



INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero en
Mecánica Automotriz**

Autor: Jirson Gary Olvera Ronquillo

Tutor: Ing. Edgar Vera Puebla

**Análisis de la Frecuencia Modal en Discos de Frenos a
través de los Softwares Inventor y Fusión 360**

Certificación de Autoría

Yo, Jirson Gary Olvera Ronquillo, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad intelectual, reglamento y leyes.

Jirson Gary Olvera Ronquillo

C.I: 0928927060

Aprobación del Tutor

Yo, Edgar Gustavo Vera Puebla certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su seguridad y autenticidad, como de su contenido

Ing. Edgar Gustavo Vera Puebla

Director del Proyecto

Dedicatoria

La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo.

Nelson Mandela

Mi gratitud a Dios, por haber guiado cada uno de mis pasos durante este proyecto de vida, por haberme dado fuerzas para seguir adelante a pesar de las adversidades, a mis abuelos Amado y Jacinta, a mis padres César y Nury por haber depositado su confianza en mí y haberme enseñado valores que hoy los pongo en práctica para ser un gran ser humano.

A Heidi mi esposa por que día a día me impulsaba a seguir en este proceso dándome su apoyo incondicional.

A mis tíos Arístides y Magaly por haber estado desde el inicio de esta hermosa etapa y dándome sus mejores consejos.

Jirson Gary Olvera Ronquillo

Agradecimientos

Mi amor y pasión por esta profesión empezó desde los 8 años impulsada por mi padre maestro en mecánica automotriz, desde ahí empezaron mis sueños de ser un gran profesional,

Cuando inicié mis estudios universitarios sabía lo difícil que sería, pero no imposible, ya que soy de un cantón lejano a Guayaquil y me movilizaba en una motocicleta exponiendo mi vida, pero con muchos sueños a cumplir para alcanzar mi objetivo.

Mi mayor agradecimiento a Dios por permitir que a pesar de los obstáculos presentados hoy culmino una etapa de mi vida con gran satisfacción; a mi familia y esposa por ser parte fundamental de este mi proyecto, a mi amigo Manuel por sus buenos deseos e impulsos en todo momento, a mis docentes que impartieron sus conocimientos, en especial a mi tutor de tesis el Ing. Edgar Vera por instruirme a lo largo de este proyecto.

Hoy mi corazón se regocija por haber cumplido uno de mis sueños más anhelados, mil gracias, Universidad Internación del Ecuador.

Jirson Gary Olvera Ronquillo

Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Ecuaciones	xiii
Índice de Tablas.....	xiv
Resumen	xv
Abstract.....	xvi
Introducción.....	1
Capítulo I.....	2
Problema De La Investigación.....	2
1.1. Tema de Investigación	2
1.2. Planteamiento del Problema.....	2
1.3. Formulación del Problema	3
1.4. Sistematización del Problema	4
1.5. Objetivos de la Investigación	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos	4
1.6. Justificación e Importancia de la Investigación	4
1.6.1. Justificación Teórica.....	5
1.6.2. Justificación Metodológica.....	5
1.6.3. Justificación Práctica	6

1.6.4.	Delimitación Temporal.....	7
1.6.5.	Delimitación Geográfica.....	7
1.6.6.	Delimitación del Contenido.....	7
1.7.	Alcance.....	7
Capítulo II.....		10
2.	Marco de Referencia.....	10
2.1.	Descripción del Sistema de Frenado de un Vehículo.....	10
2.1.1.	Freno de Tambor	13
2.1.2.	Freno de Disco.....	14
2.1.3.	Freno de Mano.....	17
2.2.	Criterios de Diseño para Discos de Freno.....	18
2.2.1.	Efectos de la Temperatura	21
2.2.2.	Geometría de Disco de Freno	22
2.2.3.	Partes del Disco de Freno	22
2.2.4.	Problemas Principales Asociados a los Discos de Frenos.....	24
2.3.	Coeficiente de Adherencia aplicado a Frenos	25
2.4.	Deslizamiento del Vehículo	26
2.5.	Eficacia del Sistema de Frenado	28
2.6.	Temperatura en el Sistema de Freno.....	29
2.7.	Método de Elementos Finitos.....	31
2.7.1.	El Método de Diferencias Finitas	33
2.8.	Frecuencia Modal.....	33
2.9.	Procesamiento del Análisis Modal a través del Método de Elementos Finitos	36

