

Identificación mediante pruebas no destructivas de los cambios en el espectro de audiofrecuencias en discos de frenos automotrices fracturados

Identification by non-destructive proofs from changes in audio frequencies spectrum in automatic fractured breaks

Cristian Sebastián Gómez Morales, Manuel Aparicio Razo y Germán Ardul Muñoz Hernández*

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica

*gmunoz@ieee.org

Resumen

Este trabajo muestra la variación del espectro de audiofrecuencias de 4 discos de freno automotrices con características particulares, como un primer acercamiento a las pruebas de audiofrecuencias para detectar fracturas en discos automotrices. El método usado constó de tres tipos de estudios. Se usó una máquina de pruebas para generar vibración en el disco, empleando un micrófono para captar vibraciones mediante el sonido y otro para captar vibraciones por contacto. Se realizó un primer estudio analizando el espectro de frecuencias, lo que mostró de manera clara la aparición de frecuencias en zonas particulares del espectro, describiendo características específicas del disco, a las que se les llamó frecuencias de falla. El segundo estudio realizado fue el análisis de potencia, que brindó características visuales superiores al primer estudio. Finalmente, se empleó un estudio basado en la distorsión armónica total, arrojando datos muy claros de los discos dañados y más aún, sus gráficas describieron características como grosor, rugosidad y fractura de la pista del disco.

Abstract

This work shows the variation of the audio frequency spectrum of 4 automotive brake discs with specific characteristics, as a first approach to audio frequency tests to detect fractures in automotive discs. The method used consisted of three types of studies. A test machine was used to generate vibration in the disc, using one microphone to capture vibrations by sound and another to capture vibrations by contact. A first study was carried out analyzing the frequency spectrum, which clearly showed the appearance of frequencies in particular areas of the spectrum, describing specific characteristics of the disk, which were called failure frequencies. The second study conducted was power analysis, which provided superior visual characteristics to the first study. Finally, a study based on total harmonic distortion was used, yielding very clear data of the damaged discs and even more, their graphs described characteristics such as thickness, roughness and fracture of the disc track.

Keywords: Acústica, discos de frenos automotrices, seguridad vehicular, pruebas no destructivas, análisis de la distorsión armónica total (THD).

Palabras clave: Acoustics, automotive brake discs, vehicle safety, non-destructive testing, total harmonic distortion analysis (THD)

Introducción

Los accidentes de tráfico son una tragedia mundial con una tendencia cada vez mayor. Los traumatismos causados por el tránsito figuran entre las principales causas de muerte, invalidez de por vida y daños a la propiedad [1].

Existen diversos análisis sobre las causas de accidentes vehiculares, y en general se ha afirmado que el fallo del sistema de frenado es uno de los principales factores. [2], [3]. Por tanto, el sistema de frenado es decisivo en materia de seguridad para la conducción, dado que un excelente frenado puede reducir el riesgo de accidentes [4].

La función del sistema de frenado es reducir la velocidad del vehículo o detenerlo en la distancia más corta [5]. Como el sistema de frenado tiene un papel vital en la seguridad del vehículo y es el sistema de seguridad más directo, éste requiere varios mantenimientos a intervalos regulares para prolongar la vida útil de los frenos [6].

Los sistemas de frenado funcionan bajo el principio de fricción, por lo que tienen mucho riesgo de falla, tal como lo muestran ciertos estudios, entre otros [7]. La falla más común, es provocada por la aparición de grietas prematuras en sus componentes, por fatiga térmica [8], [9], [10]. Uno de los componentes con mayor prevalencia de falla en los vehículos, es el disco de frenado, el cual a menudo presenta grietas capilares por las altas temperatura [11], [12].

Los métodos empleados para el diagnóstico y estado de los discos de frenado, por parte de los profesionales en mantenimiento mecánico, se centran generalmente en la inspección visual, así como en el estado de rugosidad, grosor, daños superficiales como fractura y desprendimiento de material. Sin embargo, este estudio no es fiable ya que carece de parámetros físicos de diagnóstico que puedan ser medidos y compa-

rados. Algunos talleres recurren a estudios de Rayos X. Los métodos de diagnóstico del sistema de frenado estudiados en la comunidad, se han centrado en la evaluación del comportamiento y respuesta del sistema de manera global, midiendo distintos parámetros durante su trabajo [13], [14].

Se han usado sistemas basados en acústica para caracterizar fallas comunes o específicas de elementos indispensables, como las bujías [15]. Así también, se han reportado investigaciones teóricas sobre fenómenos vibroacústicos en sistemas de frenos de transporte [16]. De igual forma se han presentado estudios de vibración forzada de baja frecuencia y ruido en frenos [17]. Por otro lado, se han analizado los comportamientos dinámicos transitorios no lineales de los sistemas de frenos tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, investigando las propiedades de vibración de los componentes de los frenos en el proceso de evolución del ruido utilizando la transformada de Hilbert-Huang mejorada [18]. De igual forma, para el estudio de análisis de vibración libre en placas, se ha empleado una formulación peridinámica de placa de Mindlin, como implementación numérica realizada mediante el software comercial de elementos finitos ANSYS [19]. También se han empleado sensores no auditivos, por ejemplo, una cámara infrarroja ha sido empleada para analizar parámetros mecánicos, como la correlación entre la tensión y la temperatura en compuestos de carbono/carbono, la variación de temperatura en la pieza de prueba a lo largo del tiempo, la distribución del calor en la fractura y el punto mecánico de máxima tensión [20].

