llegamos a la conclusión de que en los experimentos en el Drum presentan una mayor presencia de ruido en la zona del “horn” o “cuerno” que en los experimentos realizados sobre la superficie plana reflectante.

Además, en la superficie plana existe una reflexión del sonido en el pavimento, la cual no se da en los ensayos en el Drum, ya que la superficie del Drum en esa dirección es mucho menor. Esto implica que parte del sonido emitido en esa dirección se pierde, en lugar de ser rebotado hacia los receptores.

En cuanto al neumático real, se puede ver una localización de casi la totalidad del ruido en la huella de contacto, mientras que en FSA, se aprecian pequeñas fuentes en cada uno de los altavoces. Esto se debe a que los altavoces de la parte superior del neumático están diseñados para emitir un ruido generado por la interacción ente las ondas del ruido de rodadura y la carrocería del vehículo, la cual no se tiene en los ensayos en el Drum.

### 6.1.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN FUNCIÓN DE LA FORMA:

Hacemos la misma comparación, pero con un valor de delta distinto, mayor o igual que el utilizado en los análisis de localización, para analizar la forma en la que se propaga el sonido en cada uno de los experimentos. Se resumen los resultados en las Figuras 89 y 90:

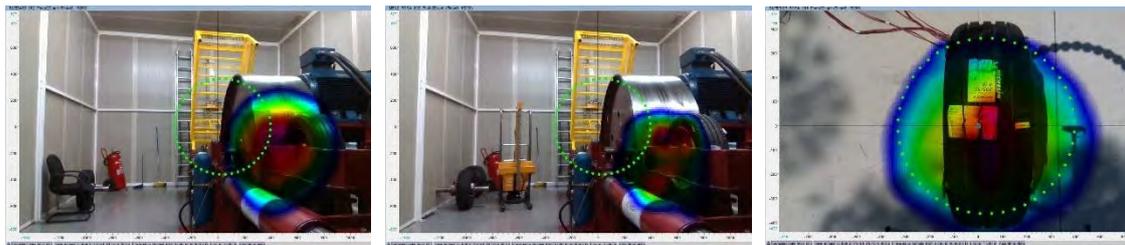


Figura 89: Primera posición de comparación con ruido rosa entre la forma de propagación del ruido con neumático real (1) y FSA (2) en Drum y FSA sobre superficie plana reflectante (3).

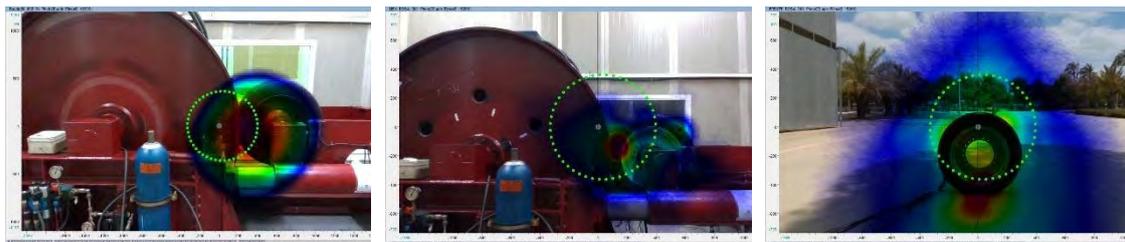


Figura 90: Segunda posición de comparación con ruido rosa entre la forma de propagación del ruido con neumático real (1) y FSA (2) en Drum y FSA (3) sobre superficie plana reflectante.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

De estas comparaciones concluimos que en la superficie plana el ruido se propaga de forma radial entorno al punto de contacto entre la fuente y el suelo. Sin embargo, en el Drum, existen varios objetos que forman parte de la máquina de ensayo de neumáticos y que obstaculizan esta propagación radial, por lo que en estos ensayos no se aprecian los círculos concéntricos en distintos colores con tanta claridad como en los ensayos sobre la superficie plana.

Con el neumático real se aprecia una forma de propagación del sonido muy similar a la que se ve con la FSA, pero ligeramente menos afectada por los elementos de la sala de ensayos.

## 6.2 ESTUDIO DEL RUIDO GENERADO POR EL NEUMÁTICO REAL GIRANDO EN EL DRUM A DISTINTAS VELOCIDADES

A continuación, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el Drum con el neumático real a distintas velocidades.

Se muestran los resultados en las Tablas 5 y 6, una para cada posición de array de micrófonos en la sala de ensayo de neumáticos. Los ensayos se realizan a las velocidades de 10 km/h, 40 km/h, 80 km/h y 120 km/h, con el Drum girando en ambos sentidos, en vacío y con el neumático apoyado.

El objetivo es analizar el efecto de la velocidad y el sentido de giro del neumático en la generación de ruido de rodadura.

NEUM. REAL 1ª POSICIÓN	VALOR MÁXIMO DE PRESIÓN SONORA (dB)			
	RUEDA	VACÍO	RUEDA (R)	VACÍO (R)
10 km/h	64,91	64,01	64,72	64,28
	64,86	64,05	64,46	64,39
	65,01	64,05	64,53	64,29
	<b>64,93</b>	<b>64,04</b>	<b>64,57</b>	<b>64,32</b>
40 km/h	70,27	66,02	70,73	65,64
	70,70	66,87	70,78	64,67
	70,52	66,43	70,66	65,70
	<b>70,50</b>	<b>66,45</b>	<b>70,72</b>	<b>65,36</b>

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

<b>80 km/h</b>	78,66	69,64	76,67	68,43
	78,66	69,70	76,73	68,59
	78,54	69,68	76,69	68,48
	<b>78,62</b>	<b>69,67</b>	<b>76,70</b>	<b>68,50</b>
<b>120 km/h</b>	82,20	72,54	82,15	70,66
	82,15	72,06	82,14	70,74
	82,22	72,21	82,09	70,63
	<b>82,19</b>	<b>72,27</b>	<b>82,13</b>	<b>70,68</b>

Tabla 5: Tabla con los valores de presión sonora en cada ensayo con el neumático real a distintas velocidades (1ª posición). En amarillo aparecen los valores promedio en escala logarítmica.

<b>NEUM. REAL 2ª POSICIÓN</b>	<b>VALOR MÁXIMO DE PRESIÓN SONORA (dB)</b>			
	<b>RUEDA</b>	<b>VACÍO</b>	<b>RUEDA (R)</b>	<b>VACÍO (R)</b>
<b>10 km/h</b>	62,71	62,34	62,36	62,72
	62,53	62,33	62,51	62,50
	62,35	62,20	62,27	62,49
	<b>62,53</b>	<b>62,29</b>	<b>62,38</b>	<b>62,57</b>
<b>40 km/h</b>	68,31	64,14	69,63	66,44
	68,36	64,33	69,51	66,62
	68,60	64,22	68,83	68,52
	<b>68,43</b>	<b>64,23</b>	<b>69,34</b>	<b>67,30</b>
<b>80 km/h</b>	76,26	68,04	76,67	67,76
	76,17	68,23	76,68	68,06
	76,14	68,44	76,66	67,71
	<b>76,19</b>	<b>68,24</b>	<b>76,67</b>	<b>67,91</b>
<b>120 km/h</b>	80,79	69,68	81,47	69,61
	80,91	68,84	81,40	69,64
	81,03	69,98	81,07	69,60
	<b>80,91</b>	<b>69,84</b>	<b>81,32</b>	<b>69,62</b>

Tabla 6: Tabla con los valores de presión sonora en cada ensayo con el neumático real a distintas velocidades (2ª posición). En amarillo aparecen los valores promedio en escala logarítmica.

Al igual que se hizo anteriormente con los valores de los ensayos a 80 km/h, aplicando la Ecuación 2, obtenemos el **valor neto** de presión sonora generada por la rodadura, restando logarítmicamente los valores medios de “VACÍO” a los de “RUEDA”.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

Realizamos esta operación para cada posición y cada velocidad, mostrando los resultados en la Tablas 7 y 9:

NEUM. REAL 1ª POSICIÓN (dB)	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
10 km/h	57,61	52,05
40 km/h	68,33	69,23
80 km/h	78,03	75,99
120 km/h	81,72	81,81

Tabla 7: Tabla con los valores netos de presión sonora en decibelios generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (1ª posición).

Para poder hacernos una idea de cómo varía realmente la presión sonora, convertimos los valores obtenidos a una unidad lineal, ya que los decibelios utilizan una escala logarítmica. Un incremento de 3 dB supone el doble de potencia en escala lineal, por lo que vamos a convertir los valores a milipascales para evaluar esta variación.

Utilizamos la Ecuación 3 para realizar el cambio de unidades:

$$P = 10^{(SPL/20)+\log(P_o)} \quad (3)$$

Donde:

\*SPL: es el nivel de presión sonora en dB

\*Po: es la presión de referencia, 20 µPa

Obtenemos así el valor de presión sonora en µPa. Multiplicando por 10<sup>-3</sup> obtenemos los valores en milipascales, los cuales se muestran en las Tabla 8 y 10, y se representan gráficamente en las Gráficas 1 y 2:

NEUM. REAL 1ª POSICIÓN (mPa)	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
10 km/h	15,19	8,01
40 km/h	52,18	57,88
80 km/h	159,42	126,05
120 km/h	243,80	246,34

Tabla 8: Tabla con los valores netos de presión sonora en milipascales generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (1ª posición).

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

a)



b)



Gráfica 1: Valores netos de presión sonora a) en dB y b) en milipascales generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (1ª posición).

NEUM. REAL 2ª POSICIÓN (dB)	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
10 km/h	49,83	¡ERROR!
40 km/h	66,35	65,08
80 km/h	75,43	76,05
120 km/h	80,56	81,02

Tabla 9: Tabla con los valores netos de presión sonora en decibelios generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (2ª posición).

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
 SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
 ACÚSTICA

NEUM. REAL 2ª POSICIÓN (mPa)	SENTIDO NORMAL	SENTIDO INVERSO
10 km/h	6,20	¡ERROR!
40 km/h	41,55	35,89
80 km/h	118,18	126,92
120 km/h	213,32	224,92

Tabla 10: Tabla con los valores netos de presión sonora en milipascales generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (2ª posición).

a)



b)



Gráfica 2: Valores netos de presión sonora en a) en dB y b) en milipascales, generada únicamente por el ruido de rodadura con el neumático real a distintas velocidades (2ª posición).