2.10.	Selección de Programa Computacional por Utilizar	37
2.10.1.	AutoDesk Inventor.....	38
2.10.2.	AutoDesk Fusión 360	39
Capítulo III	.....	40
3.	Método de Modelado	40
3.1.	Herramientas para el Modelado y Análisis del Disco de Freno.....	40
3.1.1.	Obtención de Medidas del Disco de Freno.....	42
3.1.2.	Selección de Programa Computacional para Modelado y Análisis Modal	43
3.1.3.	Modelado de Disco de Frenos	46
3.1.4.	Simulación de Frecuencia Modal a través de AutoDesk Fusión 360	54
3.1.5.	Generación de Análisis Modal de Disco de Freno	56
3.1.6.	Resumen de Obtención de Resultados con un Disco de Freno sin Orificios	64
3.1.7.	Resumen de Obtención de Resultados con un Disco de Frenos con Orificios.....	65
3.1.8.	Generación de Informe del Estudio Modal de Frecuencia de Discos de Frenos	65
Capítulo IV	.....	67
4.	Análisis de Resultados	67
4.1.	Análisis Transitorio	67
4.2.	Análisis de Resultados Obtenidos	70
Conclusiones	.....	73
Recomendaciones	.....	75
Bibliografía	.....	76
Anexos	.....	79
Anexo 1: Informe de Análisis de Frecuencia Modal en Disco de Freno Simple		79

Anexo 2: Informe de Análisis de Frecuencia Modal en Disco de Freno Perforado 86

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Mecanismo de Freno y Accionamiento de Fuerzas</i>	11
Figura 2 <i>Diseño de Disco de Freno Ventilado</i>	16
Figura 3 <i>Discos de Freno Utilizados en la Industria Automotriz</i>	19
Figura 4 <i>Partes del Disco de Freno</i>	23
Figura 5 <i>Fuerzas que Actúan en el Deslizamiento de Vehículo</i>	27
Figura 6 <i>Ejemplo de Aplicación de Proceso del Método de Elementos Finitos</i>	32
Figura 7 <i>Partes de Disco de Freno hacer Analizado</i>	40
Figura 8 <i>Disco de Freno hacer Analizado</i>	41
Figura 9 <i>Extracción de Dimensiones de Disco de Freno</i>	42
Figura 10 <i>AutoDesk Inventor 2023</i>	44
Figura 11 <i>AutoDesk Fusión 360</i>	45
Figura 12 <i>Creación de Nuevo Proyecto AutoDesk Inventor 2023</i>	46
Figura 13 <i>Creación de Nuevo Proyecto AutoDesk Inventor 2023</i>	47
Figura 14 <i>Creación de Nuevo Boceto en 2D AutoDesk Inventor 2023</i>	47
Figura 15 <i>Inicio de Boceto de Disco de Freno</i>	48
Figura 16 <i>Extrusión de Base de Disco de Freno</i>	48
Figura 17 <i>Generación de Aletas de Refrigeración</i>	49
Figura 18 <i>Extrusión de Patrón de Refrigeración</i>	49
Figura 19 <i>Aplicación de Réplica de Patrón en Creación de Conductos de Refrigeración</i>	50
Figura 20 <i>Creación de Base Superior de Superficie de Fricción</i>	50
Figura 21 <i>Creación de Perforaciones sobre Superficie de Fricción</i>	51
Figura 22 <i>Creación de Ranura Térmica</i>	51

