



Benemérita Universidad Autónoma  
de Puebla

Facultad de Ciencias de la  
Electrónica



Desarrollo e implementación de prototipo para la  
verificación de la integridad mecánica de discos de  
freno automotrices.

Para obtener el grado de:  
Licenciatura en Ingeniería en Mecatrónica

Presenta:

Cristian Sebastián Gómez Morales

Director de tesis:

Dr. Manuel Aparicio Razo

Co-asesor:

Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández

Puebla, Puebla Abril 2022.

## Agradecimientos

*Agradezco a Dios y a la vida por haber tenido la oportunidad de lograr una de mis más grandes metas y culminarla con éxito.*

*Por el apoyo incondicional de mis padres a lo largo de esta travesía, gracias a su confianza y paciencia logré superar muchos retos que tuve por delante, agradezco por sus consejos, sabiduría y por siempre ayudarme a ver la vida desde otra perspectiva, por darme las herramientas morales y los valores que me han guiado hasta ahora.*

*Agradezco el apoyo de mis hermanas, por sus consejos, por su guía y por recordarme siempre la importancia de la familia.*

*A mis asesores de tesis por la formación dada en las aulas, por darme la oportunidad de trabajar a su lado y por la confianza dada a lo largo de este proyecto, gracias a sus consejos y conocimientos pude concluir satisfactoriamente este trabajo.*

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por la formación escolar y profesional, por la oportunidad de ser parte de esta gran familia.*

# CONTENIDO

Agradecimientos .....	2
1. Introducción.....	6
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Justificación .....	8
1.3. Objetivo general.....	9
1.3.1. Objetivos específicos.....	9
1.4. Estructura del documento .....	9
1.5. Análisis de accidentes automovilísticos.....	10
2. Marco Teórico .....	12
2.1. Antecedentes .....	12
2.1.1. Mantenimiento predictivo en la industria.....	12
2.1.2. Metodología para el diagnóstico de fallas en rodamientos usando el análisis de densidad de potencia (PSD) .....	13
2.1.3. Identificación de espectros acústicos en motores de combustión interna .....	14
2.1.4. Estudio acústico en vehículos (NVH).....	15
2.2. Estado del arte.....	16
2.2.1. Detector digital de defectos por ultrasonidos y sus aplicaciones .....	16
2.2.2. Método para inspeccionar neumáticos que permite detectar in situ fallas .....	17
2.2.3. Equipo para inspección automática de piezas .....	17
2.2.4. Equipo para pruebas en ruido de frenos .....	18
2.3. Sistema de frenos .....	19
2.3.1. Sistema de frenos de disco .....	19
2.3.2. Sistema de frenos de tambor .....	20
2.3.3. Funcionamiento general del sistema de frenos .....	21
2.3.4. Revisión general del sistema de frenos .....	24
2.3.5. El ruido y problemas en el sistema de frenos.....	24
2.4. Disco de frenos .....	27
2.4.1. Composición de discos de frenos .....	27
2.4.2. Geometría de un disco de frenos .....	28
2.4.3. Tipos de discos de frenos .....	30

2.4.4. Principales problemas en discos de frenos automotriz.....	34
2.5. Acústica .....	39
2.5.1. Fenómenos de las ondas sonoras.....	40
2.5.2. Propiedades de las ondas sonoras.....	43
2.5.3. Espectro de frecuencias .....	45
2.5.4. Densidad espectral de potencia (PSD) .....	45
2.5.5. Distorsión armónica total (THD) .....	46
3. Desarrollo de prototipo.....	48
3.1. Sistema mecánico .....	48
3.1.1. Sistema de anclaje del disco.....	48
3.1.2. Sistema de golpeteo.....	50
3.1.3. Sistema de filtrado de ruido .....	52
3.1.4. Soporte universal de pruebas.....	53
3.1.5. Caja acústica.....	54
3.2. Sistema electrónico .....	54
3.2.1. Sistema de alimentación.....	54
3.2.2. Sistema de potencia.....	55
3.2.3. Transductores .....	56
3.2.4. Preamplificador .....	59
3.2.5. Tarjeta de comunicación y control .....	62
3.3. Sistema de control y comunicación .....	63
3.3.1. Modelado de un motor CD.....	63
3.3.2. Obtención de parámetros físicos de un motor CD .....	67
3.3.3. Controlador Proporcional Integral .....	72
4. Validación y resultados .....	75
4.1. Funcionamiento de la máquina .....	75
4.2. Método de análisis de discos de frenos.....	76
4.2.1. Discos de pruebas.....	76
4.2.2. Procedimiento para analizar los discos .....	77
4.3. Espectro de frecuencias.....	78
4.3.1. Espectro de frecuencias con el micrófono de aire.....	80

4.3.2. Espectro de frecuencias con el micrófono de contacto .....	81
4.4. Espectro de potencia .....	84
4.4.1 Análisis del espectro de potencia con el micrófono de aire .....	84
4.4.2. Análisis del espectro de potencia con el micrófono de contacto.....	86
4.5. Análisis de la distorsión armónica total .....	88
5. Conclusiones y recomendaciones finales .....	92
5.1. Espectro de potencia .....	92
5.1.1. Generalidades .....	92
5.1.2. Específicas.....	92
5.2. Espectro de frecuencias.....	94
5.2.1. Generalidades .....	94
5.2.2. Específicas.....	94
5.3. Análisis de la distorsión armónica total .....	95
5.4. Trabajo futuro y recomendaciones.....	96
Anexo A. Cálculo de engranes cónicos .....	98
.....	99
Anexo B. Diagrama eléctrico preamplificador.....	100
Anexo C. Algoritmo para sintonizar un controlador PI [46].....	101
Referencias .....	102

## 1. Introducción

En México la industria automotriz es una de las más importantes solo por debajo de la industria alimentaria [1]. El sector automotriz tiene una participación del 3% del PIB nacional y 16% de participación del PIB manufacturero lo que representa el 22% del empleo manufacturero a nivel nacional [2]. De acuerdo al INEGI y AMIA desde el 2010 al 2017, el PIB de la industria automotriz creció 12.3%, lo que generó más de 800 mil empleos directos [1]. México es considerado uno de los mayores exportadores de vehículos y autopartes en el mundo brindando crecimiento continuo en diversas áreas de investigación y desarrollo de nuestro país, así surge la oportunidad para la creación de nuevas herramientas y técnicas y de esta manera se incentiva la creatividad y capacidad del investigador mexicano, para hacer frente no solo a las problemáticas del país, también a encarar y resolver problemas a nivel mundial.

La venta y producción de autos en México asciende anualmente, de acuerdo a cifras por el INEGI, en el año 2021 se registró una producción de 1,090,304 unidades en el periodo enero-abril y más de 83,000 unidades tan solo en el mes de abril [3]. El parque vehicular en México es grande, ya que hasta el año 2019 se tenían más de 50 millones de autos circulando en el país y de estos 34,649,011 fueron automóviles [4], pero lo que realmente preocupa es el estado en el que se encuentran los vehículos.

Un estudio realizado por la universidad de Pretoria en Sudáfrica, muestra que países en vías de desarrollo están más susceptibles a accidentes automovilísticos, esto debido a que se usan más autos antiguos que nuevos por lo que están más propensos a fallas mecánicas. "Los datos obtenidos de las unidades de respuesta a accidentes (ARU) indican que los neumáticos y los frenos fueron los principales contribuyentes a las fallas mecánicas que provocaron accidentes en la región de Pretoria (provincia de Gauteng). Sin embargo, el porcentaje informado de aproximadamente el 3% es comparable a estadísticas similares de países desarrollados " [5]. Estos datos son preocupantes y de aquí surge la necesidad de establecer métodos y sistemas que permitan la detección oportuna de fallas mecánicas y evitar accidentes automovilísticos. Cuando acudimos a la revisión del sistema de frenado se inspeccionan elementos como el cilindro maestro, líquido de frenos en buenas condiciones y

con la cantidad suficiente, grosor y calidad de las balatas, traseras y delanteras y de ser necesario hacer su respectivo cambio o ajuste y por último inspección del tambor o disco dependiendo del modelo del automóvil, comúnmente se realiza un examen visual considerando rugosidad del disco, grosor o algún daño por fractura y dependiendo de los resultados se opta por cambiar el disco o realizar una rectificación, sin embargo este diagnóstico no es fiable, pues en la actualidad los especialistas en autos no cuentan con el equipo necesario que permita un análisis correcto.

El ultrasonido es una técnica que ha cobrado relevancia en la industria debido a su bajo costo, rapidez y eficiencia al momento de detectar fallas como en rodamientos, fugas de presión o vacío e instalaciones eléctricas [6]. Esta técnica ha dado seguridad al desarrollo de nuevas tecnologías acústicas para la detección de fallas en la industria automotriz, tal como la implementación de redes neuronales para la detección de fallas en los motores de los autos [7]. Así mismo, se ha usado la acústica para caracterizar fallas comunes o específicas de elementos indispensables, como las bujías a fin de obtener una comparativa con el consumo de combustible [8].

### **1.1. Planteamiento del problema**

El sistema de frenado de los automóviles es crucial, ya que de este depende la seguridad tanto del usuario, como del peatón y de los autos externos, una mínima falla y puede ser mortal para cualquiera de ellos, es por eso que se requiere de equipos seguros que permitan una verificación fiable de los frenos y específicamente los discos de freno automotriz. Mas aun, este equipo debe de cumplir con las características necesarias para realizar pruebas no destructivas, un disco de frenos debe de estar en óptimas condiciones desde su manufactura hasta en el uso habitual, por tal razón se debe de tener la flexibilidad para estudiar el estado del disco en el momento que se considere pertinente, ya sea en la fábrica o en el centro de verificación automotriz. Por la versatilidad del estudio, las pruebas deben de ser de bajo costo, pero de buena calidad.

El uso de la acústica en el mantenimiento predictivo ha ido cobrando relevancia gracias a sus bajos costos, rapidez y precisión [6]. Además, es una prueba no destructiva por lo que puede realizarse tantas veces como sea requerida, así se puede analizar el disco de freno automotriz a lo largo de su vida útil y determinar en qué momento realizar el reemplazo. Por

tal motivo se plantea el uso de la acústica en el espectro audible para realizar la inspección del área de frenado del disco de freno automotriz y determinar el estado en el que se encuentra.

## **1.2. Justificación**

La creciente industria automotriz en nuestro país es un factor sustancial para el desarrollo de nuevas tecnologías, que abren un nuevo campo de estudio e investigación. La propuesta planteada tiene la finalidad de generar un nuevo campo de investigación y de desarrollo para la verificación correcta de discos de frenos automotriz por medio del procesamiento del sonido, pues actualmente no se dispone de estos equipos en el mercado nacional.

El desarrollo de tecnología mexicana permite una independencia al investigador y al sector automotriz mexicano pues si bien somos pioneros en esta área la mayor parte de equipos y maquinaria se compra en el extranjero lo cual reduce los márgenes de utilidad ya que las áreas de oportunidad en esta industria, están en desarrollar tecnología para ser proveedores con diseño de productos y procesos de fabricación [9].

El uso de la acústica para pruebas de verificación en discos tiene la ventaja de ser un método no destructivo y con el procesamiento adecuado del sonido se pueden obtener resultados confiables que permitan validar el estado de un disco. Por esta razón esta tecnología es muy flexible y se podría implementar en diversas etapas de la manufactura, pues bien puede servir como un método alterno, para validar discos nuevos de manera rápida, en una primera etapa, en una línea de producción y evitar análisis más complejos y costosos.

Por otro lado, la parte medular del prototipo es el tratamiento del sonido por lo que es un sistema totalmente seguro y práctico para el usuario. Al trabajar en el rango audible los elementos del sistema son más robustos y accesibles en comparación a maquinas que trabajan con ultrasonido por lo que los costos de fabricación e implementación son bajos. Tal característica abre un mercado de oportunidad a centros del área automotriz para realizar verificaciones seguras y confiables y con esto resolver un problema directo en materia de seguridad para los usuarios finales, por medio de la implementación de principios de acústica y técnicas matemáticas para el tratamiento de señales.



### **1.3. Objetivo general**

Desarrollar e implementar un sistema prototipo, basado en el procesamiento del sonido de la vibración del disco, para la verificación de la integridad mecánica en discos de frenos automotrices.

#### **1.3.1. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un sistema mecánico para pruebas de discos automotrices.
- Realizar sistema electrónico para adquisición de datos y control de la máquina.
- Desarrollar e implementar un sistema de control para el movimiento de dos motores CD.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos de diferentes discos automotrices.

### **1.4. Estructura del documento**

Este documento consta de 5 capítulos donde se expone la importancia del sistema de frenos automotriz, así como la propuesta de un prototipo de máquina que permite realizar pruebas seguras a los discos de frenos.

En el primer capítulo se hace la presentación de la tesis, se plantea y justifica el tema, se describe de manera general la importancia de la industria automotriz en México y las consecuencias de su impacto, también se muestra un análisis de los accidentes automovilísticos a fin de obtener las principales causas por las que suceden.

El capítulo dos consta del marco teórico, se presenta el estado del arte de las máquinas actuales, también se muestra la teoría necesaria en la cual se apoya la tesis, se describe el sistema de frenos y sus elementos principales, también se realiza un estudio de los discos de frenos, desde su composición hasta sus tipos y los principales problemas que se presentan y finalmente se muestra la teoría del sonido así como sus propiedades y los métodos matemáticos empleados en este documento.

En el capítulo tres se presenta la propuesta del prototipo para inspeccionar los discos, se abordan las diferentes etapas del diseño y manufactura del mismo, así como la serie de cálculos realizados para su fabricación.

El capítulo cuatro consta de la implementación del prototipo, y se detallan las pruebas que se hicieron tanto en la maquina como en los discos, de igual manera se presentan los resultados obtenidos de cada análisis y se valida el prototipo.

El capitulo cinco habla acerca de las conclusiones y recomendaciones finales. Explica de manera detallada las conclusiones de cada análisis y se dan sugerencias para tratar los discos, además se habla del trabajo futuro y los alcances que tiene esta tecnología.

### **1.5. Análisis de accidentes automovilísticos**

De acuerdo a cifras obtenidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) cada año mueren alrededor de 1.3 millones de personas en el mundo en accidentes de tránsito y entre 20 y 50 millones padecen traumatismos, causantes de alguna discapacidad [10].

“El 93 % de las muertes por accidentes de tránsito tienen lugar en los países de ingresos bajos y medianos (donde se halla menos de la mitad de los vehículos matriculados en todo el mundo)”. México ocupa el séptimo lugar a nivel mundial y el tercero en Latinoamérica en muertes por siniestros viales, en otras palabras, mueren alrededor de 22 jóvenes entre 15 y 29 años de edad al día, siendo esta la principal causa de muertes de jóvenes en nuestro país [11].

Un estudio realizado por la Secretaría Distrital de la Movilidad Departamento de Cundinamarca en Bogotá Colombia. Muestra como principales causas de accidentes automovilísticos: bajos niveles de control vial, vías deficientes para el creciente flujo vehicular y falta de capacitación al usuario para interactuar en el tránsito. Al analizar los factores de accidentalidad se encontró que 60% de factores que promueven los accidentes son debidos al conductor y/o peatón, el 26% a ciclistas y motociclistas, 6% a las vías y el 4% al vehículo. De estos porcentajes, los accidentes que mayormente se presentan son choques, atropellos y volcamientos. Las principales causas fueron a errores cometidos por el conductor y a las vías en mal estado [12].

Por otra parte, un estudio de tesis presentado por la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca en Ecuador, identifico tres factores básicos en accidentes: factor humano, factor mecánico y factor ambiental [13]. De igual manera se identificó el factor humano como el principal causante de accidentes, esto debido a que el conductor es el único medio de control

en el automóvil y la toma de decisiones de su parte es la causa directa que repercute en las acciones, por tal razón se debe dar énfasis en los dos factores restantes pues en la mayoría de accidentes intervienen como causa directa o indirecta más de un factor relacionado con los elementos hombre-máquina-medio [13].

De igual manera, un proyecto técnico de análisis de accidentes, provocados por fallas mecánicas, realizado por esta misma universidad, muestra un estudio realizado por una empresa estadounidense, indicando que los accidentes por fallas mecánicas son uno de los más comunes en los Estados Unidos y se pueden prevenir únicamente realizando el mantenimiento periódico del vehículo del sistema de frenos, neumáticos, limpiaparabrisas, faros y dirección pues de acuerdo a los autores estos son los más influyentes en estos accidentes [14].

En este mismo proyecto de investigación, también se presenta un estudio realizado por la Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras de los Estados Unidos (NHTSA, por sus siglas en inglés), identificando como motivo principal el sistema de neumáticos/ruedas-relacionados y Sistema de frenos-relacionados. De acuerdo a este estudio el 2% fueron ocasionados por alguna falla mecánica, representado así 44,000 accidentes y de estos 25,000 debidos a fallas en sistema de ruedas y frenos [14].

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1. Mantenimiento predictivo en la industria

Existen dos tipos de mantenimiento en la industria, el mantenimiento correctivo, el cual es el encargado de reparar la maquinaria que llega a fallar y el mantenimiento preventivo el cual tiene la función de detectar fallas en los equipos sin que estos detengan la producción. Dentro del mantenimiento preventivo se encuentra una técnica de suma importancia, el mantenimiento predictivo. Un artículo presentado por la Universidad Tecnológica de Pereira, en Colombia [15], señala al mantenimiento predictivo como una técnica eficiente para prevenir fallas en maquinaria industrial, éste realiza un seguimiento de la maquinaria a razón de obtener una caracterización de los equipos y predecir posibles fallas antes de que sucedan, lo que permite una toma de decisiones oportuna y programar su reparación sin que afecte a la producción.

El mantenimiento predictivo tiene un costo elevado de desarrollo, sin embargo, cada vez son más las industrias que utilizan este sistema debido a la ventaja de monitorear en cada instante el estado de la maquinaria, controlar su funcionamiento, programar la reparación del equipo sin afectar el proceso de producción, prolongar la vida útil de los equipos y en comparación a los costes que implica el mantenimiento correctivo este es mucho más bajo [15].

Una técnica que ha cobrado relevancia en el mantenimiento predictivo, es el análisis por ultrasonido. Consiste en el estudio de la onda de sonido de alta frecuencia generadas por la maquinaria cuando presentan alguna falla, una ventaja significativa es que, debido a su onda de longitud corta, estas se atenúan rápidamente por lo que permite detectar de manera precisa las averías aun en ambientes ruidosos. Con este estudio es posible detectar fricción en máquinas rotativas, detectar fallas o fugas en válvulas, detectar pérdidas de vacío, verificar la integridad de juntas de recintos estancos y la detección de arcos eléctricos [15].

### 2.1.2. Metodología para el diagnóstico de fallas en rodamientos usando el análisis de densidad de potencia (PSD)

Un artículo publicado por la revista Ingeniería Investigación y Tecnología, en el 2016 [16]. Muestra una nueva forma de analizar los rodamientos en una máquina síncrona mediante el uso del análisis de potencia.

Como se mencionó anteriormente el mantenimiento predictivo es una técnica que ha cobrado relevancia en la industria y por supuesto se ha instituido para tratar la fallas en rodamientos. Los autores proponen una nueva metodología para el diagnóstico empleando la acústica. También muestran una comparativa con modelos convencionales que usan acelerómetros piezoeléctricos. Las señales de vibración propias de rodamientos enmascaran componentes espectrales relacionadas con *la geometría del rodamiento, número de elementos rodantes, velocidad de rotación, ubicación de la falla y el tipo de carga aplicada.*

Las principales ventajas del uso de la acústica son [16]:

- Es sensible al movimiento, detectando fallas tempranas.
- Las pruebas se aplican a diversos mecanismos.
- Es una técnica no destructiva.
- Las fallas crean patrones particulares dependiendo de la falla.
- Pruebas rápidas y repetibles.

En el mismo artículo se hace mención a una investigación hecha por fabricantes donde se identifican 4 etapas de falla [16]:

- Etapa 1: Existe vibración en altas frecuencias, no hay grietas visibles y se da un incremento de temperatura.
- Etapa 2: Aparecen las primeras grietas y el rodamiento comienza a emitir sonido. Se presentan frecuencias propias de la falla.
- Etapa 3: La grieta se hace más pronunciada y en el análisis de frecuencias comienzan a aparecer bandas laterales alrededor de las frecuencias de falla.
- Etapa 4: Muy cerca de una falla catastrófica, el ruido propio de la falla es mayor y se da sobrecalentamiento.

### *Densidad espectral de potencia*

Es complicado analizar una señal en el dominio del tiempo debido a que tienden a ser opacadas por señales de gran amplitud a lo que comúnmente se le llama ruido, es por ello que estas señales se pasan al dominio de la frecuencia. Así es posible medir la energía en base a su frecuencia, que no es más que la amplitud del espectro al cuadrado, de esta manera podemos sumar las potencias medias de cada componente individual, a fin de obtener la potencia media de una señal periódica, para poder hacer una distribución de las potencias obtenidas en función de su frecuencia, obteniendo lo que se le llama la densidad espectral de potencia (PSD) [16].

El experimento consistió en analizar rodamientos sin falla y con grietas en la jaula del rodamiento. Para realizar las pruebas se construyó un banco de pruebas empleando un motor de inducción monofásico, acelerómetros piezoeléctricos y micrófonos omnidireccionales, montados en lugares estratégicos. El análisis de densidad espectral de potencia se usa en el diagnóstico de fallas debido a que permite detectar señales de alta y baja frecuencia. Los resultados mostraron que al trabajar con acelerómetros piezoeléctricos no es posible detectar los casos con y sin falla. Por otra parte, los resultados obtenidos por los micrófonos omnidireccionales fueron satisfactorios. Concluyendo que estos son una buena propuesta para el diagnóstico en rodamientos.

#### **2.1.3. Identificación de espectros acústicos en motores de combustión interna**

El trabajo de tesis presentado en la Universidad de Salesiana Cuenca en Ecuador [17], muestra una investigación para hallar una relación entre fallas de un motor y la captación del espectro acústico por medio de un micrófono unidireccional. El estudio consistió en analizar el espectro acústico de un motor de combustión interna de 4 cilindros, induciéndolo a diferentes fallas para obtener una comparativa con los resultados del sonido.

Para ello, se utilizó una cámara semi-aneecóica, en donde se introdujo el motor y se montó el micrófono en un lugar estratégico. Para la captación del sonido, se trabajó con LabView® y Matlab®, en donde se montaron algoritmos para convertir las señales acústicas a espectros acústicos en el dominio de la frecuencia, por medio de la transformada rápida de Fourier.

## *Experimentación*

Para realizar la captación del sonido en un periodo corto, es necesario conocer el tiempo mínimo en el cual deben de operar los micrófonos, para ello, dependiendo de la frecuencia de la muestra de sonido, se establece el tiempo requerido. Por lo que después de capturar el sonido se procedió a recortar la muestra, estas muestras fueron grabadas y representadas en LabView®, posteriormente fueron obtenidas las gráficas por medio de algoritmos en Matlab®. Para continuar con el experimento, se provocaron fallas en el motor a fin de observar el comportamiento. Los resultados mostraron de manera notoria la falla, en cada uno de los elementos y demuestran que los armónicos están íntimamente relacionados con el tipo de falla [17].

### 2.1.4. Estudio acústico en vehículos (NVH)

Actualmente la industria automotriz no solo tiene en cuenta la realización de vehículos rápidos, sino también toma en cuenta factores relacionados con el ahorro del combustible, disminución de recursos petroleros, exigencias medioambientales, interés por vehículos híbridos y eléctricos. Con estos últimos se han planteado objetivos específicos y se han abierto campos de investigación que anteriormente no se tenían en cuenta, tales como el estudio del ruido, vibraciones y asperezas (NVH) [18].

Una tesina de maestría, presentada en la Universidad Politécnica de Valencia en España [18], presenta el comportamiento del estudio de NVH en los vehículos, las fuentes de ruido en el motor, transmisión, escape, ruedas y sistema de frenado.

A diferencia del sonido las vibraciones han sido un factor importante en el diseño de los autos para garantizar la calidad de este. Por otra parte, la aspereza viene ligada como lo que denotamos como desagradable a los sentidos. La aspereza está relacionada con las fluctuaciones de las señales moduladas en amplitud en el margen de 100 Hz.

### *Vibraciones en los vehículos*

En un vehículo las vibraciones se generan por una fuerza o movimiento aplicado a una estructura flexible. Las principales fuentes se deben a la superficie de la carretera, el tipo de suspensión del auto y todo lo concerniente al movimiento del motor, cigüeñal, levas, pistones, explosiones, fallas del motor, entre otros.

## 2.2. Estado del arte

Las técnicas y la investigación en el área de la acústica han sido de interés para varios investigadores debido a la versatilidad de los aparatos, la seguridad, fiabilidad y rapidez para el análisis. En este apartado se estudia los instrumentos y las técnicas que son referente para el desarrollo del prototipo presentado, también se hace mención del estado de la técnica de métodos e instrumentos cercanos al prototipo presentado [15], [18].

### 2.2.1. Detector digital de defectos por ultrasonidos y sus aplicaciones

La patente de nombre anterior publicada en el 2007 [19], muestra el desarrollo de un instrumento que detecta defectos en los materiales por métodos digitales, incorporando técnicas que permiten que tal instrumento opere aun en condiciones de ruido. Para ello hace uso de filtros digitales programables, que de acuerdo a los autores estos logran “linealidad, manteniendo el ancho de banda de las señales y reduciendo los efectos de los armónicos de radiofrecuencia” [19].

Un detector de defectos por ultrasonido prácticamente funciona por la excitación de un transductor ultrasónico que ya incorpora, el cual es activado a una frecuencia específica, de esta manera dicha vibración trasciende a lo largo del material o pieza a inspeccionar, sin embargo cuando la onda atraviesa por una parte específica del material, la cual es diferente en homogeneidad al resto de este, parte de esta energía regresa al transductor en forma de eco, tal alteración provoca oscilaciones en el transductor, lo cual es interpretado en forma de voltaje por lo que es fácilmente detectable con algún dispositivo, estimando el defecto que se presenta en el material.

La invención describe técnicas para reducir el ruido. Un inconveniente a la hora de digitalizar las señales es la frecuencia de muestreo la cual no debe de ser inferior a la determinada por el criterio de Nyquist, que “comúnmente es del orden de 4 veces la frecuencia central del transductor”. Lo cual genera un problema con el tratamiento de datos pues, aunque se reduce la cantidad de datos a procesar se pierde información valiosa de la traza lo que impide la generación de ciertas imágenes, la patente desarrollada permite la reducción de datos muy superior a la demanda por el criterio de Nyquist sin perder información [19].



### 2.2.2. Método para inspeccionar neumáticos que permite detectar in situ fallas

El ultrasonido necesita de un medio para su propagación por lo que no es posible propagarse en el vacío. Para el caucho es fácil debido a las moléculas elásticas de su composición, así sus moléculas vibran a una frecuencia específica y cada partícula se convierte en “un oscilador que vibra sometido a fuerzas derivadas de una perturbación de su posición de equilibrio con respecto a sus vecinas” [20]. El avance de la perturbación es lo que se conoce como onda mecánica debido al medio elástico. La energía de las ondas mecánicas se da de manera regular y constante al avance de la onda a través del medio sin que exista una traslación de la materia misma.

La velocidad de propagación de las ondas depende de las propiedades del medio tal como módulo de Young, módulo de densidad y módulo de Poisson. El ultrasonido presenta atenuación o pérdida de amplitud cuando se presenta dispersión, fricción interna, histéresis elástica y disipación térmica. Tales fenómenos tienden a absorber la energía proviniendo del transductor ultrasónico lo cual es la base para el estudio de la falla.

#### *Invención*

La patente descrita es un método para “detectar fallas, desgarros, separaciones, estado de degradación del caucho, rotura de cuerdas o mallas de acero en neumáticos de grandes dimensiones” [20]. Para ello hace uso de un instrumento detector de fallos por medio del ultrasonido generando ecos por reflexión provenientes de discontinuidades o interfaces del material, así permite determinar el estado del neumático.

### 2.2.3. Equipo para inspección automática de piezas

Esta patente hace referencia al diseño de un equipo para la inspección de piezas de manera automática con técnicas no invasivas. Los ensayos no destructivos son técnicas que no alteran de manera permanente las propiedades físicas del elemento en cuestión. Se suelen usar fenómenos físicos como ondas electromagnéticas, ondas acústicas, ondas elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad y absorción, entre otros. “Existen diversas técnicas de carácter no destructivo tales como inspección por líquidos penetrantes, la inspección mediante partículas magnéticas, la termografía, radiografía y la inspección por ultrasonidos, resultando especialmente útil ésta última por su carácter limpio e inocuo” [21].