El tratamiento del sonido para pruebas de verificación en discos, tiene la ventaja de ser un método no destructivo. Por esta razón esta tecnología es muy flexible y se podría implementar en diversas etapas de la manufactura, para validar discos nuevos de manera rápida en una línea de producción. Con el procesamiento adecuado se pueden obtener resultados confiables, que permitan validar el estado de un disco. Por ello en este escrito se presenta la evaluación de 4 discos de frenos automotriz con distintas características, mismas que se presentan con una variación en el espectro de frecuencias. Dando un primer acercamiento a la propuesta del análisis de audiofrecuencias para este sector en específico.

Metodología para el análisis de discos de freno.

Para las pruebas, se diseñó una máquina especializada en el análisis de discos de frenos automotrices, misma que se encuentra patentada, por lo que los autores se limitan en detalles en cuanto a sus diferentes sistemas que la componen, así como sus características, sin embargo, si se muestran los principios físicos empleados, así como los detalles experimentales, en los que se sustenta dicho trabajo.

El disco es introducido en la máquina, la cual tiene la capacidad de hacerlo rotar. El experimento consistió en analizar la superficie de la pista del disco ya que es la parte que sufre mayor desgaste en el funcionamiento y también es la que más

se daña. Para esto, la pista del disco fue golpeada por un punzón especial de acero, de forma cilíndrica, de punta redonda y recta, con un diámetro de impacto de 13 mm y con una masa de 0.064kg. Para evitar un daño permanente en la pista del disco. El punzón se deja caer en caída libre, gracias a un sistema de control que permite que el punzón golpee una sola vez al disco. La máquina se diseñó, de manera que la pista del disco quede completamente aislada de cualquier masa que impida su oscilación y la deje vibrar de manera natural. Debido al funcionamiento simple del sistema de golpeteo y conociendo la altura desde la que se deja caer el punzón, así como su masa, se puede calcular su energía potencial, la cual es de 32.22 mJ. De la física de las vibraciones mecánicas sabemos que existe una transformación constante de diversas formas de energía y la energía potencial se transforma en energía cinética una y otra vez, de manera periódica a través del tiempo. Internamente, en el disco se da esta transferencia de energía y para el caso específico de daños y grietas en el disco sucede una alteración debido a las discontinuidades de masa en este, por tanto y aunque fue posible calcular la energía dada por el punzón, en este experimento no se realizó un censo de las fuerzas disipativas asociadas a este, por lo tanto el sistema no se puede tratar como un sistema conservativo, y analizar la dinámica del disco, en este contexto sería compleja y no se considera en este escrito.

Para analizar de manera uniforme la pista del disco, este es golpeado en toda su superficie. Específicamente recibe 12 golpes la pista, es decir, el disco rota 30° y posteriormente es golpeado por el punzón. Debido a que el análisis es consecutivo, después del primer impacto, el disco quedaría vibrando y para el siguiente golpe, el disco tendría condiciones iniciales diferentes al primero. Para evitarlo, se diseñó un sistema estabilizador, el cual es accionado después de que el disco fue golpeado y la toma de datos fue hecha, así la función de este, es comprimir la pista del disco por medio de espuma sonora y otros elementos, que, al entrar en contacto con la superficie del disco, absorben las vibraciones mecánicas y el sonido, para posteriormente disipar esta energía al medio y garantizar que el disco tenga las mismas condiciones iniciales que el experimento anterior.

La toma de datos fue hecha por medio de 2 transductores, el primero consta de un micrófono omnidireccional, el cual tiene la función de captar el sonido del impacto. Otro micrófono, este de contacto, se colocó en la pista del disco, muy cerca del lugar de impacto, su función fue captar las vibraciones del disco. Ambos transductores, trabajan con un ADC de 12 bits. Para el experimento, operaron por un tiempo de 110 ms a una tasa de muestreo de 10 μ s. Obteniendo un total de 22,000 muestras, que fueron procesadas mediante el Software MATLAB®, así se obtuvieron 2 matrices (una por cada micrófono), de 12 filas correspondientes a cada sector del disco y 11,000 columnas.

Una vez que se terminó de caracterizar el disco, se realizaron 3 tratamientos matemáticos en el dominio de la frecuencia, así

lo primero fue determinar la frecuencia de muestreo. Sabiendo que la frecuencia máxima a captar era de 20kHz, se determinó una frecuencia de muestreo de 100kHz. El análisis del disco constó de 3 estudios matemáticos, en un intervalo de 0kHz a 20kHz. Así, se obtuvo el espectro de potencia con la transformada rápida de Fourier (FFT), el cual resaltó las frecuencias de falla particulares de cada disco, posteriormente se realizó el análisis de la densidad espectral de potencia, que proporcionó una idea general del estado del disco en comparativa a un modelo base, además mostró de manera más clara y rápida las frecuencias de falla y finalmente se realizó el estudio de la distorsión armónica total (THD), que dio una idea general del estado de la pista del disco, en otras palabras fue un indicio para saber qué tan deteriorado se encontraba el disco aún en etapas tempranas. El diagrama mostrado en la Figura 1 es una descripción general del método empleado.