Figura 23 <i>Creación de Doble Chaflán de Ranura Térmica</i>	52
Figura 24 <i>Creación de Zona de Sujeción de Disco de Freno</i>	52
Figura 25 <i>Creación de Orificios de Sujeción de Disco de Freno</i>	53
Figura 26 <i>Finalización de Modelado de Disco de Freno</i>	53
Figura 27 <i>Localización de Proyecto en AutoDesk Fusión 360</i>	55
Figura 28 <i>Importación de Archivo de Disco de Freno de Inventor a Fusión 360</i>	56
Figura 29 <i>Simulación de Espacio de Trabajo</i>	57
Figura 30 <i>Creación de Estudio con Selección de Frecuencias Modales</i>	58
Figura 31 <i>Selección del Material</i>	58
Figura 32 <i>Designación de Restricción del Tipo Pasador</i>	59
Figura 33 <i>Visualización de los Grados de Libertad</i>	60
Figura 34 <i>Visualización de Print Check e Inicio de Creación de Malla</i>	61
Figura 35 <i>Generación de Mallado de Disco de Freno</i>	61
Figura 36 <i>Procesamiento de Resultados</i>	62
Figura 37 <i>Obtención de Resultados en Disco de Frenos sin Orificios</i>	63
Figura 38 <i>Repetición de Proceso con un Disco de Freno Perforado</i>	63
Figura 39 <i>Obtención de Resultados en Disco de Frenos con Orificios</i>	64
Figura 40 <i>Generación de Informe en AutoDesk Fusión 360</i>	66
Figura 41 <i>Resultado de Aplicación de Restricciones</i>	68
Figura 42 <i>Resultado de Modo Total a Menor Frecuencia</i>	69
Figura 43 <i>Resultado de modo Total a Mediana Frecuencia</i>	70
Figura 44 <i>Resultado de Modo Total a Máxima Frecuencia</i>	70
Figura 45 <i>Resultado de Modo Total de Manera Cualitativa</i>	71

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Modelo Matemático para Determinación de Fuerza de Frenado F_0	12
Ecuación 2 Modelo Matemático para Determinación la Magnitud de Deslizamiento χ	27
Ecuación 3 Modelo Matemático para Determinación la Distancia de Frenado.....	28
Ecuación 4 Modelo Matemático para Determinación el Calor Absorbido por el Disco de Freno	31

Índice de Tablas

Tabla 1 Medidas de Disco de Freno	42
Tabla 2 Resumen de Resultados de Disco de Frenos sin Orificios.....	64
Tabla 3 Resumen de Resultados de Disco de Frenos con Orificios	65

Resumen

El presente trabajo investigativo se encuentra basado en el estudio y análisis de frecuencia modal de disco de frenos con aplicación a los vehículos con la ayuda de dos programas computacionales de AutoDesk como lo es Inventor y Fusión 360, los cuales permiten realizar el modelado y la simulación respectivamente.

La simulación permite observar claramente el comportamiento los modos de frecuencia naturales sobre el disco de freno y así poder observar el comportamiento estructural que se encuentra sometido al fenómeno de vibración de acuerdo a distintos valores e frecuencia para de esta manera poder determinar sus propiedades por parte de los modos modales de vibración, conocidos por las siglas MNV, los mismos que corresponden a un tipo de fenómeno de vibración como lo son las mecánicas, la cual son oscilaciones de la masa al contorno de un punto de pivote o equilibrio, siendo su naturaleza la oscilación que se encuentra determinada por tres factores principales como lo son la masa, rigidez y el amortiguamiento, que son factores propios de la estructura, el cual para nuestro caso de estudio es el disco de freno. Para poder determinar una comparación en el presente trabajo se realiza la simulación con dos tipos de frenos de disco uno son una superficie de fricción simple y otro con una superficie de fricción perforada y por obvias razones de menor masa, logrando de esta manera 8 modos de frecuencia por cada simulación.