La invención hace referencia a un equipo que permite inspeccionar piezas complejas de manera automática, mediante técnicas no invasivas. Para esto el dispositivo cuenta con 3 módulos de posicionamiento, uno global, uno local y el de verificación. La función del módulo global es primeramente aproximar y posteriormente orientar el dispositivo hacia la pieza a analizar. Seguido del módulo local el cual permite que el dispositivo se centre y acople a la pieza. Finalmente, el módulo de verificación es el encargado de desplazar al sensor por toda la pieza a analizar. El dispositivo puede montarse en una o varias líneas de producción dentro de la misma fabrica.

#### 2.2.4. Equipo para pruebas en ruido de frenos

La empresa Dewesoft® especializada en el desarrollo y fabricación de sistemas de adquisición de datos en el área de pruebas y mediciones, desarrolló un equipo para detectar problemas en sistemas de frenos, basado en la guía VDA-303, la cual ofrece información para el análisis de ruidos en frenos, tales como frecuencias de trabajo, presión sonora y sugerencias para el tratamiento de datos [22]. El equipo permite detectar y rastrear el ruido causado por la vibración mecánica en múltiples sistemas de frenos tales como: frenos delanteros y traseros, frenos de camiones, frenos de maquinaria pesada, frenos de avión, tren, turbinas de viento y cintas transportadoras [23].

Tiene la capacidad de detectar el tipo de chillido con la ayuda de micrófonos y acelerómetros y a partir de sus amplitudes y vibraciones mecánicas, realiza análisis matemáticos tales como la transformada de Fourier. El equipo cuenta con parámetros propios los cuales le permiten realizar una evaluación. El equipo es modular, por lo que tiene la facilidad de que se le incorporen otros sensores o equipos, tales como termopares, galgas extensométricas, GPS, video, entre otros.

El cálculo que realiza es la transformada rápida de Fourier (FFT) y puede detectar y rastrear múltiples eventos de ruido de frenos, en múltiples pares de detección de vibración de manera simultánea. Para el análisis de eventos estadísticos, toma una muestra en tiempo real por un periodo de tiempo determinado y posteriormente emite una evaluación.

## 2.3. Sistema de frenos

El sistema de frenos es el encargado de detener al vehículo cuando se encuentra en movimiento. Para ello sucede una conversión de la energía cinética proveniente del movimiento del automóvil a calor, el cual es producido por la fricción que se origina cuando las zapatas o balatas presionan al disco o tambor de cada llanta. Aunque existen diferentes tipos de frenos, en este escrito únicamente se mencionan dos, pues son los de mayor relevancia para esta tesis.

### 2.3.1. Sistema de frenos de disco

En la Figura 1, se aprecia el sistema de frenos de disco compuesto por un disco de hierro fundido sujeto al balero delantero y/o trasero según el modelo de automóvil, el cual es presionado por dos balatas montadas en una mordaza hidráulica, la cual actúa en forma de pinza, pues internamente cuenta con una cámara en donde se aloja el pistón hidráulico. La función es simple, el líquido de frenos pasa a través de las mangueras de alta presión y hacia la cámara hidráulica de la mordaza, empujando al pistón, a su vez, este empuja a la balata principal hacia el disco, de igual manera la misma fuerza desplaza a la mordaza de manera axial junto con la segunda balata y así ambas comprimen al disco con la misma fuerza provocando fricción en este, obligándolo a frenar.



*Figura 1. Frenos de disco.*

Actualmente este sistema es el más usado, pues la disipación de calor es más rápida evitando el problema de cristalización, sobrecalentamiento del líquido de frenos y otros elementos del sistema de frenado, además la distancia de frenado es menor en comparación al sistema de

tambor [24]. Entre las desventajas más notorias se encuentra que la superficie de contacto es menor por lo tanto existe un desgaste excesivo en las balatas en comparación a las balatas de tambor, de igual manera el sistema de disco únicamente se encuentra protegido por el rin, por lo que está expuesto a agua, lodos, piedrecillas y otros agentes contaminantes que son perjudiciales para el disco.

### 2.3.2. Sistema de frenos de tambor

Este sistema es el antecesor a los frenos de disco. En la Figura 2, se muestran sus componentes como el plato de freno (que es la base en donde asientan el resto de componentes), zapatas o balatas y cilindro hidráulico. Al igual que en los frenos de disco, el líquido de frenos entra por este cilindro y a su vez empuja a dos pistones que se encuentran en su interior, cada pistón empuja a las balatas hacia los lados, provocando fricción con el tambor, el cual se encuentra unido a la flecha o balero de la llanta dependiendo el tipo de automóvil. Otros elementos que lo componen son un juego de resortes, los cuales tienen como función regresar a las balatas a su estado inicial y resortes de retención los cuales mantienen unidas a las balatas al plato de freno. También se encuentra el chicote y base del sistema de freno de mano y finalmente el calibrador que se encuentra en medio de ambas balatas.



*Figura 2. Frenos de tambor.*

Las principales ventajas, son que este sistema es más económico que el sistema de frenos de disco, las balatas son más grandes por lo que la superficie de contacto es mayor y el desgaste en las balatas es menor. El sistema viene completamente protegido por el tambor como se ve

en la Figura 3, por lo que es menos vulnerable y aunque esta es una ventaja, también provoca que la disipación de calor sea lenta, en consecuencia, se presenta calentamiento y puede fracturar el tambor o dañar otros elementos [25].



*Figura 3. Tambor de frenos Nissan Tsuru III.*

Actualmente los automóviles cuentan con una combinación de ambos sistemas, comúnmente se encuentran los frenos de tambor en el eje trasero y los frenos de disco en el eje delantero. Aunque esta combinación difiere mucho entre fabricante y modelo de automóvil, algunos vehículos cuentan con el sistema de disco en las 4 ruedas y únicamente se usa el sistema de frenos de tambor en el eje trasero para el freno de mano.

### 2.3.3. Funcionamiento general del sistema de frenos

A lo largo de los años los automóviles han evolucionado en un sinnúmero de modelos, han surgido nuevas marcas y autos más rápidos y potentes, que recorren mayores distancias, esto ha obligado a diseñar un sistema de frenos más eficiente y cómodo para el conductor, por ello se han dotado de nuevos elementos mecánicos y electrónicos. Explicar el funcionamiento general del sistema de frenado puede ser una tarea complicada, pues existe una gran variedad de vehículos con formas, funciones y aditamentos diferentes entre sí, y su sistema de frenado no es la excepción, por ello, se explicará de manera general las partes más importantes que lo conforman y la manera en cómo funcionan.

### *Pedal de freno*

Cuando el conductor necesita frenar, basta con presionar ligeramente el pedal y sin el más mínimo esfuerzo logra disminuir la velocidad e incluso detener el automóvil por completo, pero ¿cómo es posible? Para responder la pregunta basta con recordar los primeros automóviles tirados por caballos, el freno se lograba con un sistema de palanca de madera friccionando las ruedas, el problema principal era el desgaste excesivo, posteriormente con el diseño de los primeros autos de combustión interna se introdujeron nuevos sistemas al incorporarse un cable de acero en el pedal que bloqueaba la ruedas, el problema era que el conductor debía de tener una gran fuerza para detener el auto. Posteriormente en 1902, Louis Renault diseño el primer sistema de disco de tambor que sentó las bases de los modelos actuales, aun así, estos solían fallar con frecuencia y el inconveniente de la fuerza excesiva no se resolvió hasta varios años después [26].

### *Servofreno*

También conocido como booster. Anqué existen varios modelos la función es la misma, multiplicar la fuerza de accionamiento del conductor, logrando que el conductor haga el mínimo esfuerzo para frenar. El principio de funcionamiento es la diferencia de presiones que se da internamente. Como se aprecia en la Figura 4, el booster se encuentra dividido en dos cámaras por medio de un diafragma. La primera cámara es la entrada del sistema, la cual entre otros elementos cuenta con una válvula que es accionada cuando el conductor presiona el pedal de freno, esta válvula permite la entrada de presión atmosférica a la primera cámara del booster, mientras que la segunda cámara se encuentra expuesta al vacío por medio de una manguera que está conectada al motor. Así se da una diferencia de presiones entre ambas cámaras, esta diferencia provoca que la presión atmosférica de la cámara uno ejerza una fuerza adicional en el diafragma, desplazándolo de manera axial, pero esta vez con mucho mayor fuerza que la que brindó el conductor.



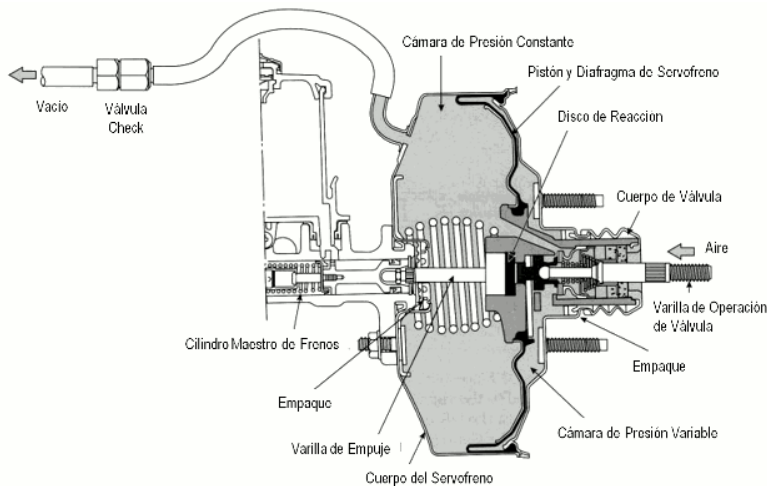


Figura 4. Booster [27].

### Bomba de frenos

También llamada cilindro maestro, tiene la función de convertir la fuerza mecánica proveniente del booster en presión hidráulica. Cuando el conductor pisa el pedal de frenos, la fuerza es amplificada por el servofreno, el cual desplaza un embolo en el interior de la bomba, al hacerlo un pistón recorre la cámara interna de la bomba donde se encuentra alojado el líquido de frenos. La cámara interior se encuentra dividida en dos cámaras: cámara primaria y cámara secundaria. El contenedor de líquido de frenos se encuentra conectado a ambas cámaras, así cuando el pistón es desplazado, también empuja al líquido que esta almacenado en la cámara primaria a través de una válvula llamada válvula de presión residual, la cual desplaza el líquido a través de las tuberías para activar los demás componentes hidráulicos. Cuando el conductor suelta el pedal, un resorte interno regresa al pistón a su posición inicial, así el líquido de frenos nuevamente vuelve a alojarse en las cámaras y el contenedor. Cabe mencionar que también existen bombas de frenos con doble cámara llamadas Tándem, así cada cámara conecta de manera aislada a un par de llantas del vehículo brindando un mejor frenado, también es un sistema de protección, pues en caso de que falle una cámara, la otra aún puede seguir funcionando, caso que no se da en las bombas de una sola cámara.

#### 2.3.4. Revisión general del sistema de frenos

El sistema de frenos es una de las partes más delicadas del automóvil, pues de este depende el control del vehículo y la seguridad de los pasajeros. Por ello es importante realizar la inspección y mantenimiento del sistema de frenos [28].

*Revisión del estado de líquido de frenos.* Primeramente, se debe verificar el nivel de líquido de frenos en el tanque de la bomba. El tanque cuenta con dos marcas que indican el nivel máximo y mínimo al que debe de estar.

*Revisión de pedal.* Para ello basta con encender el vehículo y presionar el pedal, después de soltarlo debe de regresar a su posición inicial, se debe de verificar si el sistema de frenos emite un sonido peculiar, posiblemente se deba un problema en el booster u otra falla.

*Revisión de las mangueras y periféricos.* Es importante inspeccionar la parte trasera de cada rueda y verificar que no exista alguna fuga de líquido de frenos.

*Estado de las balatas o zapatas.* Aunque esta inspección puede ser difícil para el conductor, es importante acudir con un especialista. La falla más notoria se presenta cuando al momento de frenar se escucha un chirrido, este proviene de unas laminas incrustadas en las balatas delanteras, su función es alertar al conductor de que las balatas deben de ser reemplazadas.

#### 2.3.5. El ruido y problemas en el sistema de frenos

El sistema de frenos es un elemento complejo debido a que está compuesto por elementos mecánicos, hidráulicos y electrónicos por lo que es complicado detectar la falla. A continuación, se muestra una serie de problemas más comunes que se presentan en los frenos y la relación que tienen con el ruido y la vibración.

##### *Fading*

Es uno de los problemas más frecuentes que se dan en el sistema de frenos. Las balatas tienen un coeficiente de fricción específico que permite un frenado adecuado, sin embargo, a medida que la temperatura aumenta este disminuye, ocasionando que el vehículo deje de frenar. En otras palabras, el fading se presenta cuando las balatas sufren sobrecalentamiento, bajando el coeficiente de fricción. En la Figura 5, se muestra una gráfica de un test de fading, este se realiza en un banco de pruebas donde se simulan las condiciones a las que se exponen los



frenos, se realiza una serie de 20 frenadas consecutivas, partiendo de una velocidad de 100km/h hasta alcanzar los 0km/h, posteriormente se toma el tiempo de frenada, temperatura inicial y final del sistema de frenos y se obtiene el coeficiente de fricción [29].

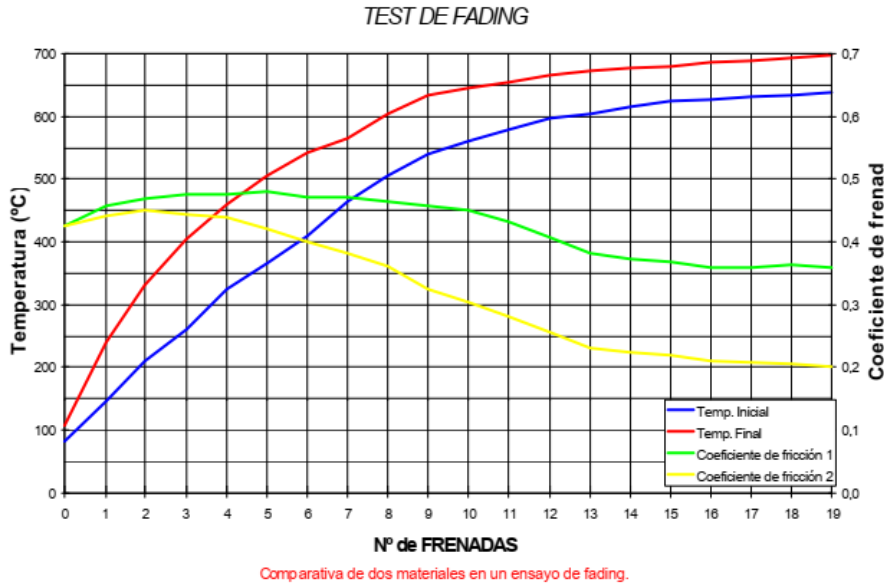


Figura 5. Test de fading [29].

Nótese como a medida que aumenta la temperatura el coeficiente de fricción disminuye, sin embargo, para el material representado por la curva verde el coeficiente de fricción  $\mu$  se mantiene arriba de 0.30. A diferencia del material representado por la curva amarilla con un  $\mu=0.2$ , este presentara fallas en los frenos pues se encuentra por debajo de 0.25.

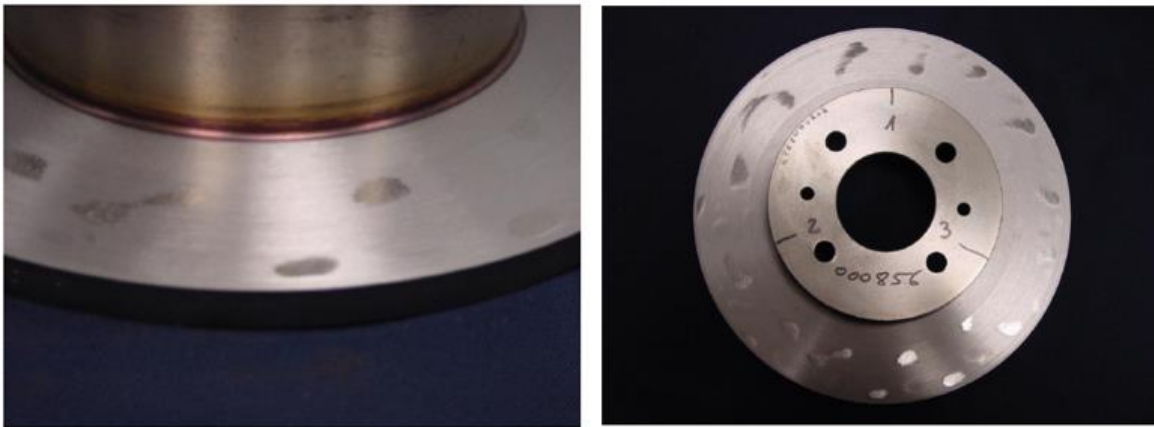
### Judder

Es uno de los fenómenos que se origina a causa de las vibraciones ya sea por un defecto de mecanizado del disco o por algún problema en la instalación. La vibración está íntimamente relacionada con el sonido, pues recordemos que para que se produzca un ruido las moléculas del material deben de oscilar en el espectro audible, por lo que este fenómeno a veces se encuentra acompañado de sonido, dependiendo del tipo de defecto presente, por tal razón el judder está dividido en 2 tipos:

*Cold judder.* Se presenta en bajas frecuencias aproximadamente a 10Hz [23], por lo que es difícil percibir algún sonido. La manera más evidente de cómo notarlo, es por la vibración

que se da en el pedal al momento de presionarlo ligeramente, en ocasiones la vibración también se suele notar en el volante.

*Hot judder.* Se presenta en frecuencias cercanas a 200Hz [23], en ocasiones el hot judder es acompañado de algún ruido y su nombre se debe a que se presenta a altas temperaturas, regularmente entre 400 °C y 500 °C [29]. Sin embargo, el calor producido se presenta de manera desigual, es decir, solo en algunas áreas del disco en donde la presión de las balatas es mayor. En tales zonas, la disipación de calor será más lenta por lo que la temperatura aumentará y el disco presentará marcas oscuras como se ve en la Figura 6. En estas zonas, el disco sufre una transformación estructural, por lo que su dureza es mucho mayor que en el resto, originando que el disco se desgaste de manera anormal y las vibraciones aumenten. Ante tal fenómeno, la rectificación no es recomendable, por lo que es necesario sustituir el disco.



*Figura 6. Marcas de judder en discos [29].*

### *Ruido*

Es producido por las múltiples vibraciones a las que se presenta el vehículo cuando se mantiene en operación. Aunque ya se ha hecho mención del estudio de ruido en los vehículos [18]. En este apartado se mencionan los tipos de ruidos más presentes en el automóvil y como se relacionan con el sistema de frenos.

*Groan, hum, moan.* Aunque la traducción es prácticamente la misma, este tipo de ruido es grave y se presenta a muy bajas velocidades, presionando de manera muy ligera el pedal de freno, se hace evidente cuando el conductor se está estacionando. El ruido groan se da por la vibración de la mordaza y por los elementos de la suspensión y se encuentra alrededor de los 100 Hz, mientras que el ruido hum se debe a la vibración torsional del caliper o pinza de frenos, oscilando entre los 100Hz a 400 Hz. Finalmente, el ruido moan, el cual que va de los 600Hz a 700 Hz y se origina por el movimiento de la maza completa de la mordaza [23].

*Squeal.* También conocido como “chirrido”, se debe a la vibración que se da entre las pastillas o balatas con el disco o el tambor, es el ruido más común que se presenta en el sistema de frenos y puede ir de 1kHz a 4 kHz [23], [29].

## **2.4. Disco de frenos**

Hemos estudiado los dos tipos de frenos usados en los automóviles y como los frenos de tambor han sido reemplazados por los frenos de disco, por la eficiencia que tienen estos. Las mejoras más notorias de los frenos de disco es la velocidad de frenado y la disipación de calor. En este apartado nos centraremos en estudiar particularmente a los discos de freno, su composición, los tipos de discos en el mercado y los daños más frecuentes a los que se enfrentan.

### **2.4.1. Composición de discos de frenos**

Una de las partes más importantes cuando se diseña un disco es la delicada elección de materiales, pues cada uno de ellos agrega las características de dureza, resistencia, abrasión, disipación y ligereza, necesarias para un óptimo desempeño. Los materiales usados en la elaboración de discos de frenos han sido el aluminio con base de carburo de silicio, dando gran la ligereza, por el contrario, el mayor inconveniente es la lenta disipación de calor, por lo que deben de diseñarse de un tamaño y grosor considerable, lo cual los hace poco factibles. Por otro lado, también se han diseñado discos carbo-cerámicos usados en aviones y autos de competencia y de gama alta. La gran capacidad de disipación de calor, su ligereza y la resistencia a la deformación los hace muy atractivos, el principal problema es el elevado costo. Por lo tanto, el material más usado en la actualidad es la fundición gris, logrando un

punto de equilibrio entre calidad y costo. En la Figura 7, se muestran los principales materiales de un disco: la fundición gris nodular de grafito laminar contiene entre un 92% y 93% de hierro, el resto de materiales como por ejemplo el silicio, manganeso y carbono, conforman el 7% u 8% restantes [30].

Los discos de carbono-cerámicos están compuestos de un material llamado composite cerámico, extremadamente duro y resistente a la abrasión, compuesto por fibras de carbono de gran resistencia que permiten absorber las tensiones que se producen en la etapa de frenado.

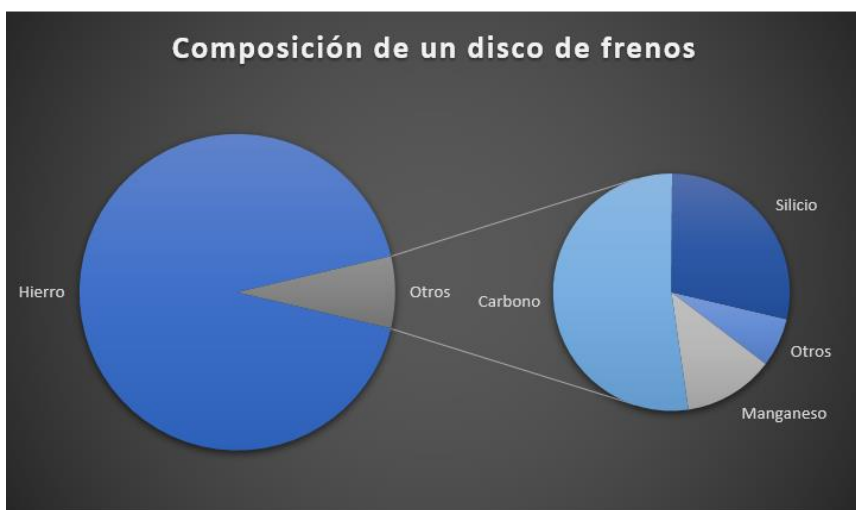


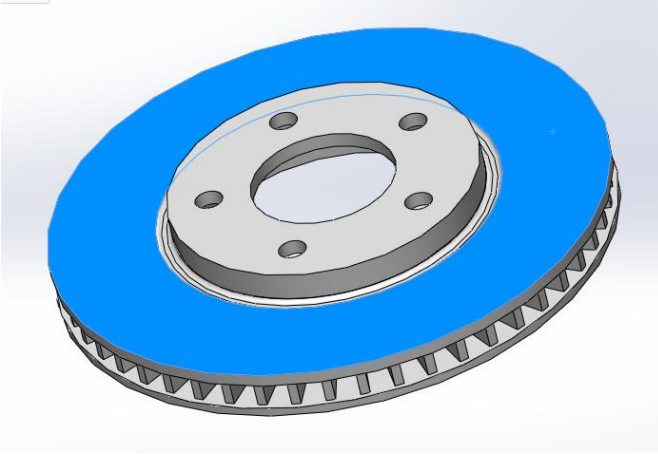
Figura 7. Materiales de un disco de frenos [29].

#### 2.4.2. Geometría de un disco de frenos

Los discos de frenos suelen cambiar dependiendo del modelo y requerimientos del automóvil, aunque existen algunos elementos generales que se describirán a continuación [30].

##### *Pista*

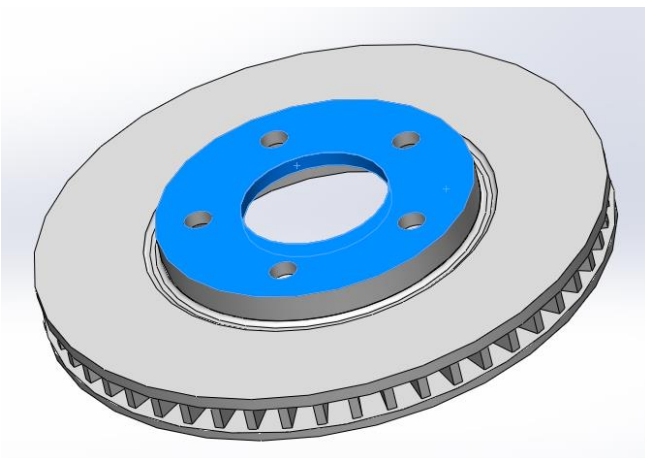
Es la superficie donde se produce la fricción entre las balatas y el disco. En la Figura 8, se muestra marcada de color azul, es la que sufre más daños, por las duras condiciones de trabajo. También es la parte del disco que sufre mayores diferencias de temperatura y donde se presentan las temperaturas más altas. Para resolver estos problemas los fabricantes han creado diversos diseños con el fin de disipar lo más rápido posible el calor producido.



*Figura 8. CAD pista de disco de frenos.*

### *Campana*

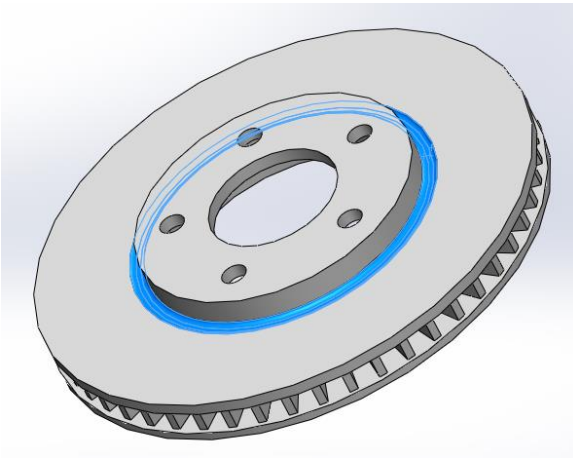
Es la parte del disco que conecta a la pista con el resto. En la Figura 9, se muestra la campana marcada de color azul y tiene la función de fijar el disco al balero de la llanta por medio de tuercas, para ello la campana cuenta con barrenos, en donde entran los birlos propios del balero o la maza de la rueda. En algunos modelos la campana también tiene la función de actuar como tambor, es decir, en esta parte se monta un mecanismo de freno meramente mecánico que se usa como freno de mano.



*Figura 9. Campana de disco.*

### *Filtro térmico.*

El filtro térmico prácticamente es una canaleta como se aprecia en la Figura 10, su función es evitar que la campana se caliente a una temperatura tan alta como la pista. Como ya se mencionó la campana tiene contacto directo con el rin de la llanta, así, si esta se calentara a la misma temperatura que la pista, el calor se transmitiría al rin y a su vez al neumático, causando un excedente de calor, de tal manera que la vida de la llanta se reduciría considerablemente.



*Figura 10. Filtro térmico de disco de frenos.*

### 2.4.3. Tipos de discos de frenos

Los frenos de disco aunque son más eficientes y disipan de mejor manera el calor, aún tienen muchos retos por delante, es por ello que cada fabricante diseña y trabaja en nuevos modelos que resuelven estos problemas, aunque de manera parcial, pues si bien existen discos con excelentes diseños, tienen el problema de costos elevados, no solo para el propio disco, sino para las balatas y resto de complementos del sistema de frenos, lo que los hace poco atractivos para el mercado. En este apartado se muestran los principales tipos de disco de freno, así como sus ventajas y desventajas [31].

#### *Discos de frenos sólidos.*

En la Figura 11, se puede ver un disco de frenos sólido. Son los primeros tipos de disco que se empezaron a comercializar, prácticamente son los más simples que se pueden encontrar en su tipo, son económicos y ligeros, por lo tanto, suelen usarse en las ruedas traseras o en

autos ligeros. El principal problema es la lenta disipación de calor, al no poseer ningún tipo de ventilación, así el problema de cristalización en las balatas está muy presente.



*Figura 11. Discos de frenos sólidos [31].*

#### *Discos de frenos ventilados.*

Están compuestos de dos discos separados por canales radiales, como se ilustra en la Figura 12. Básicamente las canaletas actúan como un ventilador enfriando internamente al disco. Esta característica los hace ideales para autos potentes o muy pesados, además los discos ventilados son usados en las ruedas delanteras, pues es donde se aplica la mayor fuerza de frenado. Este tipo de disco es el más usado en los automóviles, debido a la eficiencia de disipación de calor y bajo precio. A menudo suelen prolongar la vida de útil de las balatas gracias a la rápida disipación de calor.