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

En los ensayos realizados en la segunda posición del array se obtiene un resultado no concluyente, ya que al obtener los resultados para el Drum girando en sentido inverso a 10 km/h con la segunda posición del Array de micrófonos, el valor de presión sonora con Drum girando en vacío supera a los valores obtenidos con el neumático apoyado a esta velocidad.

Esto es debido al poco impacto que tiene el ruido de rodadura a bajas velocidades, por lo que un pequeño cambio en el ruido ambiente “background noise” entre unos ensayos y otros puede resultar más influyente que el propio ruido de rodadura generado en estas condiciones de funcionamiento.

Se aprecia también cómo aumentan exponencialmente estos valores de presión sonora a al visualizar los resultados en escala lineal (mPa), habiendo grandes diferencias de la cantidad de ruido percibido conforme se aumenta la velocidad.

Sin embargo, cuando visualizamos los resultados en escala logarítmica (dB), observamos un incremento más lineal, que se asemeja mucho más a la forma en la que el oído humano percibe los incrementos en los niveles de ruido.

Es por esto que en acústica se utiliza normalmente el decibelio (dB) como unidad de medida para expresar valores de nivel sonoro.

### 6.3 ESTUDIO DEL ESPECTRO SONORO GENERADO EN LOS ENSAYOS

Para poder visualizar los niveles de ruido obtenidos únicamente en ciertas bandas de frecuencia, seleccionamos dentro del programa “Noise Image” la opción “Spectral Photo 2D).

Podemos así estudiar el comportamiento del ruido generado a lo largo del espectro de frecuencias.

En primer lugar, nos vamos a centrar en el ruido emitido en **frecuencias bajas**, ya que a menudo entran en **resonancia** con algunos elementos de los vehículos, dando lugar a importantes vibraciones. No tenemos en cuenta los infrasonidos, ya que los micrófonos de la Acoustic Camera no son capaces de captarlos.

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

Un ejemplo de este fenómeno de resonancia se da cuando conectamos un equipo de música y los elementos del interior del vehículo resuenan con los tonos bajos de la pista de audio.

A menudo, se producen vibraciones similares cuando se arranca un vehículo y este funciona al ralentí, es decir, a bajas revoluciones (fácil de apreciar en un autobús o un camión), vamos a analizar si en la generación de estas vibraciones puede influir también el ruido de rodadura.

Estudiaremos también qué parte del nivel de ruido total, es emitido en el espectro de bajas frecuencias.

Posteriormente, realizamos un análisis similar para las frecuencias que se consideran las **más molestas para el oído humano**, que son las que oscilan entre **2.000 Hz y 5.000 Hz** [20].

Se muestra sombreado en **color negro** el rango de frecuencias utilizadas para cada imagen. Se muestran los resultados de presión sonora en mPa para poder entender mejor la importancia de cada tipo de ruido dentro del espectro total. Para cada velocidad, se mostrará una imagen con los sonidos del espectro objeto del estudio y otra para todo el rango de frecuencias.

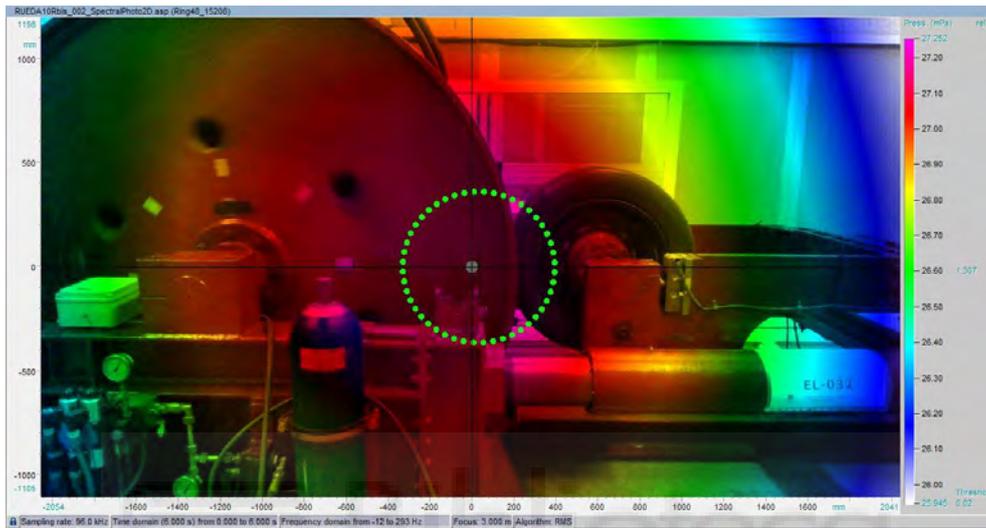
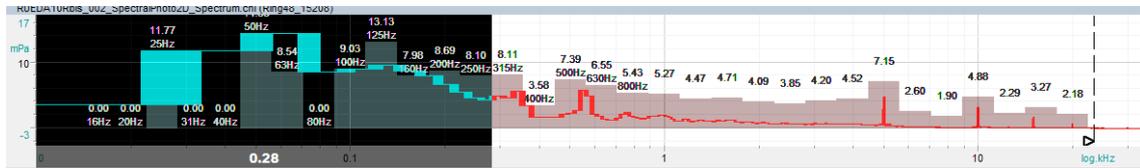
### 6.3.1 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL ESPECTRO SONORO “GRAVE” GENERADO EN LOS ENSAYOS

Se muestran a continuación, en las Figuras 91 a 98, las imágenes del procesado de los resultados para un espectro grave de frecuencias, mostradas junto con los el procesado del espectro completo:

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

**-A 10 km/h:**

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

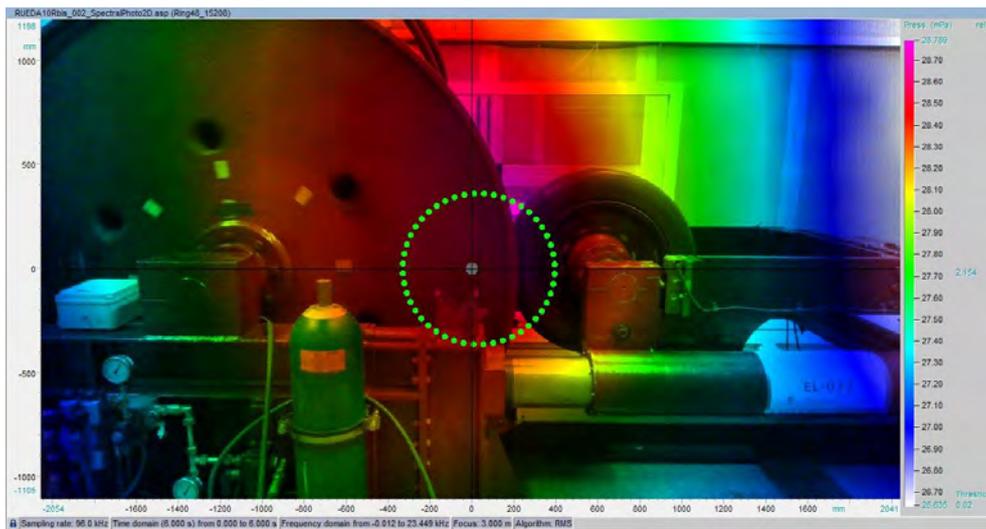
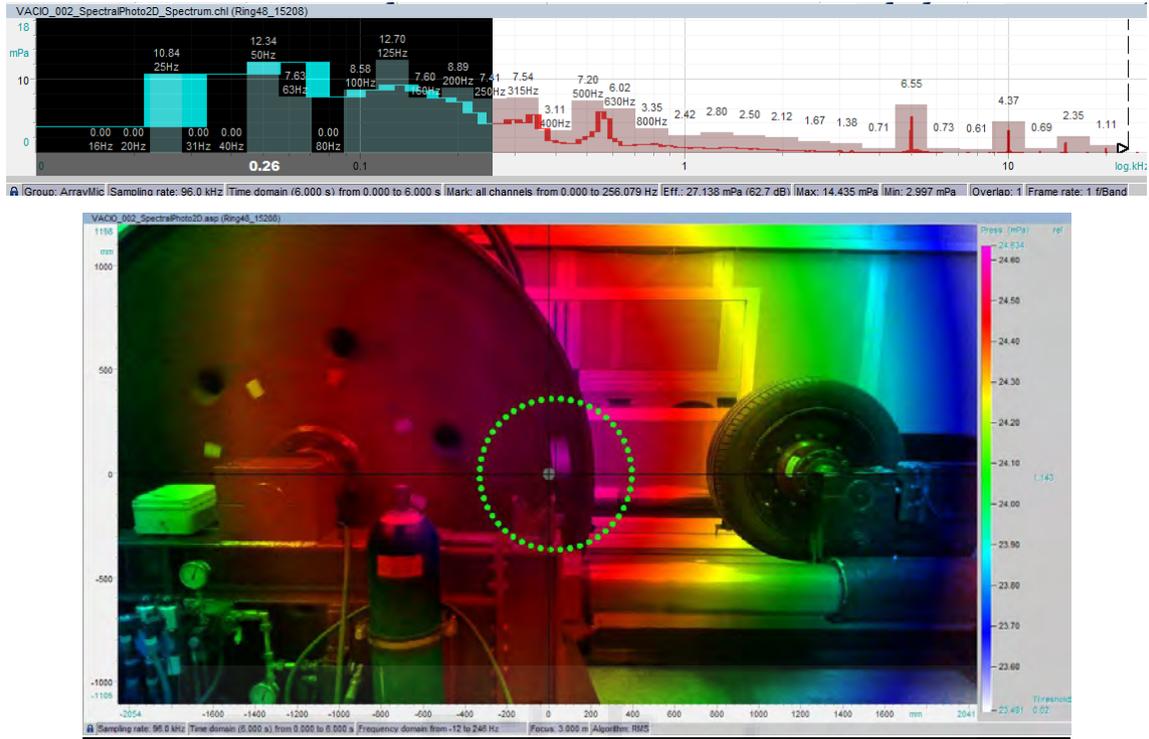


Figura 91: Espectro seleccionado e imagen generada para 10 km/h con el neumático apoyado. a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

