

Metodología para la detección de ruidos dentro de la cabina de un automóvil, caso de estudio en automóviles de gama alta

Daniel Zacarias Rodríguez Martínez¹, Jose Alejandro Garcia Arredondo²
 POSGRADO CIATEQ A.C.¹, CIATEQ A.C unidad Aguascalientes²

Resumen - Conducir un automóvil en el cual se puede percibir ruido resulta cansado y desagradable, además puede ocasionar daño en la salud humana a lo largo del tiempo. Todos los automóviles requieren tener excelentes características de aislamiento acústico. Cuando se habla de automóviles de gama alta estas características acústicas deben tener mayores controles de calidad. Para lograr lo anterior cada industria automotriz establece una serie de pruebas para asegurar dichas características. El presente trabajo muestra un estudio que propone una metodología experimental para la identificación de las fuentes de ruidos, basado en la correlación de la medición sonora del ruido con la magnitud de las componentes de las diferentes frecuencias de ruido en el interior de la cabina de automóviles de gama alta. Se plantea la problemática de la incomodidad de los pasajeros reportada en un estudio interno de una marca de vehículos de gama alta. Se realiza una revisión de los métodos que abordan el análisis de NVH (Noise, Vibrating and Harshness, por sus siglas en inglés) desde un punto de vista experimental. La metodología propuesta contempla: 1) Identificar las características de frecuencia e intensidad acústica relacionadas con algunos sistemas de los vehículos, 2) Realizar mediciones experimentales de ruido dentro de cabina con un equipo especializado y 3) Establecer recomendaciones para identificar los problemas de ruido en vehículos de gama alta a través de la correlación de las mediciones acústicas y la fuente del ruido. Se realizaron mediciones sonoras dentro de la cabina con ruidos predefinidos y se lograron identificar los parámetros acústicos de los ruidos en cuestión.

Índice de Términos - Cabina de automóvil, Confort vibro-acústico, Medición sonora, Metodología experimental, NVH, Ruido.

Abstract - Driving a car where noise can be perceived is tiring and unpleasant, and it can also cause harm to human health over time. All cars must have excellent acoustic characteristics. When it comes to high-end vehicles, these acoustic characteristics must meet higher quality standards. To achieve this, each automotive industry establishes a series of tests to ensure these features. This work presents a study that proposes an experimental methodology for identifying noise sources, based on the correlation of noise sound measurements with the magnitude of the components of different noise frequencies inside the cabin of high-end vehicles. The issue of passenger discomfort, reported in an internal study of a high-end vehicle brand, is addressed. A review of the methods that approach NVH (Noise,

Vibration, and Harshness) analysis from an experimental perspective is conducted. The proposed methodology includes: 1) Identifying the frequency and acoustic intensity characteristics related to some vehicle systems, 2) Conducting experimental noise measurements inside the cabin with specialized equipment, and 3) Providing recommendations to identify noise issues in high-end vehicles through the correlation of acoustic measurements and noise sources. Sound measurements were taken inside the cabin with predefined noises, and the acoustic parameters of the noises in question were successfully identified.

Keywords - Car cabin, Experimental methodology, NVH, Noise, Sound measurement, Vibro-acoustical comfort.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el potencial de la industria automotriz mexicana es muy importante, lo que le representa estar entre los primeros lugares del sector económico más importante del país, además de ser la base de la modernización y estrategias de globalización de este [30].

Se debe tener en cuenta que para que los clientes tengan una opinión positiva sobre un producto o servicio automotriz, la empresa debe satisfacer ampliamente sus necesidades y expectativas, ya que la satisfacción del cliente influye significativamente en sus intenciones de compra [4].

En México se establecen diferentes marcas de automóviles las cuales deben tener una calidad alta de ensamblaje para seguir siendo competitivas en el mercado. Muchas de esas marcas ensamblan vehículos de gama alta donde esa calidad debe de ser aún mayor, ya que los clientes potenciales lo que buscan principalmente es la comodidad.

Uno de los grandes problemas con la comodidad en la industria automotriz es el estudio acústico o de ruido dentro de la cabina del automóvil. Del mismo modo una de las principales características que atraen al cliente a comprar un vehículo son los aspectos del confort acústico y de vibración del vehículo dentro de la cabina [15].

Existen 3 conceptos importantes que se toman en cuenta para el estudio acústico: ruido, vibración y aspereza. El ruido es una sensación o percepción que se tiene, cuando una onda sonora

¹Daniel Zacarias Rodríguez Martínez, Ingeniero en Robótica. Universidad Autónoma de Aguascalientes./ POSGRADO CIATEQ A.C.

izan.daniel.rdz@gmail.com

²M.C. Jose Alejandro García Arredondo, Docente del departamento Electrónica y control. CIATEQ A.C. Unidad Aguascalientes
algarcia@ciateq.com

de suficiente magnitud y de frecuencia de onda adecuada, llega al oído [27]. La vibración es causada por el movimiento periódico de ida y vuelta de las partículas en un medio, cuando se desplazan de su posición de equilibrio que causa ruido y

La referencia [2] menciona que el rendimiento del conductor será afectado tanto con el ruido y las vibraciones expuestas al interior de la cabina de tal manera que distraerán su visión, lo que en conjunto será estresante para el conductor y los pasajeros. La percepción del ruido y la calidad acústica dentro del vehículo son aspectos críticos que pueden influir en la decisión de compra del consumidor y, por ende, en la satisfacción general con el producto.

Los 3 conceptos anteriores (ruido, vibración y aspereza) conforman una línea de estudio denominada NVH la cual es la evaluación del confort automotriz. Por parte de los clientes, la calidad del sonido dentro de la cabina del vehículo se está volviendo cada vez más importante.

Por lo tanto, los fabricantes de automóviles están continuamente investigando y desarrollando nuevas tecnologías y materiales para reducir el ruido interior y mejorar el aislamiento acústico.

Para las pruebas de rendimiento NVH, el ruido y la vibración son los dos indicadores más importantes [24].

Una de las maneras de ejecutar las pruebas acústicas, consiste en campos de prueba de vehículos para replicar perfiles extremos de uso por parte del cliente a lo largo de la vida del vehículo por diseño (conocidos como datos del ciclo de servicio), pruebas de simulación en tiempo real en sistemas utilizando simuladores de prueba en carretera y mesas de simulación multi-axiales, o pruebas de vida sencillas para componentes, como pruebas de carga de amplitud constante [33]. Al interior de la cabina del automóvil se colocan varios instrumentos, como: medidores de vibración (acelerómetros) y micrófonos ya sea en el volante, tablero, a la altura de la caja de transmisión o sobre la cabecera de los asientos. Esto se conecta a un sistema de adquisición de datos para poder medir las variables sonoras al interior de la cabina. Después se hace un análisis de señales acústicas de los sensores y se determina de donde surge mayor contribución de ruido para saber que se debe optimizar [17].

Es importante mencionar que existen diferentes métodos para el análisis acústico al interior de cabina de automóviles durante la etapa del diseño del vehículo, pero no existe un método para realizar inspecciones acústicas dentro de la cabina del vehículo una vez que se llega al final de la línea de ensamble.

La planta automotriz donde se realizó la presente investigación no contaba con una metodología que le permitiera documentar y estandarizar el proceso de medición acústica y mucho menos contaba con una base de datos. Por lo anterior, este trabajo propone una metodología experimental para la identificación de las fuentes de ruidos, basado en la correlación de la medición sonora del ruido con la magnitud de las componentes de las

perturbaciones [27]. La aspereza está relacionada con la calidad y la naturaleza transitoria de la vibración y el ruido, también está fuertemente vinculada a la sofisticación del vehículo [3].

diferentes frecuencias de ruido en el interior de la cabina de automóviles de gama alta.

En la búsqueda de literatura realizada se observó que no está reportado algún método experimental que se utilice en la industria automotriz al final de las líneas de ensamble para el estudio de NVH al interior del vehículo como el que se menciona en este trabajo.

Las principales contribuciones de este trabajo se resumen en:

1.- La obtención de la información de la literatura con respecto a la frecuencia y magnitud de los ruidos que se pueden percibir en el interior del automóvil.

2.- La medición de ruido en el interior de un vehículo de alta gama con un equipo especializado.

3.- Recomendaciones sobre la fuente del ruido en vehículos de gama alta.

El resto de las secciones de este trabajo presentan el marco teórico relacionado al ruido generado en cada sistema del vehículo, la metodología utilizada, los resultados de las mediciones y las conclusiones obtenidas, así como la discusión planteada para trabajos futuros.

II. MARCO TEÓRICO

Acústica Integral para NVH. La aspereza, la vibración y el ruido siempre han sido un desafío significativo en relación con la confiabilidad, la calidad y la comodidad de los vehículos para los usuarios y defensores del medio [3], estos 3 aspectos son un desafío complejo dada la presencia de múltiples fuentes de vibración, ruidos interconectados y dependientes de la velocidad.

En la referencia [9] se define que las ondas sonoras se generan, debido a perturbaciones que ocurren en un medio material, estas perturbaciones causan que las partículas que componen el medio vibren y con la vibración de las partículas es cómo se propaga el sonido (es por esta razón que el sonido no puede viajar a través del vacío) y que para la transmisión del sonido implica un movimiento periódico de moléculas en los 3 estados de la materia.

En la referencia [10] se menciona que los sonidos son mezclas complejas de variaciones de presión que varían en términos de fase, amplitud y frecuencia teniendo en cuenta que el oído humano puede percibir en el rango de 20 Hertz a 20,000 Hertz. En la referencia [3] se indica que, en el contexto automotriz, el medio da lugar al término "sonido transmitido por la estructura" donde, la presión del aire se superpone a la presión ambiente.