*Figura 12. Discos de frenos ventilados [31].*

### *Discos de frenos perforados*

Los discos perforados surgieron de la necesidad de liberar los gases producidos por las balatas. A medida que se usan los frenos, las balatas tienden a aumentar de temperatura, sobre todo cuando se usan de manera excesiva, en estos casos, las balatas tienden a sobrecalentarse y liberar gases y partículas que se adhieren al disco, reduciendo el coeficiente de fricción, a este fenómeno se le conoce como fundido de freno. En la Figura 13, se puede ver que son discos con perforaciones en la pista, lo que permite la liberación de gases de la balata y también son más ligeros, sin embargo, la disipación de calor tiende a ser más lenta y también se ve comprometida su resistencia, es por ello que son fabricados de hierro fundido con una concentración mayor de carbono. Aunque es otra buena opción, en la actualidad están perdiendo mercado porque son más costosos y los materiales de las balatas ya no liberan tantos gases ni partículas como en el pasado.



*Figura 13. Discos de frenos perforados [32].*

### *Discos de frenos rayados*

Son otra alternativa para solucionar los problemas de liberación de gases de las balatas. A diferencia de los discos perforados, los discos rayados cuentan con una matriz de ranuras en la pista del disco como se parecía en la Figura 14, lo que los hace muy atractivos visualmente. Tienen ventajas significativas sobre los discos perforados, reducen las vibraciones, son más resistentes a las grietas, tienen una superficie de fricción del 96% mientras que los ranurados del 85% al 93%. En general ambas opciones son viables pues los discos perforados, se



comportan mejor en la lluvia, ofrecen un agarre inicial mejor que los rayados, son más ligeros y aunque los discos perforados se enfrían más rápido que los ranurados, también tienden a calentarse más rápido.



*Figura 14. Discos de frenos rayados o ranurados [32].*

#### *Discos de frenos perforados y rayados (mixtos)*

Son una combinación entre los dos discos anteriores, tienen una superficie de fricción del 80% al 91% y tienen el mismo objetivo. La diferencia es que estos discos solo están perforados parcialmente como se puede ver en la Figura 15, lo que los hace más resistentes que los discos perforados. Debido a las ranuras también pueden limpiar las pastillas de freno como los discos rayados y tienden a ser más livianos que los anteriores.



*Figura 15. Discos de frenos mixtos [31].*

### *Discos de frenos ondulados tipo wave*

Estos discos inicialmente se encontraban en las motocicletas, pero recientemente se han incorporado en los automóviles de gama alta debido al gran atractivo visual que tienen como se puede ver en la Figura 16. Entre las ventajas principales, se encuentra una mayor disipación de calor que los anteriores y por su propia forma son mucho más ligeros.



*Figura 16. Discos de frenos wave [31].*

#### 2.4.4. Principales problemas en discos de frenos automotriz

Los discos de frenos a menudo sufren desperfectos, pues son la parte de los frenos que junto con las balatas llevan el trabajo más fuerte, aunque es una práctica habitual el cambio de balatas cada ciertos kilómetros, se asume que los discos de frenos deben durar el mismo tiempo de vida que el automóvil. Este es un gran error, aunque no existe un periodo de tiempo que nos indique cuando es necesario el cambio oportuno de discos, es necesario acudir con un experto para que los revise a fondo y en caso de encontrar un problema grave hacer su cambio inmediato.

El prototipo presentado en este documento tiene el objetivo de revisar los discos de frenos a fondo y dar un juicio sobre el estado en el que se encuentran, dando respuesta al momento correcto en el cual hacer el respectivo cambio. Para ello en este apartado se estudian los problemas más habituales que se dan en los discos de frenos [29].

### *Apriete incorrecto*

El montaje de las llantas puede ser una de las tareas más simples, pero el apriete incorrecto de las tuercas o simplemente apretarlas de manera desordenada puede ocasionar que el disco no asiente uniformemente. Cuando se da este problema la parte comprometida del disco es la campana, pues un exceso de fuerza en las tuercas puede ocasionar grietas o fisuras, el problema principal es que en la mayoría de los casos no son visibles a simple vista por lo que no se sabe si el disco se encuentra bien. El segundo caso se da por un orden incorrecto de apriete de las tuercas, ocasionando que la campana del disco no se asiente uniformemente en el balero o maza de la rueda y lo deforma, este defecto tampoco es visible a simple vista, pero se detecta ya cuando el automóvil está trabajando, porque el pedal de frenos tiende a vibrar, en otras ocasiones, este problema se da porque el disco se encuentra con deformaciones de fábrica.

### *Montaje incorrecto de la pinza o caliper.*

Como ya vimos la pieza encargada de presionar a las balatas contra el disco es la pinza de sujeción, la cual tiende a realizar movimientos axiales respecto al eje de la llanta, por tal motivo sí cuando se realizó el cambio de las pastillas, la pinza no encajo correctamente en el perno guía o en sus bases, la frenada es irregular y se nota rápidamente la ineficiencia en los frenos, otra manera de detectar este problema, es por el desgaste antisimétrico o cónico que se da en las balatas. En estos casos los discos tienden a deformarse y/o rayarse como se puede ver en la Figura 17, por lo que también deben de ser reemplazados.



*Figura 17. Desgaste por montaje incorrecto del caliper [29].*

### *Holgura o desgaste de los rodamientos de la rueda.*

Cuando los baleros de la maza de la rueda, están desgastados o desajustados (dependiendo el modelo de automóvil), todo el sistema de la llanta tiende a vibrar más de lo habitual, cuando la holgura es excesiva, la pista del disco golpea de manera irregular a las balatas aun cuando están en desuso, ocasionando un desgaste en este, como se puede ver en la Figura 18, si por el contrario, el auto cae en un bache o la suspensión recibe un golpe fuerte, el disco golpeará al caliper o a la balata y se puede fracturar



*Figura 18. Disco dañado por holgura excesiva de rodamientos.*

### *Temperatura excesiva*

Es habitual que los discos de frenos se calienten en cada frenada, sin embargo cuando es rebasada la temperatura que el disco puede disipar se presenta un problema de sobrecalentamiento, ocasionando que cambie la estructura molecular del mismo, así en puntos críticos se pueden formar zonas de cementita ( $Fe_3C$ ), un material con una dureza mayor y propiedades físicas diferentes al resto del disco, lo que ocasiona un desequilibrio de frenada y vibraciones, también se da una variación en el coeficiente de fricción. En estas zonas, el disco se vuelve vulnerable a presentar grietas. Este defecto se puede apreciar porque la coloración del filtro térmico del disco, suele presentar una gama de colores azulados [29].

### *Prolongar la vida del disco*

Los discos de frenos al igual que las balatas deben de ser sustituidos frecuentemente, algunos expertos recomiendan cambiar el disco después de reemplazar las balatas 3 o 4 veces. En la

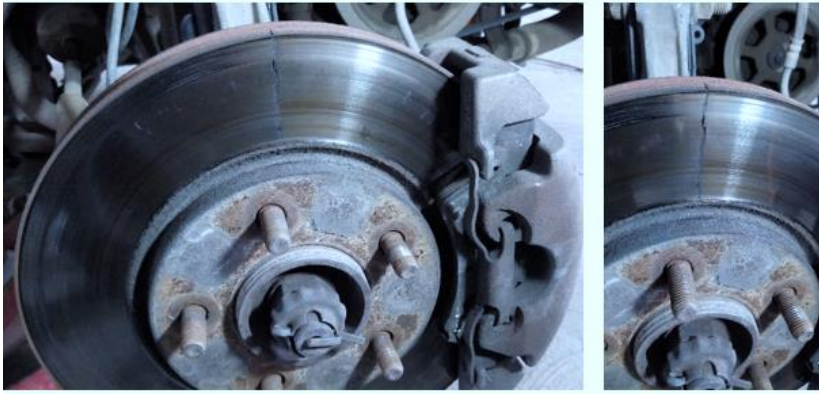
práctica este cambio jamás se realiza y únicamente se da cuando el disco presenta problemas críticos. Los discos que han sobrepasado su espesor mínimo tienden a presentar grietas en la superficie de la pista, como se puede ver en la Figura 19. Al haberse desgastado más de lo habitual presentan una ligereza de material y con ello problemas de sobrecalentamiento.



*Figura 19. Desgaste excesivo del disco.*

### *Discos agrietados*

Esta falla quizá sea la más alarmante de todas y no es porque las demás tengan menos importancia, sino debido a que el problema es claramente visible. Las grietas se producen por varios factores, por ejemplo, el disco ha llegado al final de su periodo de vida o el disco ha sido sometido a fuertes cambios de temperatura. El sobrecalentamiento ocasiona grietas o rupturas como la de la Figura 20, que se dan al existir poros en el material, si el daño continúa el disco se rompe completamente. Antes de esto, se presentarán problemas graves de vibración, en el pedal y en el volante, si el problema es mayor, se suelen notar vibraciones en la suspensión. También la superficie deja de ser homogénea por lo que disminuye la calidad de frenado y se acorta la vida de las balatas. En etapas finales se presenta ruido continuo y el disco se vuelve sumamente frágil por lo que se puede romper en cualquier momento.



*Figura 20. Discos de frenos con grieta.*

### *Desgaste excesivo del disco por las balatas*

Este problema suele ser uno de los más comunes y la causa se debe al gran descuido de parte del conductor. Las balatas cuentan con un revestimiento en su superficie que se va desgastando conforme se usan los frenos, este material es mucho más blando que el disco, así este se mantiene en perfectas condiciones. Una vez que el material se ha terminado, el disco comienza a rozar con una lámina indicadora de desgaste, la cual emite un chirrido cada que se frena. El problema se presenta cuando se ignora esta señal y la misma lamina comienza a rayar el disco cada vez más. En casos más graves, la pasta de la balata se desgasta completamente y la lámina indicadora se rompe, así comienza a haber un roce entre metal-metal, se presenta sobrecalentamiento y un ruido muy fuerte, en tales casos el disco sufre un desgaste excesivo como se evidencia en la Figura 21 y suele romperse.

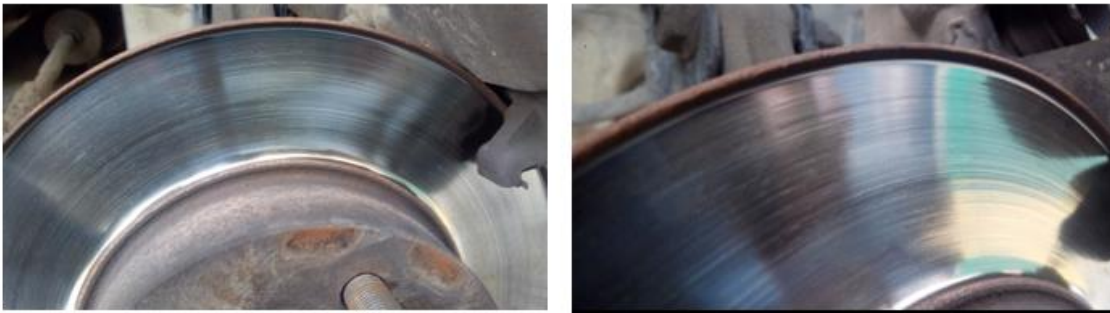


*Figura 21. Disco desgastado en exceso por balatas deterioradas.*



### *Surcos y rayaduras profundas*

Debido al propio diseño del sistema de frenado, el disco se encuentra vulnerable a cualquier daño del exterior. Este es otro de los problemas más comunes y se da cuando se interponen agentes externos entre la balata y el freno, los más frecuentes son piedrecillas o lodos, estos materiales producen sobrecalentamiento y un deterioro rápido en la pista del disco. Suele identificarse el problema, porque se producen ruidos al momento de frenar y/o en todo momento en que el vehículo está en movimiento. Estos desgastes también se dan por la misma balata, pues el material es de baja calidad o el material está sumamente desgastado y se presenta el roce de la lámina indicadora de desgaste. En la Figura 22 se puede ver como el disco presenta rayaduras en la pista.



*Figura 22. Disco con rayaduras en la pista.*

## **2.5. Acústica**

Es la parte de la física encargada de estudiar los fenómenos de vibraciones mecánicas considerando su origen, propagación y efectos. Así las vibraciones u oscilaciones se dan en diferentes objetos a los que se les llama fuentes sonoras, estas vibraciones son captadas por el oído humano y es lo que se entiende como sonido. La propagación de sonido está íntimamente relacionada con la elasticidad del objeto, así cada objeto tiende a emitir sonidos diferentes, debido a la particularidad de sus moléculas: elasticidad (módulo de Young), densidad y coeficiente Poisson, sin embargo para que se dé el efecto de propagación del sonido, se necesita de un medio de transmisión o propagación, por ello en el vacío no es posible captar algún sonido [33].

El sonido, es transmitido principalmente por sólidos en vibración a través de un medio en contacto, como por ejemplo las moléculas de aire, dando lugar a una onda de presión que se propaga con movimiento ondulatorio en todas direcciones, así se da un transporte de energía, pero no de materia. La velocidad depende del medio de transmisión, por ejemplo, en los sólidos la velocidad de propagación es más rápida que en los líquidos y a su vez en los líquidos es más rápida que en los gases, esto se debe a las fuerzas de cohesión. En otras palabras, entre mayores sean las fuerzas de cohesión entre las partículas del medio, mayor será la velocidad de propagación del sonido [34]. Esto no significa que las moléculas, como por ejemplo las del aire, viajen a 344 m/s, que es la velocidad de propagación, más bien quiere decir, que las perturbaciones locales de presión se dan a esta velocidad.

### 2.5.1. Fenómenos de las ondas sonoras

#### *Ondas progresivas y ondas estacionarias*

Las ondas progresivas viajan a través del medio a una misma velocidad, así cada partícula dentro de la onda tiene la misma vibración. Si bien las fases pueden variar de manera aleatoria, la amplitud siempre será la misma, transportando una cantidad específica de energía.

Por otra parte, las ondas estacionarias se dan cuando se tienen dos ondas de igual frecuencia desplazándose en direcciones opuestas, así algunas partículas no se mueven mientras que otras incrementan su valor, por lo que de manera independiente cada partícula tiene una vibración diferente. Por lo que existe un transporte de energía, pero, la energía promedio siempre será cero.

#### *Propagación en el medio*

En el aire la propagación de las ondas se da en la misma dirección del movimiento de las partículas (onda longitudinal) con una velocidad constante en todas direcciones. En los líquidos, el movimiento de las partículas es elíptico y aunque también se presenta un desplazamiento longitudinal, las partículas se desplazan principalmente en forma de una onda transversal. En los sólidos el movimiento es más complicado, así dependiendo de las propiedades físicas de este y de las fuerzas de cohesión, el movimiento será por medio de



choques y deformaciones de los vínculos cohesivos en todas direcciones, originando ondas longitudinales, transversales y de flexión.

### *Impedancia acústica*

Se llama impedancia acústica a la relación que existe entre la presión sonora y el vector de velocidad de una partícula dada, caracterizando al medio de propagación. La manera más simple de entenderlo es haciendo una analogía con la impedancia eléctrica, en otras palabras, la impedancia acústica es la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas sonoras sobre el mismo.

### *Principio de Huygen*

El sonido se propaga en forma de frentes de ondas esféricas, concéntricas al punto emisor, a su vez cada partícula del frente sonoro se comporta como una nueva fuente sonora, dando infinitos frentes de ondas esféricas en todas direcciones tal como se muestra en la Figura 23.

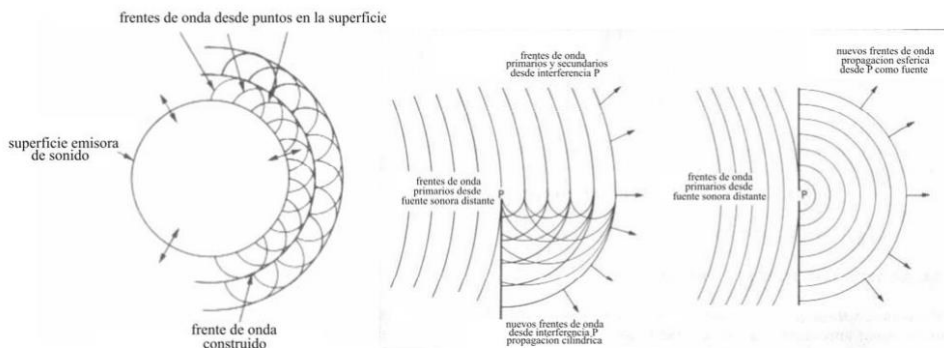


Figura 23. Propagación del sonido por el principio de Huygen [33].

### *Reflexión*

Este fenómeno se presenta cuando una onda de sonido choca con algún objeto presente, parte de la energía es reflejada en forma de onda con las mismas características que el incidente, y aunque la frecuencia y longitud se conserva, la nueva onda tiende a presentar una amplitud menor lo que repercute en su intensidad [34].

### *Difracción*

Se presenta difracción en un objeto, cuando las ondas sonoras no pueden traspasarlo y lo rodean, produciendo nuevos focos de emisión en sus puntos de intersección, envolviéndolo

por estas nuevas fuentes emisoras. La difracción depende de las características físicas del objeto y la longitud de onda, pues las bajas frecuencias pueden rodear al objeto más fácil que las de alta frecuencia. En la Figura 24, se ilustra este fenómeno, nótese como se presentan nuevas ondas en las aristas del objeto a causa de sus vértices.

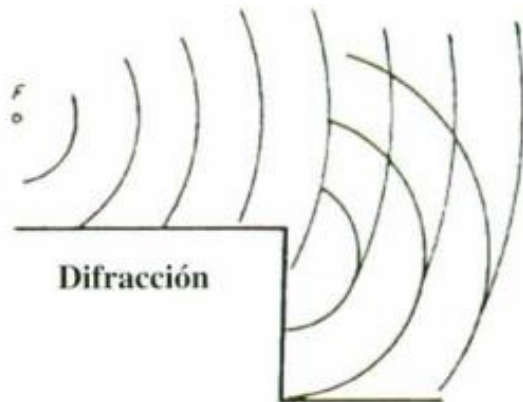


Figura 24. Difracción del sonido [34].

### *Refracción*

Este fenómeno se da cuando la onda atraviesa a un material, pero se ve afectada por la densidad de este causando que cambie de dirección. Así se presenta una curvatura de la onda del sonido y también la velocidad de propagación se ve afectada.

### *Dispersión*

La dispersión se da cuando la onda sufre una rotura al chocar con algún objeto y la onda se descompone en sus frecuencias componentes a medida que pasa por el material, regularmente la superficie de este es mucho menor que la longitud de onda [34].

### *Eco y reverberación*

El eco es un caso particular de reflexión y se da cuando una onda sonora se refleja de manera perpendicular al chocar con un objeto y esta se regresa al emisor con un retraso de 1/15 parte de segundo [34].

Por su parte la reverberación también es otro fenómeno de reflexión, sin embargo, las ondas sonoras llegan a la fuente emisora mucho antes de que la fuente se extinga. Este fenómeno tiende a modificar las propiedades de la fuente original por el conjunto de nuevas ondas

producidas, al que se le llama campo reverberante, la principal diferencia con el eco, es que este no modifica a la señal original, además el retraso de la señal es mucho mayor.

### *Resonancia*

La resonancia se produce cuando una onda sonora choca con un objeto y su frecuencia natural o algunos de sus armónicos coinciden con la frecuencia de la onda, haciéndolo vibrar. Así se logra que este objeto se convierta en una nueva fuente de emisión de sonido por lo que la señal original se ve amplificada.

## 2.5.2. Propiedades de las ondas sonoras

### *Frecuencia (f)*

Corresponde al número de ciclos o repeticiones de la onda por unidad de tiempo. Su unidad de medida corresponde a ciclos/segundo o hercios (Hz).

El sonido se divide en tres categorías dependiendo de la frecuencia de su onda. Primeramente se encuentra el infrasonido el cual corresponde a frecuencias menores a 20 ciclos por segundo (Hz), posteriormente se encuentra la banda de audiodfrecuencias la cual corresponde a las frecuencias que el oído humano puede detectar, la cual va de 20 Hz a 20 kHz, aunque el oído es más sensible a frecuencias de entre 1 kHz y 5 kHz, finalmente se encuentra el ultrasonido el cual corresponde a frecuencias superiores a 20 kHz [35].

### *Periodo (T)*

Es el tiempo que tarda la onda en realizar un ciclo completo de oscilación por unidad de tiempo, así sus unidades de medida son inversas a la de la frecuencia.

### *Longitud de onda*

Es la distancia recorrida de la onda durante un lapso, a diferencia del periodo, aquí influye el medio por el cual se propaga la onda sonora, es decir es la inversa de la frecuencia multiplicada por la velocidad de propagación del medio.

### *Amplitud*

Es el máximo desplazamiento al que llega la onda en relación con su posición de reposo, prácticamente hablando es lo que el oído puede percibir como el volumen o la intensidad de sonoridad, pues es la máxima presión a la que llega la onda.

### *Potencia sonora*

Cantidad de energía sonora generada por una fuente emisora por unidad de tiempo.

### *Presión sonora*

Es la energía sonora que se desplaza perpendicularmente a la dirección de propagación, en otras palabras, es la potencia transferida por una fuente emisora por unidad de área, normal a la dirección de propagación. También se le llama así a la variación de presión atmosférica producida en un punto a causa de una onda sonora que se propaga en el aire, este principio es el que usan los sonómetros usados para medir los niveles de ruido en un determinado lugar.

### *Unidades de medida*

A la magnitud percibida del sonido se le llama sonoridad, depende principalmente de la intensidad y frecuencia del sonido. Como se ha descrito, el sonido se origina por medio de vibraciones mecánicas, en otras palabras, el sonido depende de la energía mecánica de la onda sonora, por tanto, se define como *intensidad acústica* a la energía acústica que llega de manera normal a una porción de área, así sus unidades de medida están dadas en vatios por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). La energía emitida por una fuente sonora por unidad de tiempo se le denomina *potencia acústica* y se mide en vatios (W).

El oído humano tiene la capacidad de captar sonidos de muy baja intensidad, hasta de  $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$  al cual se le conoce como umbral de audición y captar sonidos sin daño físico de 100 billones de veces este valor ( $10^2 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Evidentemente el oído tiene un amplio rango de audición, por tanto una unidad más acorde a este es el belio (en honor a Alexander Graham Bell), el cual se expresa en unidades logarítmicas, siendo el decibelio (dB) (10 veces el belio), la unidad más usada, así el rango de audición humana va de 0 dB a 140 dB [34].

Por lo tanto, la ecuación que describe la conversión de potencia en termino de decibelios es:

$$dB = 10 \log_{10} \left( \frac{P_s}{P_e} \right) \quad (1)$$

con  $P_s = \text{Potencia de salida}$

$P_e = \text{Potencia de entrada}$

La principal ventaja que se tiene al usar el dB es la facilidad de determinar si el sistema presenta una ganancia o atenuación a la salida por medio de su signo, así si el signo es positivo se sabe que se tiene una ganancia, por el contrario, si el signo es negativo se asume que existe una atenuación a la salida. También otra ventaja radica en los cálculos que se tienen al hacer sumas y resta en lugar de grandes multiplicaciones y divisiones.

### 2.5.3. Espectro de frecuencias

Es una representación gráfica de las ondas sonoras y su campo de acción en función de sus frecuencias. En algunos estudios es necesario conocer como el ruido se distribuye en cada una de las frecuencias que lo componen y la cantidad de energía que cada una de ella posee, en tales casos se recurre al espectro de frecuencias.

### 2.5.4. Densidad espectral de potencia (PSD)

La densidad espectral de potencia de una señal periódica, es la descripción de cómo está distribuida la energía de la señal en cada una de sus frecuencias. Dicho de otra manera, es la variación de la energía de una señal vibratoria (para este caso sonora), en función de la frecuencia por unidad de masa. En este contexto, la medición de la potencia no hace referencia a unidades en términos de vatios, más bien hace referencia a un valor medio cuadrático de la señal a analizar, por lo cual en el análisis de PSD se hace referencia a la potencia de cualquier unidad que se esté trabajando. Por otra parte, la densidad espectral representa la distribución de la señal en términos de sus frecuencias en todo el espectro de frecuencias, tomando como ancho de banda a 1 Hz. Así la densidad espectral no cuenta con una unidad específica, más bien es un proceso estadístico que se adapta a un fenómeno físico estudiado con lo cual tiende a tomar sus unidades, por ejemplo al hablar del análisis del PSD de una señal de aceleración con la unidad de medida en g's, las unidades de la función de PSD serán  $g^2/Hz$  [36].

### *Transformada rápida de Fourier*

Para la aplicación de la ecuación del análisis de densidad espectral, se emplea la transformada rápida de Fourier, la cual tiene como principio que cualquier señal puede ser reconstruida nuevamente por una suma de series de funciones senos y cosenos. Así esta señal permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa [36]. En palabra simples

la transformada de Fourier es el espectro de frecuencias de una señal, por ello es muy usada en el tratamiento de señales sonoras para determinar su espectro. Dado que en la práctica es complicado caracterizar una señal periódica de forma continua. Cuando se trabaja con sistemas digitales y particularmente con el tratamiento y reconstrucción de señales periódicas, se toman muestras de señales a intervalos determinados por lo que estos son finitos, además en este mismo tratamiento se suelen usar filtros digitales. Para estos casos se suele aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT), la cual permite calcular la transformada discreta de una señal digital por medio de diferentes algoritmos con características diferentes en términos de las necesidades y el tratamiento aplicados.

#### 2.5.5. Distorsión armónica total (THD)

A menudo este tratamiento de señales es usado en sistemas eléctricos para la medición de la distorsión presentada en la red eléctrica, se entiende como distorsión a las señales periódicas que presentan deformaciones con respecto a la forma de la onda sinusoidal.

La distorsión puede darse por fenómenos transitorios, en el caso de la red eléctrica por el arranque de motores o la conmutación de capacitores, por otro lado, se puede presentar condiciones permanentes donde la señal está relacionada con armónicos estables.

Se dice que una señal sinusoidal se encuentra contaminada por armónicos si cumple con las siguientes condiciones [37]:

- Que la señal tenga valores definidos dentro de un intervalo, implicando que la energía es finita.
- La señal debe de ser periódica teniendo la misma forma de onda en todo momento.
- Que la distorsión sea permanente, es decir que se presente en cualquier instante de tiempo y no sea pasajera.

#### *Armónicos*

Los armónicos tienen su origen en señales periódicas, cuando se presentan señales sinusoidales de la misma señal, en donde sus frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental y cuyas amplitudes van decreciendo conforme va pasando el tiempo. Así las

ondas simétricas contienen armónicos impares, mientras que las ondas asimétricas pueden contener armónicos pares e impares.

#### *Cofactor de distorsión (Cd)*

Para cuantificar una señal es necesario conocer los parámetros que determinen su magnitud, así se entiende por cofactor de distorsión a la relación entre el contenido armónico de una señal y su valor eficaz (rms). El cual se mide en unidades de porcentaje.

#### *Distorsión armónica total (THD)*

“Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito” [37]. Igual que con el cofactor de distorsión, esta cobra relevancia cuando se desea conocer la influencia de la frecuencia fundamental en una señal. Esto nos da un parámetro para medir armónicos no deseados presentes en la señal analizada. Comúnmente, este estudio suele realizarse a señales de entrada con amplitud y frecuencia conocidas, con el fin de determinar el estado de la señal de salida, por ejemplo, en un amplificador de audio. Para esto, se suma la potencia de salida de todos los armónicos y la sumatoria es dividida entre la potencia de salida de la frecuencia fundamental. Comúnmente el resultado se expresa en porcentajes, aunque ocasionalmente es presentado en decibelios.

### 3. Desarrollo de prototipo

Este capítulo está dedicado al desarrollo del prototipo y a los cálculos realizados. El sistema cuenta con elementos mecánicos y electrónicos, de igual manera la inspección del disco, así como la adquisición de datos es automatizada, por lo que cuenta con una serie de sensores y transductores, los cuales se conectan a una tarjeta que también fue programada para tal propósito.

#### 3.1. Sistema mecánico

##### 3.1.1. Sistema de anclaje del disco

Se diseñó una base que sirve como soporte para el modelo de disco de frenos con el que se trabajó. La base se diseñó y se manufacturó por medio de impresión 3D. El material elegido fue ácido poliláctico (PLA), debido a su resistencia y la facilidad de moldearlo a bajas temperaturas [38].

En la base de soporte asienta el disco de manera uniforme. Para evitar que este gire o vibre de manera discontinua, en la parte superior de la campana del disco se atornilla una tapadera la cual está sujeta con la primera base. Así la pista del disco puede vibrar sin interferencia alguna por parte del sistema de anclaje, tal como se muestra en la Figura 25. A su vez, esta base cuenta con un rodamiento interno y un sistema de engranes de cónicos, que le permiten girar.