Discos de pruebas

Se eligieron cuatro discos de frenos del mismo modelo. Dos discos usados, de los cuales uno de ellos se encuentra fracturado por condiciones de trabajo y se muestra en la Figura 2.a, en este texto se identifica como disco 1. El siguiente disco de la Figura 2.b corresponde al disco 2, el cual presenta desgaste por el propio trabajo, pero sin daños aparentes. Los discos 3 y 4 de la Figura 2.c y Figura 2.d, respectivamente, son discos nuevos que aún no se han instalado, por lo que estos se utilizaron como modelo base a partir del cual se determinó el estado de los discos anteriores.

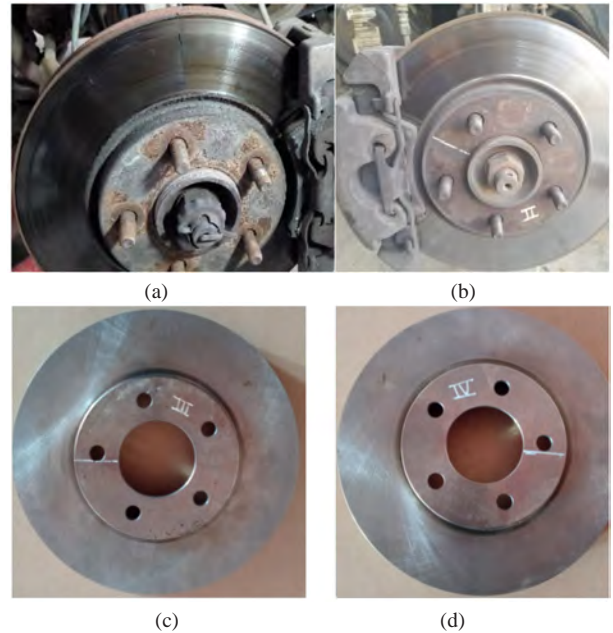


Figura 2 Discos de prueba. (a) Disco 1 de pruebas fracturado. (b) Disco 2 de pruebas usado sin fractura. (c) Disco nuevo de pruebas 3. (d) Disco nuevo de pruebas 4.

Procedimiento para analizar los discos

El procedimiento inicia con la limpieza del disco, por medio de un solvente mecánico, removiendo polvos, lodos y otros agentes contaminantes, también fueron marcados con una línea, que se usó como punto de inicio, posteriormente se realizó un examen visual del disco y se procedió a montar el disco en la máquina de pruebas.

El experimento se realizó en una habitación cerrada con condiciones mínimas de ruido, con una temperatura de 20°C y a una presión de 101.6kPa. Se realizaron dos tipos de pruebas a fin de obtener comparativas, la primera consistió en introducir la máquina en una caja acústica y sellarla perfectamente, una vez dentro se procedió con el estudio, mientras que la otra prueba se realizó sin la caja acústica. Ambas pruebas se realizaron un total de 10 veces, es decir, se obtuvieron 20 pruebas por disco. Las pruebas se realizaron en el mismo ambiente de trabajo, (es decir, con condiciones mínimas de ruido y temperatura de 20°C, a una presión de 101.6kPa), por lo que se omitieron perturbaciones ambientales y externas al disco, como por ejemplo la masa del micrófono de contacto y se consideraron como constantes a lo largo del estudio y para los 4 discos. En el texto se omite el proceso de selección de los datos, así como el proceso estadístico realizado, puesto que el fin del escrito es mostrar la comparativa entre los discos y la variación de su espectro.

Discusión y análisis de resultados

Espectro de frecuencias

Se aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener el espectro de frecuencias. Estrictamente hablando se obtuvieron 12 señales, propias de cada sector, así que se

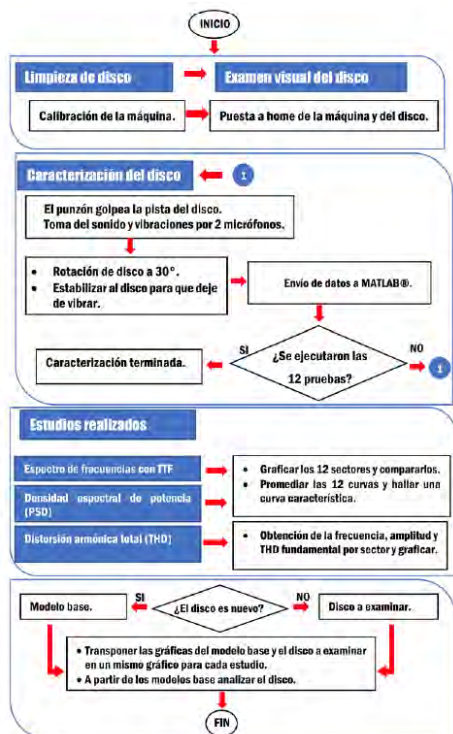


Figura 1 Metodología de análisis de los discos.