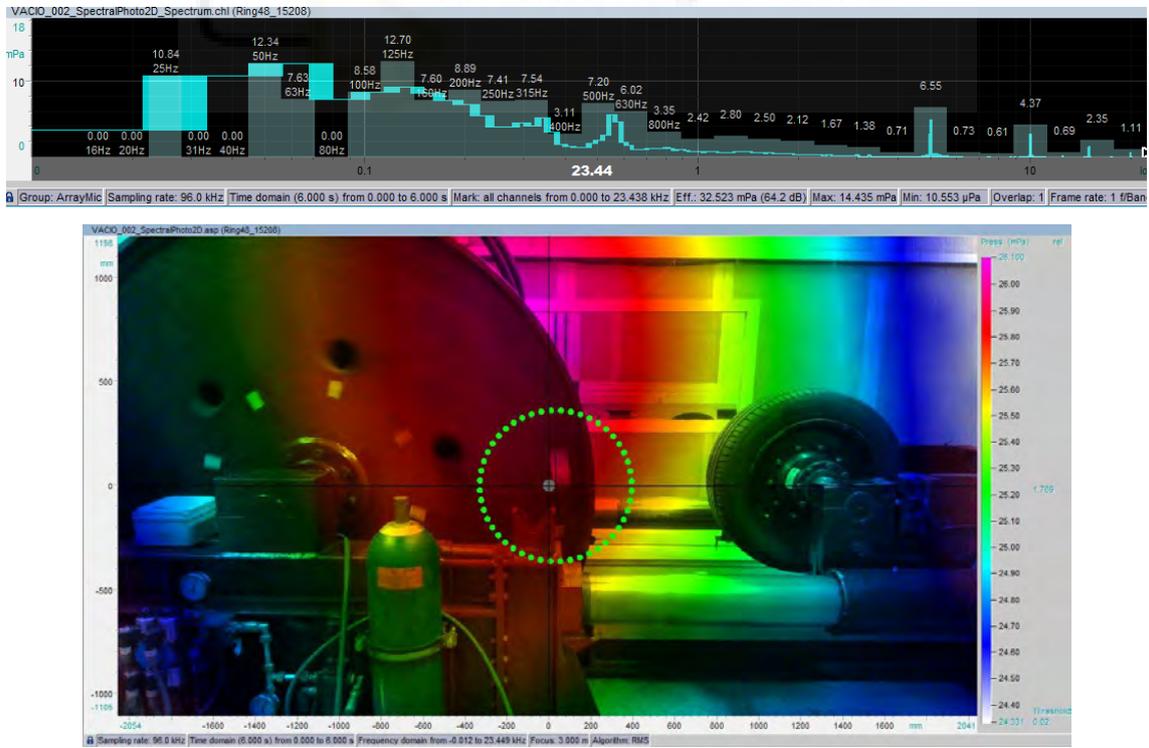


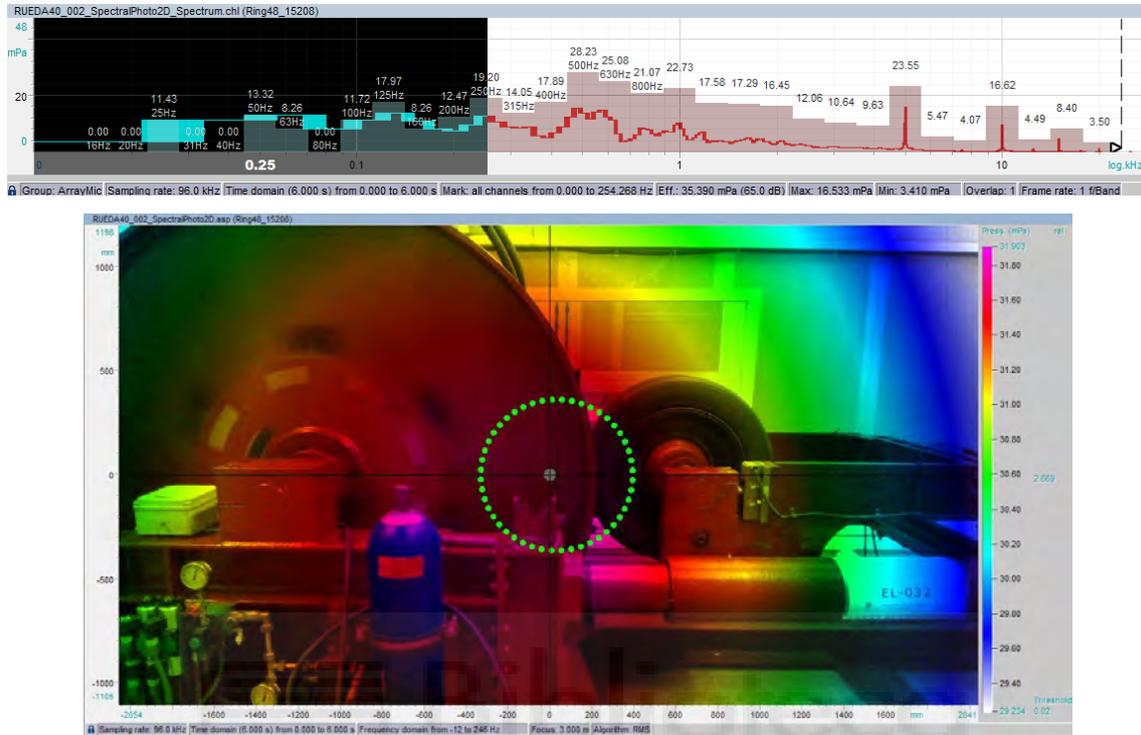
Figura 92: Espectro seleccionado e imagen generada para 10 km/h con el neumático sin apoyar.

a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

**-A 40 km/h:**

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

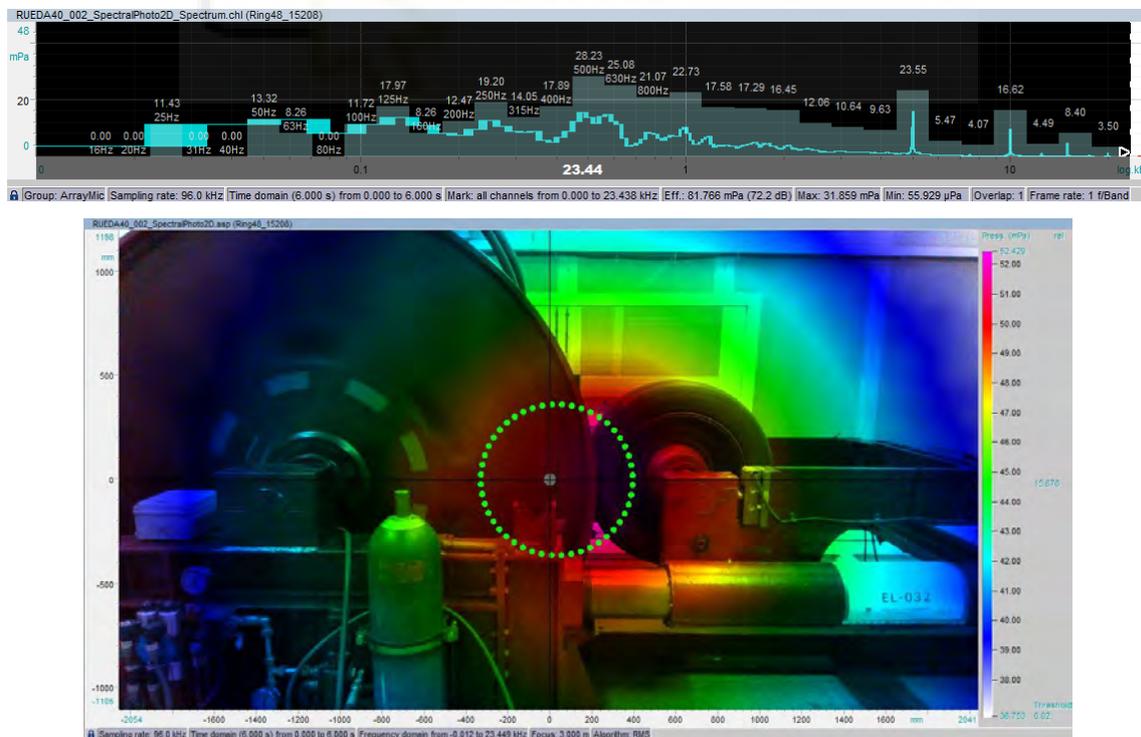
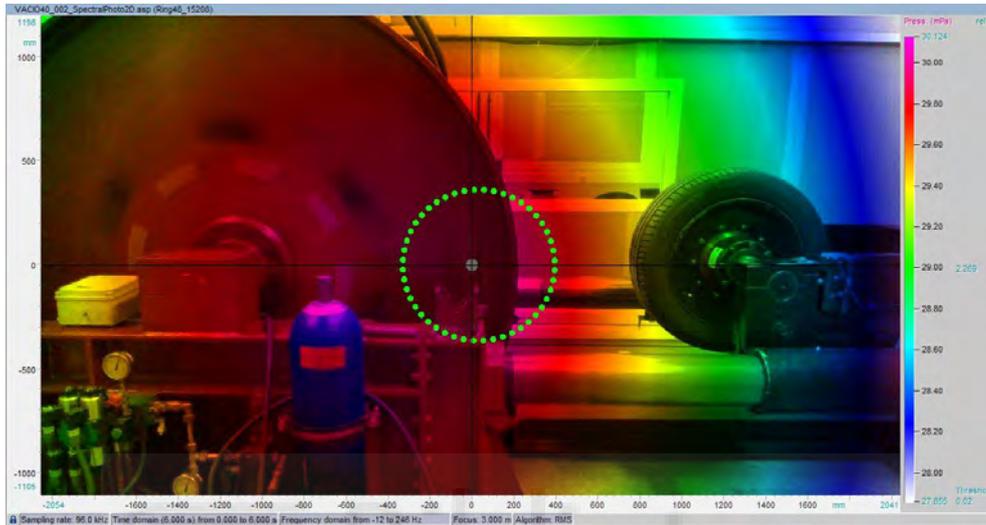
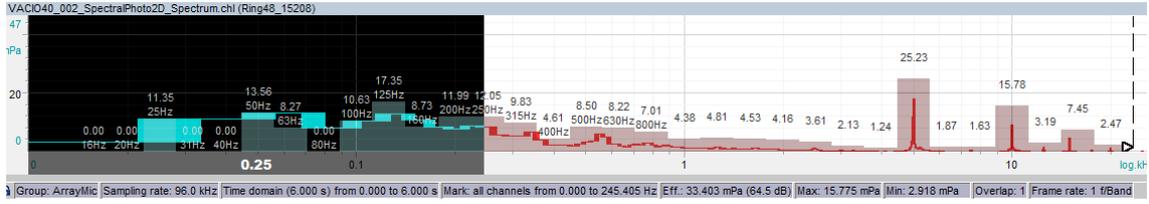