En la referencia [27] se expone que el aire dentro de la cabina de un vehículo se comporta como un fluido elástico, exhibiendo diversas frecuencias naturales de modos de onda. La complejidad de la forma de la cabina, con superficies

¹Daniel Zacarias Rodriguez Martinez, Ingeniero en Robótica. Universidad Autónoma de Aguascalientes./ POSGRADO CIATEQ A.C.

izan.daniel.rdz@gmail.com

²M.C. Jose Alejandro García Arredondo, Docente del departamento Electrónica y control. CIATEQ A.C. Unidad Aguascalientes

algarcia@ciateq.com

absorbentes y vibrantes, dificulta el cálculo preciso de estas frecuencias y modos. Superficies duras, compactas y lisas tienden a reflejar la mayor parte de la energía acústica, mientras que superficies porosas y suaves la absorben en su mayoría. El diseño cuidadoso del vehículo es muy importante, pero en lo que respecta al control del ruido estructural y sonoro también lo es [12],[15],[22].

En la referencia [10] se define 4 características clave del sonido: amplitud, longitud de onda, frecuencia y periodo. La amplitud corresponde a los cambios de presión. La longitud de onda determina la distancia recorrida por la onda de presión durante un ciclo. La frecuencia refiere al número de ciclos de variación de presión por unidad de tiempo. El período corresponde al tiempo necesario para que un ciclo de una onda pase por un punto fijo.

En la referencia [3] se define que las técnicas de control de ruido se basan en los siguientes principios: (1) Controlar el ruido en la fuente: esto implica comprender profundamente el proceso de generación de ruido. (2) Modificar el entorno acústico: esto se refiere al sonido en recintos cerrados y que el entorno no refleje el sonido múltiples veces. (3) Utilizar barreras y recintos de sonido: el objetivo es limitar la transmisión de sonido aéreo. (4) Utilizar tratamientos de amortiguamiento de vibraciones: el objetivo es atenuar la amplitud de la superficie vibrante y reducir el nivel de ruido generado [7], [12], [18], [21], [26], [29], [31], [35].

Ruido Automotriz, fuentes y control. En un vehículo, hay dos tipos de vías o fuentes de transmisión [31]: (1) La estructural (vibraciones): Las ondas de sonido generadas por fuentes de ruido externas estimulan la vibración de los paneles del vehículo, con esto emiten el ruido hacia el interior del vehículo. (2) La aérea (ondas): El ruido se transmite directamente al vehículo a través de orificios y juntas en la carrocería, como manijas y diferentes instrumentos en el interior del compartimento de pasajeros (estas brechas y uniones en la carrocería son prácticamente inevitables).

En la referencia [23] se menciona que, el ruido se transmite principalmente por fuentes de transmisión estructural a bajas frecuencias (<200 Hertz) y por fuentes de transmisión aérea a frecuencias más altas (>500 Hertz).

En la referencia [31] se menciona que las fuentes de vibración como se observa en la Fig. 1, se originan principalmente en la vibración generada por el tren motriz y la excitación del suelo. En la Fig. 1 se distingue la zona del conductor como la principal zona de percepción del ruido, ya que ahí se encuentra el mayor confort del vehículo. Estas vibraciones inician a través del chasis del vehículo, y finalizan en la emisión de ruido hacia el interior del vehículo. Es importante destacar que, aunque la vibración y las ondas de sonido están relacionadas y son difíciles de distinguir, sus rutas de propagación, características de frecuencia y métodos de reducción de ruido son diferentes.

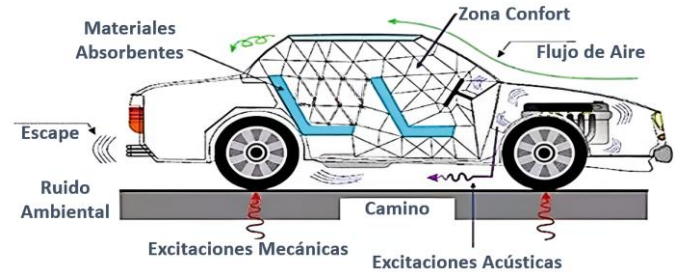


Fig. 1. Mecanismo del ruido interior del vehículo [31].

Ruido del motor de combustión interna. En la referencia [3] se define que el ruido del motor de combustión interna se origina en el proceso de combustión, en las fuerzas mecánicas del motor y en la estructura del vehículo.

El ruido del motor se compone principalmente de tres tipos de ruido: mecánico, de combustión y aerodinámico. Para reducir la radiación de ruido en los motores, recomiendan el uso de sellos, pernos y pantallas de ruido.

Ruido de la transmisión de engranajes. En la referencia [32] se indica que la vibración torsional del motor, transmitida desde el sistema del embrague a la transmisión, constituye la principal fuente de ruido que llega a la cabina del vehículo a través de la carcasa, conocido como ruido de la transmisión.

Ruido de admisión y escape. El ruido de admisión (frecuencias típicas de 2 Kilo Hertz a 4 Kilo Hertz) se origina por la interrupción periódica del flujo del filtro de aire a través de las válvulas de admisión en un motor de combustión interna. Para prevenir la propagación del sonido a través de la estructura del vehículo, los sistemas de escape deben suspenderse del fondo mediante elementos de suspensión flexibles para mitigar el riesgo de resonancias no deseadas en la carrocería [3].

Ruido de los Bordes del vehículo. El ruido de los bordes en vehículos surge cuando el flujo se separa de las esquinas y bordes afilados de la estructura del cuerpo y está relacionado con la velocidad del vehículo. La reducción de este ruido implica un rediseño en la forma del vehículo, en los pilares que soportan el parabrisas, ajustar espejos retrovisores, embellecedores de ruedas, mantener una superficie suave y garantizar un sellado efectivo alrededor de las [3].

Ruido de los flujos de aire internos. La principal fuente de ruido en vehículos es el viento, esto debido a la alta velocidad, ya que la interacción del automóvil con el flujo de aire genera turbulencia y ruido turbulento en todo el vehículo [3].

Ruido de los neumáticos. El ruido de los neumáticos y de la carretera, consta de dos partes [31]: (1) el ruido causado por la vibración de diferentes partes del neumático. (2) el ruido causado por la interacción entre el neumático y la superficie de la carretera. Según el mecanismo de generación, se divide principalmente en tres categorías: (1) ruido de vibración del neumático, (2) ruido de la bomba de aire, (3) ruido aerodinámico.

En la referencia [23] se menciona que los neumáticos tienen un doble papel en la generación y transmisión del ruido en la carretera. Los diseñadores de neumáticos se centran en reducir

el ruido en la fuente, mientras que los ingenieros de chasis se preocupan por reducir la transmisión de ruido al interior del vehículo desde el área de contacto del neumático [12], [13], [22].

En la referencia [3] se explica que el ruido de la banda de rodadura surge cuando bloques pequeños se despegan y regresan a su posición original en los bordes de la huella del neumático. Un patrón uniforme de bloques produce un ruido tonal, pero los diseñadores han desarrollado secuencias de paso de bloques para dispersar la energía acústica en un amplio rango de frecuencias y reducir este efecto. Se utilizan software y modelos de neumáticos para analizar los impulsos a lo largo del ancho del neumático durante el diseño. Además, la superficie de la carretera también influye en la generación de ruido, siendo las carreteras de concreto generalmente más ruidosas que las de asfalto debido a sus características de superficie diferentes.

Ruido de frenos. En la referencia [17] se indica que, a pesar de casi 80 años de investigación y avances significativos, los mecanismos subyacentes que generan el ruido de frenos aún no se comprenden completamente debido a su complejidad.

Las vibraciones y ruidos no deseados en los frenos de los automóviles pueden causar molestias a los pasajeros y afectar la percepción de la calidad del vehículo [3], también se menciona que existen dos mecanismos referentes en los frenos que causan ruido, vibración y aspereza: (1) La frecuencia resonante constante independiente de la velocidad del rotor (ruido de frenos), (2) Una vibración mecánica de la velocidad del rotor.

El ruido de frenos es un problema de calidad y, si el problema se vuelve lo suficientemente grave como para dañar la reputación del fabricante de vehículos, toda la cadena de suministro se involucra en buscar una solución. Estas soluciones son los métodos computacionales incluyen el Análisis de Elementos Finitos (*FEA*, por sus siglas en inglés) [1], [14], [15], [18], [21], [24], [34] y el Análisis de Valores Propios Complejos [3].

Evaluación del ruido automotriz. En la referencia [3] se destaca que los fabricantes enfrentan regulaciones cada vez más estrictas; por ejemplo, de 1976 a 1996, los requisitos de ruido en la Comunidad Económica Europea disminuyeron significativamente. Las normativas actuales, definidas por la directiva 92/97/CEE, establecen límites de ruido en movimiento para vehículos nuevos, cuyo procedimiento de prueba se encuentra en la norma ISO 362-1:2007.

Ruido interior en vehículos. En la referencia [3] se establece que el ruido interior en los vehículos es generado por fuentes periódicas que producen componentes fundamentales y armónicos de diferente orden. El orden varía con la velocidad del motor, la velocidad del vehículo y su intensidad depende de la potencia generada. Estos componentes de excitación causan vibraciones periódicas en la estructura del vehículo, lo que puede llevar a resonancias cuando coinciden con las frecuencias naturales de la estructura. También puede haber ruido interior causado por filtraciones de ruido en el aire a través de aberturas en la pared cortafuegos y sellos de las puertas. Existen

procedimientos para medir el ruido interior de los vehículos, como el especificado en BS 6086 [13].