Palabras clave: Freno, análisis modal, automotriz, sistemas automotrices.

Abstract

The present research work is based on the study and analysis of the modal frequency analysis of the brake disc for application to vehicles with the help of two AutoDesk computer programs, such as Inventor and Fusion 360, which allow modeling and simulation to be carried out. respectively.

The simulation allows to clearly observe the behavior of the natural frequency modes on the brake disc and thus be able to observe the structural behavior that is subjected to the phenomenon of vibration according to different values and frequency in order to determine its properties by the modal modes of vibration, known by the acronym MNV. These correspond to a type of vibration phenomenon called mechanics, which are oscillations of the mass around the contour of a pivot or equilibrium point, its nature being the oscillation that is determined by three main factors such as mass, stiffness and damping, which are factors of the structure, that in the case of this study is the brake disc. In order to determine a comparison in the present work, the simulation is carried out with two types of disc brakes, one with a simple friction surface and the other with a perforated friction surface and for obvious reasons of less mass, thus achieving eight modes of frequency for each simulation.

Key words: Brake, modal analysis, automotive analysis, automotive systems.

Introducción

Un sistema de frenos posee elementos de fricción que cumplen la función de que un vehículo genere un proceso de desaceleración o detención a través de la transformación de una gran cantidad de energía cinética, en energía calorífica.

Esta transformación de energía se genera en una parte o sección de la superficie de contacto de un elemento denominado disco de freno conjuntamente con las pastillas de freno, siendo el disco de freno el componente que se encarga de absorber la energía, la misma que a través de cualquiera de los medio de transferencia debe ser disipada en el menor tiempo posible hacia el medio ambiente, normalmente este fenómeno de disipación se da por conducción, convección y cuando su temperatura es muy elevada se da también por radiación.

Actualmente los programas computacionales se han convertido en una herramienta fundamental para la generación y solución de problemas a través de cálculos ya sean estos térmicos, mecánicos o fluidos dinámicos. Uno de los métodos más convenientes y adecuados lo es la simulación numérica, la misma que es aplicada para este caso a los discos de frenos, mientras están en funcionamiento y bajo condiciones distintas, para el presente caso investigativo se centra en un análisis modal para poder determinar el comportamiento de los discos de frenos y cómo se comporta en cuanto a las vibraciones generadas al momento que este entra en funcionamiento giratorio.

Se debe tener muy en cuenta que luego de haber aplicado este tipo de metodología se recomienda estrictamente su validación en bancos de pruebas físicos para finalmente aplicarlos a vehículos para su funcionamiento real.

Capítulo I

Problema De La Investigación

1.1. Tema de Investigación

Análisis de frecuencia modal en discos de frenos a través de los softwares Inventor y Fusión 360.

1.2. Planteamiento del Problema.

Un sistema de freno implementado en un vehículo cumple la función principal de disminuir o detener la trayectoria o inercia de cada una de sus partes y sobre todo las ruedas, las mismas que se encuentran en contacto con la superficie o suelo.

Uno de los elementos principales del sistema de frenos de un vehículo lo es el disco de frenos el mismo que se encuentra soportado por un buje o eje y gira en conjunto con la rueda y entre las funciones que cumple es la de transformar la energía cinética en energía calorífica generada por la fricción con las balatas de freno, hasta conseguir su objetivo que es el de disminuir o eliminar la energía cinética del vehículo.

Por este motivo es que el disco de freno se encuentra sometido a grandes esfuerzos por lo que se pretende a dar una solución o ver el comportamiento de este para así poder brindar una sugerencia de mejora en eficiencia a este elemento.

Uno de los inconvenientes que se presentan sobre los discos de freno que utiliza el sistema de frenado de un vehículo lo es la deficiencia en su comportamiento por factores internos y externos del mismo, sobre todo que se debe considerar que este pertenece o es parte de un sistema de seguridad del vehículo y entre otros requerimientos se encuentran que los discos de freno deben trabajar sin duda alguna de manera y en cualquier tipo de desempeño bajo cualquier factor ambiental así como de temperatura.