Figura 93: Espectro seleccionado e imagen generada para 40 km/h con el neumático apoyado. a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

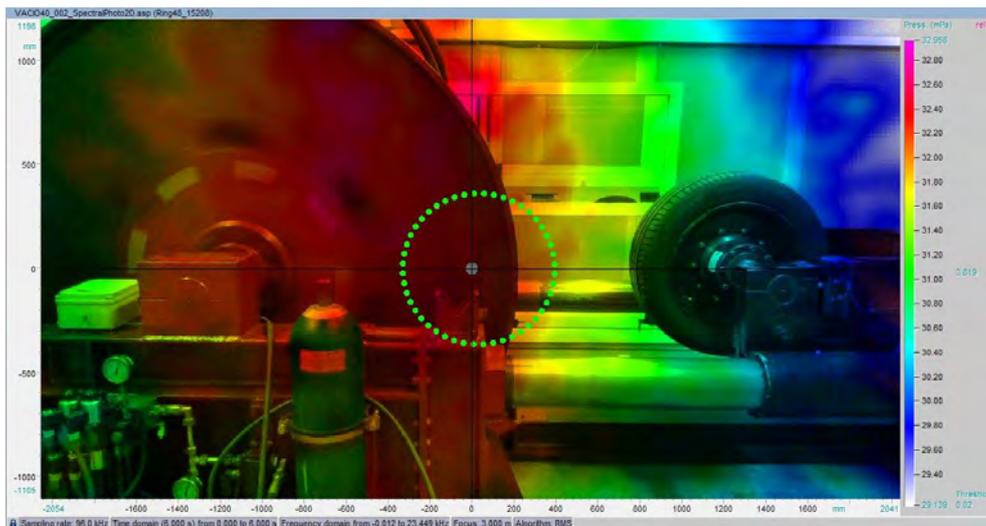
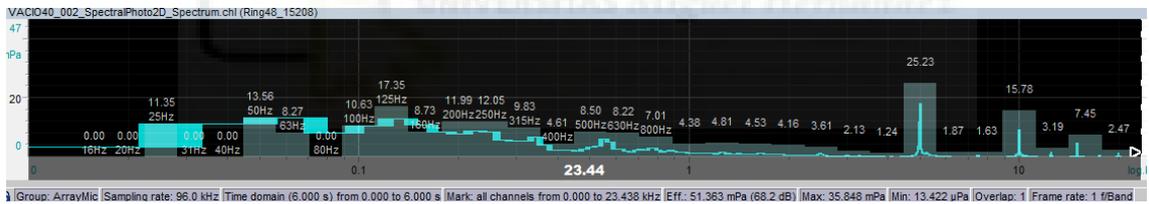


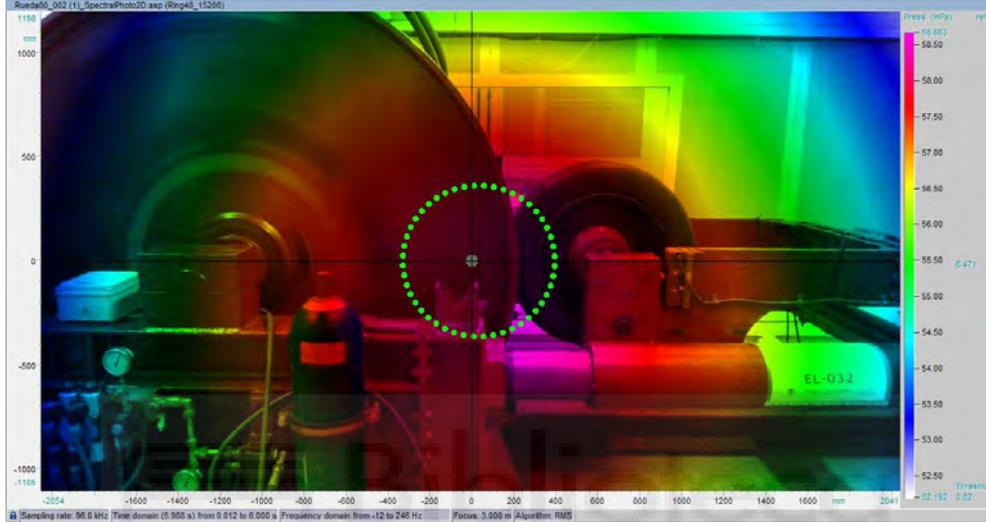
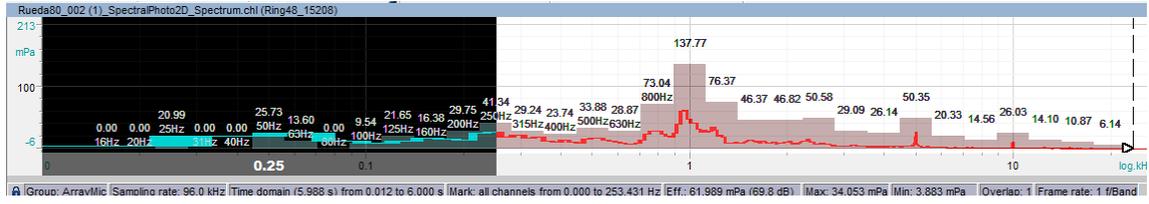
Figura 94: Espectro seleccionado e imagen generada para 40 km/h con el neumático sin apoyar.

a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

**-A 80 km/h:**

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

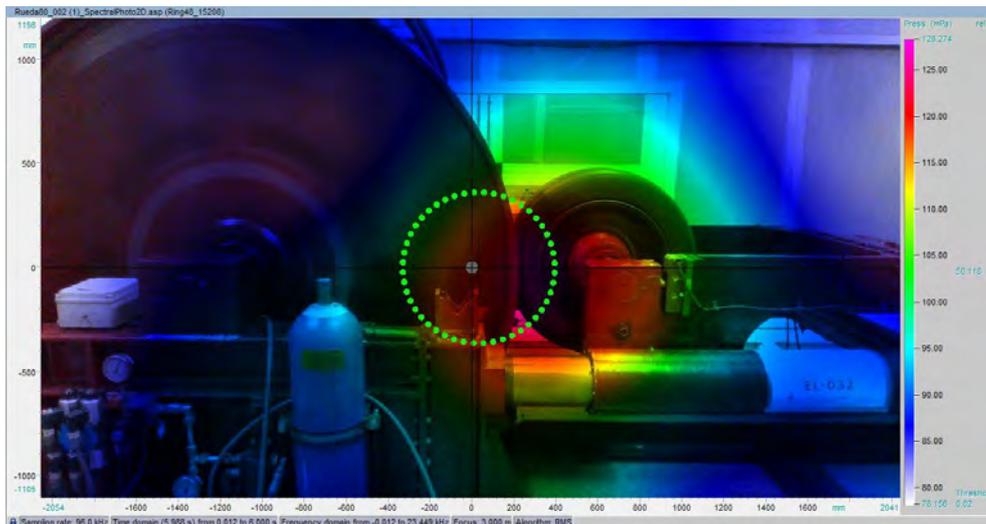
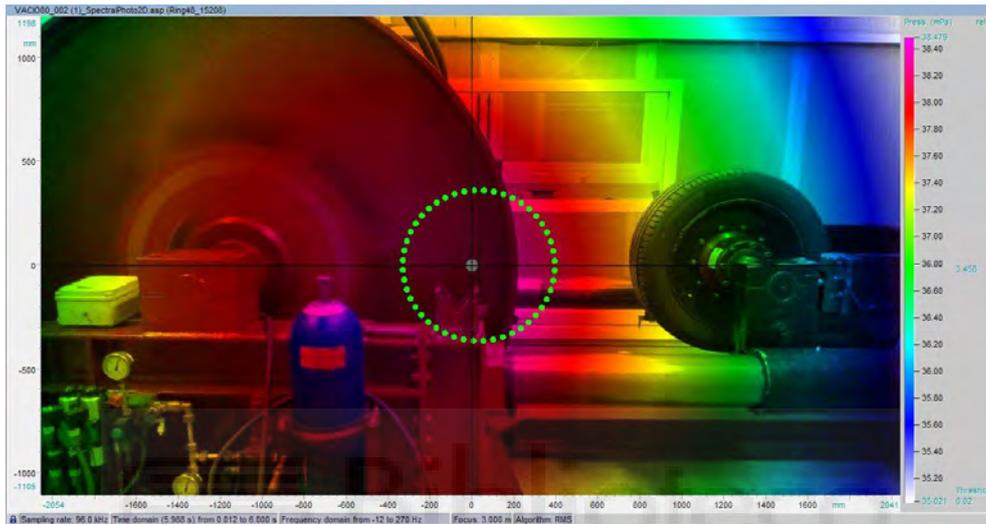


Figura 95: Espectro seleccionado e imagen generada para 80 km/h con el neumático apoyado. a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

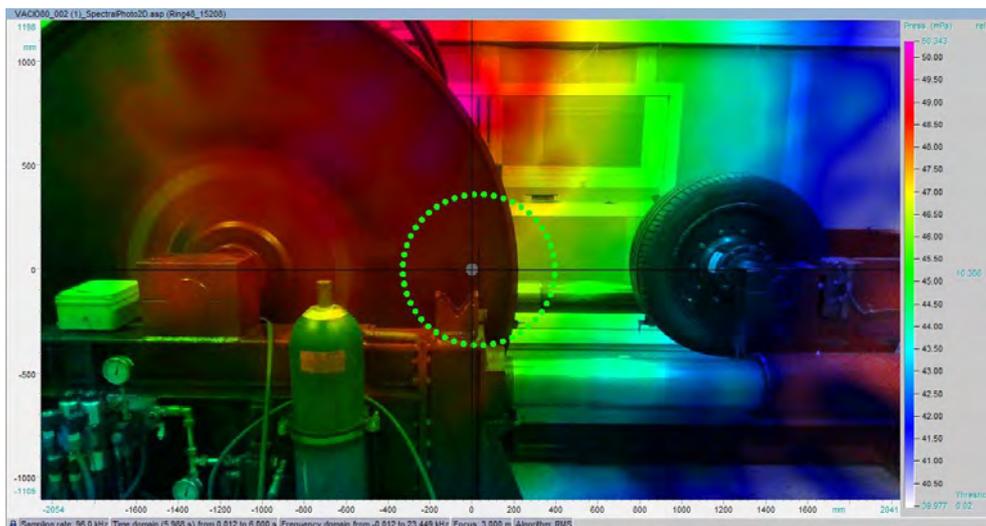
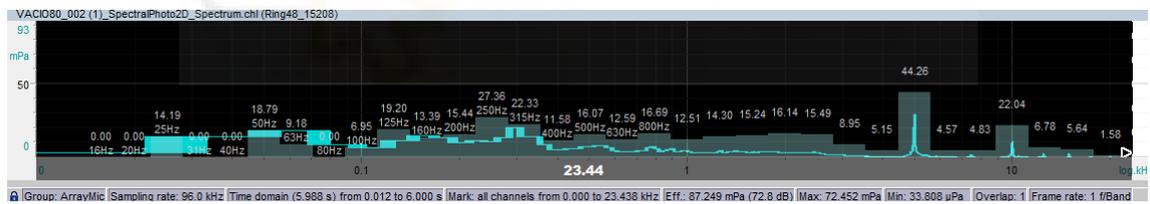