Técnicas y métodos experimentales. Para reducir el tiempo de desarrollo de los vehículos, se han desarrollado métodos para predecir los niveles de ruido interior durante la etapa de diseño y el análisis de trayectoria de transferencia (*TPA*, por sus siglas en inglés) [15], [16], [22], [26]. En la referencia [2] se indica que el TPA es una de las técnicas utilizadas para investigar el efecto de la estructura del vehículo y los aisladores de vibración en el ruido transmitido a la cabina. En el TPA, las características de la trayectoria se determinan en términos de las funciones de respuesta en frecuencia mecánico-acústicas. El TPA se puede realizar experimentalmente de dos formas diferentes: (1) Utilizar un agitador para excitar el chasis en cada posición de los soportes, en las direcciones x, y, z, a lo largo de un rango de frecuencias discretas, y medir la presión sonora en el compartimento de pasajeros utilizando un micrófono. (2) Utilizar un altavoz que produce vibración en los soportes del motor. Esto se mide mediante un conjunto de acelerómetros montados en el lado del cuerpo de los soportes del motor [3]. Para determinar el nivel de ruido producido a través de todas las trayectorias de transmisión, es necesario conocer la rigidez compleja de cada soporte en las direcciones x, y, z. Los cambios en la rigidez de los soportes y/o en las estructuras del chasis pueden investigarse utilizando el TPA para controlar el nivel de ruido en varias ubicaciones dentro del espacio de la cabina [3]. En la referencia [23] se menciona que, las técnicas de mapeo de ruido, holografía acústica y formación de haces, TPA, análisis modal y seguimiento de orden se consideran las técnicas experimentales más relevantes para analizar e identificar fuentes de NVH en un vehículo. Algunas de estas técnicas emplean instrumentación que requiere habitaciones específicamente construidas, como cámaras anecoicas o que el entorno refleje el sonido múltiples veces. El análisis de seguimiento de orden puede proporcionar información útil sobre vibraciones y señales acústicas generadas en los componentes del tren motriz del vehículo, relacionadas con la velocidad de rotación del motor y, en particular, con la frecuencia de encendido del motor. En la referencia [23] también menciona que los principales métodos experimentales para el análisis de la dinámica estructural son: (1) Análisis Modal Experimental (EMA), su objetivo es la construcción de un modelo matemático de las características dinámicas del objeto en investigación mediante la medición de la función de respuesta en frecuencia entre una fuerza y sensores de respuesta, (2) Análisis Modal Operacional (OMA), que utiliza solo mediciones de respuesta de la estructura en condiciones operativas para identificar características modales y (3) Formas de Deflexión Operacional (ODS), que permite determinar la deflexión forzada del mundo real durante la operación. En relación con el confort acústico en la referencia [23] se menciona que la reducción de ruido interior es muy importante para los ocupantes, pero por sí solo no es suficiente. En relación con la calidad del ruido menciona que se han realizado estudios y análisis para definir los criterios de un sonido que no sólo sea

silencioso, sino también agradable. Panza también habla sobre algunas de las métricas de calidad de sonido y psico-acústica y menciona que las más utilizadas para la percepción del usuario en un vehículo son: (1) Índice de Articulación (IA), medida de la inteligibilidad de las señales de voz, expresada como un porcentaje de unidades de habla que son comprendidas por el oyente cuando se escuchan fuera de contexto, (2) *Loudness*, intensidad percibida del sonido. Se basa en la respuesta estadística del oído como función de la frecuencia para un número estadísticamente significativo de personas y (3) *Sharpness*, cuenta el contenido de frecuencia del ruido y se define como la relación entre el nivel de ruido de alta frecuencia y el nivel general; no está relacionada con la intensidad del sonido, pero es alta para componentes de ruido metálicos que generalmente se consideran molestos.

Percepción de incomodidad de conductores. La empresa donde se realizó la presente investigación realizó una encuesta a 314 personas entre 30 y 75 años las cuales son propietarias de una camioneta de gama alta, automática, 5 puertas, SUV de gasolina, 4 cilindros con motor 2.0L turbo para monitorear la satisfacción del cliente. Se indicó a los usuarios que anotaran los problemas de cualquier tipo que observaran al conducir, los comentarios más importantes se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Comentarios de los problemas encontrados por clientes.

No.	Comentarios de clientes
1	"GLB: Los ruidos interiores son excesivos y necesitan mejorar."
2	"GLB: El ruido en las llantas es tan grande mientras manejas en caminos dispares."
3	"GLB: Cuando las ventanas están cerradas, existe un gran ruido de viento al igual que en"
4	"GLB: El ruido de viento al igual que en las llantas es alto. Es más evidente en los asientos delanteros."
5	"GLB: Este es mi segundo modelo de Mercedes. Pienso que el ruido al conducir podría ser más bajo."
6	"GLB: El ruido al conducir es muy alto cuando sobrepasa una velocidad de 80km/h."
7	"GLB: El ruido en las llantas es mayor cuando el vehículo sobrepasa una velocidad de 100km/h."
8	"GLB: No es muy calmado y quieto."
9	"GLB: Cuando estoy sentado dentro del vehículo, escucho un excesivo ruido de viento y de llantas al conducir, así como ruido en el motor. Las características de este modelo están degradadas y no está equipada con algodón de aislamiento acústico y el sistema de sonido no es muy bueno."



Fig. 2. Datos obtenidos de la encuesta de satisfacción.

En la Fig. 2 se muestra un resumen de los problemas más comunes que los usuarios detectan en este tipo de automóviles, como se puede observar el tema de NVH cuenta con una cifra importante que se debe considerar para el estudio de vehículos de gama alta. De la misma manera los comentarios de los conductores como se muestran en la Tabla I corresponden específicamente al ruido interior en la cabina, donde se aprecia el disgusto de los clientes ante su experiencia al conducir automóviles de gama alta teniendo este tipo de problemas. Esta información tiene un impacto en la planta de producción del

vehículo, ya que son reclamos directamente de clientes que deben ser resueltos a la brevedad para que no vuelvan a reincidir.

El NVH en la industria automotriz es crucial para mejorar la calidad percibida del vehículo y la experiencia del usuario. La reducción del ruido y la vibración contribuye significativamente al confort y la satisfacción del conductor y los pasajeros. Destaca la importancia de técnicas experimentales avanzadas que permiten un análisis detallado de las fuentes de ruido y vibración. La evolución en los métodos de medición y la búsqueda continua de soluciones que no solo reduzcan el ruido y la vibración, sino que también mejoren la calidad percibida del sonido en los vehículos. Las soluciones para mejorar el rendimiento NVH incluyen el uso de materiales adecuados para garantizar una buena aislación acústica y absorción en la cabina del vehículo, así como el empleo de técnicas de amortiguamiento estructural.

Ruidos reportados en la literatura. Se realizó una revisión de la literatura, donde se encontró una relación entre los ruidos captados en el interior del automóvil, con su frecuencia y magnitud, como se observa en la Tabla II.

Tabla II. Relación acústica tipo de ruido vs frecuencia.

Cita	Tipo de Ruido	Magnitud(dB)	Frecuencia(Khz)	0Khz-5Khz	6Khz-10Khz	11Khz-15Khz	16Khz-20Khz
(Barton&Fielhouse,2018)	Frenos		1 a 20	•			•
(Barton&Fielhouse,2018)	Transmisión	6 a 8	0.2 a 1	••			
(Barton&Fielhouse,2018)	Escape	10 a 15	2 a 4	••••			
(Liu et al.,2021)	Aceleración	0.340 a 0.56		••			
(Kook et al.,2011)	Camino	0.5		•			
(Garcia et al.,2016)	Motor	13 a 23	0.02 a 0.2	•			
(Sanza,2012)	Viento	0.64		•			
(M.D Redel-Macias et al.,2010)	Ruedas	0.8 a 1.3		••			
(Masgrau et al.,2010)	Int. Vehiculos	0 a 27	0.2 a 8	•••••	•		
(Masgrau et al.,2010)	Vehiculos estacionados	0 a 21	0.2 a 8	••	••		

En la Tabla II se puede observar que para el ruido del camino y el ruido del viento existe una frecuencia específica [15], [25], mientras que para los demás tipos de ruido tiene un rango de frecuencia específica. Particularmente el ruido de frenos tiene un rango de frecuencia muy amplio ya que en la literatura se deben a la combinación de la velocidad y vibraciones mecánicas [3]. El rango de frecuencia más bajo que en este caso es del motor [8] se debe a que el motor de alguna manera está aislado por diferentes materiales que no dejan pasar el sonido al interior de la cabina. Se debe de tomar en cuenta que estas frecuencias son al interior del automóvil.

La Tabla II se toma como referencia para la identificación de las principales fuentes de ruido dentro de la cabina del automóvil, con esto se puede hacer un análisis más rápido de algún problema presentado sin necesidad de duplicar la búsqueda de la fuente del ruido ya que solo bastaría con los datos de la medición sonora y localizar en que frecuencia se encuentra para localizar el tipo de ruido.

Equipo de medición. Se realizó un estudio de mercado con diferentes equipos de medición de ruido como se observa en la Tabla III, que pueden utilizarse para medir el ruido en el interior de la cabina. El SQuadriga II de la marca *HEAD Acoustics* como se muestra en la Fig. 3, cubre un mayor rango de sensores que se pueden conectar, es un sistema de grabación y

reproducción de 24 bits (Resolución suficiente para el archivo de audio), cuenta con una mejor portabilidad, es posible el registro de datos durante la conducción del vehículo, la conexión de los micrófonos es muy sencilla y el sistema es muy intuitivo con el usuario. Los datos pueden ser analizados utilizando algoritmos de magnitud, tiempo y frecuencia, con el fin de identificar los parámetros acústicos de un ruido en particular.

Tabla II. Estudio de mercado para equipos de medición.