Por ende, se toma muy en cuenta ciertos aspectos importantes como lo son: Generación de ruido y vibraciones, fabricabilidad, resistencia al agrietamiento, deformación térmica,

niveles máximos de temperatura, peso, resistencia mecánica, materiales y geometría del componente.

Tras estos problemas que suele presentar un disco de frenos en operación a través del presente trabajo investigativo se pretende realizar un estudio sobre la frecuencia modal con la ayuda de dos softwares como lo son Inventor y Fusión 360.

Otro de los inconvenientes que se presenta en discos de frenos por parte de su constitución es la disipación del calor generado, así como la cantidad de masa que posee, por este motivo lo que se pretende es conocer el comportamiento si se puede aplicar un cambio en su conformación para mejorar significativamente la disipación del calor y disminuir su peso para mejorar su eficiencia.

Con el uso de ingeniería asistida por un ordenador y con la ayuda de un método analítico se pretende generar parámetros y determinadas características físicas como lo son vibraciones y temperatura que se producen en un disco de frenos, también conocer o determinar cada uno de los coeficientes de fricción con los que trabajan los discos que son fundamentales para la determinación del tiempo de frenado cuando el elemento se encuentra activado de manera práctica.

Posteriormente conocidos estos parámetros se pretende modelar y simular el comportamiento térmico, estructural del elemento y las tensiones o deformaciones provocadas y de esta manera interpretar los resultados obtenidos a través del informe generado por el software.

1.3. Formulación del Problema

¿Se puede generar una propuesta de mejora en la eficiencia de un disco de freno utilizado en un vehículo por medio de un análisis de frecuencia modal con la ayuda de un proceso de ingeniería asistida por ordenador?

1.4. Sistematización del Problema

- ¿Cuáles son los beneficios que se obtienen al realizar un análisis modal de un disco de freno por medio de un software de ingeniería asistida por ordenador?
- ¿Cuáles son los factores que influyen en el análisis modal para un disco de frenos en su comportamiento normal del elemento?
- ¿Qué ventajas brinda el uso de un software de ingeniería asistida por ordenador al realizar un análisis modal sobre un elemento mecánico?
- ¿Cómo influyen las características físicas en el desempeño funcional de un disco de frenos sobre un sistema de frenado de un vehículo?
- ¿Qué ventajas brinda el realizar un análisis modal sobre un disco de frenos con referencia a las vibraciones provocadas durante su funcionamiento?

1.5. Objetivos de la Investigación

1.5.1. *Objetivo General*

- Realizar a través de los softwares Inventor y Fusión 360 un análisis modal de frecuencia sobre el desempeño de un disco de freno.

1.5.2. *Objetivos Específicos*

- Modelar un disco de freno de acuerdo con dimensiones reales con asignación de propiedades y restricciones en los softwares Inventor y Fusión 360.
- Realizar un estudio comparativo del comportamiento de un disco de freno a través de modelos matemáticos y softwares de ingeniería asistida por ordenador.
- Obtener resultados de simulación del análisis modal de frecuencia de un disco de freno para ser contrastados con las especificaciones del fabricante.

1.6. Justificación e Importancia de la Investigación

El presente trabajo investigativo referente al análisis modal de un disco de freno por parte de un sistema de ingeniería asistida por ordenador determina objetivos por parte de

fuentes investigativas la misma que presenta respuestas a la perspectiva metodológica, teórica y práctica como se expresa a continuación:

1.6.1. *Justificación Teórica*

El constante avance tecnológico en cada uno de los sistemas de seguridad de un vehículo exige a cada investigador experimentar, observar y analizar cada uno de sus componentes, para de esta manera poder mejorar su eficiencia así como su desempeño con un sustento teórico bien fundamentado basado en la búsqueda y revisión de fuentes bibliográficas, fichas técnicas y artículos científicos en los que han realizados estudios relacionados que ayuden al desarrollo del presente trabajo investigativo y por este motivo a continuación se presenta algunos de estos estudios:

(Exzar, 2019), en su estudio se basa en “Evaluar el estado de operatividad de los sistemas de frenado del tipo tambor y disco, realizar pruebas de frenado a diversos regímenes de trabajo para frenos de disco y frenos de tambor en vehículos de servicio público”.