promediaron y se obtuvo una curva característica de todo el disco, en la Figura 3, se aprecia dicha curva en color negro. Compárese la gráfica de la Figura 4, la cual corresponde al disco 1 (disco dañado), con la gráfica de la Figura 3, correspondiente a un disco nuevo. Ambas gráficas corresponden a la cara frontal del disco de frenos con el micrófono de contacto. Nótese como las curvas del disco 3 (Figura 3) convergen a frecuencias específicas y presentan amplitudes similares entre sí, caso que no se da con las curvas del disco 1 (Figura 4), pues cada sector, muestra picos en un mayor número de frecuencias. En otras palabras, la energía se distribuye de manera no uniforme, para cada pico de frecuencias y con niveles diferentes en amplitud para cada sector. Además, las amplitudes del disco 1 fueron más bajas que las del disco 3. Otro punto a resaltar fue el corrimiento a las bajas frecuencias de la Figura 4, en comparativa a la gráfica de la Figura 3. Estas características se identificaron a lo largo del estudio y con ambos micrófonos.

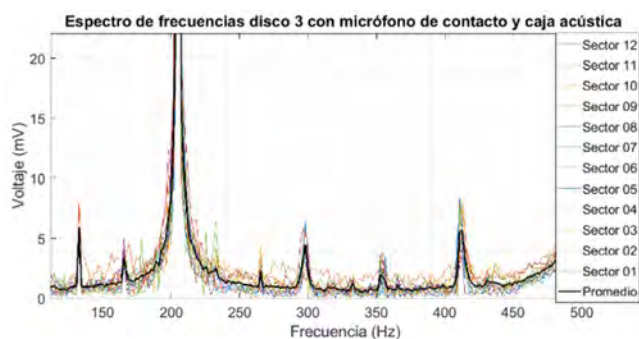


Figura 3 Espectro de frecuencias del disco 3.

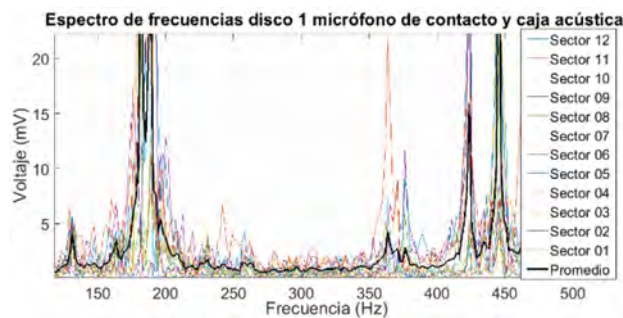


Figura 4 Espectro de frecuencias del disco 1.

Espectro de frecuencias con el micrófono de aire

En la Figura 5, se muestra una gráfica comparativa de los 4 discos, este estudio se realizó en la cara frontal del disco captando la vibración con un micrófono de aire, empleando la caja acústica, para reducir la interferencia de ruido ambiental. Esta gráfica se tomó en una pequeña muestra del espectro, en el intervalo de 0Hz a 850Hz y para amplitudes de no más de 12mV. En este análisis la manera de estudiarlo, es atender los intervalos en donde se presentan los máximos de cada curva, que superan de manera notoria la forma de esta, esto sin poner demasiado interés en el valor de las amplitudes de las curvas, ya que, por la naturaleza del estudio, este suele variar abruptamente. Existen frecuencias base en las cuales

se presentaron amplitudes altas. Las primeras se presentaron alrededor de 200Hz, nótese el corrimiento de los discos 1 y 2 a las frecuencias bajas en comparativa a los discos nuevos 3 y 4. Las siguientes se presentaron en el intervalo de 400Hz a 600Hz, donde se presentaron las primeras frecuencias de falla, del disco 1 a 424Hz, la siguiente se presentó a 447Hz, en los discos 1 y 2. El siguiente desfase se presentó en el intervalo de 650Hz a 820Hz, donde el corrimiento respecto a los discos en buen estado fue de 100Hz.

Gráfica comparativa de los 4 discos con micrófono de aire y caja acústica

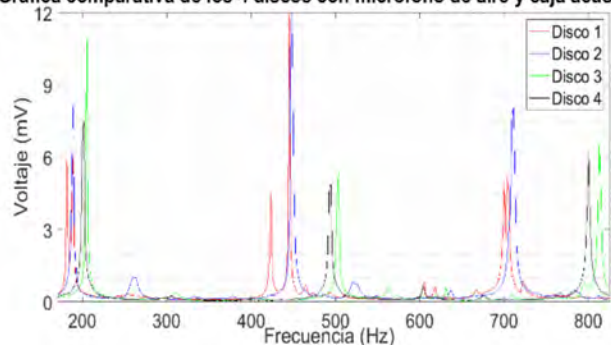


Figura 5 Espectro de frecuencias con micrófono de aire y caja acústica.

La gráfica de la Figura 6, muestra las frecuencias de 940Hz y 973Hz, donde se encontraron nuevas frecuencias de falla. Las frecuencias de falla más evidentes se dieron en el intervalo de 1400Hz a 1550Hz.