MARCA	EQUIPO	NUM. DE CANALES	SEÑALES Y COMUNICACIONES	TIPO DE SENSORES	RESOLUCIÓN	CAPACIDAD DE MEMORIA
HEADACOUSTICS (https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/user_upload/Data-Sheets/Archive/Squadriga_II-3320-Data-Sheet.pdf)	SQUADRIGA II	10	CAN, OBD-2, FlexRay, HMS, HSU, BHM, Analog Out, BEQ, IIPEQ, V, BHS via BNC, GPS, RC	Accelerometer, Impact Hammer, Triaxial Sensors, Headset, Pulse Sensors, HMS, RC, Condenser Microphones, Strain Gauges, High-Impedance Voltage Sources, GPS, ICP	24 bits	SD card
HEADACOUSTICS (https://cdn.head-acoustics.com/fileadmin/user_upload/Data-Sheets/Archive/Squadriga-III-3324-Data-Sheet.pdf)	SQUADRIGA III	13	Line-ICP-In, BHS, Pulse In, CAN, FlexRay	Binaural Sensors, Other Squadriga III, HMS, Headphones, GPS, Headset, Video Camera, SLM, ICP, CLB, RC, BSU, Computer, Network	24 bit	64 GB internal
MORSONIC (https://web2.morsonic.com/product_single/sound-level-meter-nor145/)	Sound Level Meter Nor145	1	IP camera and weather station connectivity	Microphones, Preamplifier	-	Internal memory: 350 MB Micro SD
IPETRONIK (https://www.ipetronik.com/en/products-services/modules/imx-sens2-4-2.html)	Mx-SENS2 4	4	CAN	Shunt, Gauge, Pressure, Piston, Flowmeter, Accelerometer, Triaxial Accelerometer, Torque Meter, Strain Gauge, Temperature Sensor	-	-
BKSV, HBK (https://www.bksv.com/calibration/instruments/handheld/sound-level-meters/2270-series/type-2270-s/)	MODELO 2270-S	2	LEMO triaxial	Microphones, Accelerometers	24 o 16 bits	SD card & DHC card
DEWESOFT (https://dewesoft.com/es/products/minis/)	SIRIUS® Mini	4	-	Microphones, Accelerometers, Hammer Impact	24 bits	-
SAAB (https://www.techsim.cz/content/files/ano-vis-product-sheet.pdf)	ANOVIS	8	-	Microphones, Accelerometers	12 bit	-
MOTYCS (https://motycs.it/es)	-	64	-	Microphones, Accelerometers, Acoustic Sources, Vibrators and Shakers, Kundt tube, Signal Conditioners, Integrated CMS / HMS System	12, 16, 18 or 24-bit	-

III. METODOLOGÍA

Identificación de los problemas por tipo de ruido. Las técnicas utilizadas como mapeo de ruido, TPA y otros, son utilizados durante el diseño del vehículo y la preproducción para disminuir el ruido que puede escucharse al interior del vehículo. Ya que durante la etapa de diseño del vehículo se contemplan todos los elementos para que no exista ruido al interior de la cabina, los ruidos que se presentan generalmente durante la fase final de producción del vehículo son generados por malos ensambles, componentes fuera de tolerancias, partes defectuosas, entre otros. Esto hace que se generen ruidos que por diseño no deberían estar presentes.

Por lo anterior se propone un método experimental para la identificación de las fuentes de ruidos, basado en la correlación de la fuente del ruido con la magnitud de los componentes de las diferentes frecuencias de ruido, [3], [17], [15], [8], [25], [20], [19] para diferentes sistemas del vehículo como se observa en la Tabla II.

Selección de vehículos para mediciones. Para el estudio actual se solicitaron 2 unidades al área de pruebas en diferentes fechas, con las cuales se realizaron mediciones sonoras dentro de la

cabina. Estas 2 unidades no cuentan con algún problema de ruido dentro de la cabina, por lo cual se generaron ruidos específicos para las mediciones al interior de la cabina.

Antes de iniciar con el estudio acústico es de suma importancia la preparación del vehículo seleccionado, esto implica la instalación y configuración de equipo. Después, se inicia con las mediciones sonoras, la obtención de la información de la medición para su análisis y por último relacionar los parámetros acústicos con el tipo de ruido presente al interior de la cabina.

Equipo de medición. Después del estudio de mercado con diferentes equipos de medición de ruido, el SQuadriga II de la marca *HEAD Acoustics* (Fig. 3), es un equipo adecuado y es con el que se cuenta en el laboratorio ya que cubre un mayor rango de sensores que se pueden conectar y es congruente con el uso de otras plantas automotrices, además de ser liviano para su y el sistema es muy intuitivo con el usuario.



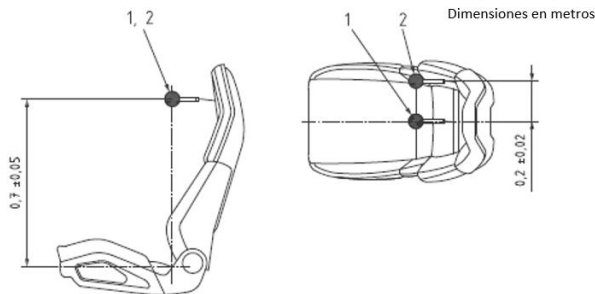
Fig. 3. SQuadriga II de la marca HeadAcoustic [11].

Configuración y posición de sensores. Para este caso de estudio se utilizaron 3 sensores (micrófonos) instalados en la cabecera del asiento del conductor, cabecera del asiento del copiloto y cabecera del asiento trasero como se muestra en la Fig. 4 y en base a la norma ISO 5128 [14] (Fig. 5), los cuales deberán sujetarse utilizando algún material que absorba las vibraciones y evite mediciones erróneas. Se deberá documentar la misma posición de los micrófonos colocados al interior de la cabina del vehículo para estudios futuros de la misma naturaleza.





Fig. 4. (a) Posición de micrófono en la cabecera del asiento del conductor, Fig. 4. (b) Posición de micrófono en la cabecera del asiento del copiloto y Fig. 4. (c) Posición de micrófono en la cabecera de los asientos traseros.



1,2 posiciones de sensores

Fig. 5. Posición de sensores de acuerdo con la norma ISO 5128 [14].

Con respecto a la configuración se habilitaron en el equipo de medición 3 canales que fueron configurados para los micrófonos utilizados. En esta configuración se dan de alta los valores correspondientes de calibración por cada micrófono, especialmente la característica de sensibilidad (dada en mV/Pa) como se muestra en la Fig. 6, con el propósito de asegurar que las mediciones sean precisas.

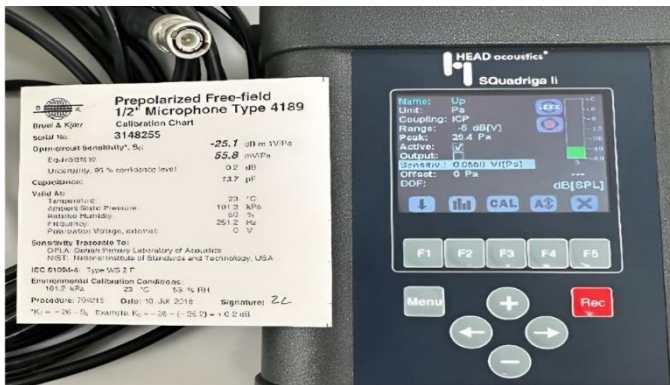


Fig. 6. Configuración de calibración para los micrófonos.

Condiciones planeadas de prueba para mediciones de parámetros acústicos. Se requiere generar ruidos para simular una posible falla, ya que los vehículos que se utilizaron en esta investigación no contaron con algún problema de ruido dentro de la cabina. Los ruidos utilizados de manera artificial se describen a continuación: A) Utilizar un generador de tonos artificiales y con frecuencias definidas durante las mediciones

(Fig. 7), B) Bajar ligeramente la ventana del conductor (Fig. 8), C) Colocar una sección de franela sujeta por el cristal de la ventana del conductor (Fig. 9), D) Encender el A/C a un nivel alto.

El área de prueba para la obtención de resultados es principalmente un camino tipo carretera estatal, con esto se buscó igualar las condiciones donde los usuarios detectan mayormente los ruidos al interior de la cabina al circular a diferentes velocidades en un camino disperejo como se menciona en la Tabla IV.

Simulación de Ruido 1 (Reproductor de Frecuencias).

Se utilizó un generador de tonos on-line (<https://sublime.tools/es/generador-de-tonos/>) en el cual consiste en seleccionar una frecuencia deseada y el tipo de onda, para este ejercicio se utilizaron las frecuencias de 500 Hertz, 2 Kilo Hertz, 5 Kilo Hertz y 10 Kilo Hertz, las cuales están en rangos de bajas y altas frecuencias. Esto con el objetivo de poner a prueba el equipo y determinar cómo es su magnitud dentro de la cabina.

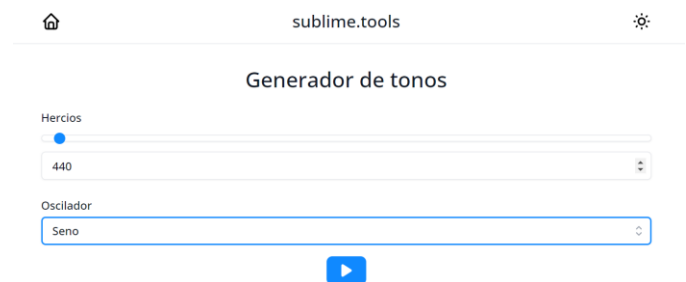


Fig. 7. Generador de tonos on-line (<https://sublime.tools/es/generador-de-tonos/>).

Simulación de Ruido 2 (Ventana del conductor un poco abierta). Para este ejercicio se solicitó una unidad buscando realizar grabaciones de ruidos dentro de la cabina, sin embargo, dicha unidad no contaba con ruidos extraños o problemas del vehículo, para este caso se buscó simular un ruido de viento, esto dejando abierta la ventana del conductor aproximadamente 5 centímetros como se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8. Condición del vehículo para la simulación del Ruido 2.

Simulación de Ruido 3 (Golpeteo de franela en ventana del conductor). De la misma manera como en la simulación del Ruido 2, se simula otro ruido, pero esta vez buscando un ruido de golpeteo, esto atrapando una sección de una franela afuera

en la ventana del conductor como se muestra en la Fig. 9.



Fig. 9. Condición del vehículo para la simulación del Ruido 3.