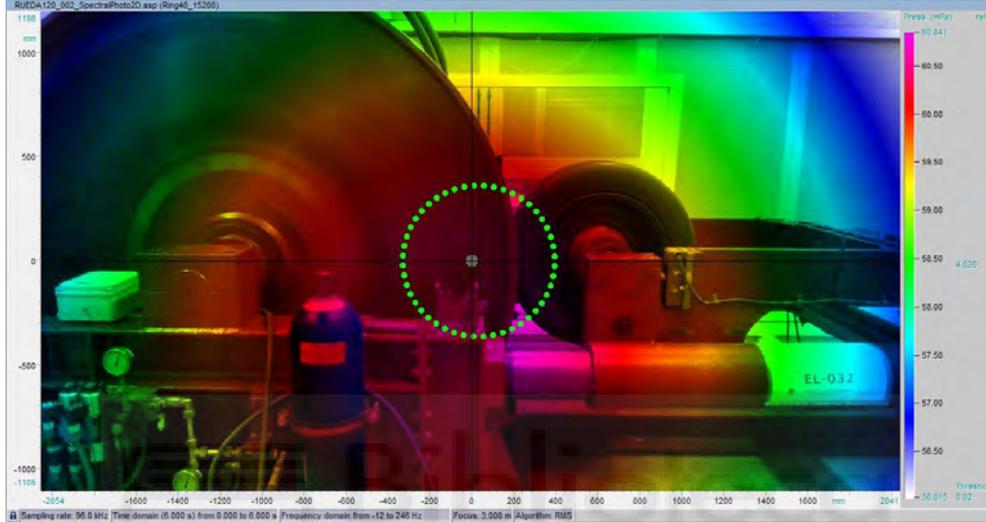
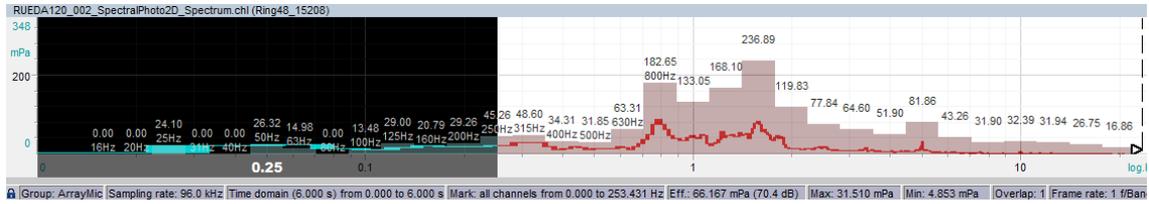
Figura 96: Espectro seleccionado e imagen generada para 80 km/h con el neumático sin apoyar.

a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

**-A 120 km/h:**

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

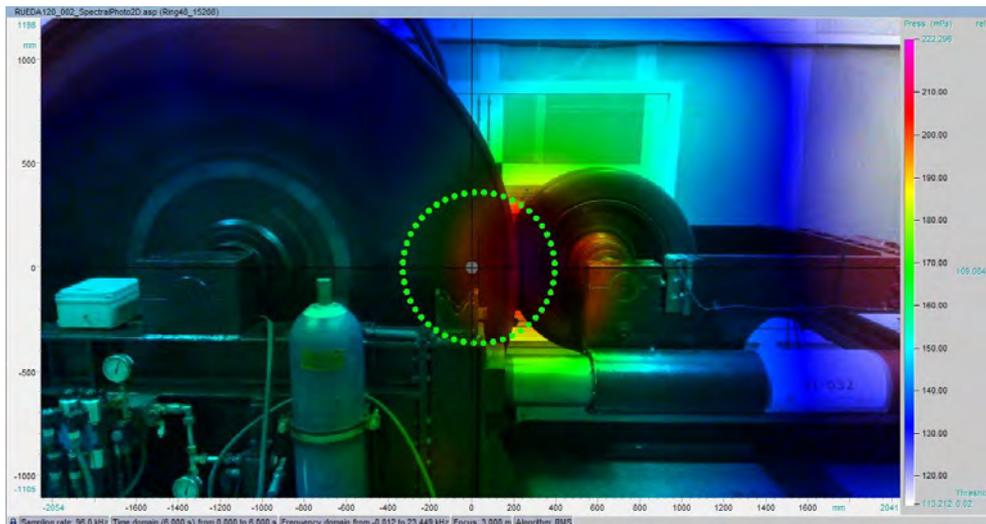
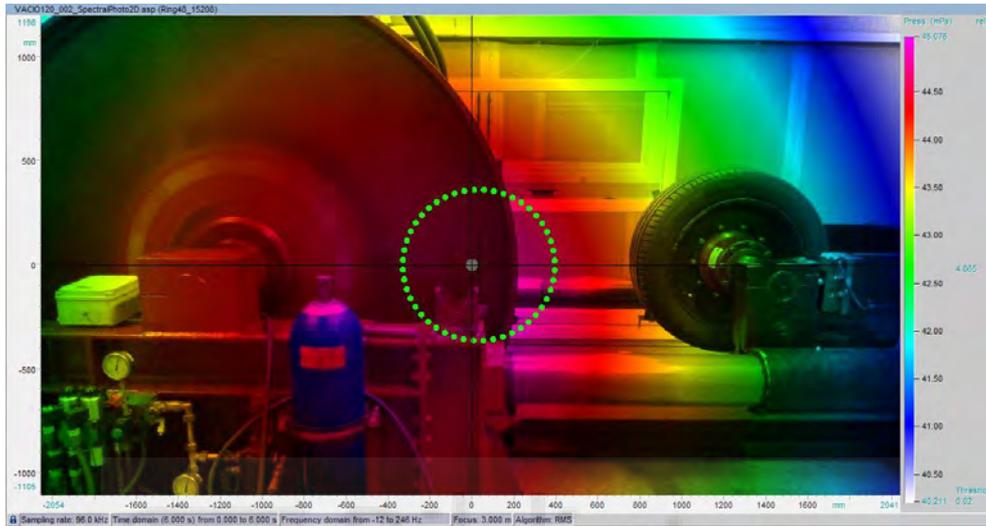
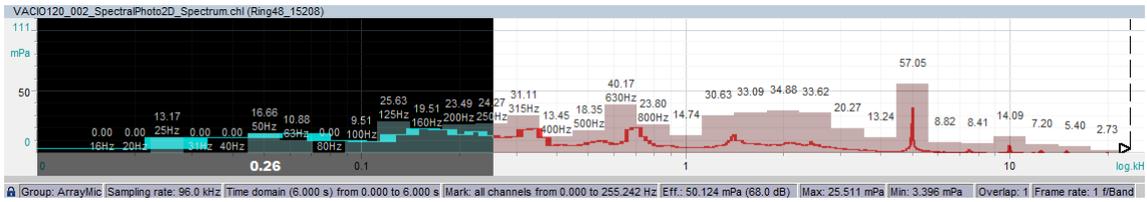


Figura 97: Espectro seleccionado e imagen generada para 120 km/h con el neumático apoyado.

a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

a) Espectro seleccionado: 0 - 250 Hz.



b) Espectro seleccionado: Espectro completo.

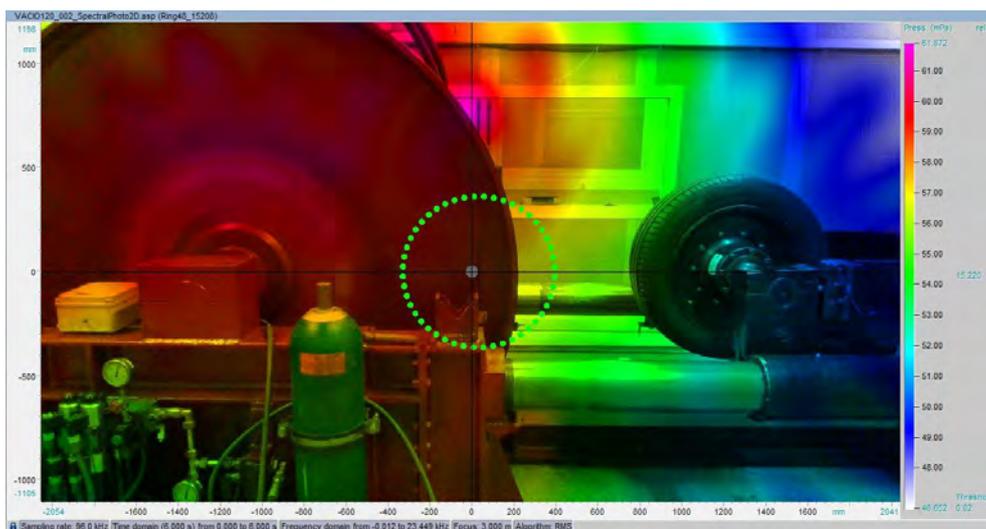


Figura 98: Espectro seleccionado e imagen generada para 120 km/h con el neumático sin apoyar.

a) Espectro grave, b) Todo el espectro.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

**6.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL  
ESPECTRO SONORO GRAVE GENERADO EN LOS  
ENSAYOS**

Se han obtenido valores únicamente para una posición y para un sentido de giro, ya que la influencia de estos factores ya ha quedado reflejada en los ensayos anteriores.

Se muestran a continuación, en la Tabla 11, los valores de nivel de presión sonora máxima obtenidos par cada velocidad, en el espectro grave y en el ancho de banda total del espectro:

	Espectro completo			Espectro grave		
	Apoyado	Sin apoyar	Neto	Apoyado	Sin apoyar	Neto
<b>10 km/h</b>	28,752	26,100	<b>2,652</b>	27,752	24,634	<b>3,118</b>
<b>40 km/h</b>	52,429	32,958	<b>19,471</b>	31,903	30,124	<b>1,779</b>
<b>80 km/h</b>	128,274	50,343	<b>77,931</b>	55,663	38,479	<b>17,184</b>
<b>120 km/h</b>	222,296	61,872	<b>160,424</b>	60,872	45,075	<b>15,797</b>

Tabla 11: Nivel de presión sonora máximo para espectro grave y espectro total en mostrados en mPa .