*Figura 25. Sistema de acople del disco de frenos.*



### *Diseño de engranes*

Para que el disco pueda girar de manera controlada, la base cuenta con un sistema de engranes, los cuales son accionados por un motor CD.

Para optimizar el espacio entre la plataforma de pruebas y el sistema de sujeción se optó por diseñar engranes cónicos con una inclinación de  $90^\circ$  entre ellos, así el motor se sujeta a la plataforma y puede rotar a la flecha fácilmente.

Se eligió un módulo de 1.2 para que la impresión de los engranes fuera apropiada. Se eligieron 13 dientes para el piñón y 51 dientes para la corona. Así, se obtuvo una relación de 3.923:1, con lo cual aumentó el torque del motor más de 3 veces.

Tomando como base la separación entre el eje de la base de sujeción y la altura del motor ya sujeto en la plataforma, se eligieron los diámetros exteriores, a partir de ellos se obtuvieron el resto de valores tal como se muestran en la Tabla 1.

Parámetros	Piñón	Corona
Diámetro primitivo (DP)	15.600 mm	61.200 mm
Dientes (N)	13	51
Ángulo de centro ( $\alpha$ )	$14.3^\circ$	$75.7^\circ$
Diámetro exterior mayor (Dem)	16.163 mm	63.526 mm
Diámetro interior mayor (Dim)	15.007 mm	58.874 mm
Diámetro exterior menor (De)	10.795 mm	42.350 mm
Generatriz (G)	31.579 mm	31.579 mm
Altura del diente en el diámetro exterior (H)	2.700 mm	2.700 mm
Longitud del diente (L)	10.526 mm	10.526 mm

*Tabla 1. Valores de los parámetros para los engranes piñón y corona del sistema de sujeción.*

Para mayor entendimiento del cálculo de los engranes cónicos consúltese el Anexo A. Nótese que tanto la generatriz como la longitud y altura de los dientes coincide para ambos engranes, lo cual tiene sentido, de lo contrario colisionarían los dientes. En la Figura 26, en la imagen de la izquierda se presentan los engranes ya manufacturados y trabajando en el prototipo, mientras que en la imagen de la derecha se aprecia más a detalle el acople piñón-corona.

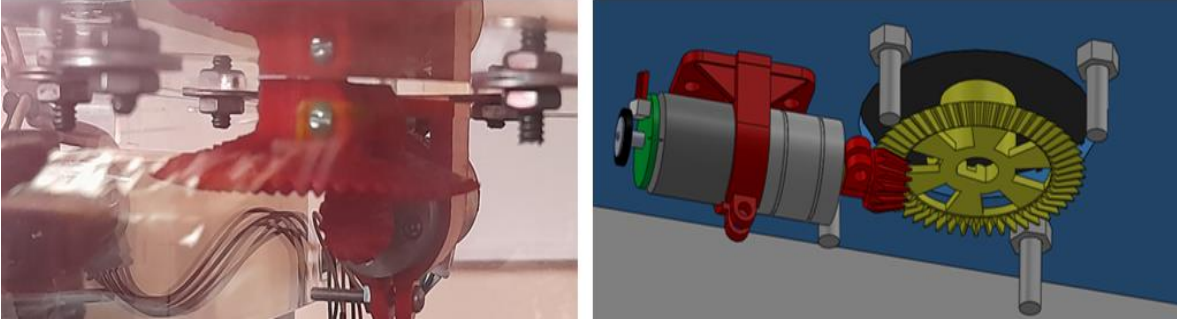


Figura 26. Sistema de rotación en funcionamiento.

### 3.1.2. Sistema de golpeteo

Este sistema es el encargado de golpear la superficie de la pista del disco, dando origen a un intercambio de energía cinética a vibraciones acústicas. Para lograrlo, se diseñó una base la cual libera a un punzón y golpea la superficie. El punzón cae en caída libre desde una altura específica, por lo tanto, se puede calcular la energía que le proporciona al disco.

Inicialmente, se calculó la constante del resorte, para ello se midió la elongación inicial y posteriormente se midió la elongación después de aplicarle una masa conocida.

$$\text{Longitud inicial del resorte} \equiv L_{Ri} = 32 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud final del resorte} \equiv L_{Rf} = 20 \text{ mm}$$

$$\Delta x = 18 \text{ mm, con una masa de } 0.708 \text{ kg}$$

De acuerdo a la ley de Hooke, la fuerza de un resorte es:

$$F = k\Delta x \quad (2)$$

$$P = mg \quad (3)$$

De (2) y (3) se tiene que:

$$mg = k\Delta x \therefore k = \frac{mg}{\Delta x} \quad (4)$$

Sustituyendo valores en (4):

$$k = \frac{mg}{\Delta x} = \frac{(0.708kg) \left(\frac{9.81m}{s^2}\right)}{0.018 m} = 385.86 \frac{kg}{s^2}$$

Para determinar la energía potencial del punzón, se midió la distancia desde donde se suelta el punzón hasta donde golpea al disco.

$$Carrera\ del\ punzón \equiv C_p = 0.059m$$

$$La\ masa\ del\ punzón\ es\ de\ 0.064\ kg$$

Así se tiene que la energía potencial del punzón es:

$$E_{pp} = mgC_p \quad (5)$$

$$E_{pp} = 37.04\ mJ$$

Es necesario que el punzón golpee una sola vez la superficie, así que un resorte ejerce fuerza contraria en él, por lo que se debe de conocer la energía de oposición emitida por este. La energía potencial del resorte se obtiene a partir del trabajo realizado, por lo tanto:

$$T = \int_a^b Fdx \quad (6)$$

$$De\ (2)\ y\ (6),\ se\ tiene\ que\ T = \int_a^b (k\Delta x)dx$$

Partiendo del hecho de que inicialmente el resorte no está en compresión se tiene que:

$$E_{pR} = \frac{k\Delta x^2}{2} \quad (7)$$

Se sabe que el resorte se comprime aproximadamente 5mm, así de (7) se tiene:

$$E_{pR} = 4.82mJ$$

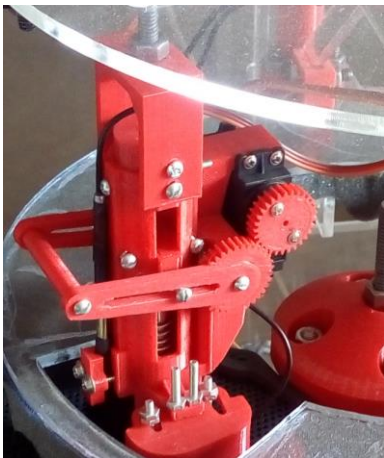
Así se determina que la energía dada al disco es:

$$E_T = E_{pp} - E_{pR} \quad (8)$$

De (8) se tiene que la energía total dada al disco es de:

$$E_T = 32.22 \text{ mJ}$$

El punzón es desplazado y accionado por un servomotor como se muestra en la Figura 27. El servomotor usado tiene la capacidad de rotar un máximo de  $180^\circ$ , por lo tanto, se diseñó un sistema de engranes rectos que rotan una leva para accionar el punzón, con una relación 0.8788:1, logrando que la leva se pueda desplazar más de  $200^\circ$ . En el sistema de golpeteo también se sujetan dos micrófonos que son los encargados de tomar las muestras de sonido.

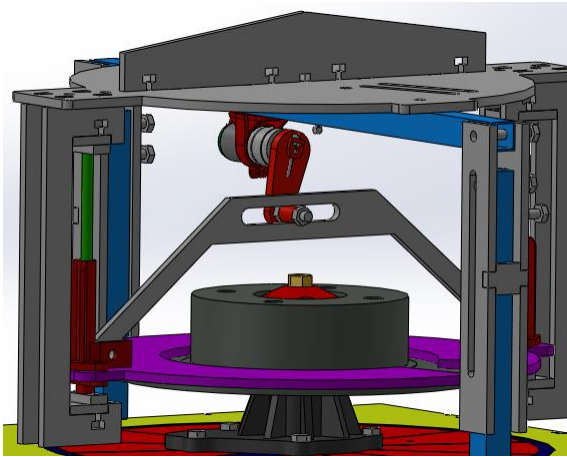


*Figura 27. Sistema de golpeteo.*

### 3.1.3. Sistema de filtrado de ruido

Para evitar problemas de reflexión acústica en el análisis de la máquina, se diseñó un sistema de filtrado mecánico de ruido. El cual absorbe el ruido emitido por el disco, evitando que este se disperse, también permite estabilizar al disco después de cada golpeteo, así en condiciones ideales, el disco siempre se encuentra bajo las mismas condiciones iniciales permitiendo que el análisis sea uniforme para toda la superficie.

El filtro mecánico comprime al disco después del análisis, mientras que en el proceso se encuentra ubicado en una posición estratégica, por lo tanto, el filtro tiene un desplazamiento normal a la superficie del disco de manera controlada por un motor CD y un sistema de leva, en la Figura 28, se muestra como el sistema de filtrado se desplaza por medio de dos bujes que corren sobre rieles.



*Figura 28. Sistema de filtrado mecánico.*

### 3.1.4. Soporte universal de pruebas

Comprende la base donde se acoplan el resto de componentes de la máquina. La base se diseñó y se manufacturo con acrílico transparente de 6mm, la técnica usada para cortar los componentes fue corte laser. Tal como se muestra en la Figura 29, esta base además de alojar al sistema de sujeción del disco permite ajustar la altura del sistema de golpeteo y desplazarlo de manera radial a un punto específico del disco. En la parte interna del soporte universal se aloja la electrónica del equipo, por lo que se encuentra protegida del exterior.



*Figura 29. Prototipo detector de fallas en discos de frenos.*

### 3.1.5. Caja acústica

El prototipo es sensible a los ruidos externos, por tal motivo se diseñó una caja acústica que aísla los ruidos externos y también absorbe los ruidos internos, para disminuir los problemas de reflexión propios del análisis. La Figura 30, muestra la caja recubierta con doble capa de espuma acústica de poliuretano usada en estudios de grabación y sellada con espuma de poliuretano expansiva. La máquina es introducida y la caja es cubierta por una placa de espuma acústica y otra de MDF de 6mm y posteriormente es sellada por prensas mecánicas.

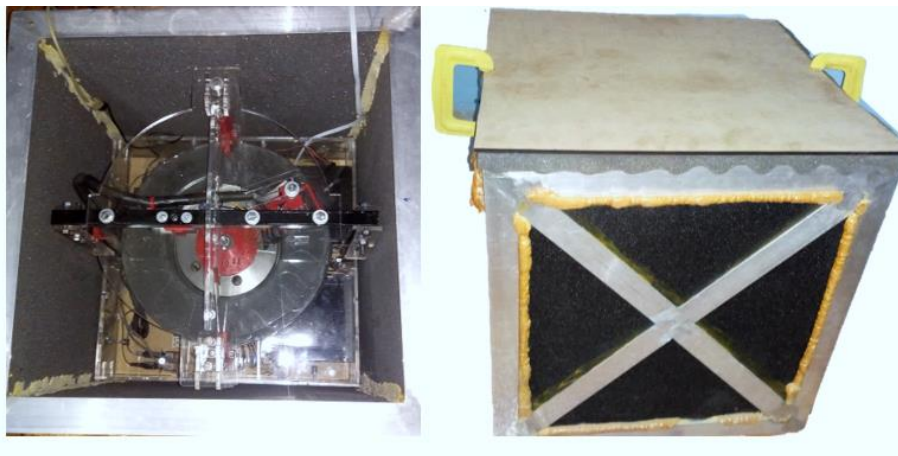


Figura 30. Caja acústica.

## 3.2. Sistema electrónico

El sistema electrónico comprende el sistema de alimentación de la máquina, el sistema de potencia para accionar los motores y servomotor, los sensores y transductores comprendidos por los micrófonos, encoders y un límite de carrera, también se incluye el preamplificador usado para los micrófonos y la tarjeta de comunicación y control.

### 3.2.1. Sistema de alimentación

El sistema de alimentación se encuentra dividido en dos partes, la primera fuente alimenta los sistemas de potencia, tal como motores, servomotor y puentes H, mientras que la segunda es la encargada de alimentar los sensores, transductores, el preamplificador y la tarjeta de control. Con esta configuración se logra disminuir el ruido dado de la parte de potencia al resto del sistema, además es un modo de protección en caso de que se presenta alguna falla. El equipo trabaja con diferentes voltajes de -12v, 3.3v, 5v y 12v. Los voltajes negativos corresponden al preamplificador como se verá más adelante.

### 3.2.2. Sistema de potencia

Esta comprendido por 2 puentes H, los cuales controlan 2 motores CD de manera independiente. En la Figura 31, se muestran los drivers usados, que corresponden al puente H BTS7960.

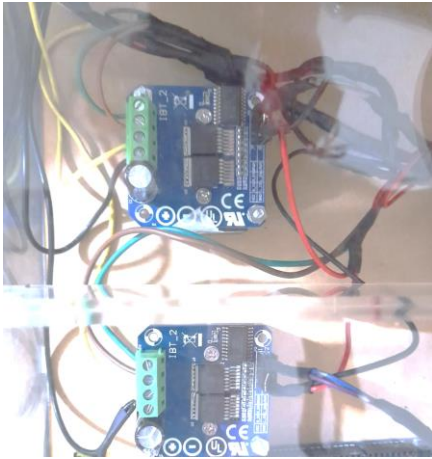


Figura 31. Drivers puente H BTS 796.

En la Tabla 2, se muestran las características técnicas del driver usado.

Características eléctricas del driver puente H	
<b>Entrada de voltaje</b>	6v-27v
<b>Corriente pico</b>	43A
<b>Frecuencia máxima PWM</b>	25kHz
<b>Voltaje de entrada de control</b>	3.3v-5v
<b>Modo de control</b>	PWM
<b>Ciclo de trabajo</b>	0%-100%
<b>Protección de sobretensión</b>	Si

Tabla 2. Características principales del puente H BTS7960 [39].

#### Actuadores

El control de giro del disco y el sistema de filtrado mecánico están a cargo de dos motores de corriente directa, los cuales se ilustran en la Figura 32, estos motores funcionan a 12v y cuentan con un tren de engranes metálicos. En la Tabla 3, se muestran las principales



características eléctricas y mecánicas de los motores, estos datos fueron obtenidos de manera experimental como se describirá más adelante.

Por otra parte, el encoder de los motores es un encoder incremental tipo Hall de 11 segmentos, con dos canales desfasados 90° entre sí, que a menudo se usan para determinar el sentido de giro del motor o dar mayor resolución al sistema de control.

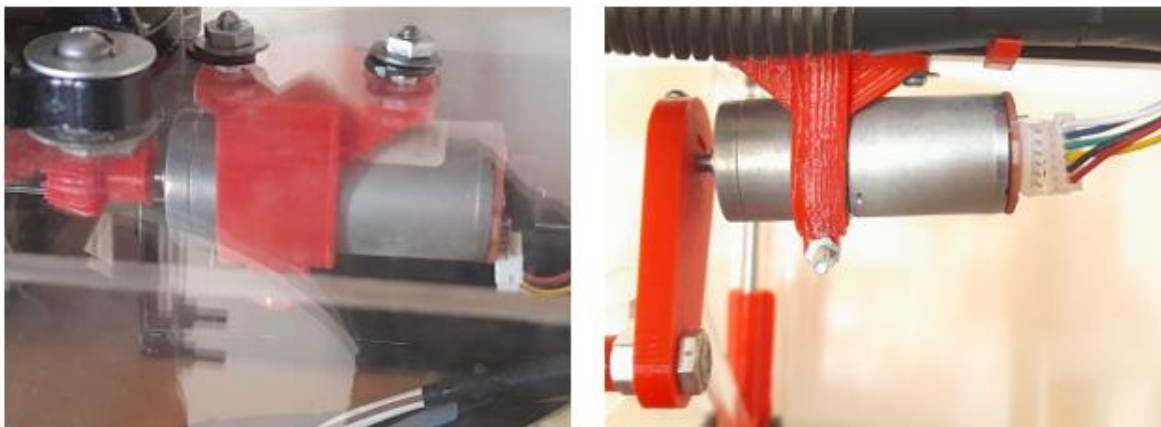


Figura 32. Motores CD modelo JGA25-370.

Motor de corriente directa JGA25-370	
<b>Voltaje nominal de trabajo</b>	12v
<b>Corriente nominal</b>	84 mA
<b>Corriente máxima</b>	1.5 A
<b>Encoder</b>	Cuadratura magnética 11 segmentos
<b>Voltaje encoder</b>	3.3v
<b>Relación de engranaje</b>	217.311:1
<b>Torque</b>	1.4 Nm
<b>Velocidad a voltaje nominal</b>	27 RPM
<b>Conteos por revolución</b>	2390.43

Tabla 3. Características eléctricas y mecánicas de motor JGA25-370

### 3.2.3. Transductores

La máquina dispone de 2 micrófonos que sirven para captar el sonido y las vibraciones del disco, mientras que se usa un límite carrera en la parte superior del sistema de filtrado mecánico, que funciona como sistema de referencia para poner a home el sistema de filtrado mecánico y para calibrar el disco de manera manual.



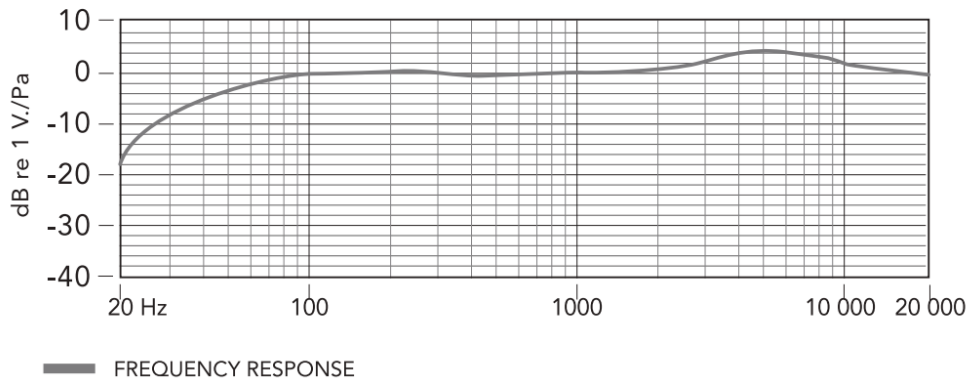
### *Micrófono omnidireccional*

Este micrófono está acoplado en la base del sistema de golpeteo, como se aprecia en la Figura 33. En la imagen de la izquierda, se puede ver que se encuentra junto al sistema de golpeteo y una vez que el sistema está trabajando, el micrófono está muy cerca de la superficie a analizar, logrando captar el sonido de manera directa.



*Figura 33. Micrófono omnidireccional de condensador.*

El micrófono usado corresponde al modelo BY-M1 de la marca Boya®, es un micrófono omnidireccional [40], que permite captar el sonido de igual manera en todas direcciones, lo que resulta conveniente a la hora de ubicar el micrófono. Para evitar problemas de reflexión que suelen presentarse en este tipo de micrófonos se colocó muy cerca al sistema de golpeteo y de manera normal a la superficie del disco a examinar. Este micrófono cuenta con un preamplificador interno y brinda una respuesta de frecuencia plana. En la Figura 34, se muestra la respuesta en frecuencia del micrófono.



*Figura 34. Respuesta en frecuencia del micrófono Boya BY-M1 [40].*

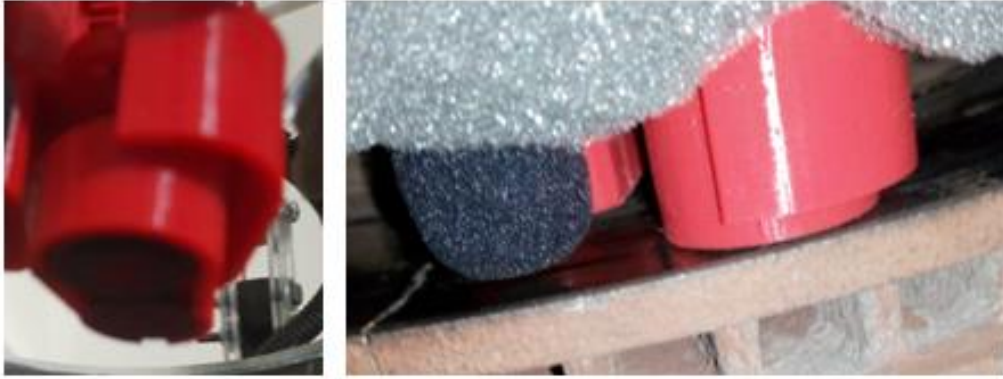
En la Tabla 4, se muestran a detalle las características físicas y eléctricas de este modelo.

Transducer	Electret condenser
Polar pattern	Omni-directional
Frequency range	65 Hz ~ 18 KHz
Signal/Noise	74 dB SPL
Sensitivity	-30 dB +/- 3 dB / 0 dB=1V/Pa, 1 kHz
Output impedance	1000 Ohm or less
Battery type	LR44 included (compatible with LR44, 357, and SR44)
Connector	3.5mm (1/8") 4-pole gold plug
Dimensions	Microphone: 18.00mmH x 8.30mmW x 8.30mmD Cable: 6.0m
Weight	Microphone: 2.5g Power Module: 18g

Tabla 4. Especificaciones eléctricas del micrófono BY-M1 [40].

### *Micrófono de contacto*

Debido a las condiciones de ruido que pueden presentarse en el análisis, también se realiza una inspección con un micrófono dinámico de contacto, correspondiente a la marca Cherub®, modelo WCP-55 [41], este micrófono es usado para afinar instrumentos musicales en condiciones de ruido. Debido a que responde a las vibraciones emitidas del instrumento, los ruidos externos no interfieren, por lo que en el análisis no se presentan problemas de reflexión. En la Figura 35, se muestra el micrófono de contacto dentro de una base especial de impresión 3D, la cual permite que se adhiera a la superficie de la pista del disco en el sector de inspección. Este micrófono se encuentra aislado completamente de la máquina por lo que puede vibrar de manera natural sin algún problema de interferencia. Estrictamente hablando a la superficie del disco se le añade una masa extra por lo que podría afectar su modo de vibración, pero debido a que se encuentra presente en todo el análisis, se toma como una constante del experimento.



*Figura 35. Micrófono de contacto.*

### 3.2.4. Preamplificador

Los micrófonos no pueden conectarse de manera directa a la tarjeta digital por lo que es necesario que primero pasen por una etapa de preamplificación donde se ajuste el voltaje de entrada y salida de estos, así como se aíse la señal dada de los micrófonos de la señal que va a la tarjeta de programación.

Para esto, se diseñó y construyó un preamplificador que también permite calibrar los micrófonos para que estos emitan la misma señal y sea más sencillo el tratamiento de los datos de manera digital.

Para limitar la corriente que va al micrófono se conectó una resistencia R1 en serie, formando un circuito RC, posteriormente a la salida se le agregó un capacitor C1, para desacoplar la señal CD. En la Figura 36, se muestra la primera etapa de amplificación del preamplificador.

#### **Etapa 1 amplificación.**

Para amplificar la señal dada de los micrófonos se usaron amplificadores operacionales. Para la primera etapa se usó la configuración amplificador inversor con una ganancia:

$$G_1 = -\frac{R_3}{R_2} \quad (9)$$

De (9) y sea  $R_3 = 100k\Omega$  y  $R_2 = 10k\Omega$ .

**Se tiene que  $G_1 = -10$**

La salida, se acopla a un amplificador operacional en configuración buffer tal como se muestra en la Figura 36.

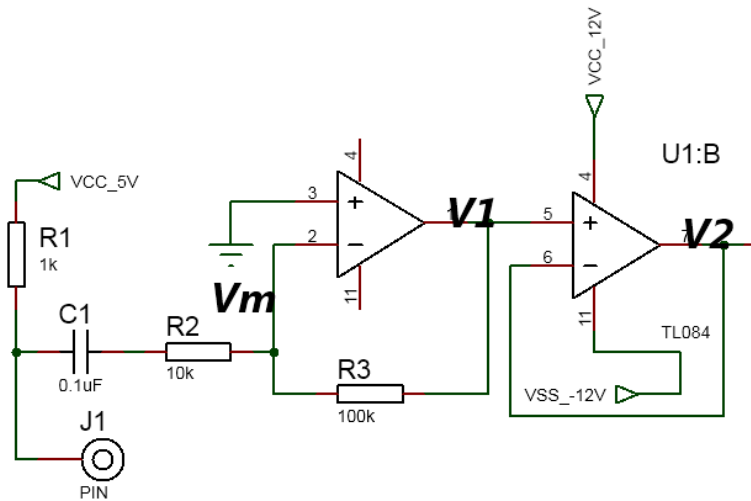


Figura 36. Etapa 1 de amplificación.

### Etapa 2 amplificación.

La salida proveniente del buffer U1:B es amplificada nuevamente por el amplificador U1:C en modo amplificador inversor, como se ve en la Figura 37, por tanto, haciendo uso de (9), se tiene que:

$$G_2 = -\frac{TP_5}{R_4}, \quad \text{siendo } TP_5 \text{ un trimpot de } 10k\Omega$$

De esta manera la señal fue amplificada dos veces teniendo a la salida:

$$V_3 = -G_1(-G_2) = \frac{R_3}{R_2} \frac{TP_5}{R_4} V_m \quad (10)$$

Sea  $R_4 = 1k\Omega$ . De (10), se tiene que:

$$V_3 = 10TP_5 V_m \quad (11)$$

Para controlar los valores picos de cada señal y dar un ajuste fino a cada micrófono, se añade un offset. Por tal motivo se agrega una tercera etapa que nos permite correr la señal en la ordenada.

Se agrega un divisor de voltaje simple con un trimpot y para evitar caídas de voltaje la señal pasa a través de un buffer como se muestra en la Figura 37. Tanto la señal  $V_4$  como la señal  $V_3$  pasan a través de un amplificador en configuración amplificador sumador inversor descrito por:

$$V_5 = -R_9 \left( \frac{V_3}{R_6} + \frac{V_4}{R_8} \right) \quad (12)$$

$$\text{Si } R_6 = R_8 \rightarrow V_5 = \frac{-R_9}{R_{6,8}} (V_3 + V_4) \quad (13)$$

De (11) y (13), con  $R_9 = 10k\Omega$  y  $R_{6,8} = 10k\Omega$  y  $V_4 < 0$

Finalmente se tiene que la salida es:

$$V_5 = (V_4 - 10TP_5V_m) \quad (14)$$

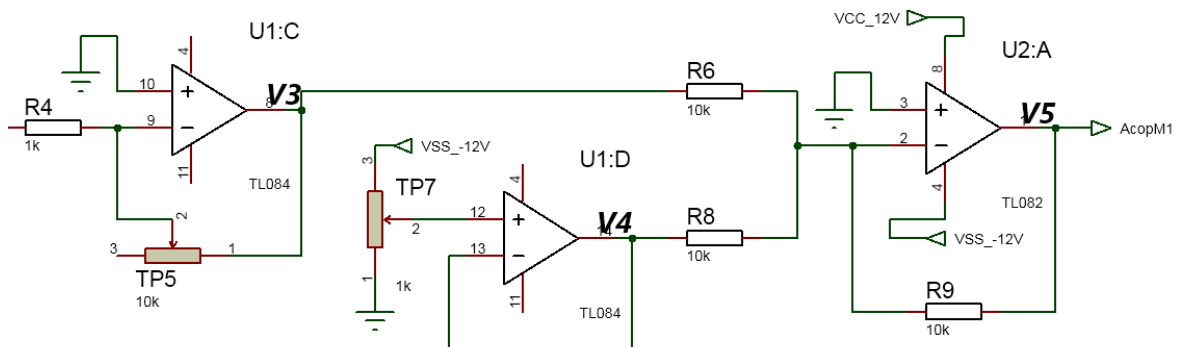


Figura 37. Etapa 2 de amplificación.

### Etapa 3 protección

De (14) se obtiene la salida de los micrófonos amplificada y con un offset, sin embargo, como se puede ver, un mal ajuste del offset podría dar valores negativos en la salida  $V_5$  o por el contrario un exceso de ruido inesperado en los micrófonos podría incrementar el voltaje

mucho más de lo que la tarjeta lógica podría soportar. Así, si esta señal se conecta directamente a la tarjeta podría dañarla, por ello se agrega un último amplificador operacional en configuración buffer, con una alimentación de 5v, de esta manera, cualquier valor negativo lo interpretaría como 0v y si por el contrario se excede de voltaje, la salida no sería mayor a 5v, protegiendo a la tarjeta. Finalmente, en la Figura 38, se muestra la tarjeta PCB terminada y montada en la máquina.