Ruido de A/C encendido. Corresponde al ruido generado por el aire acondicionado dentro de la cabina del automóvil donde se logró captar en todas las condiciones del vehículo.

Las mediciones acústicas al interior de la cabina consideran las condiciones del automóvil en la Tabla IV y Tabla V.

Se realizaron un total de 54 mediciones dentro de la cabina en 2 vehículos diferentes a lo largo de este estudio, en el primer vehículo fueron tomadas 8 mediciones, estas sin ningún tipo de ruido ajeno/extraño, donde se capta el ruido normal dentro de la cabina, como lo indica la Tabla IV y en el segundo vehículo fueron tomadas 46 mediciones simulando 3 ruidos ajenos al que normalmente se encuentra dentro de la cabina como se muestra en la Tabla V. La información obtenida se analiza con el software *Artemis Suite* y se obtienen las gráficas de frecuencia y presión sonora.

Tabla IV. Detalle de las primeras 8 mediciones sonoras al interior de la cabina sin perturbaciones.

No. De Medición	Estado del Vehículo
1	Prendido y estacionado
2	Estacionado a 2000 rpm
3	Estacionado a 3000 rpm
4	Estacionado a 4000 rpm
5	Conducción a 20 km/h
6	Conducción a 40 km/h
7	Conducción de 60 km/h a 100 km/h
8	Conducción de 100 km/h a 110 km/h

En la Tabla IV se observa las condiciones de las mediciones acústicas que se realizaron para poder captar el sonido ambiente normal dentro de la cabina del automóvil. Los resultados de estas mediciones se pueden tomar como base en la manera de evaluar los vehículos donde cualquier otro comportamiento de magnitud y frecuencia pueden tratarse de un ruido que no debería estar presente dentro de la cabina del automóvil.

Tabla V. Detalle de las 46 mediciones sonoras al interior de la cabina con perturbaciones sintéticas.

Estado del Vehículo	Simulación de Ruido 1. (Reproductor de frecuencias)				Simulación de Ruido 2. (Ventana del conductor abierta)	Simulación de Ruido 3. (Golpeteo de franela en ventana del conductor abierta)	A/C Prendido
	500 Hz	2 KHz	5 KHz	10 KHz			
Prendido y estacionado	✓	✓	✓	✓	N/A	N/A	✓
Estacionado a 2000 rpm	✓	✓	✓	✓	N/A	N/A	✓
Estacionado a 3000 rpm	✓	✓	✓	✓	N/A	N/A	✓
Estacionado a 4000 rpm	✓	✓	✓	✓	N/A	N/A	✓
Conducción a 20 km/h	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓
Conducción a 40 km/h	✓	✓	✓	✓	✓	N/A	✓
Conducción de 60 km/h a 100 km/h	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Conducción de 100 km/h a 110 km/h	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

En la Tabla V se observa las mismas condiciones que en la Tabla IV acerca de las mediciones acústicas, por el contrario, se agregaron nuevas condiciones en las mediciones y con esto poder captar una variación en el ambiente dentro de la cabina del automóvil.

Método experimental. En las secciones previas de este apartado de metodología se mencionan las condiciones para la toma de mediciones y en esta sección se propone un método experimental para documentar mediciones futuras asociadas con parámetros acústicos de una falla en particular.

Actualmente la empresa que fabrica vehículos de gama alta no cuenta con una metodología bien definida para identificar la fuente de ruido al interior del vehículo, y tampoco queda documentada la relación del ruido con los parámetros acústicos. Cuando se presenta o se detecta alguna anomalía sonora (detectada por una prueba del vehículo en conducción o por un reporte de cliente), el vehículo es llevado a un área de análisis, donde se intenta localizar la fuente del ruido y eliminarlos con retrabajos en los ensambles y partes involucradas. Estos retrabajos son típicamente cambio de partes de otro lote de producción o colocando materiales absorbentes de ruido entre las partes involucradas. Si el retrabajo no es efectivo el vehículo se envía a otra área donde, con la ayuda de un equipo de medición acústica puedan rastrear el ruido en modo estático, o si es necesario, en modo dinámico (pista de pruebas o carretera), colocando micrófonos en las zonas cercanas a los ruidos no deseados con la finalidad de medir su intensidad y frecuencia. La medición del ruido sólo se utiliza como herramienta de búsqueda rápida para resolver la problemática y una vez resuelto el problema del ruido, el vehículo se libera del área de reparaciones y continua su flujo y sin embargo no se documenta el problema encontrado con las variables acústicas de intensidad y frecuencia.

Propuesta de proceso para la detección de ruidos.

1.-Construcción de una tabla con las recomendaciones para la solución de problemas localizadas en la literatura.

Teniendo como apoyo la tabla con las recomendaciones dadas por los diferentes autores sobre las recomendaciones para la solución de problemas se disminuirán los tiempos de análisis ante problemas similares que surjan en los vehículos.

2.-Identificar los problemas de ruidos que históricamente se han presentado en vehículos.

Tener una base de datos, correctamente documentada es de gran importancia ya que si al pasar de los años se presenta un problema se puede consultar la base de datos y revisar si ese problema ya se había presentado con anterioridad y ver cómo

fue que se resolvió, con esto se corta el tiempo de reacción, se ahorra tiempo de análisis y es una manera rápida saber si ya funcionó la solución documentada.

3.- Definir el proceso de medición

Establecer un estándar GOS (*Global Operation Sheet*, por sus siglas en inglés), en el cual dependiendo del problema a atacar se establezca: 1) Posición de los sensores, buscando siempre que sea la misma posición para estandarizar la medición de los datos, 2) Pasos de montaje de los sensores, considerando el mismo material absorbente que se coloca entre el sensor y la superficie de sujeción, 3) Agregar imágenes que corresponda a los puntos anteriores con la finalidad de mejorar el entendimiento del documento.

4.- Identificación de los problemas por tipo de ruido.

Se propone un método experimental para la identificación de las fuentes de ruidos, basado en la correlación de la fuente del ruido con la magnitud de los componentes de las diferentes frecuencias de ruido como las identificadas por [3], [17], [15], [8], [25], [20], [19], para diferentes sistemas del vehículo como se observa en la Tabla II.

Una vez que se presente un ruido al interior de la cabina, se deberán de tomar las mediciones acústicas de magnitud y frecuencia de las diferentes componentes que forman el ruido y una vez identificada la fuente del ruido correlacionarla con la medición acústica. Una recomendación es que no solo se tome la decisión de cambiar alguna parte o agregar algún material absorbente para reducir la cantidad de ruido emitido, esto ocasiona un aumento de costo y peso al vehículo, se deberá documentar y rastrear la causa raíz del problema y la trayectoria de propagación para su solución permanente durante el proceso de ensamble evitando costos adicionales [6].

En la referencia [6] se propone categorizar el problema de ruido de acuerdo con bandas de frecuencias también debe relacionarse la fuente del ruido y su ruta de propagación a través del interior la cabina.

La información que debe correlacionarse a la fuente del ruido detectado al interior del vehículo son la magnitud y frecuencia de las componentes del ruido y organizar esta información en intervalos de 1/3 de octava para cada tipo de ruido identificado con el fin de ubicar las características de los ruidos por grupos de la frecuencia sonora. Esta información será útil para obtener una base de datos de todos los problemas presentados en un determinado periodo de tiempo.

Los reportes que existen en planta con problemas de ruido están documentados como en la Tabla VI, pero ninguno de ellos cuenta con una relación de frecuencia e intensidad, no se documenta la solución ni las mediciones acústicas correspondientes al problema identificado.

Tabla VI. Problemas de ruido presentados en planta.

Elemento	Problema
1	Ruido chirriante en el eje delantero
2	Ruido Schnappi al abrir la puerta trasera
3	Ruido de clic en el asiento de la tercera fila Rh y Lh
4	Ruido de golpeteo al abrir/cerrar todas las puertas
5	Ruido de fricción entre el forro del techo y el ASD M1
6	Ruido en el tablero Lh
7	Ruido de traqueteo en la parte frontal del tablero
8	Ruido de traqueteo en la guantera del tablero
9	Ruido de la cubierta del reposapiés Rh.
10	Ruido en la pantalla del tablero
11	Ruido metálico al retraerse a la posición final
12	Ruido de fricción del estor enrollable
13	Ruido de traqueteo en el pilar D
14	Ruido de traqueteo desde el área interior
15	Ruido de traqueteo desde el área del maletero

En base a la propuesta presentada, se propone recolectar la información usando la plantilla de la Tabla VII para cada vehículo cuando se le realice la medición sonora. En la Tabla VII considera la siguiente información:

- Problema detectado: Problema de tipo ruido detectado al interior de la cabina para catalogarlo en un futuro.
- Fecha y hora de la prueba: Corresponde a la fecha y la hora cuando se hicieron la prueba en los vehículos.
- Modelo: Se refiere al modelo en el cual se está realizando la prueba.
- Planta de producción: Corresponde a la planta donde se produce el modelo en el cual se realizará la prueba de medición de ruido.
- Magnitud y frecuencia fundamental: Corresponde a la medición con el equipo de la intensidad sonora, importante para revisar la afectación dentro de la cabina.
- Rango (1/3 de octavas): Se refiere a la clasificación de rango de frecuencia para clasificarlos en tonos.
- Especificación y destino de venta: Mercado al cual será enviado el vehículo y el nivel de equipamiento que tendrá, dependiendo de esto su ensamble de componentes varia.
- No. de Vin: Es el número de serie de cada vehículo irrepetible sirve para identificar el lote de producción, la fecha de ensamble y destino final.
- Posición de Sensores: Identificar en donde fueron instalados los sensores para el tipo de ruido interior y estandarizar posición cada vez que se presente un ruido similar.
- Tipo de camino: Describir el tipo de camino en el cual se conduce el vehículo durante la prueba.
- Fecha de prueba: Es importante conocer la fecha de prueba para tener un histórico de ruidos presentados a lo largo del tiempo.
- Velocidad y r.p.m.: Corresponde a la velocidad en la cual el vehículo se desplaza y las revoluciones del motor al hacer la prueba, con el objetivo de relacionarlas con el ruido medido.
- Solución implementada: Documentar cual fue la solución final de cada problema para tenerla en la base de datos.