Como vemos que la emisión del espectro grave es mayor conforme aumentamos la velocidad, como cabe esperar por el mero hecho de haber una mayor emisión de ruido total.

Sin embargo, el peso que tiene el espectro grave sobre la generación de ruido total va disminuyendo conforme aumentamos la velocidad. Esto se explica por la propia definición de frecuencia, ya que, a mayor velocidad, los mecanismos de generación de ruido se reproducen un mayor número de veces en el mismo intervalo de tiempo, dando lugar a tonos más agudos.

Al existir un nivel de ruido “grave” mayor a altas velocidades, además de la baja importancia que tiene el ruido de rodadura frente al ruido del motor cuando se circula a bajas velocidades, se descarta que las vibraciones en elementos de los vehículos a bajas velocidades sean causadas por el ruido de rodadura,.

En cuanto a la propagación del sonido, se puede apreciar claramente cómo las imágenes obtenidas de los espectros de frecuencia graves presentan unos círculos de colores

## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

concéntricos. Es decir, los elementos de la máquina de ensayo de neumáticos tienen menor interferencia con la propagación de los sonidos graves, debido a la mayor longitud de onda de estas frecuencias.

### 6.3.3 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL ESPECTRO SONORO “MOLESTO” GENERADO EN LOS ENSAYOS

Se muestran a continuación, en las Figuras 99 a 106, los resultados obtenidos en el procesado de las imágenes seleccionando el espectro “molesto”:

**-A 10 km/h:**

Espectro seleccionado: 2000 - 5000 Hz.

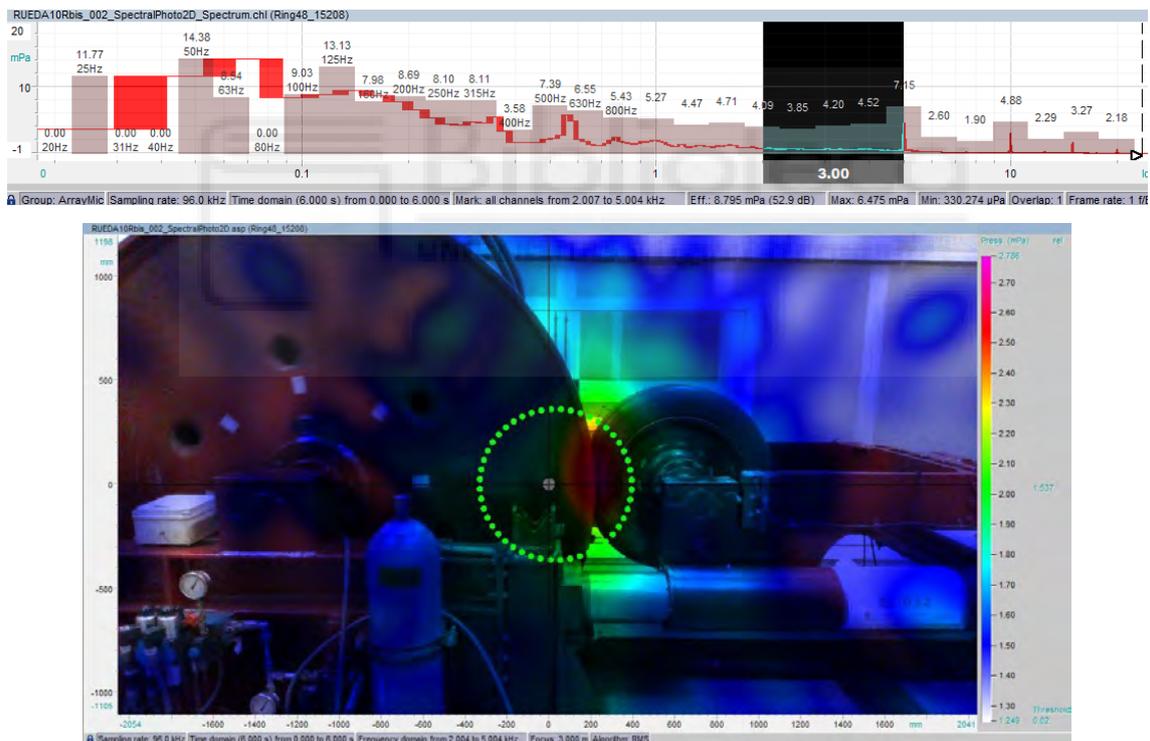


Figura 99: Espectro seleccionado e imagen generada para 10 km/h con el neumático apoyado. Espectro molesto.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

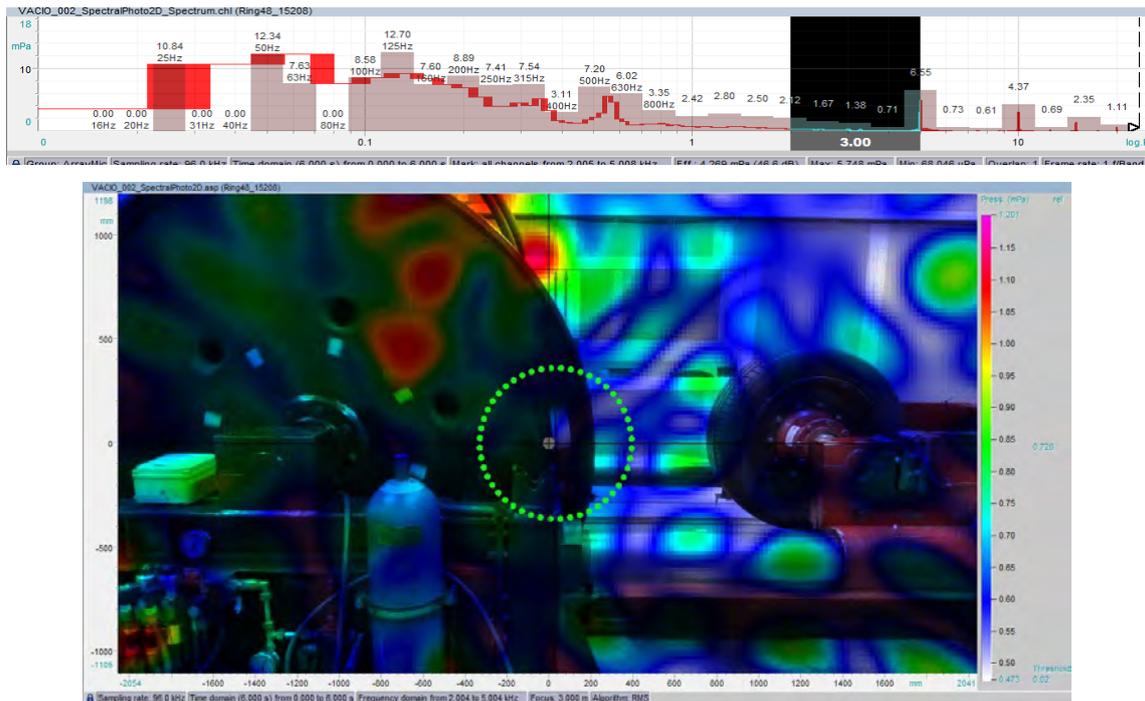
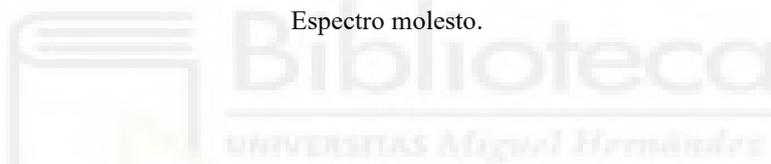


Figura 100: Espectro seleccionado e imagen generada para 10 km/h con el neumático sin apoyar. Espectro molesto.



## -A 40 km/h:

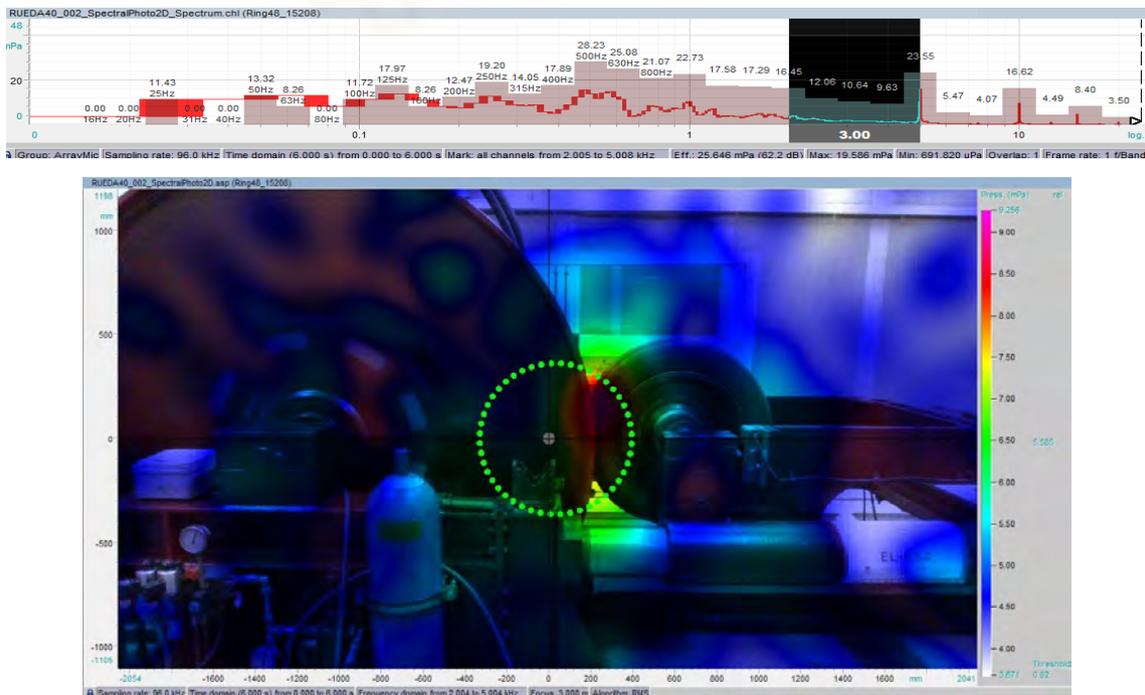


Figura 101: Espectro seleccionado e imagen generada para 40 km/h con el neumático apoyado. Espectro molesto.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