Gráfica comparativa de los 4 discos con micrófono de aire y caja acústica

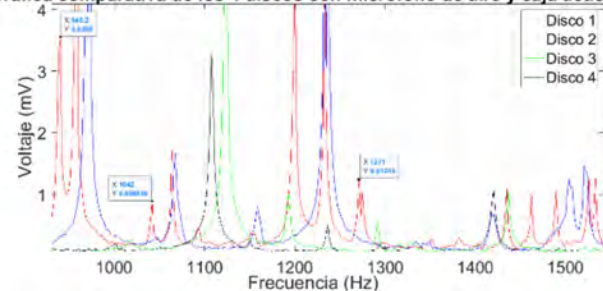


Figura 6. Espectro de frecuencias en el intervalo de 900 Hz a 1550 Hz.

En las frecuencias de 1042Hz y 1271Hz, se presentaron frecuencias de falla del disco 1 con características diferentes a las anteriores, éstas se dieron en un rango de aproximadamente 5Hz con un desfase evidente del resto de discos, téngase en cuenta que el disco 1 es el único con fractura evidente.

Espectro de frecuencias con el micrófono de contacto

En la Figura 7, se muestra el espectro de frecuencias del disco, la vibración se captó con un micrófono de contacto y sin la caja acústica. Los picos de amplitud, se encontraron en el mismo intervalo que en las gráficas del micrófono de aire. Una diferencia a mencionar es que se registraron mayores amplitudes para los discos en buen estado, además, el disco con menores amplitudes fue el disco 1. Con este micrófono

fue posible registrar mayores frecuencias de falla. De manera muy evidente para el intervalo de 1800Hz a 2500Hz y en la frecuencia de 2620Hz, apareció una frecuencia de falla de gran amplitud que no se percibió con el micrófono de aire. Las frecuencias de falla mostradas en las gráficas anteriores se siguieron presentando con este micrófono. Otro punto a mencionar es la distribución del espectro de frecuencias del disco 1, pues, aunque sus amplitudes son menores, se presentaron mayores picos de amplitud en varias frecuencias, caso que no se dio en los discos nuevos.

Gráfica comparativa de 4 discos con micrófono de contacto sin caja acústica

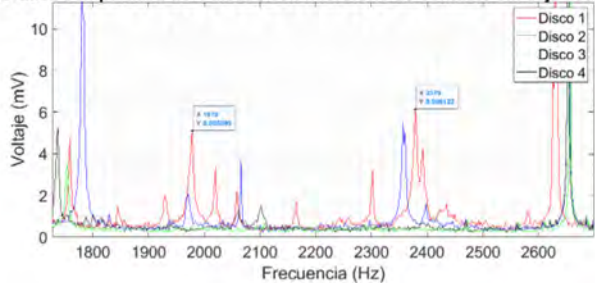


Figura 7 Espectro de frecuencias con micrófono de contacto sin caja acústica.

Espectro de potencia

El análisis del espectro de potencias amplificó las frecuencias de falla y también permitió identificar los picos de las frecuencias base de los discos. Este análisis proporciona resultados visuales más claros. El procedimiento para determinar el espectro de potencia fue el ya descrito anteriormente. A partir de este estudio se consideraron de manera indistinta las gráficas de ambos micrófonos y los estudios con y sin caja acústica, pues los resultados fueron indistintos.

La Figura 8, muestra el espectro de potencia para la cara frontal de los discos 1 y 3, el disco 1 se desfasó hacia las frecuencias bajas y al igual que en los casos anteriores este desfase aumentó a medida que las frecuencias lo hicieron, otro punto a notar, es la amplitud superior del disco 3 en comparativa al 1, también téngase en cuenta que el disco 3 presentó menos picos de amplitud que el disco 1, lo cual explica porque existe mayor energía en los principales picos del disco 3.

La Figura 9, muestra el mismo análisis y se aprecian claramente las frecuencias de falla del disco 1 en 3500Hz, 4900Hz, 6000Hz y 7800Hz. Al igual que la gráfica anterior, esta gráfica muestra que la energía del disco 1 estaba distribuida en muchos más puntos, por lo que la energía en cada uno de ellos fue menor, caso contrario al que se dio en discos en buen estado, donde la energía fue mayor, pero con menos picos.

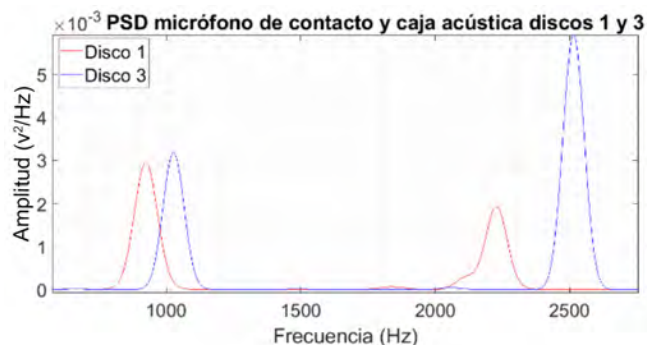


Figura 8 Espectro de potencia discos 1 y 3 con micrófono de contacto y caja acústica.

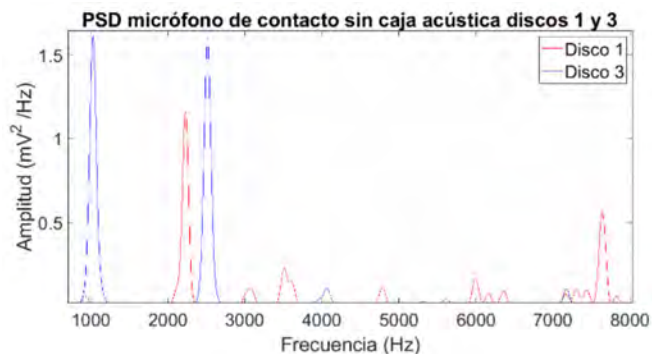


Figura 9 Espectro de potencia discos 1 y 3 con micrófono de contacto sin caja acústica.