Tabla VII. Plantilla para tabla de ruidos.

Elemento	1	2	3
Problema			
Imagen			
Magnitud de la frecuencia fundamental (dB)			
Frecuencia fundamental (Khz)			
Rango (1/3 octavas)			
Especificación			
Destino			
No. De VIN			
Pos. de sensores			
Tipo de camino			
Hora de prueba			
Velocidad			
RPMS			
Solución			

Así, la Tabla VII proporciona una visión general de la condición sonora dentro de la cabina del vehículo sobre los problemas de tipo de ruido presentados y la base de datos tendrá mayores y mejores elementos, lo que podrá ser útil para relacionar la fuente del ruido con el problema detectado.

5.- Realizar una prueba aleatoria.

Cada determinado tiempo evaluar una unidad con el fin de realizar una medición al interior de la cabina y en el caso de que se presente algún ruido ampliar la base de datos. Si bien la automatización permite que los tiempos de operación sean más rápidos, el proceso de ensamble de vehículos puede ser fluctuante, ya que a pesar de que se fabriquen los vehículos en celdas de ensamble con las mismas condiciones de programación, herramientas, materiales, partes, operaciones manuales y criterios de calidad, los ruidos aparecen en ciertos automóviles si ningún patrón, lo cual hace que sea complicado saber cuándo se presentan. Con la metodología propuesta se desea mejorar el proceso actual que se lleva a cabo, ya que para poder efectuar una metodología más especializada en el futuro se debe tener una buena documentación, bases de datos, desarrollo de personal en el entrenamiento del equipo de medición y una estandarización adecuada de actividades.

IV. RESULTADOS

ASPECTOS DE APOYO PARA LA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Graficas de medición sonora (frecuencia vs magnitud)

Las siguientes figuras muestran los resultados de los casos más severos de las 54 pruebas para observar las mediciones sonoras e identificar los parámetros acústicos para esos ruidos en

particular, las cuales destacan el sonido dentro de la cabina del vehículo con las condiciones descritas anteriormente.

Se realiza el análisis de cada una de las figuras mencionando rangos de frecuencia audibles para el ser humano [28], que van desde 20 Hertz a 20 Kilo Hertz, también se hace una comparación de los rangos de frecuencia y magnitud si están dentro del umbral del dolor para el ser humano [5] y que es por debajo de 130 decibeles.

Cabe señalar que una parte del análisis menciona las contribuciones naturales de ruido que existe dentro de la cabina del vehículo tomando en cuenta la Tabla II donde se describen algunos tipos de ruido con su frecuencia y magnitud los cuales se tomaron del estado del arte.

Por otra parte, la descripción de cada una de las líneas de colores corresponde a una señal del sensor situado en el vehículo como se muestran en la Fig. 4 (a) (VL_left/VL_right), Fig. 4 (b) (Up) y Fig. 4 (c) (Down) respectivamente.

La Fig. 10, la Fig. 11 y la Fig. 12 muestran los resultados de las mediciones realizadas dentro de la cabina de un vehículo de gama alta en condiciones normales de operación, reflejando el ruido natural de estos vehículos. Cualquier variación fuera de este rango de frecuencia y magnitud se considera una perturbación ajena al sonido ambiente normal de la cabina, sin la presencia de sonidos simulados. Por otro lado, en las figuras donde se incorporaron intencionalmente sonidos artificiales, el objetivo es identificar y diferenciar aquellos que puedan estar asociados a posibles problemas en el vehículo.



Fig. 10. Medición acústica de magnitud y frecuencia de un automóvil encendido y estacionado.

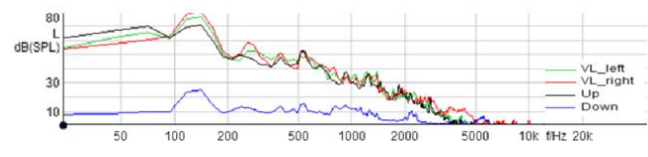


Fig. 11. Medición acústica de magnitud y frecuencia de un automóvil encendido y estacionado a 4000 r.p.m.

En la Fig. 10 y en la Fig. 11 se observa el resultado de la medición acústica dentro de la cabina del automóvil teniendo condiciones de encendido, estacionado y con revoluciones constantes de 4000 r.p.m., respectivamente.

En la Fig. 10 se observa la medición acústica en la cabina con el automóvil donde se aprecia la frecuencia que va desde los 20 Hertz hasta 4 Kilo Hertz, con un rango de magnitud desde los 70 decibeles hasta los 5 decibeles respectivamente con una caída lineal de la magnitud.

Es importante señalar que el rango de frecuencia de la Fig. 10 que oscila entre los 50 Hertz con una magnitud de 75 decibeles a los 1.5 Kilo Hertz con una magnitud de 5 decibeles, corresponde al sonido ambiente normal dentro de la cabina. Por

otro lado, en la misma Fig. 10 se puede observar que el micrófono *Down* (señal azul), que corresponde al sensor situado en la cabecera de los pasajeros traseros, no muestra datos significativos ya que tanto su frecuencia y magnitud están fuera de la zona audible del ser humano, los cuales para todas las mediciones siguientes no se considera este micrófono.

Por las condiciones del vehículo las fuentes del ruido que se presentan se deben a la transmisión, admisión, escape del motor, así como el motor mismo en mínimas condiciones de operación ya que el vehículo está estacionado.

En la Fig. 11 se observa la medición acústica en la cabina con el automóvil donde se aprecia la frecuencia que va desde los 20 Hertz hasta 5 Kilo Hertz, con un rango de magnitud desde los 70 decibeles hasta los 5 decibeles respectivamente con una caída lineal de la magnitud.

Es importante señalar que el rango de frecuencia de la Fig. 11 que oscila entre los 50 Hertz con una magnitud de 70 decibeles a los 5 Kilo Hertz con una magnitud de 10 decibeles, corresponde al sonido ambiente normal dentro de la cabina, teniendo un parecido con los resultados de la Fig. 10.

Por las condiciones del vehículo las fuentes del ruido que se presentan se deben a la transmisión, admisión, escape del motor, así como el motor mismo por las condiciones de operación al estar generando 4000 r.p.m. ya que el vehículo está estacionado.

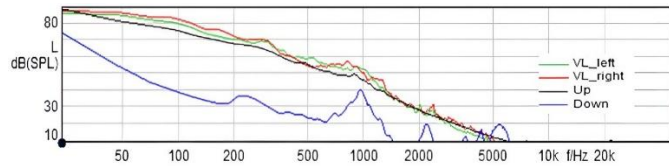


Fig. 12. Medición acústica de magnitud y frecuencia de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

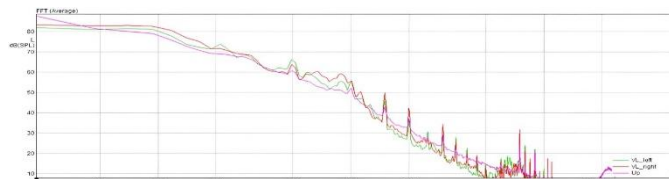


Fig. 13. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 1(500 Hertz) de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

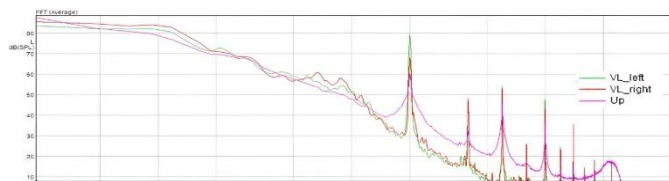


Fig. 14. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 1(2 Kilo Hertz) de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

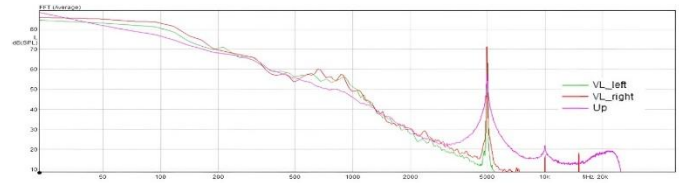


Fig. 15. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 1(5 Kilo Hertz) de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

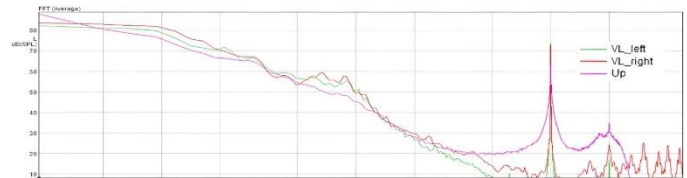


Fig. 16. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 1(10 Kilo Hertz) de un automóvil en marcha de 100 Km/h a 110 Km/h.

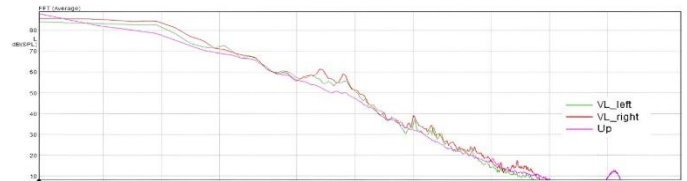


Fig. 17. Medición acústica de magnitud y frecuencia de A/C prendido de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

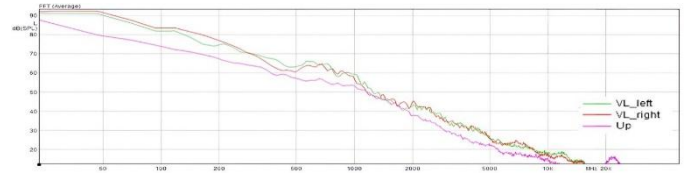


Fig. 18. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 2 (Ventana del conductor abierta) de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

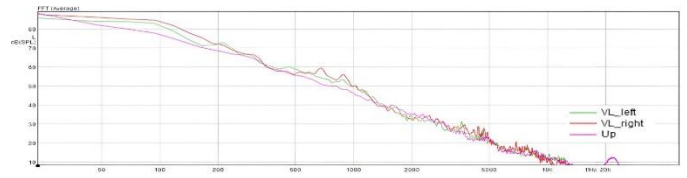


Fig. 19. Medición acústica de magnitud y frecuencia de simulación de ruido 3 (Golpeteo de franela en ventana del conductor) de un automóvil en marcha a 110 Km/h.