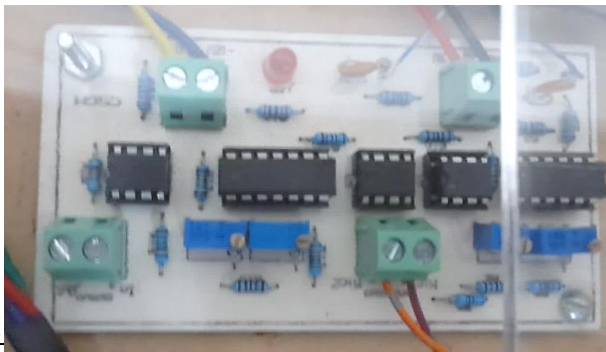


Figura 38. PCB preamplificadora de los micrófonos.

Téngase en cuenta que este análisis es el mismo para ambos micrófonos, por lo tanto, el circuito se replicó y se ajustaron las ganancias, para ver el diagrama del circuito completo consúltese el Anexo B.

### 3.2.5. Tarjeta de comunicación y control

Para el control y adquisición de datos se usó la tarjeta de programación Arduino Due® [42], la cual cuenta con un microcontrolador ARM Cortex M3 de 32 bits. Dispone de 54 pines, de ellos 12 son analógicos los que son usados para la toma de datos de parte de los micrófonos. Cuenta con 4 puertos UART, que también son usados para realizar la comunicación con la PC. Trabaja con un reloj de 84 MHz y 12 pines de salida PWM, de estos 5 pines son usados para el control de los motores y servomotor. Como se muestra en la Figura 39, la tarjeta se encuentra atornillada en la parte inferior de la máquina ya conectada con los puentes H, la tarjeta de preamplificación y los sensores.

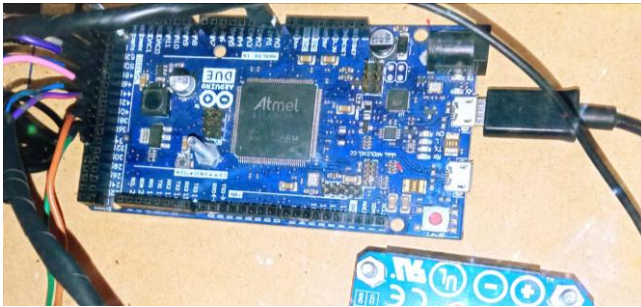


Figura 39. Tarjeta de programación Arduino Due.

### 3.3. Sistema de control y comunicación

Se diseñó un sistema de control para los motores encargados de rotar el disco y también para desplazar al sistema de filtrado mecánico. Se usó el mismo tipo de motor, por lo que en este apartado se describe el análisis de manera general y se muestran los parámetros específicos de cada uno.

#### 3.3.1. Modelado de un motor CD

En este apartado se muestran dos maneras para obtener la función de transferencia de un motor de imanes permanentes [43]. El circuito eléctrico de un motor CD se puede representar como el circuito de la Figura 40, que es un circuito RL con una fem. Aplicando las leyes de Kirchoff:

$$V_m(t) = R_m i(t) + L_m \frac{di(t)}{dt} + e_b(t) \quad (15)$$

$R_m \equiv$  Resistencia de armadura

$L_m \equiv$  Inductancia del motor

$e_b \equiv$  fem inducida

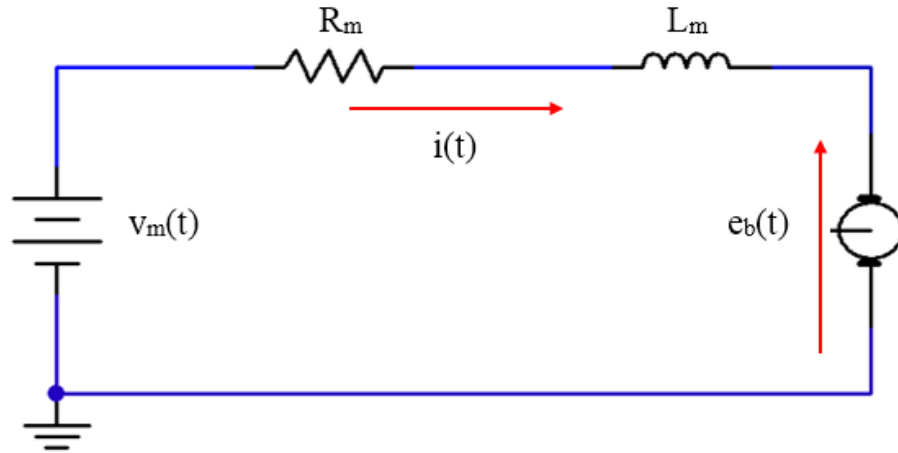


Figura 40. Representación eléctrica de un motor CD.

Por otro lado, la ecuación que describe al sistema mecánico con respecto a la aceleración y torque es:

$$T_m(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + T_l(t) + T_f(t) \quad (16)$$

$T_m \equiv$  Par motor

$J_m \equiv$  Inercia del rotor

$T_l \equiv$  Par de carga desde el eje del motor

$T_f \equiv$  Par de fricción

A su vez el par de fricción es dividido como lo muestra (17):

$$T_f(t) = T_{fc}(t) + T_{fv}(t) + T_{fs}(t) \quad (17)$$

$T_{fc} \equiv$  Par de fricción seca o fricción de Coulumb

$T_{fv} \equiv$  Par de fricción viscosa

$T_{fs} \equiv$  Par de fricción estática

Donde el par de fricción viscosa respecto a la velocidad angular es:

$$T_{fv}(t) = B_m \dot{\theta}_m(t) \quad (18)$$

$B_m \equiv$  Constante de fricción viscosa

$T_{fs}$  impide el movimiento del eje del motor hasta que la corriente eléctrica  $i(t)$  supere un valor constante, así en este instante de tiempo la ecuación eléctrica es:



$$V_m(t) = R_m i(t) + L_m \frac{di(t)}{dt} \quad (19)$$

Así (15) en régimen permanente quedaría como:

$$i(t) = \frac{U_m}{R_m} \quad (20)$$

con  $V_m(t) = U_m$ , es un valor constante

Lo que significa que el motor tiene un voltaje de arranque a partir del cual comenzará a girar,

Así de (16) tenemos:

$$T_m(t) = k_m i(t) \quad (21)$$

Sustituyendo (21) y (17) en (16):

$$k_m i(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + T_l(t) + T_{fc}(t) + T_{fv}(t) + T_{fs}(t) \quad (22)$$

$$\text{Sea } T_c(t) = T_{fs}(t) + T_{fc}(t) + T_l \quad (23)$$

Sustituyendo (23) en (22):

$$k_m i(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + T_c(t) + T_{fv}(t) \quad (24)$$

Sustituyendo (18) en (24):

$$k_m i(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + B_m \dot{\theta}_m(t) + T_c(t) \quad (25)$$

$T_c \equiv \text{Par de carga y fricción}$

Considere un motor CD donde la fuerza contraelectromotriz es directamente proporcional a la velocidad de giro, así:

$$e_b(t) = k_b \dot{\theta}_m(t) \quad (26)$$

$k_b \equiv \text{Constante contraelectromotriz}$

Sustituyendo (26) en (15):

$$V_m(t) = R_m i(t) + L_m \frac{di(t)}{dt} + k_b \dot{\theta}_m(t) \quad (27)$$

Ignorando el par de fricciones  $T_c(t)$  de (25) se tiene que:

$$k_m i(t) = J_m \ddot{\theta}_m(t) + B_m \dot{\theta}_m(t) \quad (28)$$

Sea (29), que se cumple para condiciones nulas:

$$\dot{\theta}_m(t) = \frac{d}{dt} \theta_m(t) \quad (29)$$

Así, aplicando la Transformada de Laplace (T.L.) a (29):

$$G_{\dot{\theta}_M}(s) = sG_{\theta_M}(s) \quad (30)$$

Aplicando la T.L. con condiciones nulas a (27) y (28):

$$V_M(s) = R_m I(s) + L_m s I(s) + k_b s \Theta_M(s) \quad (31)$$

$$k_m I(s) = J_m \Theta_M(s) s^2 + B_m \Theta_M(s) s \quad (32)$$

Sustituyendo (32) en (31), se obtiene la función de transferencia de posición del motor:

$$G_{\theta_M}(s) = \frac{\Theta_M(s)}{V_M(s)} = \frac{k_m}{L_m J_m s^3 + (B_m L_m + R_m J_m) s^2 + (R_m B_m + k_b k_m) s} \quad (33)$$

De (30) se obtiene la función de transferencia de velocidad del motor:

$$G_{\dot{\theta}_M}(s) = \frac{k_m}{L_m J_m s^2 + (B_m L_m + R_m J_m) s + (R_m B_m + k_b k_m)} \quad (34)$$

Con

$k_m \equiv$  Constante del par motor

$k_b \equiv$  Constante contraelectromotriz

$L_m \equiv$  Inductancia de armadura

$R_m \equiv$  Resistencia de armadura

$J_m \equiv$  Inercia del rotor

$B_m \equiv$  Constante de fricción viscosa

### *Método de eliminación de la constante eléctrica*

Este método permite simplificar la función de transferencia y trabajarla como un sistema de segundo orden [43]. Teniendo en cuenta que la constante eléctrica del motor es mucho menor que la constante mecánica se puede despreciar el factor de inductancia  $L_m$ , así de (27):

$$V_m(t) = R_m i(t) + k_b \dot{\theta}_m(t) \quad (35)$$

Sustituyendo (28) en (35):

$$V_m(t) = \frac{J_m R_m}{k_m} \ddot{\theta}_m(t) + \frac{B_m R_m + k_m k_b}{k_m} \dot{\theta}_m(t) \quad (36)$$

Aplicando T.L. con condiciones iniciales nulas a (36), se obtiene la función de transferencia de posición del motor:

$$G_{\Theta_M}(s) = \frac{\Theta_M(s)}{V_M(s)} = \frac{k_m}{(R_m J_m) s^2 + (R_m B_m + k_b k_m) s} \quad (37)$$

Teniendo en cuenta (29) y (30), se deduce que la función de transferencia de velocidad del motor es:

$$G_{\dot{\theta}_M}(s) = \frac{k_m}{(R_m J_m) s + R_m B_m + k_b k_m} \quad (38)$$

### 3.3.2. Obtención de parámetros físicos de un motor CD

Las funciones de transferencia obtenidas en el apartado anterior requieren de ciertos parámetros propios de cada motor, el inconveniente mayor es que el fabricante no los proporciona, por tal razón en este apartado se emplea un método para la obtención experimental de estos parámetros [43], [44], [45].

#### *Inductancia de armadura ( $L_m$ ) y resistencia de armadura ( $R_a$ )*

Tanto la inductancia de armadura como la resistencia de armadura, pueden medirse con un inductómetro y óhmetro. Para esto rote el motor y vuelva a hacer las respectivas mediciones, es necesario repetir el experimento varias veces hasta obtener resultados similares, posteriormente puede valerse de métodos estadísticos para obtener los valores finales.

#### *Constante de tiempo eléctrica ( $t_e$ )*

La constante de tiempo eléctrica surge de despejar  $\Theta_M(s)$ , de (31) y hacer la sustitución en (32), obteniendo la función de transferencia:

$$G_I(s) = \frac{I(s)}{V_M(s)} = \frac{J_m s + B_m}{(J_m s + B_m)(L_m s + R_m) + k_m k_b} \quad (39)$$

La constante de tiempo eléctrica con unidades en segundos, se obtiene en el instante antes de que el motor empiece a rotar, por tanto, se anula el acople mecánico ( $k_b$ ) de (39), así:

$$G_I(s) = \frac{1}{(L_m s^2 + R_m)} \quad (40)$$

$$\text{Sea } t_e = \frac{L_m}{R_m} \quad (41)$$

entonces  $-\frac{1}{t_e}$ , es el polo de (40)

#### *Constante contraelectromotriz ( $k_b$ )*

Cuando el motor rota, aparece una tensión proporcional al producto del flujo por velocidad angular, en este caso el flujo es constante, por lo tanto:

$$E_b \propto \omega, \quad \text{así } E_b = k_b \omega \quad (42)$$

$$\text{Además } E_b = v_i - (L_a + R_a)i \quad (43)$$

siendo  $v_i$  el voltaje de entrada.

Para hallar  $k_b$ , hágase rotar el motor a varios voltajes conocidos, méndase el voltaje en el momento en que este girando (este voltaje es  $E_b$ ), tómesese lectura de la velocidad angular y corriente para cada muestra. También se puede determinar  $E_b$  a partir de (43). La Figura 41, en la gráfica de la derecha muestra las curvas  $E_b$  usando (43) y la obtenida de manera experimental. Posteriormente, se realiza una regresión lineal de  $E_b$  contra  $\omega$ , a partir de la gráfica de la izquierda de la Figura 41. Tenga en cuenta que esta regresión en realidad describe la recta de (42), siendo  $k_b$  la pendiente.

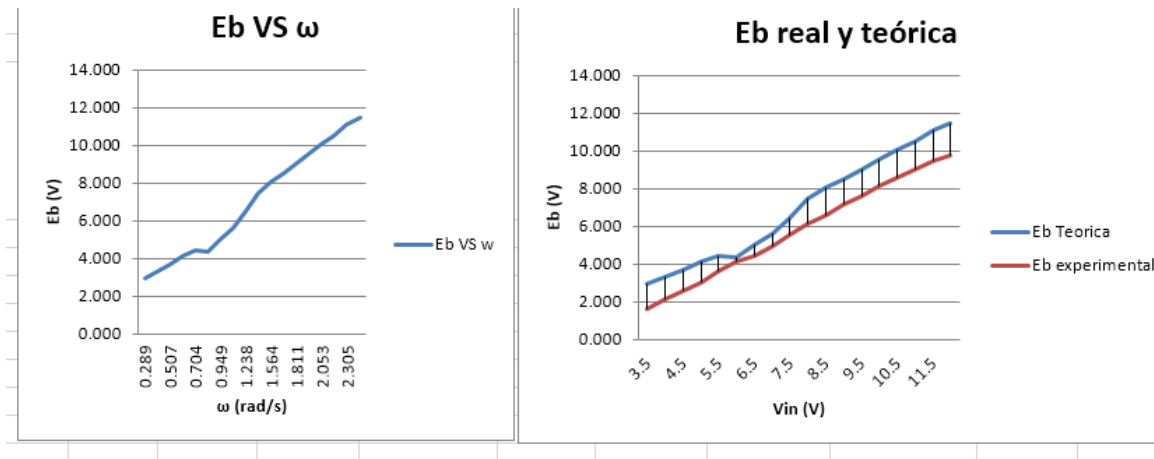


Figura 41. Gráficas para determinar la constante contraelectromotriz.

### Constante de torque ( $k_m$ )

El par torsor está relacionado por el producto de la corriente del motor y una constante de torque ( $k_m$ ). A partir de (21), y sabiendo que para una polea el torque se determina como:

$$T = Fr \tag{44}$$

Donde F es una fuerza tangencial y r el radio de la polea del motor, igualando (21) y (44) se tiene que la constante de torque es:

$$k_m = \frac{Fr}{I_{arr}} \tag{45}$$

Para hallar  $k_m$ . Con el uso del freno prony se mide la fuerza con un dinamómetro y se mide la corriente de arranque del motor, tal como se ilustra en la Figura 42, este experimento se repite las veces necesarias a fin de emplear un método estadístico y a partir de (45), se obtiene la constante de torque.

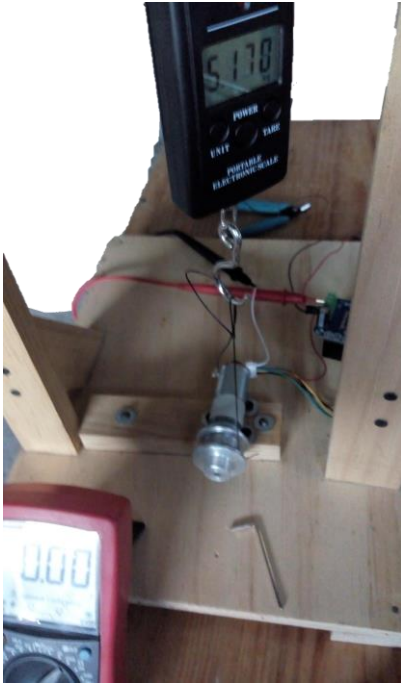


Figura 42. Obtención de la constante de torque.

### Constante de tiempo mecánica ( $t_m$ )

Con ayuda de un osciloscopio y un generador de funciones se introduce una onda cuadrada, con una frecuencia lo suficiente baja, a fin de que el motor alcance el régimen permanente. Posteriormente con ayuda del osciloscopio se captura la respuesta al escalón como se aprecia en la Figura 43, posteriormente se determina el tiempo en que la señal alcanza el 63.2% del voltaje nominal. Este tiempo corresponde a la constante de tiempo mecánica.

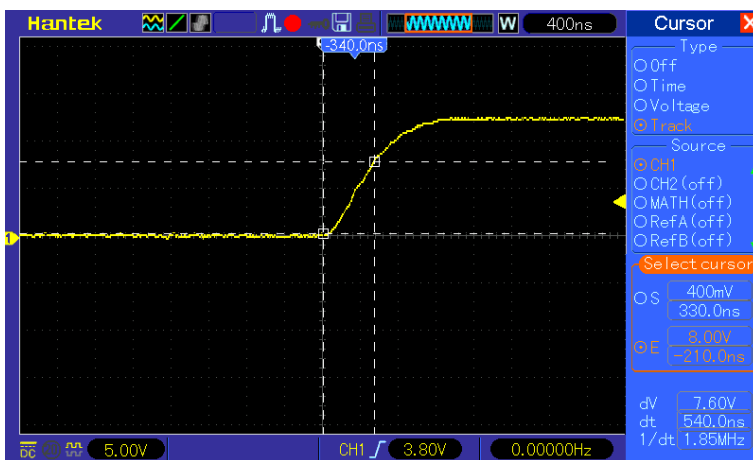


Figura 43. Constante de tiempo mecánica del motor 1.

### *Momento polar de inercia ( $J_m$ )*

La constante de tiempo mecánica surge de suponer que  $t_e$  es despreciable, es decir que  $L_m$  es nula, así a partir de la constante de tiempo mecánica se puede determinar el momento polar de inercia, pues todos los parámetros ya son conocidos:

$$t_m = \frac{R_m J_m}{R_m B_m + k_b k_m} \quad (46)$$

### *Constante de fricción viscosa ( $B_m$ )*

Para determinar la fricción viscosa, es necesario determinar la corriente del motor sin carga y medir su velocidad en régimen permanente. Así que se introduce una señal escalón y se obtiene de manera simultánea la velocidad angular del motor y la corriente a voltaje nominal. Este experimento se repite lo suficiente para tratar por métodos estadísticos los datos y posteriormente con ayuda de (47), se obtiene  $B_m$ .

$$B_m = \frac{k_m I_o}{\dot{\theta}_M} \quad (47)$$

$I_o \equiv$  Corriente sin carga

$\dot{\theta}_M \equiv$  Velocidad angular del motor

### *Experimentación*

Con el método mencionado se caracterizaron ambos motores y se obtuvieron los datos para el motor 1 que se muestran en la Tabla 5, posteriormente se caracterizó el segundo motor y se obtuvieron los datos de la Tabla 6, con estos datos se hallaron sus respectivas funciones de transferencia.

Parametros de entrada experimentales							Parametros por ecuaciones	
Resistencia de armadura ( $\Omega$ )	Inductancia de Armadura (L)	Cte. Contra electromotriz	Cte. Torque	Cte. Tiempo mecanica (s)	Relación de engranaje	Cte. de fricción viscosa	Cte. Tiempo electrica (s)	Momento de inercia
Ra o Rm	La o Lm	Ke o kb	Kt o km	tm	N	Bm	te	Jm
6.4933333	6.7E-3	5.0E+0	1.0E+0	540.0E-9	1	29.8E-3	1.0E-3	441.4E-9

Tabla 5. Parámetros físicos del motor 1 correspondiente al control de giro del disco.

Parametros de entrada experimentales							Parametros por ecuaciones	
Resistencia de armadura ( $\Omega$ )	Inductancia de Armadura (L)	Cte. Contra electromotriz	Cte. Torque	Cte. Tiempo mecanica (s)	Relación de engranaje	Cte. de fricción viscosa	Cte. Tiempo electrica (s)	Momento de inercia por todas las ctes
Ra o Rm	La o Lm	Ke o kb	Kt o km	tm	N	Bm	te	Jm
8.86	8.2E-3	4.9E+0	943.6E-3	580.0E-9	1	17.9E-3	924.3E-6	312.4E-9

Tabla 6. Parámetros físicos del motor 2 correspondiente al control de desplazamiento del filtro mecánico.

### 3.3.3. Controlador Proporcional Integral

Para el control de los motores se eligió un controlador PI, el cual permite eliminar el error en estado estable. En este apartado se muestra el método usado para la sintonización de los motores. El diagrama a bloques de la Figura 44, muestra el sistema de control en lazo cerrado del motor 1, encargado de controlar la rotación del disco, mientras que la Figura 45, muestra el diagrama a bloques del segundo motor, que controla el sistema de filtrado mecánico, las funciones de transferencia corresponden a la ecuación (37).



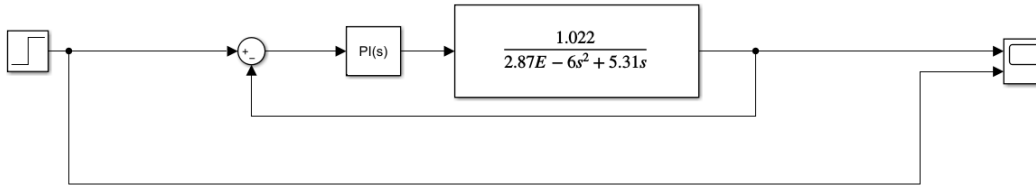


Figura 44. Diagrama a bloques de sistema de control del motor 1.



Figura 45. Diagrama a bloques de sistema de control del motor 2.

Aunque existen diversos métodos para la sintonización de controladores, en este análisis se usó el método de optimización computacional, por medio de un algoritmo para estimar las ganancias deseadas [46], el algoritmo usado se presenta en el Anexo C. Para ambos motores se diseñó el controlador PI con un sobrepaso máximo del 5% y un tiempo de asentamiento ( $t_s$ ) al 2% menor de 15ms. Así la respuesta al escalón unitario del motor 1 es la que se aprecia en la Figura 46, mientras que la respuesta al escalón unitario del motor 2 es la de la Figura 47, nótese como ambas respuestas satisfacen las condiciones dadas. Finalmente, estas ganancias fueron implementadas en la tarjeta de control.

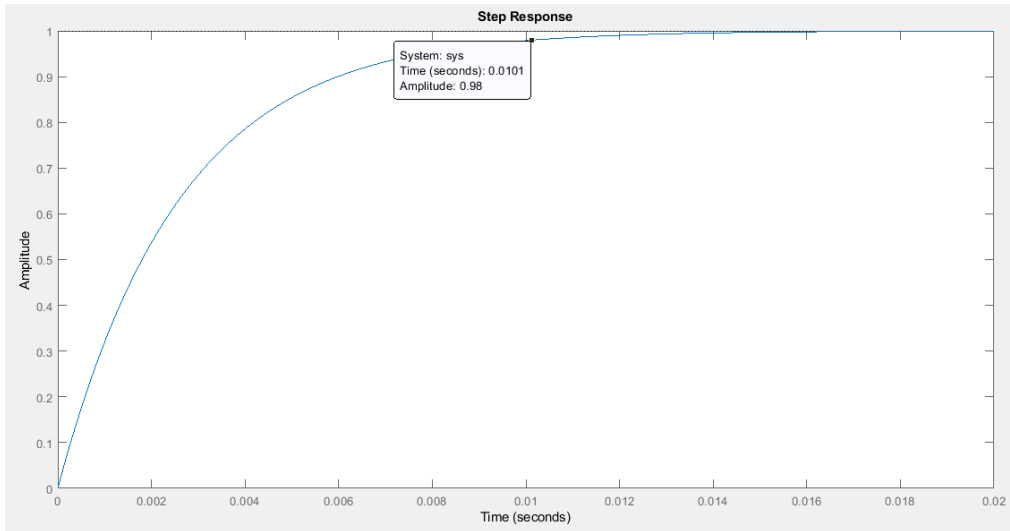


Figura 46. Respuesta al escalón del motor 1 con controlador PI.

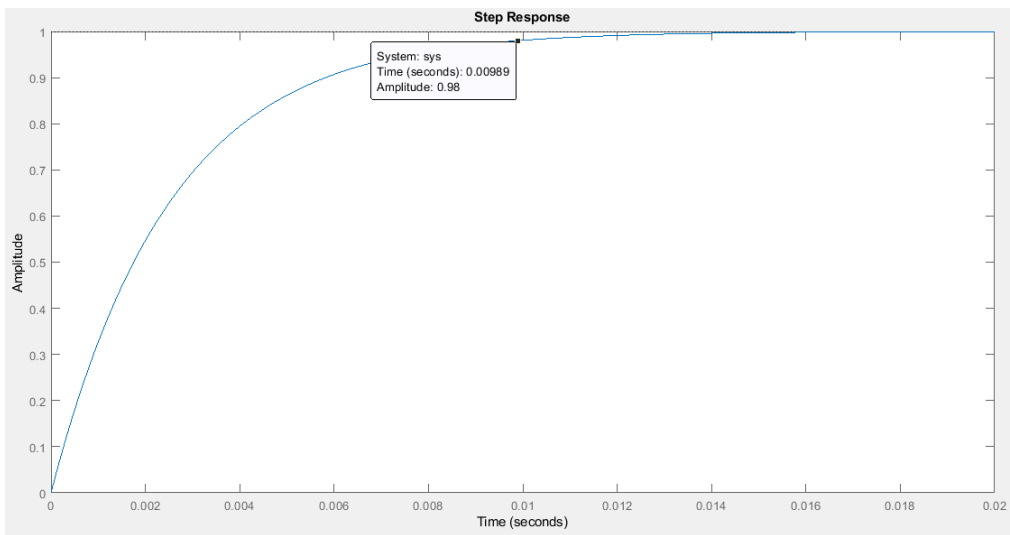


Figura 47. Respuesta al escalón del motor 2 con controlador PI.

## 4. Validación y resultados

### 4.1. Funcionamiento de la máquina

La máquina se comunica por comunicación UART y cuenta con comandos básicos que permiten su funcionamiento tal como poner a home la máquina, poner a home el disco, elegir el tipo de análisis a realizar, es decir general o analizar un sector en específico, también indica si el análisis se efectuó de manera correcta o si hubo alguna falla en el proceso, indicando un código en específico, por ejemplo si los micrófonos no capturaron ningún sonido o si algún motor o encoder fallaron.

Para cada acción se tiene un código particular, por ejemplo, para ajustar el disco a home se introduce el código 500 por el serial, así el disco empieza a girar y para detenerlo se presiona el límite de carrera. Para dar mayor precisión a la calibración del disco se introduce el código 550 con lo cual el disco gira de manera más lenta y de igual manera se detiene el giro con el límite de carrera.

Para poner a home el sistema de filtrado mecánico y el disco una vez que este ya fue ajustado se introduce el código 450. Para calibrar la altura del estabilizador y la distancia del actuador por primera vez, es decir para un disco en particular se usa el código 400.

Para agilizar el proceso se realizó una interfaz en Matlab® que proporciona un menú desde el cual se pueden elegir las funciones ya mencionadas. Cuando se analiza el disco y se elige la opción análisis general, la maquina divide al disco en 12 sectores para facilitar la inspección visual del disco, así primero examina el sector 12 y va de manera descendente hasta llegar al sector 1 girando en sentido contrario a las manecillas del reloj, es decir el disco lo va rotando cada 30°.

Una vez que termino la inspección los datos se guardan en una matriz de 12 filas las cuales corresponden a cada uno de los 12 sectores. Cada fila contiene 11,000 columnas lo que corresponde a 11,000 muestras en un rango de tiempo de 110 ms, así cada muestra es recolectada cada 10µs.

Debido a que son 2 micrófonos el análisis proporciona 2 matrices. Los datos que contienen las matrices en realidad son los voltajes dados de los micrófonos, convertidos en bits. La resolución que se maneja es de 12 bits y el voltaje de los micrófonos va de 0v a 3.3v, así el rango de los valores de las matrices va de 0 a 4096 bits. Para realizar la transferencia de datos más rápido, se envían los datos de manera simultánea. Para evitar que estos se mezclen, se elige un micrófono al cual se le suman 5000 unidades, es decir un micrófono envía datos de 0 a 4096 unidades, mientras que el otro envía datos de 5000 a 9096 unidades, finalmente el software en Matlab® decodifica ambas señales y las agrupa en su respectiva matriz.