Análisis de la distorsión armónica total

Este análisis se realizó con el fin de determinar la frecuencia fundamental de cada sector, así se obtuvieron 12 muestras por disco que caracterizaron toda su superficie. La Figura 10, muestra el estudio de THD de uno de los sectores de los discos nuevos, nótese que la frecuencia fundamental aparece de color azul y a partir de esta se van marcando sus armónicos de menor amplitud en color rojo. Estudiar estas gráficas es complicado, por ello, se usó la frecuencia fundamental, la amplitud y el porcentaje de THD fundamentales de cada sector del disco. Estos datos se guardaron en 3 vectores y se compararon con los valores base determinados a partir de los discos nuevos.

La Figura 11, muestra el estudio de THD con el micrófono de aire y la caja acústica, este examen fue el más rápido para detectar de manera visual el disco dañado. Nótese en el primer gráfico de amplitudes, que la variación de cada sector del disco 1 fue muy significativa en comparación al resto, indicando que su superficie fue discontinua, además este disco presentaba una ruptura, lo que afectó toda la superficie de la pista. Por otro lado, el disco 2 presentó la mayor amplitud de las curvas, este disco si bien no está fracturado si posee desgaste propio del trabajo. Las amplitudes de las frecuencias fundamentales también pudieran indicar el tipo de daño que este presenta, pues el disco 2 al estar desgastado disminuye su peso y el grosor de la pista, en otras palabras, las altas frecuencias pudieran estar asociadas a estas características,

otro punto a destacar para el disco 2 es como los cambios entre cada sector son suaves, igual que en los discos nuevos, indicando que la pista se encuentra uniforme en su superficie. Por otro lado, los discos 3 y 4 mostraron suavidad en su superficie, además presentaron bajas amplitudes y siguen un mismo patrón de forma entre ellos con un ligero offset. En este análisis se tomó como primera instancia las amplitudes, pues al ser las de las frecuencias fundamentales son exactas en cuanto a la descripción de las características que dan del disco, hecho que no se da en los estudios anteriores. El siguiente gráfico corresponde a las frecuencias fundamentales, en este caso la manera para determinar el estado del disco se basó en las variaciones de un sector a otro por disco, pues al igual que con las amplitudes, las variaciones grandes son indicativo de daño. La segunda manera de determinar el estado del disco, consistió en realizar la comparativa del valor de sus frecuencias, nótese como los discos en buen estado presentaron frecuencias constantes de no más de 1kHz, mientras que el disco 2 presentó un valor de más de 2kHz, lo que puede estar asociado con el grosor de la pista del disco. Si se obtiene la media del disco 1 se determina una constante por encima de 1.5kHz, dato que también indica un daño en el disco.

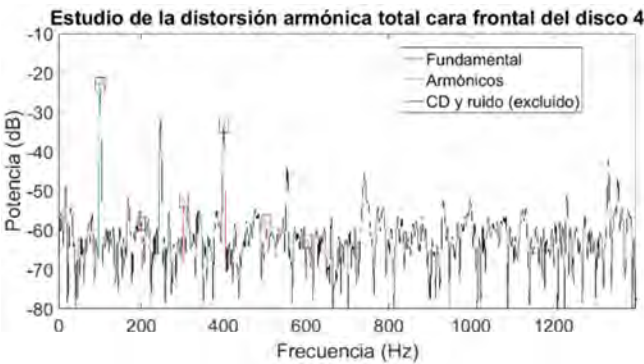


Figura 10 Gráfica del análisis de THD de uno de los discos nuevos.

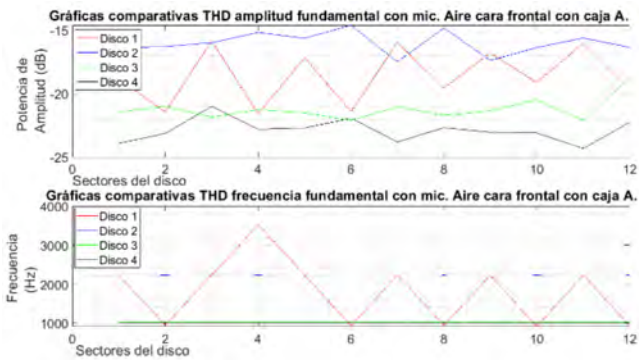


Figura 11 Análisis de THD, amplitud y frecuencia de los cuatro discos con micrófono de aire y caja acústica.

El gráfico de la Figura 12, muestra el porcentaje de THD de las señales dadas, para este caso, los discos que presentaron un porcentaje mayor de THD son los discos en buen estado, mientras que los más deteriorados no lo presentaron.