De la Fig. 12 a la Fig. 19 se observa el resultado de la medición acústica dentro de la cabina del automóvil circulando a una velocidad de 110 km/h y teniendo en todas las figuras anteriores las mismas condiciones, además de simulaciones de ruido dentro de cabina.

En la Fig. 12 se observa la medición acústica en la cabina con el automóvil donde se aprecia la frecuencia que va desde los 20 Hertz hasta 5 Kilo Hertz, con un rango de magnitud desde los

80 decibeles hasta los 10 decibeles respectivamente con una caída lineal de la magnitud.

Es importante señalar que el rango de frecuencia de la Fig. 12 que oscila entre los 20 Hertz con una magnitud de 80 decibeles a los 5 Kilo Hertz con una magnitud de 10 decibeles, corresponde al sonido ambiente normal dentro de la cabina, teniendo un parecido con los resultados de la Fig. 10.

Posteriormente se generaron sonidos artificiales con frecuencias de 500 Hertz, 2 Kilo Hertz, 5 Kilo Hertz y 10 Kilo Hertz, con los hallazgos que se mencionan a continuación.

Con la frecuencia de 500 Hertz se observó en la Fig. 13 un incremento en el rango de frecuencia medido desde 20 Hertz hasta 10 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 85 decibeles hasta los 5 decibeles respectivamente. Para este caso se observa la frecuencia fundamental de 500 Hertz y la frecuencia de sus armónicos (1 Kilo Hertz, 2 Kilo Hertz, 4 Kilo Hertz, 8 Kilo Hertz y 16 Kilo Hertz) con una magnitud por debajo de los 65 decibeles.

Con la frecuencia de 2 Kilo Hertz se observó en la Fig. 14 un incremento en el rango de frecuencia medido desde los 20 Hertz hasta 8 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 80 decibeles hasta los 50 decibeles. También se denota como el micrófono del conductor (*Up*-Señal de color rosa) percibe más ruido que los demás micrófonos. Para este caso se observa la frecuencia fundamental de 2 Kilo Hertz y la frecuencia de sus armónicos (4 Kilo Hertz, 8 Kilo Hertz y 16 Kilo Hertz) con una magnitud por debajo de los 50 decibeles.

Con la frecuencia de 5 Kilo Hertz se observó en la Fig. 15 un incremento en el rango de frecuencia medido desde los 20 Hertz hasta 7 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 80 decibeles hasta los 5 decibeles. También se denota como el micrófono del conductor (*Up*-Señal de color rosa) percibe más ruido que los demás micrófonos. Para este caso se observa la frecuencia fundamental de 5 Kilo Hertz y la frecuencia de sus armónicos (10 Kilo Hertz y 20 Kilo Hertz) con una magnitud por debajo de los 25 decibeles.

Con la frecuencia de 10 Kilo Hertz se observó en la en la Fig. 16 un incremento en el rango de frecuencia medido desde los 20 Hertz hasta 10 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 85 decibeles hasta los 75 decibeles. También se denota como el micrófono del conductor (*Up*-Señal de color rosa) percibe el ruido 10 Kilo Hertz mientras el sensor del copiloto (*VL_right* de color rojo) capta más ruido que los demás micrófonos por estar más cerca de la fuente del ruido. Para este caso se observa la frecuencia fundamental de 10 Kilo Hertz y la frecuencia de sus armónicos (20 Kilo Hertz) con una magnitud por debajo de los 40 decibeles.

Enseguida se prendió el A/C de la unidad y se observó en la Fig. 17 un incremento en el rango de frecuencia medido desde los 20 Hertz hasta 10 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 80 decibeles hasta los 5 decibeles.

De la misma manera se observa que para la simulación de ruido 2 (Ventana del conductor un poco abierta) en la Fig. 18 el rango de frecuencia medido va desde los 20 Hertz hasta 15 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 85 decibeles hasta los 5

decibeles.

También se observa que para la simulación de ruido 3 (Golpeteo de franela en la ventana del conductor) en la Fig. 19 el rango de frecuencia medido va desde los 20 Hertz hasta 10 Kilo Hertz y con un rango de magnitud desde los 90 decibeles hasta los 5 decibeles.

Por las condiciones del vehículo las fuentes del ruido que se presentan se deben a la transmisión, admisión, escape del motor, a las ruedas, al tipo de camino, a la aceleración, al viento, al sonido de la franela golpeando la ventana del conductor un poco abierta, y a las frecuencias de 500 Hertz, 2 Kilo Hertz, 5 Kilo Hertz y 10 Kilo Hertz también al ruido que genera el A/C, así como el motor mismo por las condiciones de operación al estar circulando a una velocidad constante de 110 km/h.

Resumen de las gráficas de medición sonora (Frecuencia vs Magnitud).

De acuerdo con los resultados de la medición sonora en los 2 vehículos no se encontraron problemas de ruido al interior de la cabina. Para fines prácticos se tuvieron que realizar 3 simulaciones con ruidos producidos artificialmente. Los resultados de las mediciones muestran que, a mayores revoluciones y velocidades, la intensidad (decibeles) aumenta el sonido ambiente normal dentro de la cabina.

Durante la prueba con el generador de tonos (simulación 1) se puede observar la frecuencia fundamental y la frecuencia de sus armónicos resaltando que estos cuentan con menor magnitud.

La Simulación del ruido 2 y 3 da una referencia de cómo puede observarse el comportamiento acústico, cuando se tenga algún vehículo con ruido de viento y de golpeteo para poder identificarlos con mayor rapidez, teniendo los valores en la base de datos.

La referencia de la Tabla VII poder identificar el tipo de ruido y deducir la fuente del ruido.

Después de analizar las gráficas se visualizó que tanto la frecuencia como la magnitud el micrófono situado en la cabecera de los pasajeros traseros es muy bajo y no arroja información útil al estudio ya que la fuente del ruido fue localizada a la altura de la consola central, por lo que se decidió no mostrarlos en los resultados. También se observó que los pasajeros de la parte trasera del vehículo tienen una percepción de comodidad mayor.

Tener presente que la posición de la fuente de ruido dependerá de la percepción de los ocupantes.

Cabe mencionar que el ruido simulado con la ventana de conductor abierta solo se logra captar cuando el vehículo está en movimiento con velocidades por encima de los 20 km/h. Por otro lado, el ruido simulado con el golpeteo de franela en la ventana del conductor solo se logra cuando el vehículo está en movimiento con velocidades por encima de los 60 km/h. Teniendo en cuenta que existe un incremento de la intensidad en un rango de frecuencia, pero no existe una componente específica de frecuencia por la naturaleza del ruido, considerado como aleatorio por los factores de velocidad del viento y velocidad del vehículo, así como la deformabilidad de la franela. Esto puede ser algún tipo de limitación para identificar

algún tipo de ruido, cuando este sea aleatorio y no se pueda asociar específicamente con parámetros acústicos, excepto por el aumento de la intensidad del ruido en un rango de frecuencia. De las mediciones obtenidas los ruidos artificiales (simulación de ruido 1, 2 y 3) se distingue la frecuencia y magnitud, con el equipo actual es posible identificarlos ya que son ruidos que no deben estar dentro de la cabina del vehículo.

Cabe destacar que el rango de las magnitudes y de las frecuencias de todas las gráficas no pone en riesgo la pérdida auditiva ya que no sobrepasan la zona del dolor para ser humano.

Se resalta que, por la gran resolución del equipo de medición, en cada figura se pueden medir las frecuencias fundamentales, la frecuencia de sus armónicos y la magnitud de estas. De la misma manera se denota que el equipo es más sensible y capta más detalle de los sonidos que el conductor o los pasajeros no podrían distinguir y esto es una mejora para la detección de ruidos.

Realizar este tipo de mediciones en todos los vehículos no es factible para la compañía, por ello la recomendación es realizar una medición aleatoria cada cierto tiempo para confirmar la calidad de la producción y aplicar la metodología propuesta cada vez que se presenten problemas de ruido. Todos los vehículos que si presenten problemas se les deberá aplicar la metodología propuesta.

Desde un punto de vista objetivo es relativamente normal que durante la producción en serie se produzcan ruidos inesperados al interior de la cabina en pocos o muchos vehículos, esto debido como consecuencia del proceso de ensambles durante su producción. Las mediciones de magnitud, frecuencia, ruta de propagación, tipo de camino, velocidad del vehículo y r.p.m. del motor pueden asociarse con un tipo de ruido particular que se presenta al interior de la cabina del vehículo.

V. CONCLUSIONES

Las metodologías experimentales para la detección de ruido como TPA, holografía, mapeo de ruidos entre otros son métodos se utilizan solamente en la fase de diseño de los vehículos y su aplicación no es factible durante la producción del vehículo. Los métodos de ensamble de partes durante el proceso de producción, aplicación de materiales, partes fuera de tolerancia y/o defectuosas pueden introducir ruidos que no estaban considerados en la etapa del diseño del vehículo. Por otro lado, la mejora en el diseño de partes, materiales de construcción y una optimización constante puede reducir problemas de ruido al interior de la cabina de un automóvil. Los problemas que ocurren después de la etapa de diseño suelen ser costosos de corregir y tienen soluciones de diseño limitadas debido a los cortos tiempos de la exigencia del mercado de un vehículo en producción.