## 4.2. Método de análisis de discos de frenos

### 4.2.1. Discos de pruebas

Para validar el funcionamiento del prototipo se eligieron cuatro discos de frenos automotriz de la misma marca y modelo. Dos discos son usados, de los cuales uno de ellos se encuentra fracturado como se muestra en la Figura 48, en este apartado será identificado como disco 1. El siguiente disco de la Figura 49 corresponde al disco 2, el cual se encuentra desgastado por el propio trabajo, pero sin daños aparentes.



*Figura 48. Disco 1 de pruebas fracturado.*



*Figura 49. Disco 2 de pruebas usado.*

El disco 3 y 4 de la Figura 50, son discos nuevos de la misma marca y modelo y aun no se han instalado, por lo que estos serán utilizados como modelo base a partir del cual se determinará el estado de los discos anteriores.



*Figura 50. Discos nuevos de pruebas 3 y 4.*

#### 4.2.2. Procedimiento para analizar los discos

Primeramente, se da una limpieza al disco a fin de quitar polvos, lodos y demás agentes contaminantes, también se le hace una marca, pues a partir de esta se referenciará el disco,

posteriormente se realiza un examen visual del disco, donde se determinan algunos de los daños más frecuentes en discos mencionados en el apartado 2.4.4. Posteriormente se procede a montar el disco en la máquina de pruebas, se calibran las alturas del sistema de golpeteo y el sistema estabilizador.

Se realizan dos tipos de pruebas a fin de obtener comparativas, la primera consiste en introducir la máquina prototipo en la caja acústica y sellarla perfectamente, una vez dentro se procede a realizar el estudio. La otra prueba se realiza fuera de la caja acústica y en condiciones mínimas de ruido.

Para analizar el disco, se trabaja en el dominio de la frecuencia, así lo primero es determinar la frecuencia de muestreo. Sabiendo que la frecuencia máxima a captar es de 20kHz y teniendo en cuenta el teorema de Nyquist-Shannon se elige a una frecuencia de muestreo de 100kHz. El análisis del disco consta de 3 estudios, así primeramente se obtiene el espectro de potencia con la transformada rápida Fourier (FFT), el cual resalta las frecuencias de falla particulares de cada disco y permite un análisis minucioso de este, posteriormente se realiza el análisis de la densidad espectral de potencia, que muestra una idea general del estado del disco en comparativa a un modelo base, además muestra de manera más clara y rápida las frecuencias de falla y finalmente se realiza el estudio de la distorsión armónica total (THD), que da una idea clara del estado general en el que se encuentra la pista del disco, en otras palabras da un indicio para saber qué tan deteriorado está el disco aún en etapas tempranas.

### **4.3. Espectro de frecuencias**

La señal digital capturada en las matrices, inicialmente está en función del tiempo, por lo que se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT), pasando al dominio de la frecuencia y al graficar dicha señal se obtiene el espectro de frecuencias. Estrictamente hablando se tienen 12 señales propias de cada sector, por lo que analizar cada una representaría una tarea compleja. Así que se promedian las 12 señales como se muestra en la Figura 51 y se obtiene una curva característica de todo el disco, que está representada de color negro. Compárese la gráfica de la Figura 52, la cual corresponde al disco 1 (disco dañado), con la gráfica de la Figura 51, correspondiente a un disco nuevo. Ambas gráficas corresponden a la cara frontal del disco de frenos y el estudio se realizó dentro de la caja acústica con el micrófono de

contacto. Nótese como las curvas del disco 1 presentan un desorden en amplitud muy evidente en comparación al disco 3, el cual presenta sus curvas ordenadas.

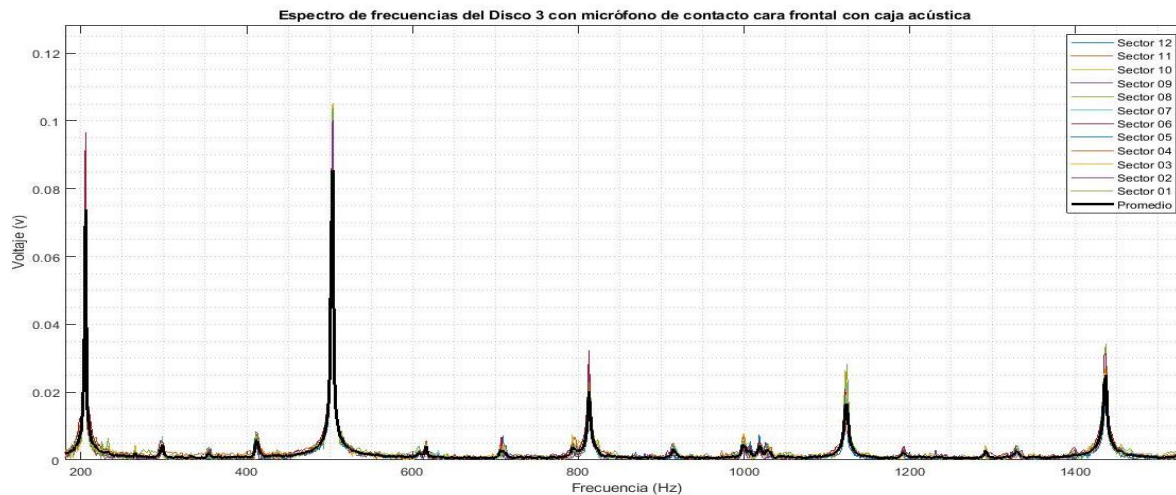


Figura 51. Espectro de frecuencias del disco 3.

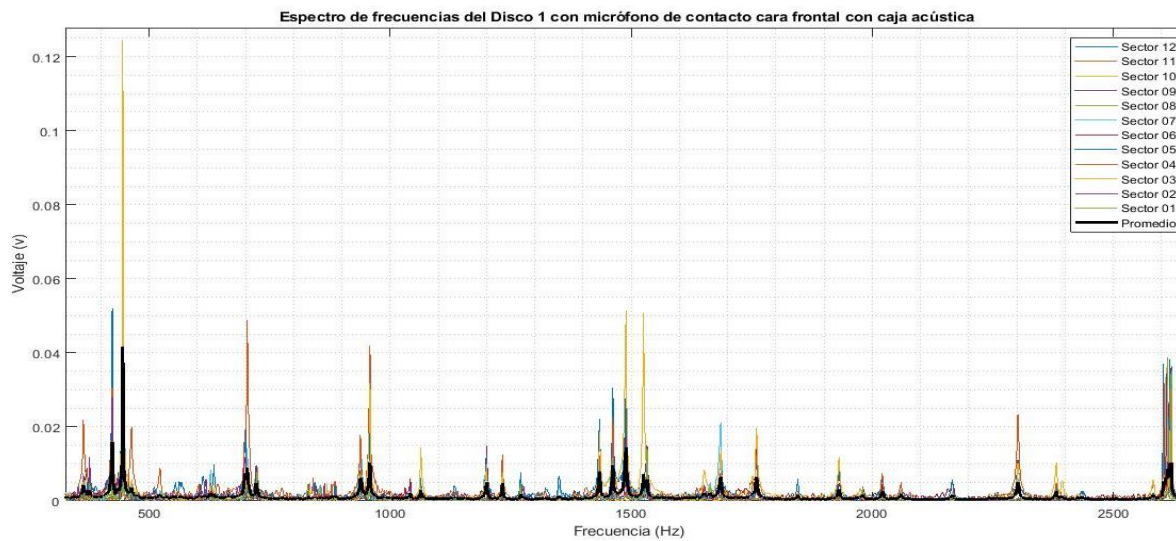


Figura 52. Espectro de frecuencias del disco 1.

Además, las amplitudes del disco 1 son más bajas que las del disco 3. Otro punto a resaltar es el corrimiento a las bajas frecuencias de la Figura 52, en comparativa a la gráfica de la Figura 51. Estas características se pueden identificar a lo largo del estudio con ambos micrófonos y con la máquina dentro o fuera de la caja acústica.



### 4.3.1. Espectro de frecuencias con el micrófono de aire

En la Figura 53, se muestra una gráfica comparativa de los 4 discos, este estudio se realizó en la cara frontal del disco y dentro de la caja acústica. Existen frecuencias base en las cuales se presentan amplitudes altas. Las primeras se presentan 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 presentan en el rango de 400Hz a 600Hz, donde se presentan las primeras frecuencias de falla, del disco 1 a 424Hz, la siguiente se presenta a 447Hz, en los discos 1 y 2. El siguiente desfase se presenta en el rango de 650Hz a 850Hz, donde el corrimiento respecto a los discos en buen estado es de 100Hz. En las frecuencias de 938Hz y 973Hz, se encuentran nuevas frecuencias de falla. Las frecuencias de falla más evidentes se dan en el rango de 1400Hz a 1550Hz.

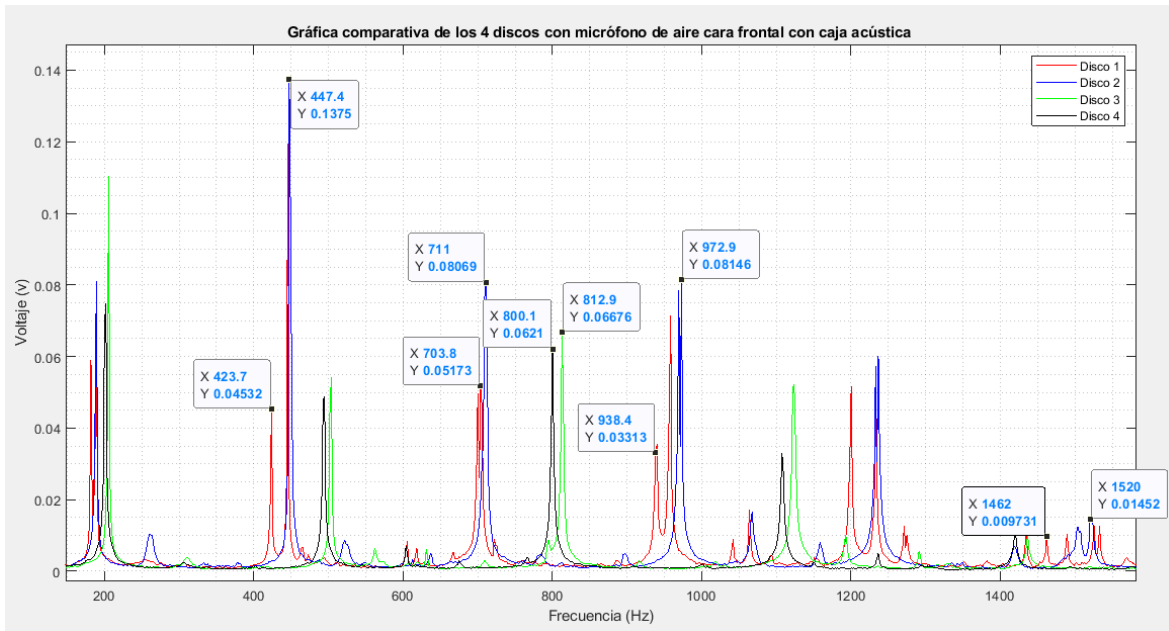


Figura 53. Espectro de frecuencias con micrófono de aire y caja acústica.

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



En la Figura 54 se presenta el mismo estudio, pero sin la caja acústica. Nótese que se presentan los picos de amplitud en las mismas frecuencias que la de la Figura 53, lo que demuestra que la caja acústica no presenta interferencia en los rangos de frecuencias, por lo tanto, el análisis anterior es el mismo para esta gráfica. Se observa que el corrimiento de los discos dañados siempre se inclina a las bajas frecuencias, pero a partir de 1000Hz, este patrón cambia y empiezan a aparecer amplitudes altas solo en los discos usados, también en 900Hz aparece una frecuencia de falla para el disco 2 y en 940Hz aparece la frecuencia de falla del disco 1, muy similar a la frecuencia de la gráfica anterior que se presentó en 938.4Hz, cabe mencionar que este análisis se hizo en fechas diferentes y con características diferentes. A partir de 1200Hz, se presenta un desfase mayor entre los discos nuevos y los usados, además el espectro del disco fracturado presenta la misma forma en la frecuencia de falla de 1275Hz y nuevamente aparecen frecuencias de falla de los discos 1 y 2 en el rango de 1500Hz a 1600Hz.

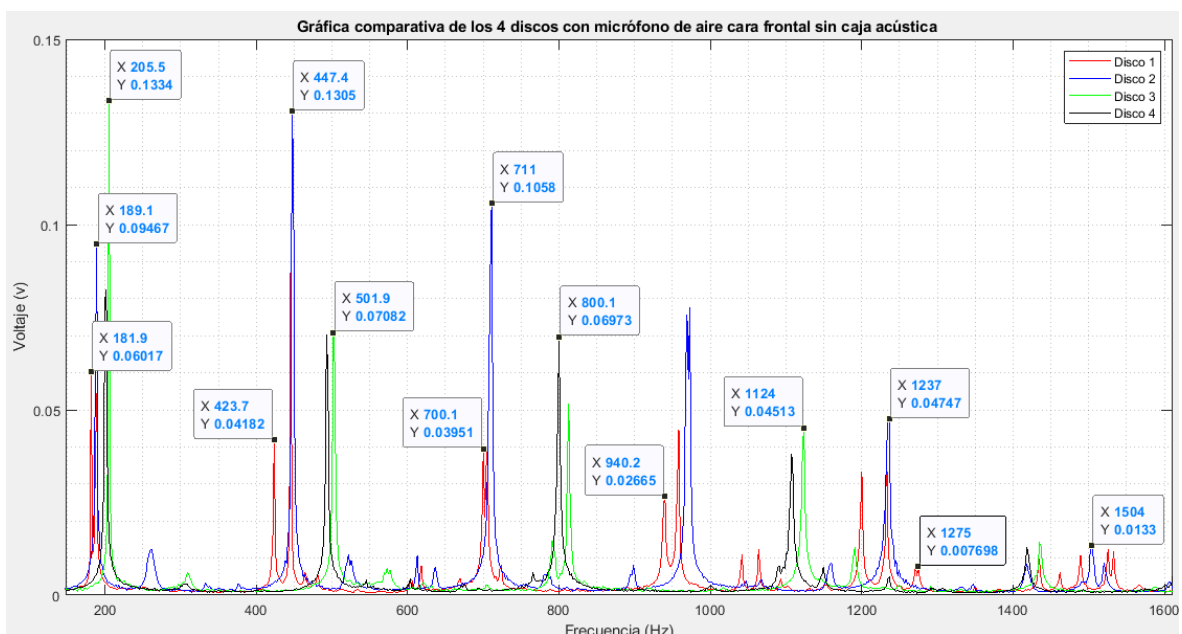


Figura 54. Espectro de frecuencias con micrófono de aire sin caja acústica.

#### 4.3.2. Espectro de frecuencias con el micrófono de contacto

En la Figura 55, se muestra el espectro de frecuencias de la cara frontal del disco con el micrófono de contacto y dentro de la caja acústica, los picos de amplitud, se encuentran en

el mismo rango que en las gráficas del micrófono de aire. Una diferencia a tener en cuenta es que se registran mayores amplitudes para los discos en buen estado, además el disco con menores amplitudes es el disco 1, una razón es la superficie de los discos deteriorados, pues está ya no es uniforme, lo que impide la adherencia total del micrófono de contacto. Con este micrófono es posible registrar mayores frecuencias de falla, de manera muy evidente para el rango de 1800Hz a 2500Hz y en la frecuencia de falla de 2620Hz, aparece una frecuencia de falla de gran amplitud que no se aprecia con el micrófono de aire. Las frecuencias de falla mostradas en las gráficas anteriores se siguen presentando en esta gráfica. Otro punto a mencionar es la distribución del espectro de frecuencias del disco 1, pues, aunque sus amplitudes son menores, se presentan mayores picos de amplitud en varias frecuencias, caso que no se da en los discos nuevos.

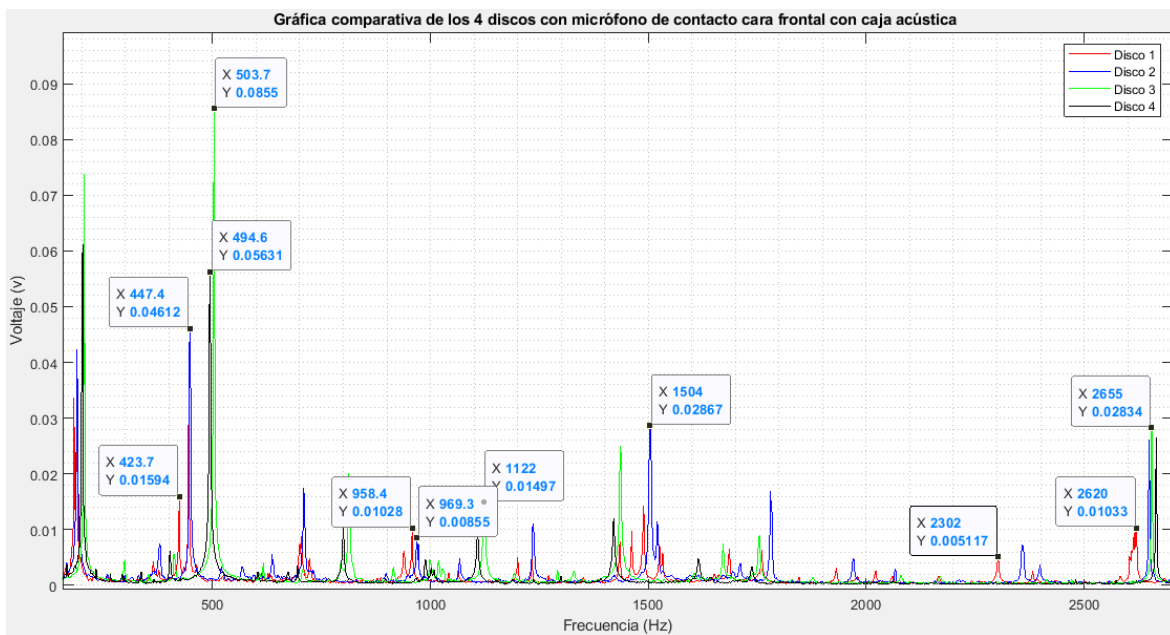


Figura 55. Espectro de frecuencias con micrófono de contacto y caja acústica.

La Figura 56 muestra la gráfica para el análisis de la superficie frontal de los discos, con el micrófono de contacto dentro de la caja acústica. En el micrófono de contacto no se presentan problemas de reflexión a los que es vulnerable el micrófono de aire y los resultados lo demuestran, pues no existen diferencias aparentes con la gráfica de la Figura 55.

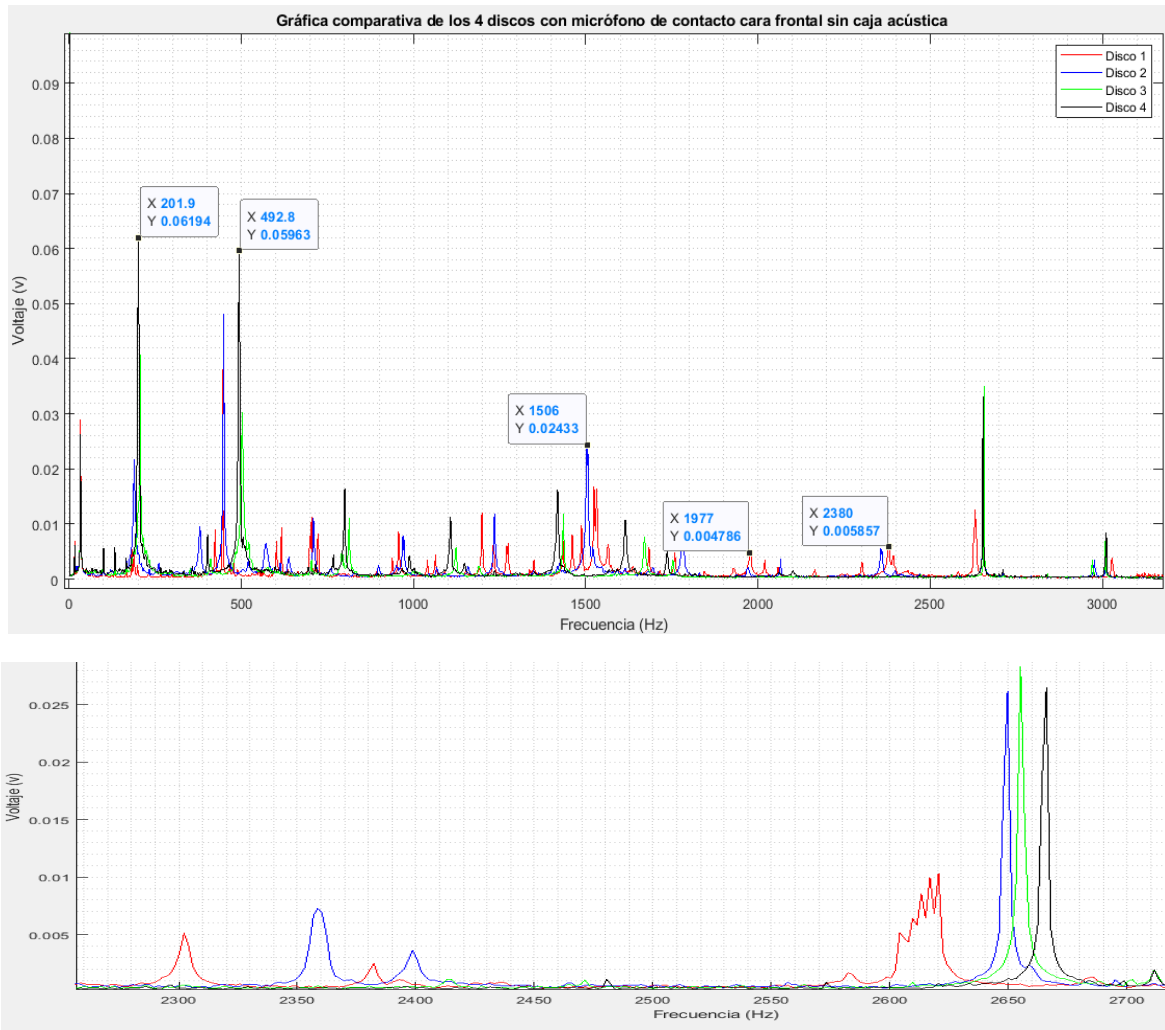


Figura 56. Espectro de frecuencias con micrófono de contacto sin caja acústica.

Para esta gráfica tiende a existir una ligera variación en amplitudes, pero conservan los mismos rangos de frecuencias, además las frecuencias de falla se siguen presentando en lugares muy cercanos a los ya mencionados y la distribución del espectro de frecuencias del disco 1 sigue siendo mayor que el resto, también para el rango de 2550Hz a 2640Hz y 3000Hz a 3200Hz, aparecen frecuencias de falla únicas del disco 1. Este resultado también se da con el análisis de la Figura 55, solo que, para apreciar mejor la forma de los espectros, el rango de frecuencias se recortó.

## 4.4. Espectro de potencia

El análisis del espectro de potencias amplifica las frecuencias de falla y también permite identificar los picos de las frecuencias base de los discos. A diferencia del espectro de potencia este análisis nos da resultados visuales más claros del disco por lo que es una manera rápida de determinar su estado.

El procedimiento usado para determinar el espectro de potencia es el mismo que con el espectro de frecuencias. A partir de las 12 curvas se obtiene una señal promedio que caracteriza a todo el disco y con esta se trabaja. Una vez obtenida la curva de cada disco se procede a compararlas entre sí, con el fin de determinar el estado de cada uno. Los siguientes objetivos son determinar si la caja acústica afecta las señales de prueba y determinar si ambos micrófonos son confiables para el análisis en discos.

### 4.4.1 Análisis del espectro de potencia con el micrófono de aire

La Figura 57, muestra el análisis de la cara frontal del disco con el micrófono de aire dentro de la caja acústica, se comparan los discos usados 1 y 2. Nótese que el disco 1 está desfasado hacia las frecuencias bajas y a medida que la frecuencia aumenta el desfase es mayor, no existe linealidad en el desfase entre cada pico.

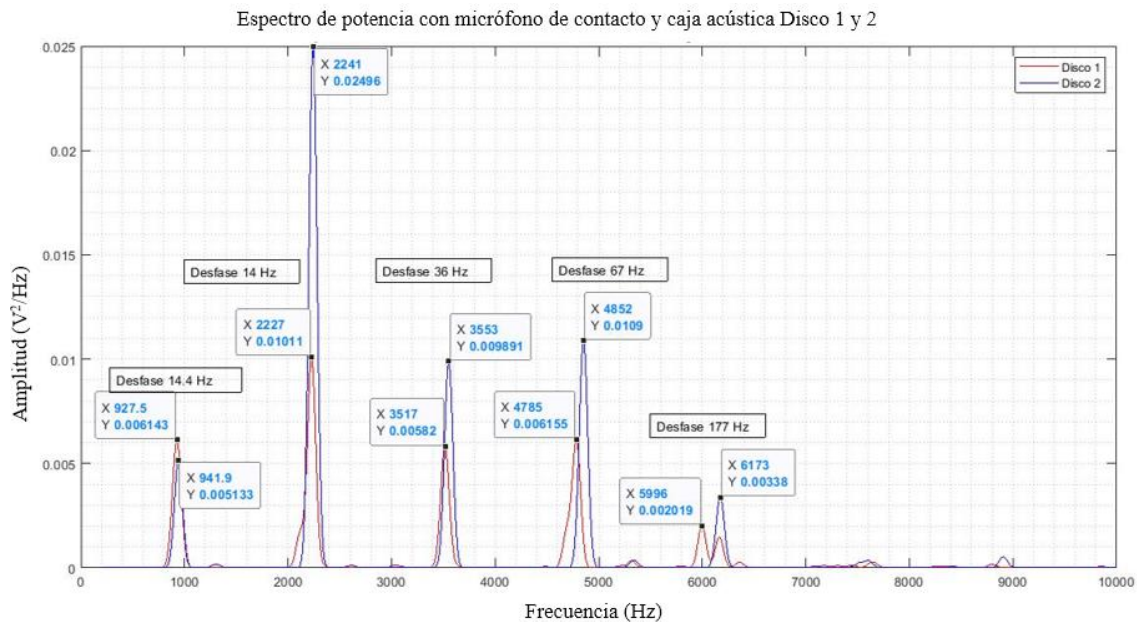


Figura 57. Espectro de potencia con micrófono de contacto y caja acústica de los discos 1 y 2.

Por otro lado, la Figura 58, muestra el mismo análisis, pero sin la caja acústica, como se observa no existen diferencias relevantes entre sí, al igual que con el análisis anterior, lo que da un indicativo que el uso de la caja acústica no afecta en los análisis. El estudio de cada disco se repitió 5 veces, es decir 5 pruebas con la caja acústica y 5 pruebas sin esta, dando un total de 10 experimentos por disco, los datos mostrados corresponden a diferentes análisis arbitrarios lo que demuestra que las pruebas convergen. A partir de aquí se mostrarán arbitrariamente las pruebas con caja y sin esta pues los resultados son similares. La Figura 59, muestra el mismo análisis pero con los discos nuevos 3 y 4, como es de suponer estos no son ideales por lo que también presentan desfase entre sí, sin embargo este es mucho menor que en los dañados, pues en los discos 1 y 2 el ultimo pico presentó un desfase de 177 Hz, mientras que en los discos 3 y 4 el desfase fue de 77Hz, dato que coincide con el desfase penúltimo del pico de la Figura 57. También a medida que las frecuencias aumentan el desfase entre sí lo hace.

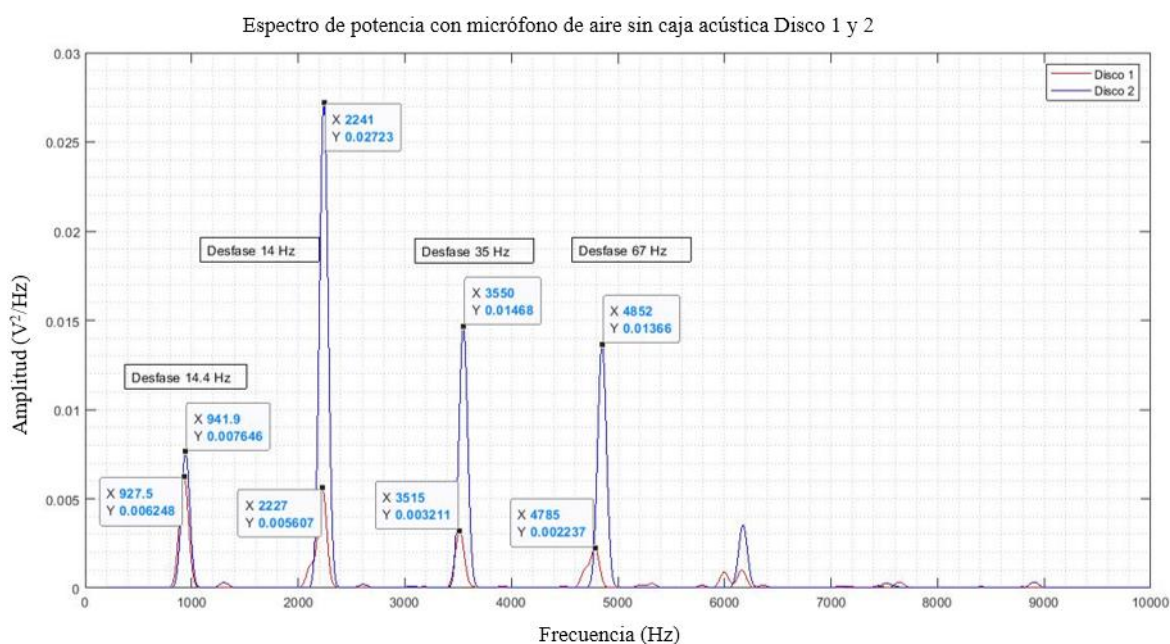


Figura 58. Espectro de potencia de los discos 1 y 2 sin caja acústica.