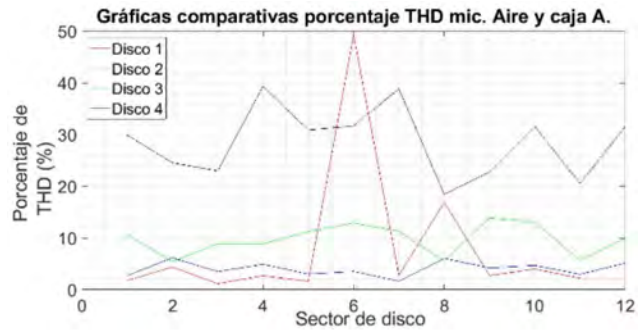


Figura 12 Análisis de THD de los cuatro discos con micrófono de aire y caja acústica.

La Figura 13 y Figura 14 presentan el mismo análisis, nótese como cumple las características del razonamiento anterior. Las amplitudes de los discos 1 y 2 son mayores que los discos nuevos, además el disco 1 siguió presentando grandes diferencias entre sus sectores. Por otro lado, los discos 3 y 4 siguieron permaneciendo constantes y presentaron menor amplitud sus frecuencias fundamentales. Para el caso del gráfico de las frecuencias fundamentales, los discos 1 y 2 presentaron variaciones grandes, mientras que los discos nuevos siguieron presentando frecuencias constantes.

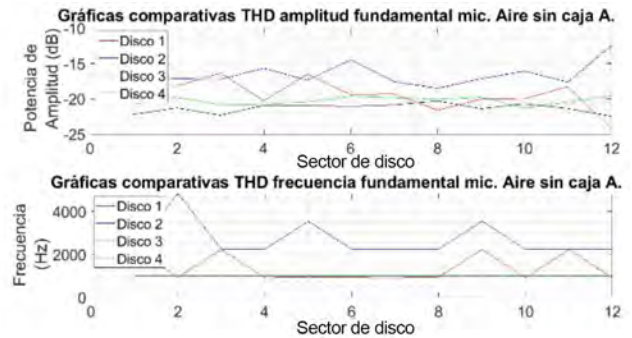


Figura 13 Análisis de THD, amplitud y frecuencia de los cuatro discos con micrófono de aire sin caja acústica.

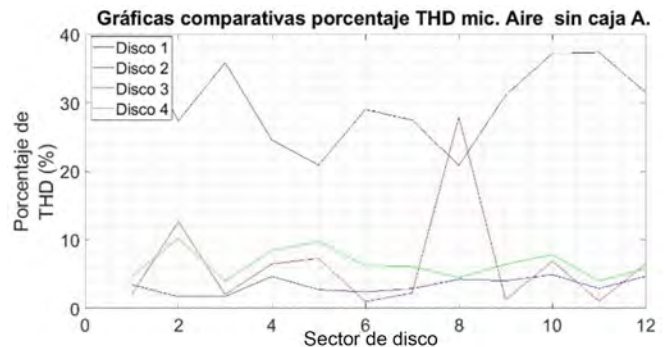


Figura 14 Análisis de THD de los cuatro discos con micrófono de aire sin caja acústica.

Conclusiones

En el análisis del PSD al hacer la comparativa entre ambos micrófonos, el micrófono de aire tiende a amplificar las frecuencias secundarias y el micrófono de contacto práctica-

mente las desprecia, estas características pueden ser importantes para determinar el estado del disco. Se considera que para un tratamiento completo se emplearían ambos micrófonos, dado que se complementan entre sí.

Como trabajos futuros, se propone una investigación detallada y una amplia base de datos, con características específicas del tipo de daño del disco, para establecer parámetros generales. Así, el estudio del espectro de frecuencias podría dar información más detallada del estado del disco tal como rugosidad o grosor. En el análisis del espectro de frecuencias se hallaron frecuencias que presentan una mayor amplitud para un disco dañado, a éstas las llamamos "frecuencias de falla" y podrían dar información específica del tipo de daño que tiene el disco, por ejemplo: fractura, grosor y rugosidad, entre otros.

Con esta misma idea el análisis de THD podría ser capaz de detectar el área específica donde se encuentre la falla. Nótese, que el porcentaje de THD del disco 1 es nulo o mínimo. Obsérvese la Figura 15, en el sector donde se encuentra la fractura del disco 1, se presentó la frecuencia fundamental más alta, las curvas de amplitud y frecuencia están en fase, pero únicamente en el lugar de la falla se desfazaron 180°.

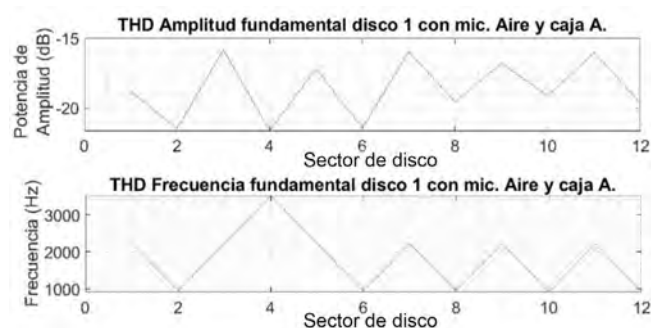


Figura 15 Análisis de THD, amplitud y frecuencia del disco 1 con micrófono de aire y caja acústica.