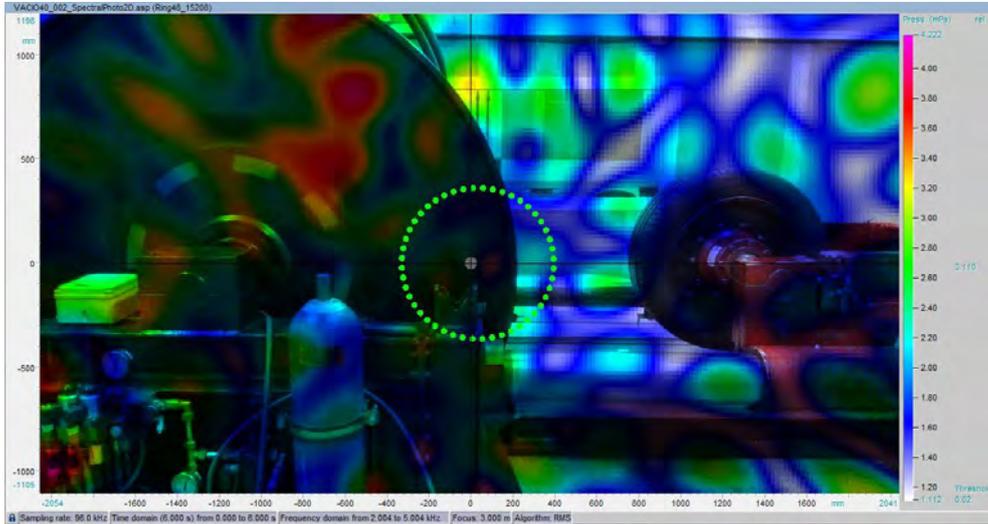
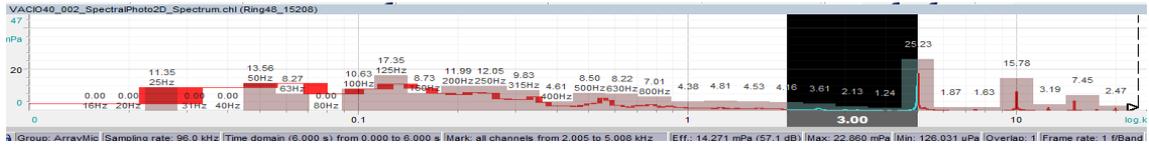


Figura 102: Espectro seleccionado e imagen generada para 40 km/h con el neumático sin apoyar. Espectro molesto.

## -A 80 km/h:

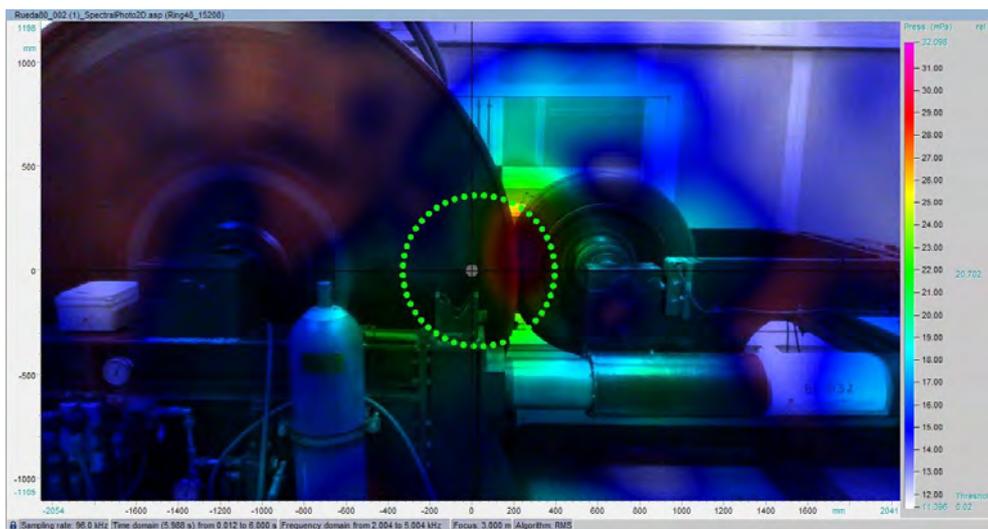
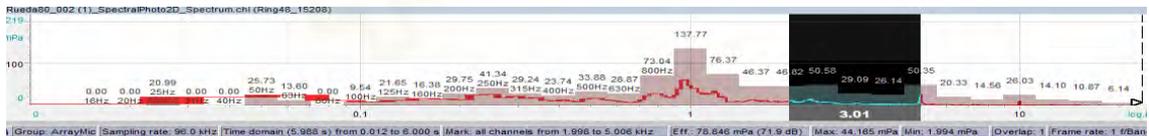


Figura 103: Espectro seleccionado e imagen generada para 80 km/h con el neumático apoyado. Espectro molesto.

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA ACÚSTICA

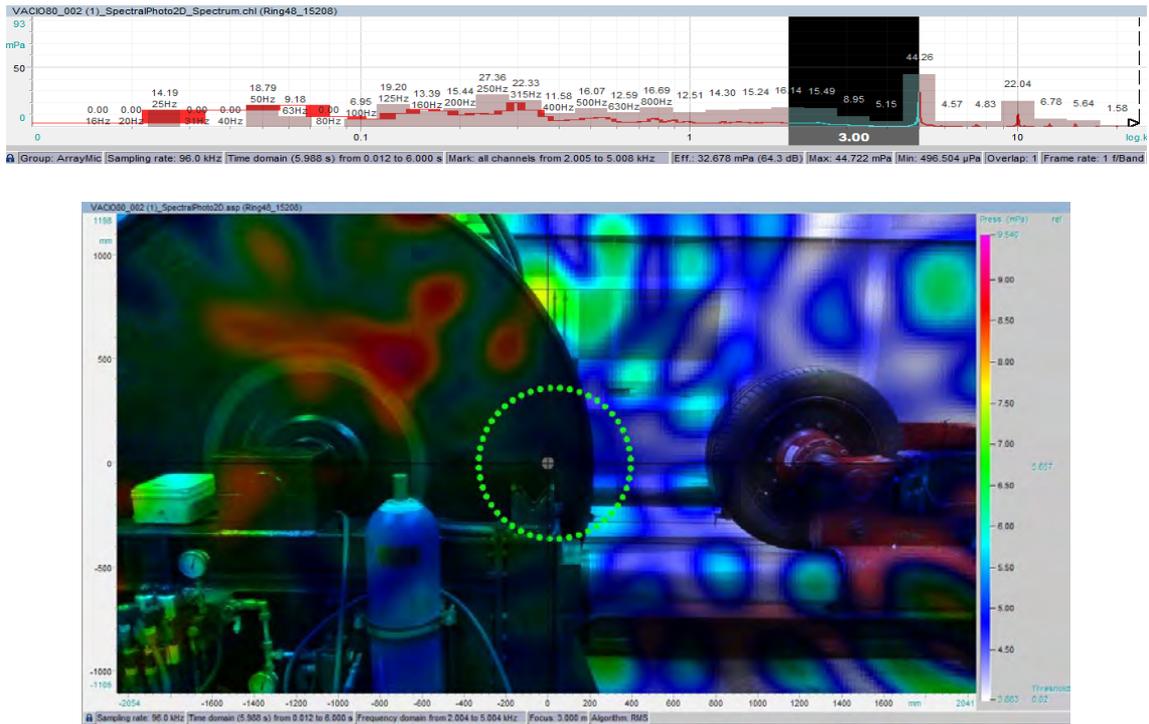


Figura 104: Espectro seleccionado e imagen generada para 80 km/h con el neumático sin apoyar.  
Espectro molesto.

**-A 120 km/h:**

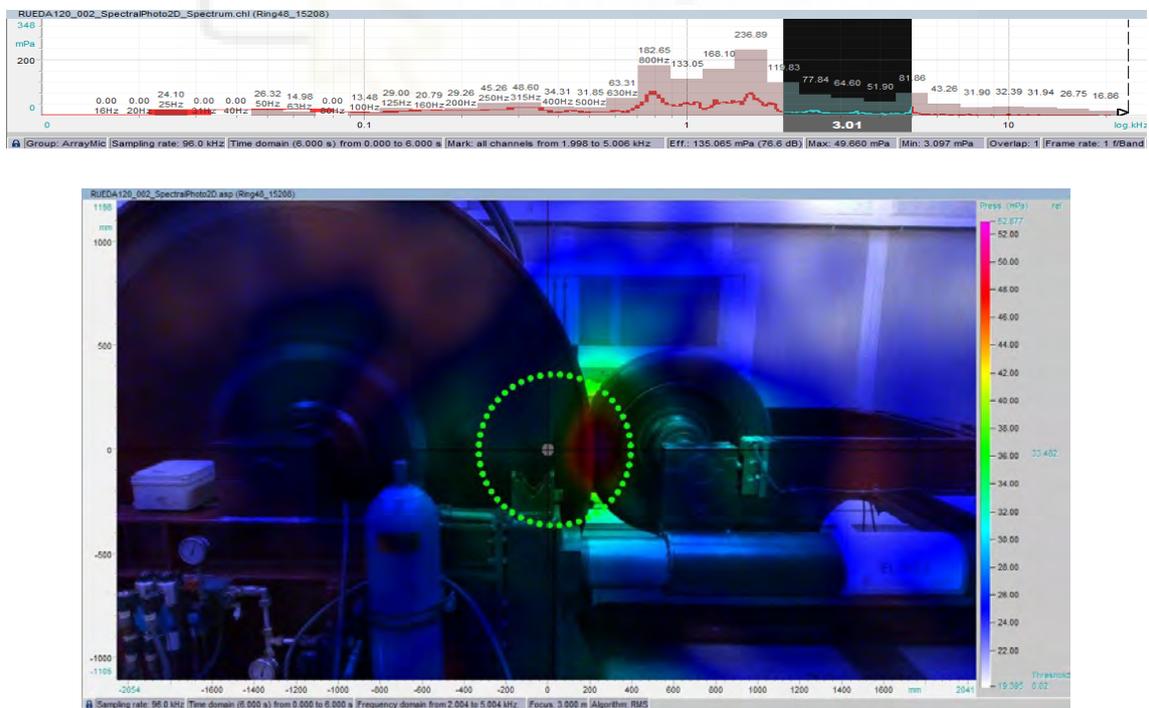
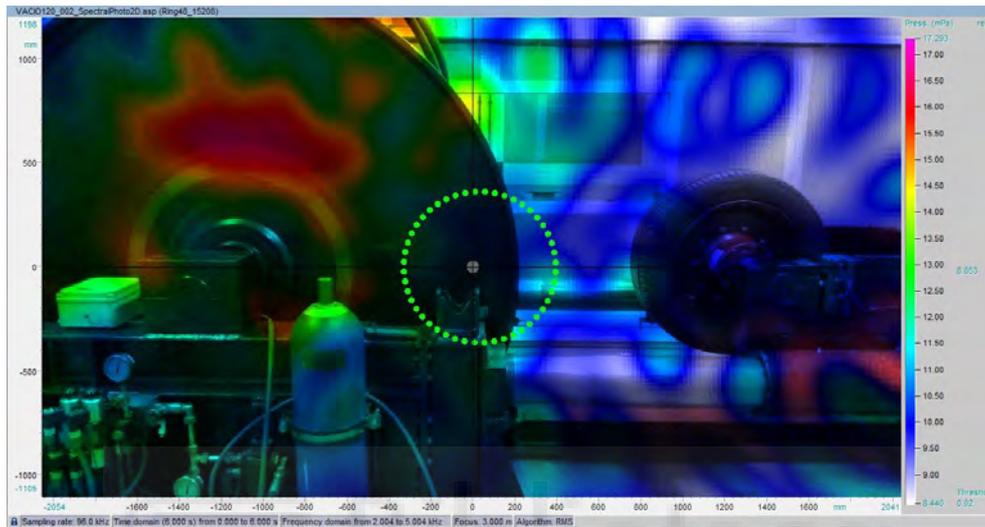