A partir de lo expuesto, se concluye que la documentación sobre los ruidos en el interior de la cabina del vehículo es limitada en la literatura, posiblemente debido al secreto industrial del sector automotriz. Estos ruidos se caracterizan por su magnitud y frecuencia, cuyos valores han sido tomados como referencia

para identificar ciertos componentes del vehículo en relación con la presencia de ruidos no deseados.

La metodología propuesta puede ayudar a documentar los parámetros acústicos de ruidos que llegan a presentarse al interior del vehículo y con esto controlar la calidad auditiva al interior de la cabina de un automóvil ya que es esencial para garantizar la satisfacción del cliente; cabe mencionar que la percepción del usuario está directamente relacionada con su experiencia al conducir. Debido a que la planta automotriz no cuenta con una metodología que le permitiera documentar y estandarizar el proceso de medición acústica, la metodología presentada será de gran utilidad para generar una base de datos de los diferentes ruidos que ayuden a identificarlos rápidamente y que ya se han presentado con anterioridad. Con relación a la prueba aleatoria se sugiere establecer un acuerdo con las áreas involucradas con la producción del vehículo, para establecer un periodo de tiempo y con esto obtener una base de datos con mediciones esporádicas en vehículos.

Lo anterior se debe a los altos tiempos de producción en la industria automotriz y de la importancia de tener documentada una relación que implique problemas encontrados al interior de la cabina y su intensidad sonora sin afectar la producción. El objetivo es identificar posibles ruidos para que en un futuro no se duplique el análisis.

A lo largo de este estudio se encontraron ciertas limitaciones /condicionantes los cuales aparecieron al momento de analizar las gráficas ya que incluyen la presencia de ruidos aleatorios que pueden afectar la precisión de los resultados, como es el ejemplo de la franela ya que la prueba no fue en un entorno controlado. Además, se identificaron dificultades en la recopilación de datos en condiciones de conducción a alta velocidad, donde factores como la vibración del vehículo y el ruido aerodinámico pueden influir en la calidad de las mediciones. Del mismo modo, la conducción en caminos con superficies irregulares o en mal estado, agrega desafíos para el análisis de ruido por las variaciones de frecuencia. A pesar de lo anterior, los resultados obtenidos proporcionan una base para futuras mediciones y se buscará mejorar la robustez de la metodología.

Con la recolección de información en una base de datos se podrá trabajar en un futuro con un algoritmo para automatizar la búsqueda de problemas de ruido o aplicar algoritmos de IA para identificar los tipos de ruidos. Esto podrá reducir los reclamos de clientes, mejorar ventas, aumentar mercado y seguir consolidando la marca. Como propuesta se recomienda utilizar esta metodología en otras plantas de la misma marca para enriquecer la base de datos a futuro.

Se tiene que resaltar que un ruido dentro de la cabina del vehículo no necesariamente se debe considerar un problema auditivo, de acuerdo con las mediciones se observó un ruido base relacionado con el confort al manejar el vehículo, si se presenta un ruido no deseado fuera de los parámetros del ruido base entonces se puede decir que existe un problema en el vehículo que se percibe dentro de la cabina y que típicamente puede afectar el confort. La percepción del confort involucra al piloto y también es percibido por los ocupantes por la posición de la fuente de ruido.

Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas dan información suficiente para identificar ruidos dentro de la cabina que puedan estar relacionados con posibles problemas del vehículo. Los resultados permiten obtener patrones de ruido en diversas condiciones de conducción, lo que facilita su clasificación y análisis. Además, estos resultados respaldan la metodología propuesta en este trabajo para documentar la detección de ruidos dentro de la cabina y encontrar las causas raíz.

VI. REFERENCES

- [1] Abdallah, A. A., & Yang, K. (2008). Predicting noise, vibration and harshness performance degradation through fatigue analysis. In *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* (Vol. 4, Issue 4). <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2008.024340>
- [2] Ahmad K., Wan Z., Zulkifli M., Jailani M., Arifin A. & Mohammad F. (2011). A study on the effects of tyre to vehicle acoustical comfort in passenger car cabin. <https://doi.org/10.1109/ICCRD.2011.5763889>
- [3] Barton, D. C., & Fieldhouse, J. D. (2018). Automotive chassis engineering. In *Automotive Chassis Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72437-9>
- [4] Botero María Mercedes, Peña Paola (2006). Calidad en el servicio: EL CLIENTE INCOGNITO.
- [5] Centro Auditivo Cuenca. (2014). Hablemos de Acústica y de Psico-acústica. Retrieved from <https://www.centroauditivo-valencia.es/2014/06/19/hablemos-de-ac%C3%Bastica-y-de-psicoac%C3%Bastica/>
- [6] Cerrato, G., & Goodes, P. (2011). Practical Approaches to Solving Noise and Vibration Problems. *Sound & Vibration*, 45, 18–23.
- [7] Frank, E., Moon, C., Rae, J., & Popovich, M. (2013). Optimization of test parameters and analysis methods for fuel tank slosh noise. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(2). <https://doi.org/10.4271/2013-01-1961>
- [8] García, M. O., Ordóñez, C. G., & Torregrosa, A. J. (2016). Análisis de Ruido en el Diseño y Construcción de una Cámara Semianecoica para Diagnóstico de Motores de Combustión Interna. *Información Tecnológica*, 27(5), 121–132. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000500014>
- [9] Grandolfo Martino and Vecchia, P. (1987). Fundamentals of Acoustic Wave Theory. In M. and R. A. Repacholi Michael H. and Grandolfo (Ed.), *Ultrasound: Medical Applications, Biological Effects, and Hazard Potential* (pp. 13–28). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1811-8_2
- [10] Hansen, C. H. (2014). FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS. 1–31.
- [11] HEAD acoustics. (2023). HEAD acoustics: Sound. Voice. Passion. Retrieved from <https://www.head-acoustics.com/>
- [12] Huang, H. B., Wu, J. H., Huang, X. R., Yang, M. L., & Ding, W. P. (2020). A generalized inverse cascade method to identify and optimize vehicle interior noise sources. *Journal of Sound and Vibration*, 467. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115062>
- [13] Huang, L., Krishnan, R., Connelly, T., & Knittel, J. D. (2003). Development of a luxury vehicle acoustic package using SEA full vehicle model. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1554>
- [14] ISO 5128, I. (2023). Acoustics — Measurement of interior vehicle noise.
- [15] Kook, H. S., Lee, D., & Ih, K. D. (2011). Vehicle interior noise model based on a power law. *International Journal of Automotive Technology*, 12(5). <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0090-0>
- [16] Lee, G. J., & Kim, J. (2018). Investigation of the Stability of a Squeak Test Apparatus Based on an Analytical and Finite Element Models. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 140(3). <https://doi.org/10.1115/1.4038945>
- [17] Liu, W., Hu, J., Jiang, F., Gong, B., Deng, X., & Xu, Y. (2021). Analysis and Optimization of Interior Noise Based on Transfer Path Analysis. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 13014 LNAI. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89098-8_51
- [18] Liu, X., Wang, H., Shan, Y., & He, T. (2013). Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Disc Brake Squeal Using Improved Hilbert-Huang Transform (pp. 25–38). https://doi.org/10.1007/978-3-642-33832-8_3
- [19] Masgrau, E., Ortega, A., Ramos, P., Vicente, L., & Lleida, E. (2010). TRATAMIENTO ROBUSTO DEL SONIDO EN EL INTERIOR DE VEHICULOS.
- [20] M.D Redel-Macias, D.Berckmans, & A.J. Cubero-Atienza. (2010). Modelo de identificación de fuentes sonoras. Aplicación al ruido del motor de un automóvil. *RIAI*, 7.
- [21] Mohamed, Z., Wang, X., & Jazar, R. (2013). A survey of wheel tyre cavity resonance noise. In *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* (Vol. 9, Issues 3–4). <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2013.055811>
- [22] Palanivelu, S., & Ramarathnam, K. K. (2015). Synthesis of structure borne vehicle interior noise due to tire/road interaction. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 6. <https://doi.org/10.1115/DETC2015-46083>
- [23] Panza, M. A. (2015). A review of experimental techniques for NVH analysis on a commercial vehicle. *Energy Procedia*, 82, 1017 – 1023. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.861>
- [24] Sakai, T., Terada, M., Ono, S., Kamimura, N., Gielen, L., & Mas, P. (2001). Development procedure for interior noise performance by virtual vehicle refinement, combining experimental and numerical component models. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1538>
- [25] Sanz, C. (2012). Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness). UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- [26] Shen, X., Zuo, S., Zhang, S., Li, L., & Lvchang, H. (2009). NVH research based on fuel cell vehicle. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/IVS.2009.5164473>
- [27] Sujatha, C. (2023). *Vibration, Acoustics and Strain Measurement*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-03968-3>
- [28] Taşdemir, C., & Demir, Ö. (2016, 9). NOISE AND VIBRATION ANALYSIS OF A TUGBOAT.
- [29] Teknos, T., Liu, W., & Musser, C. T. (2009). Use of SEA to support sound package design studies and vehicle target setting. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2206>
- [30] Wang, W. L., Luo, M. J., Guo, W. X., & Li, F. X. (2009). Structure dynamics analysis for use in noise reduction of an automotive body-in-white. *Proceedings - 2009 International Conference on Information Engineering and (Journal Online Sources style)* K. Author. (year, month). Title. *Journal* [Type of medium]. Volume(issue), paging if given. Available: [http://www.\(URL\)](http://www.(URL))
- [31] R. J. Vidmar. (1992, August). On the use of atmospheric plasmas as electromagnetic reflectors. *IEEE Trans. Plasma Sci.* [Online]. 21(3). pp. 876–880. Available: <http://www.halcyon.com/pub/journals/21ps03-vidmar>