Es importante considerar los 2 puntos anteriores, ya que pueden ser referencia para hallar uno o varios sectores específicos donde estén las fallas, sin embargo, se requiere tomar más puntos en consideración como porcentaje THD, variaciones de amplitudes y frecuencias entre cada sector, forma de las curvas de frecuencia y amplitud, así como sus valores. Es necesario desarrollar un algoritmo considerando estos puntos para localizar el lugar de la falla. Con una base de datos de los diferentes estudios y con un amplio número de muestras sería posible establecer técnicas y métodos de IA, para determinar de manera específica el tipo de daño que tiene el disco y establecer un porcentaje de vida útil.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Por el apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] D. Debela, «Review on factors causes road traffic accident in Africa,» *Global Journal of Applied Sciences and Technology*, vol. 1, pp. I(1), 103, 2019.
- [2] S. Ghaleh, M. Omidvari, P. Nassiri y S. M. M. Lavasani, «Pattern of safety risk assessment in road fleet transportation of hazardous materials (oil materials),» *Safety science*, pp. 116, 1-12, 2019.
- [3] J. Kamla, T. Parry y A. Dawson, «Analysing truck harsh braking incidents to study roundabout accident risk,» *Accident Analysis & Prevention*, pp. 122, 365-377, 2019.
- [4] N. M. Pawar, R. K. Khanuja, P. Choudhary y N. R. Velaga, «Modelling braking behaviour and accident probability of drivers under increasing time pressure conditions,» *Accident Analysis and Prevention*, p. 136, 2020.
- [5] A. R. Prabowo, T. Putranto y J. M. Sohn, «Simulation of the behavior of a ship hull under grounding: Effect of applied element size on structural crashworthiness,» *Journal of Marine Science and Engineering*, p. (7) 270, 2019.
- [6] T. Zou, Z. Yu, M. Cai y J. Liu, «Analysis and application of relationship between postbraking- distance and throw distance in vehicle-pedestrian accident reconstruction,» *Forensic science international*, pp. 207(1-3), 135-144, 2011.
- [7] M. Boniardi, F. D'Errico, C. Tagliabue, G. Gotti y G. Perricone, «Failure analysis of a motorcycle brake disc,» *Engineering Failure Analysis*, pp. 13(6), 933-945, 2006.
- [8] F. Bagnoli, F. Dolce y M. J. Bernabei, «Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs,» *Engineering Failure Analysis*, pp. 16(1), 152-163, 2009.
- [9] A. Mazzù, L. Provezza, N. Zani, C. Petrogalli, A. Ghidini y M. Faccoli, «Effect of shoe braking on wear and fatigue damage of various railway wheel steels for high speed applications,» *Wear*, p. 434, 2019.
- [10] Z. Wang, J. Han, J. P. Domblesky, Z. Li, X. Fan y X. Liu, «Crack propagation and microstructural transformation on the friction surface of a high-speed railway brake disc,» *wear*, pp. 428, 45-54., 2019.
- [11] A. M. Reyes, C. J. D. Cruz, L. J. Diaz y E. M. Oleario, «Microstructure evaluation of the damage and wear characteristics of a failed disc brake of a provincial bus,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 16, 1789-1795, 2019.

- [12] X. Ma, S. Fan, H. Sun, C. Luan, J. Deng, L. Zhan y L. Cheng, «*Investigation on braking performance and wear mechanism of fullcarbon/ ceramic braking pairs.*» Tribology International, p. 142, 2020.
- [13] W. Sawczuk, A. Merkisz-Guranowska y A. M. Rilo Cañas, «*Assessment of disc brake vibration in rail vehicle operation on the basis of brake stand.*» Eksploatacja i Niezawodność, p. 23(2), 2021.
- [14] R. Jegadeeshwaran y V. Sugumaran, «*Fault diagnosis of automobile hydraulic brake system using statistical features and support vector machines.*» Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 52, 436- 446, 2015.
- [15] L. R. Salas-Rodríguez, *Identificación de fallas en bujías por desgaste de electrodos en automóviles a través de la extracción de características de audios y clasificación K-NN y SVM*, Zacatecas: Tesis de maestría, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, 2019.
- [16] V. P. Sergienko y S. N. Bukharov, «*Vibration and Noise in Brake Systems of Vehicles. Part 2: Theoretical Investigation Techniques.*» Journal of Friction and Wear, pp. 216-226, 2009.
- [17] V. P. Sergienko, S. N. Bukharov y S. F. Mel'nikov, «*Vibration and Noise in Brake Systems of Mobile Vehicles. Part 3: Forced Low Frequency Vibration (A Review).*» Journal of Friction and Wear, pp. 293-307, 2012.
- [18] X. Liu, H. Wang, Y. Shan y T. He, «*Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Disc Brake Squeal Using Improved Hilbert- Huang Transform.*» de FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing, China, 2012.
- [19] J. Heo, Z. Yang, W. Xia, S. Oterkus y E. Oterkus, «*Free vibration analysis of cracked plates using peridynamics.*» Ships and Offshore Structures, pp. S220-S229, 2020.
- [20] H. J. Shin, I. P. Cha, M. S. Lee, S. K. Ko, H. G. Kim y L. K. Kwac, «*A Study on the Nondestructive Evaluation of Carbon/ Carbon Brake Disks Using Infrared Thermography.*» Polymers & Polymer Composites, pp. 233-240, 2014.