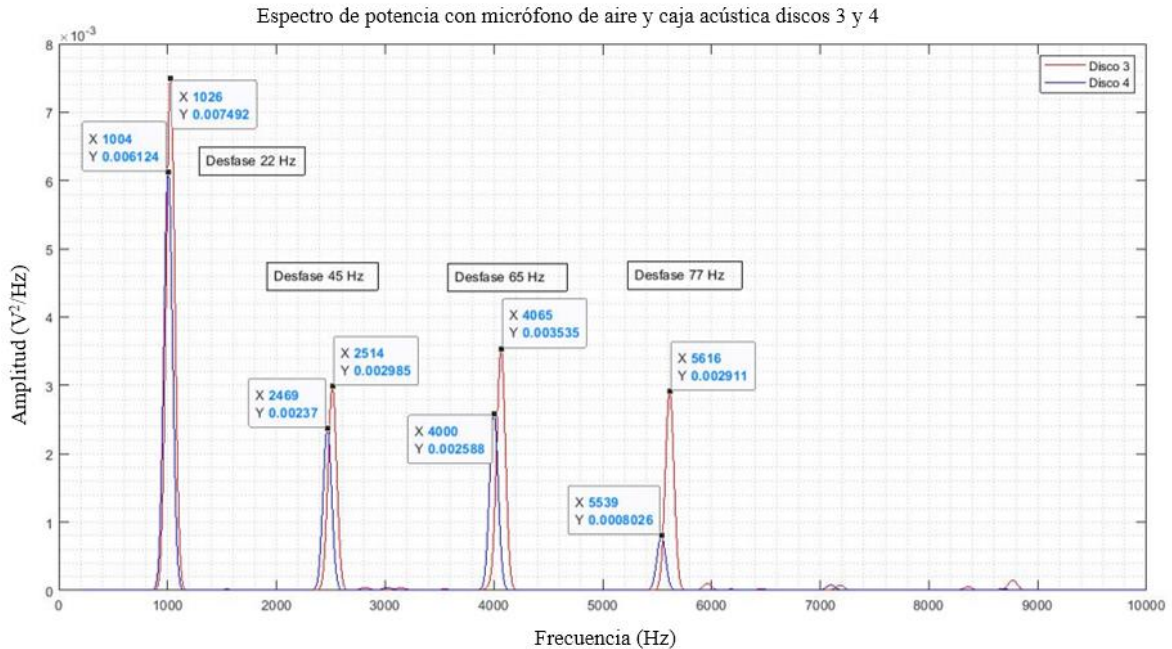


Figura 59. Espectro de potencia de los discos 3 y 4 con caja acústica y micrófono de aire.

#### 4.4.2. Análisis del espectro de potencia con el micrófono de contacto

La Figura 60, muestra el espectro de potencia para la cara frontal de los discos 1 y 3 tomado con el micrófono de contacto, el disco 1 se desfasa hacia las frecuencias bajas y al igual que en los casos anteriores este desfase aumenta a medida que las frecuencias lo hacen, otro punto a notar es la amplitud superior del disco 3 en comparativa al 1, también téngase en cuenta que el disco 3 presenta menos picos de amplitud que el disco 1, lo cual explica porque existe mayor energía en los principales picos del disco 3. Debido al rango de muestra en que se tomó la gráfica no se aprecian mucho las frecuencias de falla, pero se muestra una forma característica en 7500Hz. También aparecen en 1900Hz, 3100Hz, 5000Hz y 6000Hz.

La Figura 61, muestra el mismo análisis sin la caja acústica, donde se aprecian de manera muy clara las frecuencias de falla en 3500Hz, 4900Hz, 6000Hz y 7800Hz. Al igual que la gráfica anterior, esta gráfica muestra que la energía del disco 1 está distribuida en muchos más puntos, por lo que la energía en cada uno de ellos es menor, caso contrario al que se da en discos en buen estado, donde la energía es mayor, pero en menos picos.



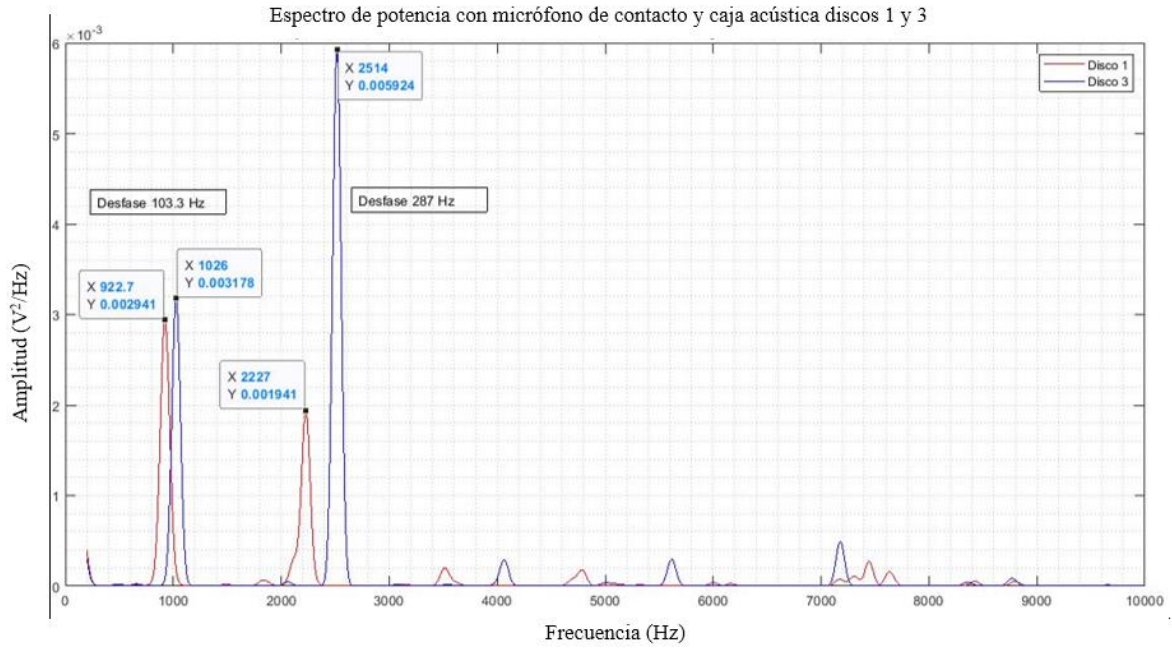


Figura 60. Espectro de potencia discos 1 y 3 con micrófono de contacto y caja acústica.

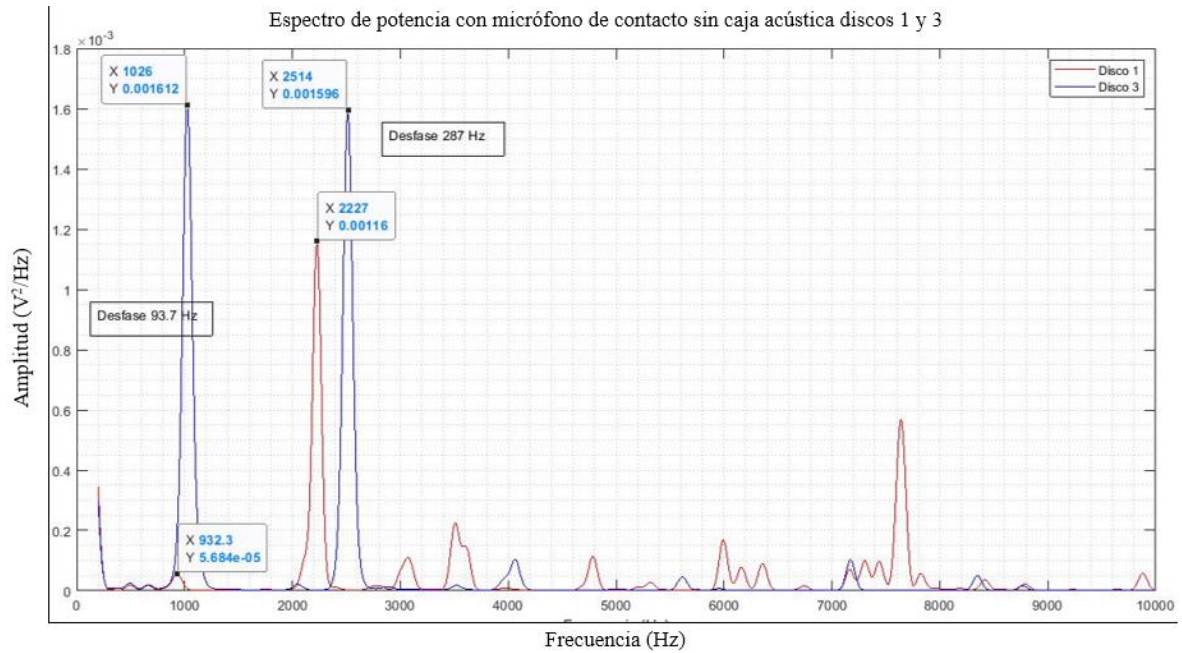


Figura 61. Espectro de potencia discos 1 y 3 con micrófono de contacto sin caja acústica.

## 4.5. Análisis de la distorsión armónica total

La distorsión de señales, es la deformación que se presenta en una señal conocida y que está contaminada por armónicos, es decir, que estas señales se presentan en todo momento del análisis y sus frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental, pero con menor energía. Para cuantificar la señal es necesario conocer la frecuencia fundamental y la relación del contenido de sus armónicos, esta razón, suele expresarse en porcentajes para conocer la influencia de la frecuencia fundamental en la señal de interés.

Para estudiar los discos, se usó este análisis con el fin de determinar la frecuencia fundamental de cada sector, así se obtuvieron 12 muestras por disco que caracterizan toda su superficie. La Figura 62, 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 este tipo de gráficos es complicado al momento comparar las frecuencias fundamentales de cada disco, por ello, el método desarrollado consiste en determinar la frecuencia fundamental, la amplitud y el porcentaje de THD de cada sector del disco a analizar. Posteriormente estos datos son guardados en 3 vectores y son comparados con los valores base determinados a partir de los discos nuevos.

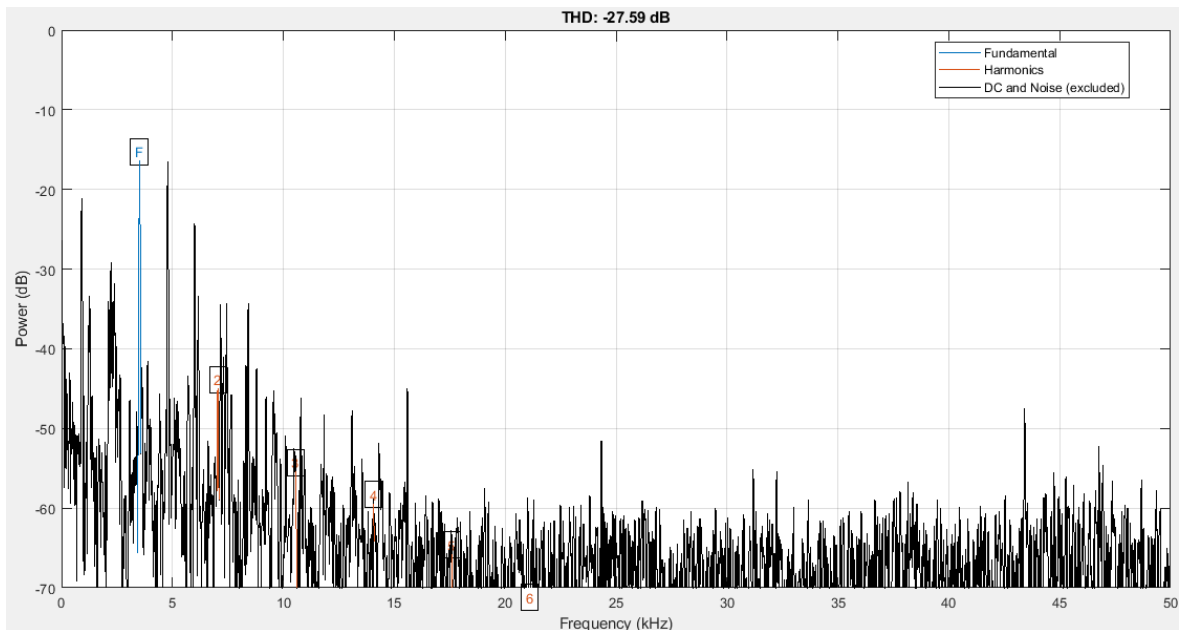


Figura 62. Gráfica del análisis de THD de uno de los discos nuevos.



La Figura 63, muestra el estudio de THD con el micrófono de aire y la caja acústica, este examen es el más rápido para detectar de manera visual el disco dañado. Nótese el primer gráfico de las amplitudes, la variación que se da en cada uno de los sectores del disco 1 es muy significativa en comparación al resto, lo que indica que su superficie es discontinua, además este disco presenta una ruptura lo que afecta toda la superficie de la pista. Por otro lado, el disco 2 que, aunque no se encuentra fracturado presenta desgaste y se refleja con la mayor amplitud que el resto de las curvas. Las amplitudes de las frecuencias fundamentales también pueden 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 pueden estar asociadas a estas características, otro punto a destacar para el disco 2 es como los cambios entre cada sector son suaves, así como los discos nuevos, lo que indica que la pista se encuentra uniforme en su superficie. Por otro lado, los discos 3 y 4 presentan suavidad en su superficie, además se encuentran con bajas amplitudes y siguen un mismo patrón de forma entre ellos con un ligero offset.

En los análisis anteriores se estudiaron, principalmente las frecuencias para determinar el estado de los discos, con este análisis se toma en consideración 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 análisis anteriores.

El siguiente gráfico a analizar corresponde a las frecuencias fundamentales, en este caso la manera en cómo determinar el estado del disco se basa 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, consiste en realizar la comparativa del valor de sus frecuencias, nótese como los discos en buen estado presentan frecuencias constantes de no más de 1kHz, mientras que el disco 2 presenta 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 determinaría una constante por encima de 1.5kHz, dato que también indicaría un daño en el disco.

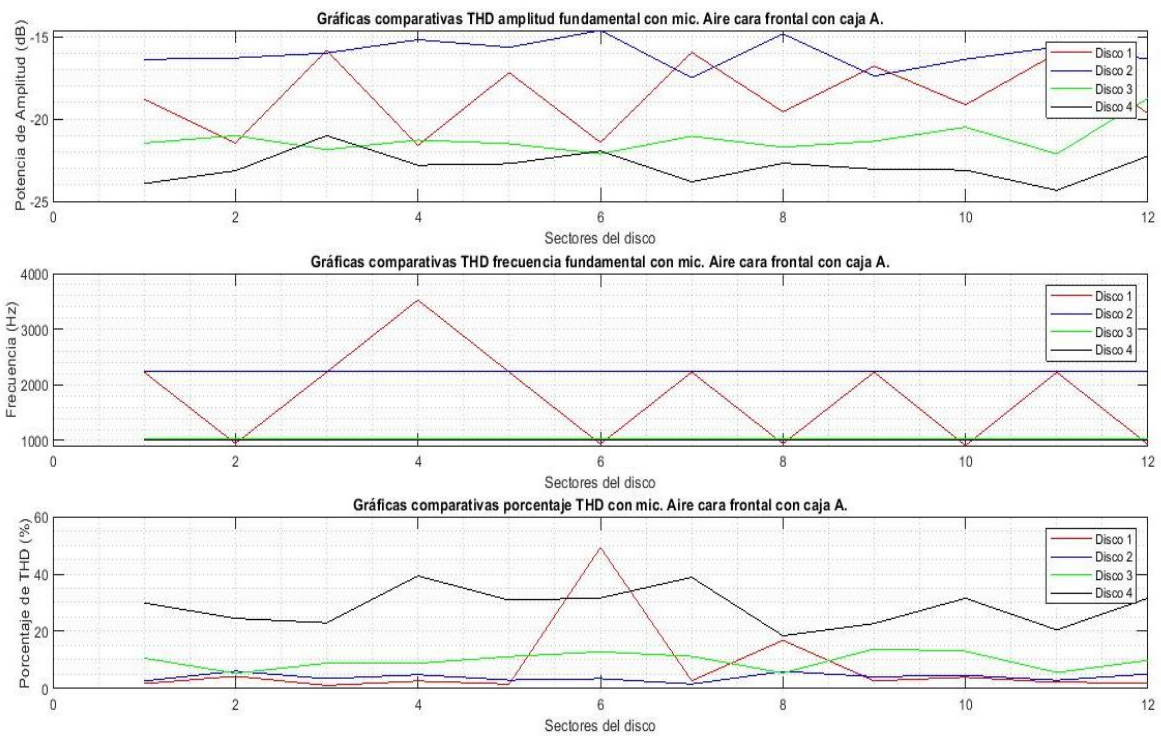


Figura 63. Análisis de THD de los cuatro discos con micrófono de aire y caja acústica.

Finalmente, el ultimo gráfico de la Figura 63, muestra el porcentaje de THD de cada una de las señales dadas, a diferencia de los resultados anteriores, en este caso los discos que presentan un porcentaje mayor de THD son los discos en buen estado, mientras que los más deteriorados no presentan THD.

La Figura 64, presenta el mismo análisis, pero sin la caja acústica, 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 sigue presentando grandes diferencias entre sus sectores y la curva del disco 2 presenta variaciones mayores al de la Figura 63. Por otro lado, los discos 3 y 4 siguen permaneciendo constantes y presentan menor amplitud sus frecuencias fundamentales. Para el caso del gráfico de las frecuencias fundamentales, los discos 1 y 2 presentan gran desorden y variaciones grandes, mientras que los discos nuevos siguen presentando frecuencias constantes, por otra parte, el porcentaje de THD sigue siendo mayor para los discos nuevos.

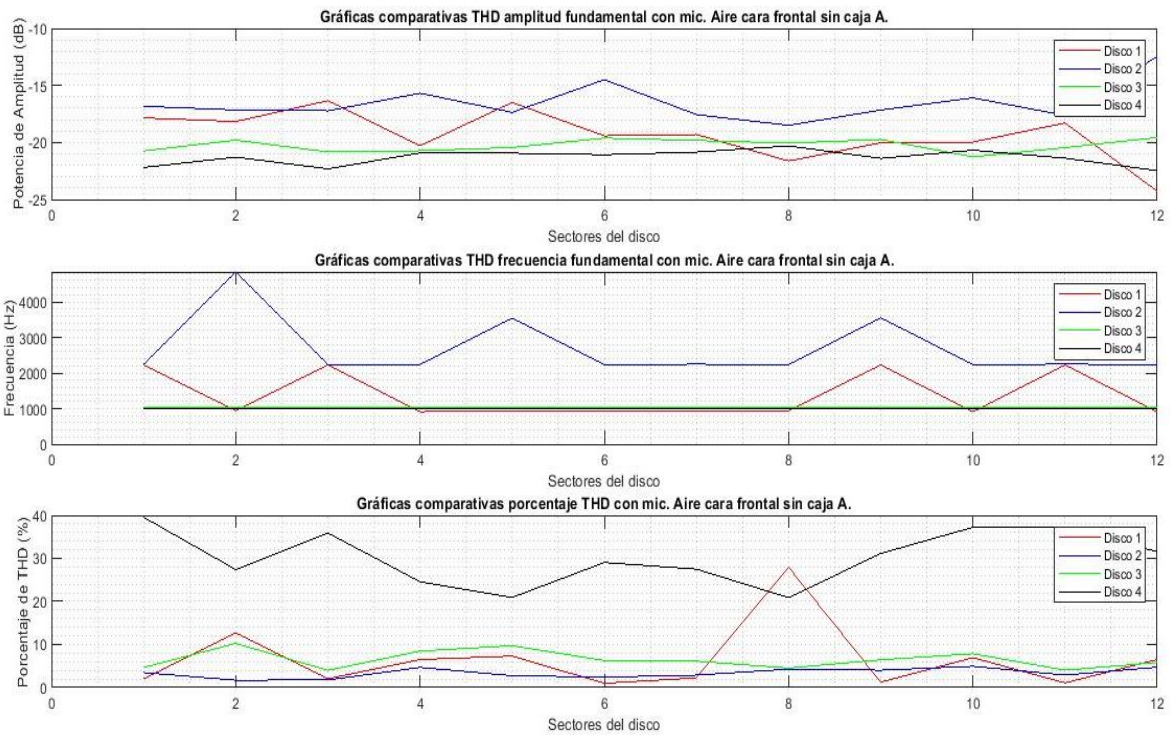


Figura 64. Análisis de THD de los cuatro discos con micrófono de aire sin caja acústica.

## 5. Conclusiones y recomendaciones finales

### 5.1. Espectro de potencia

#### 5.1.1. Generalidades

- Las 12 curvas de los discos usados presentan mayores diferencias entre sí en amplitud y frecuencia que los discos nuevos.
- En las 12 curvas de los discos nuevos existe una tendencia a las mismas frecuencias.
- Con este análisis no es posible determinar uno o varios sectores dañados.

#### 5.1.2. Especificas

##### *Micrófono de aire*

- La Figura 65, muestra las curvas comparativas del disco 4 con caja acústica y sin esta, las amplitudes de las curvas en frecuencias bajas son mayores en comparación con las amplitudes en frecuencias altas y decrecen de manera lineal en los discos nuevos.

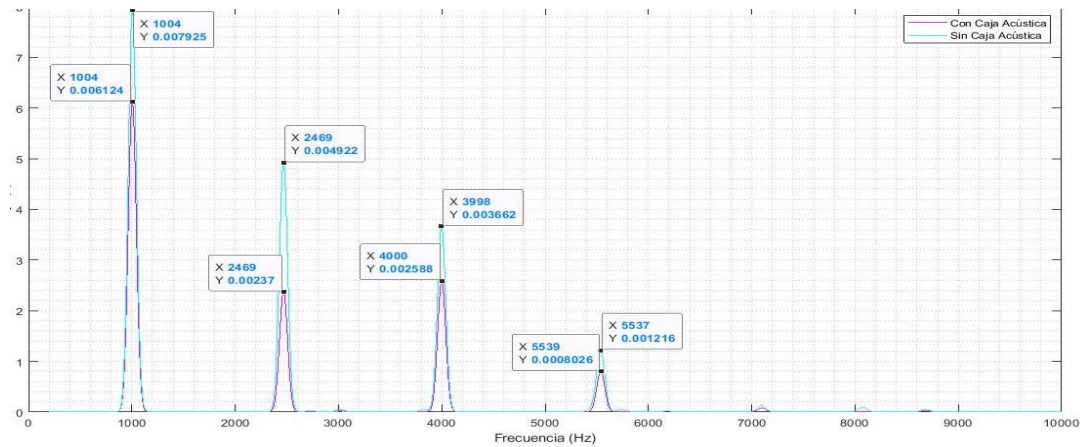


Figura 65. Espectro de potencia de los discos nuevos con caja acústica y sin esta.

- En los discos usados no se presenta linealidad, en frecuencias superiores a 2kHz las amplitudes son constantes y si varían estos cambios son drásticos, como se aprecia en la Figura 66.
- Al comparar las curvas de los discos usados con nuevos existe un corrimiento evidente y este desfase va aumentando a manera que las frecuencias son más altas.

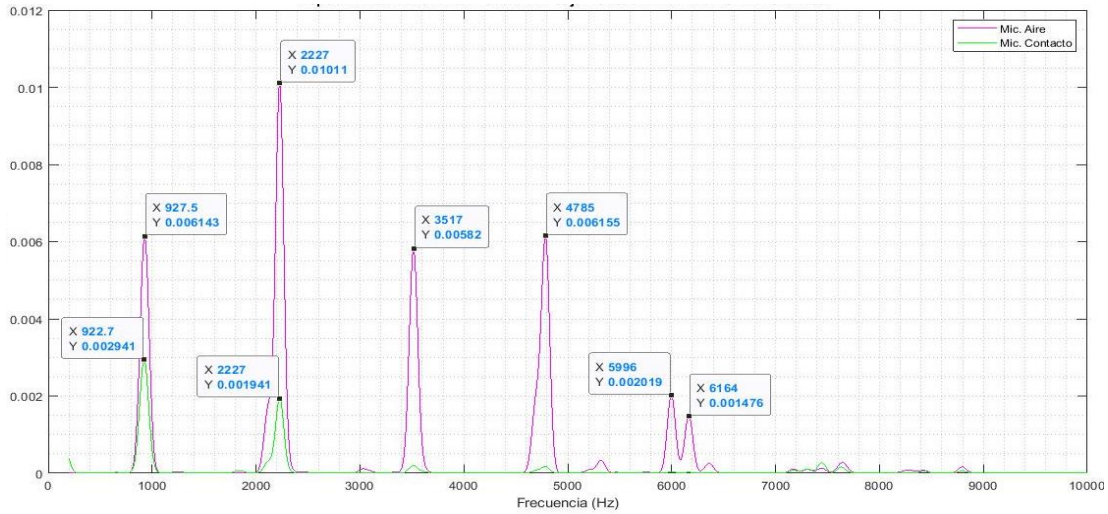


Figura 66. Curvas de PSD del disco 1 con ambos micrófonos y caja acustica.

- Se presentan nuevas curvas a frecuencias altas en el disco más dañado que no existen en los nuevos, a estas se les llama frecuencias de falla.
- Obsérvese la Figura 67, al comparar las curvas del disco 1 con el disco 3 y el disco 1 con el disco 4, se evidencia que los picos de amplitudes a frecuencias bajas son similares entre sí, incluso la amplitud es mayor en el disco 3 y a medida que aumenta la frecuencia se invierten los papeles teniendo mayor amplitud los picos del disco 1, esta característica es más notoria con la caja acústica, sucede lo mismo cuando se compara el disco 2 con los discos nuevos.

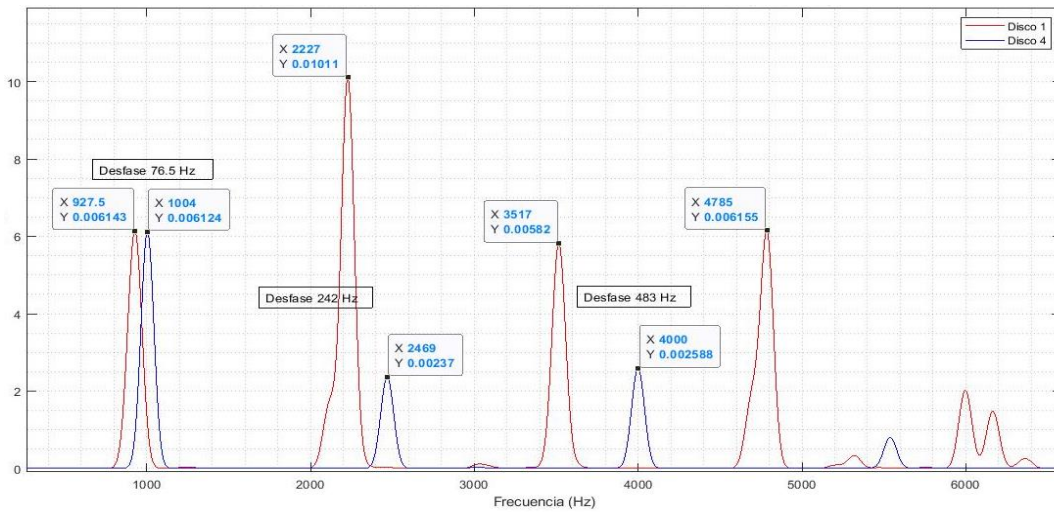


Figura 67. Espectro de potencia de los discos 1 y 4.



### *Micrófono de contacto*

- Se presentan menos picos en estas graficas lo que hace pensar que existe menos problemas de reflexión.
- No existe gran diferencia entre trabajar con o sin caja para este micrófono, incluso por sus propias características se sugiere trabajar con este en lugares ruidosos.
- Se nota claramente nuevos picos de frecuencias en el disco dañado que no presentan los nuevos.