Figura 105: Espectro seleccionado e imagen generada para 120 km/h con el neumático apoyado. Espectro molesto.

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA**



**Figura 106:** Espectro seleccionado e imagen generada para 120 km/h con el neumático sin apoyar.  
Espectro molesto.

Los valores de presión sonora máxima obtenidos en el procesamiento del espectro “molesto” de las imágenes acústicas, se muestran en la Tabla 12:

	Espectro completo			Espectro molesto		
	Apojado	Sin apoyar	Neto	Apojado	Sin apoyar	Neto
<b>10 km/h</b>	28,752	26,100	<b>2,652</b>	2,786	1,201	<b>1,585</b>
<b>40 km/h</b>	52,429	32,958	<b>19,471</b>	9,256	4,222	<b>5,034</b>
<b>80 km/h</b>	128,274	50,343	<b>77,931</b>	32,098	9,540	<b>22,558</b>
<b>120 km/h</b>	222,296	61,872	<b>160,424</b>	52,877	17,293	<b>35,584</b>

**Tabla 12:** Nivel de presión sonora máximo para espectro molesto y espectro total en mostrados en mPa .

Se observa que el espectro de ruido molesto varía de manera similar al espectro total conforme aumentamos la velocidad.

Los niveles de ruido percibidos en el espectro molesto de frecuencias (2000 – 5000 Hz) serán mayores a mayores velocidades, y cobrarán mayor importancia respecto al ruido total emitido por el vehículo conforme se aumente la velocidad.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

En cuanto a la propagación de ruido, se observa cómo los colores correspondientes a los niveles más altos se distribuyen de manera no uniforme en los ensayos en vacío (*figura 123*). Esto se debe a que este rango de frecuencias se ve más afectado por la reflexión y refracción con los distintos elementos presentes en la sala de ensayo de neumáticos. Sin embargo, este efecto pierde importancia con el neumático apoyado.

## 7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Se han realizado numerosos ensayos en distintas condiciones, con el fin de analizar y evaluar el ruido de rodadura producido por distintas fuentes y sobre distintas superficies de contacto.

Uno de los principales objetivos ha sido la comparación del ruido emitido por la Fuente Sonora Artificial (FSA) con el emitido por la rodadura de un neumático real. Dicha comparación se ha llevado a cabo mediante la realización de estudios análogos utilizando la FSA y un neumático real.

Se expone a continuación un listado de las conclusiones a las que se ha llegado a través del estudio los resultados obtenidos en cuanto a la comparación entre el ruido emitido por la fuente sonora artificial y el ruido emitido por el neumático real:

- Analizando el nivel de presión sonora captado por la cámara, se concluye que, variando la potencia de emisión de los altavoces, podemos asemejar el nivel de ruido emitido, al que emite un neumático rodando sobre una superficie a una determinada velocidad.
- En cuanto a la localización de la emisión de ruido, se concluye que con la FSA se obtiene una emisión de ruido muy similar a la producida por la rodadura del neumático real, con la diferencia de que en el neumático real el ruido se localiza prácticamente en su totalidad en la huella de contacto, mientras que con la FSA, tenemos pequeñas fuentes de ruido en cada uno de los altavoces. Sin embargo, con la FSA se consigue una emisión de ruido global muy similar a la producida en el neumático real.
- En cuanto a la propagación de ruido, se aprecia cómo el comportamiento del ruido generado con la FSA y el ruido generado por el neumático real son muy similares,

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

por lo que con la FSA se pueden llegar a realizar ensayos de propagación de ruido sin necesidad de utilizar un neumático real.

Otra comparación que se ha llevado a cabo, es la de la superficie curva del DRUM frente a una superficie plana reflectante a la hora de realizar ensayos de ruido de rodadura. Se exponen a continuación las conclusiones que se han sacado de este estudio:

- Se concluye que, la superficie del DRUM, para hacer ensayos de ruido de rodadura, puede ser válida hasta cierto punto, ya que esta superficie es muy lisa comparada con la del asfalto sobre el que circulan habitualmente los vehículos. El comportamiento, sin embargo, es muy similar al de la superficie plana reflectante que se ha utilizado en los ensayos.
- Además, existe una importante influencia de la forma de esta superficie sobre la localización de la emisión además del efecto de los elementos de la sala de ensayo de neumáticos sobre la forma de propagación de estos ruidos.

En cuanto a los ensayos realizados para ciertos espectros de frecuencia, se concluye que:

- Los resultados analizados por frecuencias indican que las ondas de mayor longitud que producen los sonidos graves, son influenciados en menos medida por los efectos de reflexión y refracción con los distintos obstáculos con los que se puedan topar.

Entre los distintos trabajos que se pueden realizar en un futuro, siguiendo con esta línea de investigación, cabe proponer los siguientes:

- Estudio de los niveles de ruido emitidos por la fuente sonora artificial utilizando los métodos CPX, A-CPX y A-Drum, montando la fuente artificial sobre una superficie plana y sobre el banco de ensayo de neumáticos, al igual que se hace en el presente trabajo con la cámara acústica.
- Cancelación de ruido mediante la emisión de señales de ruido opuestas a las generadas en la rodadura. Es realmente interesante esta nueva tecnología, la cual ya se ha aplicado en auriculares canceladores. Quizá sea posible crear una FSA

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

inversa, colocada sobre elementos del chasis y carrocería del vehículo, que cancele en parte el ruido emitido por la rodadura [21].

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Iberdrola.com. *La contaminación acústica, ¿cómo reducir el impacto de una amenaza invisible?*. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad>.
- [2] radioslibres.net. *¿Qué son los graves, medios y agudos?*. Disponible en: <https://radioslibres.net/4-que-son-los-graves-medios-y-agudos/>
- [3] Ulf Sandberg. (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*.
- [4] researchgate.net. *Fig 2. Prashant Borkar*. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/a-Tyre-hitting-the-ground-b-Vibration-of-the-air-through-the-tread-pattern-c\\_fig2\\_261360583](https://www.researchgate.net/figure/a-Tyre-hitting-the-ground-b-Vibration-of-the-air-through-the-tread-pattern-c_fig2_261360583)
- [5] gigantes.com. *Las 10 mejores zapatillas de la temporada*, José Ajero. Disponible en: <https://www.gigantes.com/nba/fan-zone/mejores-zapatillas-de-201920/>
- [6] ISO 10844. (2021) *Specification of test tracks for measuring sound emitted by road vehicles and their tyres*
- [7] ISO 362. (2015). *Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles Engineering method Part 1: M and N categories*.
- [8] ISO 11819-1. (2023). Statistical pass-by method. En: *Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise*.
- [9] ISO 11819-2. (2017). The close-proximity method. En: *Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise*.

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

- [10] ISO 20908. (2023). *Tyre sound emission test - Methods of drum*.
- [11] ISO 3744. (2010). *Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane*.
- [12] Nuria Campillo Davó. (2019). *Compilation of some novel approaches for Rolling noise evaluation in vehicles*. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández, Departamento de Acústica, Elche.
- [13] SILVIA PROJECT. *Development of Procedures for Certifying Noise Testing Equipment*.
- [14] B. Peeters and A. Kuijpers. (2008). *M+P- The effect of porous road surfaces on radiation and propagation of tyre noise*.
- [15] Adrián Rubio Rodríguez. (2013). *Diseño y construcción de fuente sonora artificial para el estudio del ruido de rodadura*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Miguel Hernández, Departamento de Acústica, Elche.
- [16] Jorge Martínez Rocamora. (2020). *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 de Fin de Grado. Universidad Miguel Hernández, Departamento de Acústica, Elche.
- [17] docplayer.es. *Acoustic Camera. Localización de ruido & Mantenimiento. The Acoustic Camera gfai tech GmbH*. Pablo Alloza. Disponible en:  
<https://docplayer.es/133184665-Acoustic-camera-localizacion-de-ruido-mantenimiento-the-acoustic-camera-gfai-tech-gmbh-pablo-alloza.html>

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA CURVATURA DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO  
SOBRE EL RUIDO DE RODADURA DE NEUMÁTICOS EMPLEANDO UNA CÁMARA  
ACÚSTICA

[18] Elicio Manuel Mora Saura. (2023). *Análisis sonoro de la circulación de un vehículo eléctrico sobre resaltos mediante cámara acústica*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad Miguel Hernández, Departamento de Acústica, Elche.

[19] UMH. *Acoustical Engineering – “1. Fundamentals”*

[20] infobae.com. *Estudio: cuál es el sonido más molesto*. Disponible en:

<https://www.infobae.com/2012/10/17/1059827-estudio-cual-es-el-sonido-mas-molesto/>

[21] sony-latin.com. *¿Qué es la Cancelación de ruido y qué me ofrece?*. Disponible en:

<https://www.sony-latin.com/es/electronics/support/articles/00203389>