## 5.2. Espectro de frecuencias

### 5.2.1. Generalidades

- Con este análisis no es posible determinar uno o varios sectores dañados en un disco.
- Ambos micrófonos brindan la misma información para detectar discos dañados tal como desfases y diferencia de amplitudes.
- No existe gran diferencia entre trabajar con o sin la caja acústica, téngase en cuenta que las pruebas se realizaron en un lugar sin ruido.

### 5.2.2. Especificas

#### *Micrófono de aire*

- Al igual que el estudio del espectro de potencias, los discos en buen estado presentan sus 12 curvas muy similares entre sí a diferencia de los discos usados.
- Obsérvese la Figura 68, los disco 2,3 y 4 presentan un decremento en sus amplitudes a medida que aumentan sus frecuencias y este decremento es lineal.

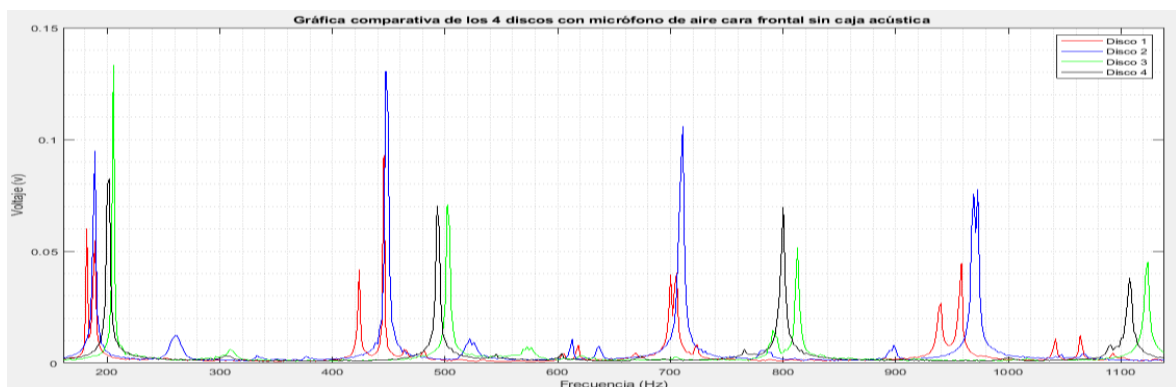


Figura 68. Espectro de frecuencias con micrófono de aire sin caja acústica.

- Si el disco no presenta un decremento lineal en sus picos de frecuencias a medida que la frecuencia aumenta seguramente se encuentra en mal estado. Véase la Figura 68.
- No hay mayor diferencia de sus curvas entre trabajar con caja que sin ésta.
- El disco dañado presenta nuevos picos de frecuencias, llamadas frecuencias de falla.
- Entre más dañado este el disco existe un corrimiento mayor hacia las bajas frecuencias.

#### *Micrófono de contacto*

- Existen más y varían mucho sus amplitudes de los picos de cada sector del disco 1 en comparación a los otros.
- Entre más dañado este el disco se presentan mayores diferencias en frecuencias y amplitudes de los picos de cada sector.
- Existen mayor número de picos de los discos usados en comparación con los nuevos, entre más dañado este el disco, mayor es el número de frecuencias que aparecen en el gráfico. Consúltese la Figura 56.
- No hay gran diferencia entre trabajar con o sin la caja.

### **5.3. Análisis de la distorsión armónica total**

- El análisis de la distorsión armónica total se realizó para el micrófono de aire y se obtuvieron mejores resultados con la caja acústica.
- Al comparar las 3 curvas fundamentales de cada disco es muy fácil hallar el disco en mal estado.
- Los resultados difieren con caja acústica y sin esta.
- Con la caja las 3 curvas frecuencia, amplitud y porcentaje de THD tienden a ser señales periódicas presentando desfases entre sí.
- Sin la caja el punto anterior no es tan evidente en algunos casos las curvas no muestran efecto de ser señales periódicas.
- Se presenta mayor THD en discos nuevos.
- Entre más dañado este el disco la frecuencia fundamental tiende a ser mayor y viceversa.

- Entre más dañado este el disco mayor serán las variaciones de amplitudes y frecuencias fundamentales entre cada sector.
- Existe una tendencia a ser mayores las amplitudes fundamentales de los discos usados que los nuevos.

#### 5.4. Trabajo futuro y recomendaciones

- En el análisis del espectro de potencia, al hacer la comparativa entre ambos micrófonos, el micrófono de aire tiende a amplificar las frecuencias secundarias y el micrófono de contacto prácticamente las desprecia estas características pueden ser importantes al momento de determinar el estado de un disco.
- Con la experiencia necesaria el estudio del espectro de frecuencias nos podría dar información más detallada del estado del disco tal como rugosidad o grosor y serviría para tomar decisiones en caso de rectificarlo o cambiarlo.
- Es difícil inclinarse por un micrófono específico pues ambos dan resultados similares para detectar discos dañados.
- Dependiendo del daño que presente el disco se elegiría el micrófono a usar por ejemplo si este presenta problemas graves de rugosidad en su superficie se recomienda el micrófono de aire, pero si se trabaja en condiciones de ruido se recomienda el micrófono de contacto.
- Se considera que para un tratamiento completo es necesario contar con ambos micrófonos.
- En el análisis del espectro de frecuencias se hallaron frecuencias donde presenta una mayor amplitud un disco en mal estado éstas "frecuencias de falla" podrían darnos información específica del tipo de daño que tiene el disco: fractura, grosor, rugosidad, etc. Si fuera el caso se requieren de mayores muestras y con distintos tipos de discos para establecer parámetros generales.
- El análisis de la distorsión total armónica podría ser capaz de detectar el área específica donde se encuentre la falla.
- Para el disco 1, en donde está la ruptura el porcentaje de THD es nulo o mínimo.



- Obsérvese la Figura 69, 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 desfasaron  $180^\circ$ .

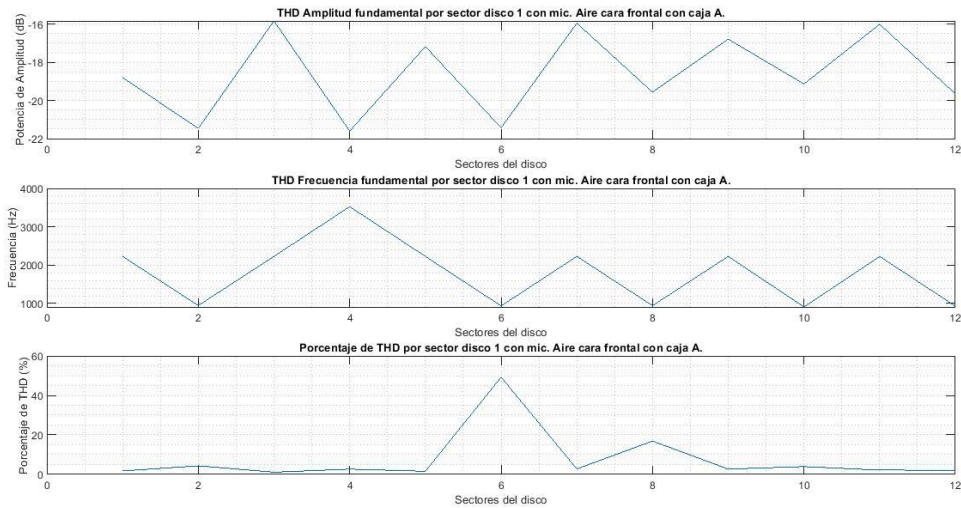


Figura 69. Análisis THD del disco 1 con caja acústica.

- 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 donde se consideren estos puntos y así se podría hallar el lugar de la falla.
- Formar una base de datos con los resultados obtenidos de los diferentes estudios y con un amplio número de muestras podría ser 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.

## Anexo A. Cálculo de engranes cónicos

Para el diseño de engranes cónicos es necesario determinar el módulo, número de dientes y el ángulo de centro. Este último valor depende de la inclinación que tendrá los engranes entre sí.

Para obtener el ángulo de centro de la corona:

$$\alpha_c = \frac{\sin(\gamma)}{\cos(\gamma) + \frac{d_p}{D_p}} \quad (48)$$

$D_p \equiv$  Diametro primitivo de la corona

$d_p \equiv$  Diametro primitivo del piñón

$\gamma \equiv$  Ángulo de inclinación entre la corona y piñón

Para obtener el ángulo de centro del piñón:

$$\alpha_p = 90 - \alpha_c \quad (49)$$

El diámetro primitivo depende del módulo ( $m$ ) y el número de dientes ( $N$ ):

$$D_p = mN \quad (50)$$

El diámetro exterior mayor ( $Dem$ ) se calcula:

$$Dem = D_p + (2m\cos(90 - \alpha)) \quad (51)$$

El diámetro interior mayor ( $Dim$ ) se calcula:

$$Dim = D_p - (2m\cos(90 - \alpha)) \quad (52)$$

La generatriz se obtiene de:

$$G = \frac{D_p}{2\sin(\alpha)} \quad (53)$$

La longitud del diente es:

$$L = \frac{G}{3} \quad (54)$$

El diámetro exterior menor ( $d_e$ ):

$$d_e = \frac{D_{em}(G - L)}{G} \quad (55)$$

En la Figura 70, se muestran los elementos principales a tener en cuenta en el cálculo de engranes cónicos.

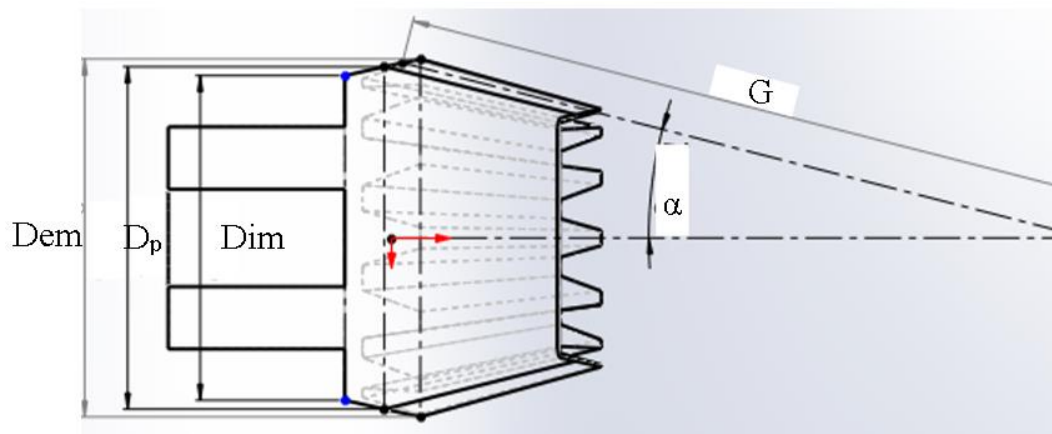
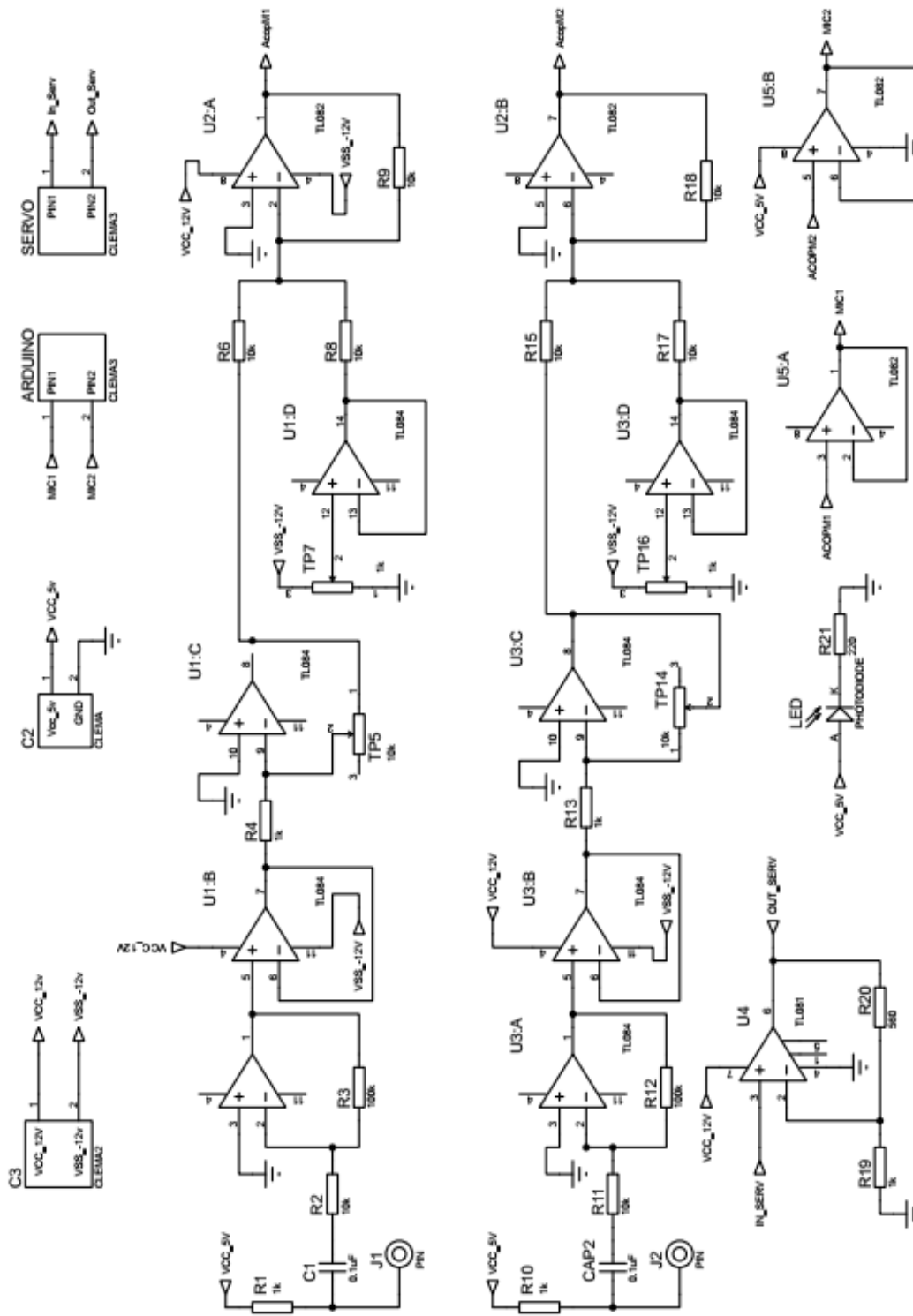


Figura 70. Parámetros principales en engranes cónicos.

## Anexo B. Diagrama eléctrico preamplificador



## Anexo C. Algoritmo para sintonizar un controlador PI [46]

<pre> clear all clc t = linspace(0,1,1000); j = 0; b = 0; %Condiciones de Mp y ts máximos MpMax = 1.05; % Mp = 5% tsMax = 0.015; % Con unidades en segundos %----- kPi = 500; % Limite menor de ganancia Kp kPf = 2000; % Limite mayor de ganancia Kp %----- kIi = 1; % Limite menor de ganancia Ki kIf = 100; % Limite mayor de ganancia Ki %-----  for Kp = kPi:20:kPf; % Valores en los que corre Kp     for Ki = kIi:10:kIf; % Valores en los que corre Ki         Kp = 2000;         Ki = 1;         N = [1.022*Kp 1.022*Ki]; % Se introduce el numerador y         D = [2.87E-6 5.31 1.022*Kp 1.022*Ki];% denominador de la FT a tratar         Gflc= step(N,D,t);         [f,c] = size(Gflc);         if (f&gt;c)             s = f;         else             s = c;         end         while Gflc(s)&gt;0.98 &amp; Gflc(s)&lt;1.02 % Parametro del 2% de ts             s = s-1;         end         ts = (s-1)*0.001; % se establece ts en segundos </pre>	<pre> M = max(Gflc); if (M&lt;MpMax )&amp; (ts&lt;tsMax)     j = j+1;     Mp = (M-1)*100;     VKp(j) = Kp; % Vectores de ganancia que %     VKi(j) = Ki; % satisfacen las condiciones %     VMp(j) = Mp; % dadas     Vts(j) = ts;     solution1(j,:) = [j Mp ts];     solution2(j,:) = [j Kp Ki Mp ts];     b = 1;     end end if b == 1     sortsolution = sortrows(solution2,4) else     ('No se encontro solucion en este rango para estas condiciones') end menor = 1; while j&gt;1 % Muestra unicamente la solución %     if VMp(j)&lt; menor % de menor Mp         menor = VMp(j)         i = j;     end     j = j-1; end j = i; clc disp('          Kp          Ki') disp([VKp(j) VKi(j)]) disp('          Mp(%)          ts(s)') disp([VMp(j) Vts(j)]) </pre>
--	---

## Referencias

- [1] INEGI, AMIA, “Conociendo la industria automotriz”, *INEGI*, 12 Dic, 2018, [En línea]. Disponible en:  
<https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/OtrTemEcon/CndoIndAuto.pdf> [Accedido 15-May-2021].
- [2] “Perspectiva Industrial Industria Automotriz”, *D.Econosignal*, Jun, 2020. [En línea]. Disponible en:  
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/mx/Documents/finance/2020/Perspectiva-Industria-Automotriz-DEconosignal.pdf> [Accedido 15-May-21].
- [3] INEGI, “Resultados del registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros correspondiente a abril de 2021”, *INEGI*, Abr, 2021, [En línea]. Disponible en:  
[https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/rm\\_raiavl/rm\\_raiavl2021\\_05.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2021/rm_raiavl/rm_raiavl2021_05.pdf) [Accedido: 15-May-21].
- [4] INEGI, “Parque vehicular”, *INEGI*, Abr, 2021, [En línea]. Disponible en:  
<https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/> [Accedido: 15 mayo 2021].
- [5] O. Van Schoor, J. L. Van Niekerk, B. Grobbelaar “Mechanical failures as a contributing cause to motor vehicle accidents South Africa”, *Accident; analysis and prevention*, vol. 33, no. 6, pp. 713–721, 2001, [En línea]. Disponible en:  
[https://doi.org/10.1016/s0001-4575\(00\)00083-x](https://doi.org/10.1016/s0001-4575(00)00083-x).
- [6] W. Olearte, M. Botero, “La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo”, *Scientia et Technica*, vol. 17, no. 47, pp. 230-233, abr, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84921327035.pdf>.
- [7] L. A. Méndez Ortega y O. F. Reyes Galaviz, “Análisis y Clasificación de Sonidos de Motores de Carros, para Diagnosticar Fallas, con Ayuda de Redes Neuronales”, [En línea]. Disponible en:  
[http://newton.azc.uam.mx/mcc/01\\_esp/08\\_sitios/micai\\_06/WORKSHOPS/WTI06/WTI03.PDF](http://newton.azc.uam.mx/mcc/01_esp/08_sitios/micai_06/WORKSHOPS/WTI06/WTI03.PDF) [Accedido: 17-May-21].

- [8] L. R. Salas Rodriguez, "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", Tesis de maestría, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, 2019, [En línea]. Disponible en: <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1801>.
- [9] I. Torres, "Innovación en México: Un Arma a Desarrollar en los Próximos Años", *Metalmecánica Internacional*, Feb, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.metalmecanica.com/temas/Innovacion-en-Mexico,-un-arma-a-desarrollar-en-los-proximos-anos+110705?pagina=3>. [Accedido: 17-May-21].
- [10] OMS, "10 Datos sobre la seguridad vial en el mundo", *webtrackgps*, [En línea]. Disponible en: <https://webtrackgps.com/10-datos-sobre-la-seguridad-vial-en-el-mundo/>. [Accedido: 02-Nov-21].
- [11] Instituto Nacional de Salud Pública, "México, séptimo lugar mundial en siniestros viales", *insp.mx*, 26, ago, 20, [En línea]. Disponible en: <https://www.insp.mx/avisos/4761-seguridad-vial-accidentes-transito.html>.
- [12] J. A. Herrera, F. L. Pulido, "Estudio de causas y efectos de la accidentalidad en las vías del departamento de boyacá," *Instituto Vial ibero-americano (IVIA)*, 2007, [En línea]. Disponible en: [http://www.institutoivia.com/cisev-ponencias/analisis\\_accidentes\\_aa/jhon\\_herrera.pdf](http://www.institutoivia.com/cisev-ponencias/analisis_accidentes_aa/jhon_herrera.pdf), [Accedido: 03-Nov-21].
- [13] J. F. Gonzáles Argudo y J. A. Ordóñez Ruilova, "Estudio de los factores que intervienen en los accidentes e infracciones de tránsito ocasionados por los buses de transporte público de pasajeros tipo urbano en la ciudad de Cuenca y planteamiento de la propuesta para disminuirlos," Tesis, Univ. Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014, [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6633/1/UPS-CT003269.pdf>.
- [14] R. O. Maldonado Saquisare y E. M. Neira Vivanco, "Análisis de los accidentes de tránsito provocados por fallas mecánicas en los vehículos de la categoría N1 y de la subcategoría M3 tipo bus, en el cantón Cuenca-Ecuador" Tesis, Univ. Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17610>.

- [15] C. W. Olarte, M. Botero Arbeláez y B. Cañon Zabal, “Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria”, *Scientia Et Technica*, nº 2, p. 45, 2010.
- [16] Z. Y. Medrano, C. Pérez, J. Gómez, M. Vera, “Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibroacústicas empleando análisis de densidad de potencia”, vol. 17, no. 1, pp.73-85, 2016, [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.007>.
- [17] K. F. Juca, “Identificación de espectros acústicos en motores de combustión interna a través del análisis en tiempos cortos”, Tesis, Univ. Politécnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [18] C. Sanz, “Técnicas para el estudio acústico en vehículos (Noise, Vibration and Harshness)” Tesina maestría, Univ. Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.
- [19] C. Fritsch, A. Ibanez, J. Camacho, J. Brizuela, J. C. Liébana, D. Videgaín, R. Gonzáles y R. Giacchetta, “Detector digital de defectos por ultrasonidos y sus aplicaciones”, WO 2007/128858 A1 15, nov, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/02/0a/04/f0e3d806d107d4/WO2007128858A1.pdf>. [Accedido: 08-Nov-21].
- [20] E. A. Olivares y M. A. Olivares, “Método para inspeccionar neumáticos que permite detectar in situ fallas, estado”, WO 2010/142054 A1 16, Dic, 2010, [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/e3/f6/de/4acf3e9a9567df/WO2010142054A1.pdf>. [Accedido: 09-Nov-21].
- [21] O. Altuzarra, A. Hernández, C. Pinto, V. Petuya, J. Navas y I. Lertxundi, “Equipo para inspección automática de piezas”, WO 2010/136614 A1 2, Dic, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/a4/d9/b9/dac71dd29b3ce4/WO2010136614A1.pdf>, [Accedido: 12-Nov-21].
- [22] German Association of the Automotive Industry (VDA), “Verband der Automobilindustrie”, 7, Dic, 20019. [En línea]. Disponible en: <https://en.vda.de/en/services/Publications/vda-303.html>, [Accedido: 20-Nov-21].



- [23] Dewesoft, “Prueba de ruido de frenos según la directriz vda 303”, *dewesoft.com*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://dewesoft.com/es/aplicaciones/prueba-de-nvh/brake-noise-testing> , [Accedido: 15-Nov-21].
- [24] P. Monroy, “Qué es mejor frenos de disco o de tambor”, 6,nov,2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.atraccion360.com/que-es-mejor-frenos-de-disco-o-de-tambor>, [Accedido: 20-Nov-21].
- [25] M. Juaréz, “Frenos de tambor, accesibles, más superficie de frenado, pero débiles ante el calor”, 11, jun, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com.mx/industria/frenos-disco-vs-frenos-tambor-diferencias>, [Accedido: 25-Nov-21].
- [26] Goodyear, “Sistema de frenado: historia y recomendaciones”, *Goodyear*, 9, May, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://kilometrosquecuentan.com/sistema-frenado/>, [Accedido: 17-Dic-21].
- [27] e-auto.com.mx, “Servofreno o Booster Sencillo”, [Imagen], [En línea]. Disponible en: <https://www.e-auto.com.mx/enuw/index.php/politica-de-privacidad>.
- [28] IPN, “Frenos”, *IPN.mx*, [En línea]. Disponible en: <https://www.ipn.mx/assets/files/cecyl4/docs/estudiantes/aulas/mescrito/cuarto/matutino/automotriz/sistemadf/1.pdf>, [Accedido: 29-Dic-21].
- [29] “Manual técnico de la pastilla de freno”, *fdocuments.mx*, 23, ago, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://fdocuments.mx/document/manual-tecnico-pastillas-freno.html>, [Accedido: 30-Dic-21].
- [30] F. J. Bauzá, “Estudio del sistema de frenado en los vehículos ligeros (turismos)”, Tesis, Univ. Politécnica de Catalunya Barcelona, Ene, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113326/REPORT\\_470.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113326/REPORT_470.pdf). [Accedido: 01-Ene-22].
- [31] A. Prieto, “Tipos de discos de frenos: Ventajas e inconvenientes de cada uno”, *Autonoción*, 20, Ago, 2018, . [En línea]. Disponible en: <https://www.autonocion.com/tipos-discos-de-freno-pros-contras/>, [Accedido: 01-Ene-22].

- [32] centralderepuestos, “Discos de freno y sus tipos”, *central de repuestos TR*, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://centralderepuestosr.com/discos-freno>, [Accedido: 03-Ene-22].
- [33] R. Estellés, “Acondicionamiento acústico-temas teóricos”, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-acustico/wp-content/blogs.dir/27/files/2012/02/01-ACUSTICA-FISICA-1.pdf>, [Accedido: 06-Ene-22].
- [34] Junta de Andalucía, “Física del sonido”, [En línea]. Disponible en: [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40-719-2\\_MENOS\\_RUIDO\\_MAS\\_VIDA-\\_CUADERNO\\_DE\\_APOYO/40-719-2/5\\_FISICA\\_DEL\\_SONIDO.PDF](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40-719-2_MENOS_RUIDO_MAS_VIDA-_CUADERNO_DE_APOYO/40-719-2/5_FISICA_DEL_SONIDO.PDF), [Accedido: 06-Ene-22].
- [35] A. M. Domingo, “Apuntes de acústica”, Mar, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>, [Accedido: 10-Ene-22].
- [36] Safe Load Testing Technologies, “La densidad espectral de potencia: qué es y cómo medirla”, 23, Ago, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.safeloadtesting.com/es/la-densidad-espectral-de-potencia-que-es-y-como-medirla/#:~:text=Atendiendo%20a%20su%20definici%C3%B3n%20t%C3%A9cnica,presente%20es%20mayor%20o%20menor..>, [Accedido: 10-Ene-22].
- [37] E. Telléz, “Distorsión Armonica”, *AP&C*, [En línea]. Disponible en: <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>, [Accedido: 11-Ene-22].
- [38] mexpolimeros, “PLA (Acido Poliláctico) - poliácido-L-láctico (PLLA)”, [En línea]. Disponible en: <https://www.mexpolimeros.com/pla.html#:~:text=El%20PLA%20tiene%20buenas%20propiedades,similares%20a%20las%20de%20PET..>, [Accedido: 15-Ene-22].
- [39] Handson Technology, “BTS7960 High Current 43A H-Bridge motor driver”, [En línea]. Disponible en: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/BTS7960%20Motor%20Driver.pdf>, [Accedido: 03-Oct-21].

- [40] BOYA, “BY-M1”, [En línea]. Disponible en: <https://www.boya-mic.com/lavaliermicrophones/BY-M1.html>, [Accedido: 15-Oct-21].
- [41] Breyer, “CHERUB WCP-55 UNIVERSAL”, [En línea]. Disponible en: <https://www.breyerinstrumentos.com.ar/product-cherub-wcp-55-universal-1709281434397746.h>, [Accedido: 15-Oct-21].
- [42] Arduino, “Arduino Due”, 2021, [En línea]. Disponible en: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-due>, [Accedido: 23-Nov-21].
- [43] F. Monasterio, Á. Gutiérrez, “Modelado de un motor DC”, 29, ene, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.robolabo.etsit.upm.es/asignaturas/seco/apuntes/modelado.pdf>, [Accedido: 15-Oct-21].
- [44] C. J. Solarte y J. E. Muñoz, “Guía para la parametrización de un motor DC de imán permanente ”, *unicauca.edu*, mar, 2015, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1488/ANEXO%20A.%20Guia%20parametrizacion%20de%20un%20motor%20DC%20de%20iman%20permanente%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, [Accedido: 15-Oct-21].
- [45] A. Carrasco, “Como obtener los parámetros de un motor de corriente continua e imán permanente”, *docplayer*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/11494805-Como-obtener-los-parametros-de-un-motor-de-corriente-continua-e-iman-permanente.html>, [Accedido: 15-Oct-21].
- [46] K. Ogata, “Ingeniería de control moderna”, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010, pp. 582-589.