(Rojas & Jaramillo, 2012), generó su investigación en “El estudio de las características de diseño y construcción de los sistemas de dirección y frenos de un automóvil, seleccionando las aplicaciones más factibles para su implementación y modificación de los sistemas originales del vehículo Toyota 1000”.

(Ortiz, 2018), basó su estudio en “El estudio de frenado de un automóvil, a partir de su evolución histórica y así obtener un conocimiento amplio de los componentes del sistema, así como de los fallos que se producen habitualmente y que afectan a la seguridad vial”.

1.6.2. *Justificación Metodológica*

Para poder justificar la metodología que se lleva a cabo en el presente trabajo investigativo concerniente a la realización de un análisis modal de un disco de frenos por medio de ingeniería asistida por ordenador se fundamenta en la obtención de información técnica del elemento en estudio para así poder determinar las características, propiedades y

especificaciones técnicas como lo son dimensiones físicas del disco de freno, posteriormente se determina las normas que restringen cada uno de los procesos a realizar en el estudio.

También se fundamenta de acuerdo con modelos matemáticos ya definidos por estudios anteriores para que se puedan aplicar al presente estudio que determinan cada uno de los comportamientos del elemento en estudio lo que permite generar el correcto alcance al momento de realizar el análisis con los resultados generados con los softwares utilizados o los informes generados por los mismos.

Adicionalmente se establece la metodología de adaptabilidad de procesos que permiten la obtención del modelado y simulación e informe del elemento en estudio como lo es el disco de freno, bajo condiciones convenientes, pero conservando cada uno de los parámetros preestablecidos.

En consecuencia, el presente trabajo investigativo del análisis modal del disco de freno se basa en la aplicación de una metodología definida como experimental, teórica y descriptiva, lo que permite obtener el alcance de los objetivos planteados y de esta manera consolidan la investigación científica en su totalidad.

1.6.3. *Justificación Práctica*

Según los objetivos planteados para el presente proyecto investigativo referente al análisis modal de frecuencia sobre un disco de freno en su etapa práctica se fundamenta en su desarrollo de acuerdo a etapas establecidas de manera cronológica, pero tomando en consideración que la fase práctica inicial se lleva a cabo en softwares de ingeniería asistida por ordenador y para esto se tiene la ayuda de los programas Inventor y Fusión 360, ambos de la compañía Autodesk, los mismos que permiten la realización del bocetado, construcción, modelado en dos y tres dimensiones, simulación y generación de informe.

1.6.4. Delimitación Temporal

De acuerdo con lo previsto como planificación en el desarrollo del análisis modal de frecuencia sobre un disco de freno, tanto de la fase de aprobación, desarrollo teórico y práctico el presente estudio se establece que se llevará a cabo desde el mes de agosto del 2022 y de manera tentativa se pretende que su finalización o defensa de proyecto se llevará a cabo en el mes de febrero de 2023.

1.6.5. Delimitación Geográfica

El presente trabajo investigativo se lo llevará a cabo en el país de Ecuador dentro de la provincia del Guayas, cantón Guayaquil, como lugar estratégico se toma de referencia a los talleres y laboratorios de la Escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad Internacional del Ecuador extensión Guayaquil con su dirección en la avenida Raúl Gómez Lince (Av. Las Aguas) y calle 15.

1.6.6. Delimitación del Contenido

El presente proyecto investigativo denominado análisis modal de frecuencia sobre un disco de freno a través Inventor y Fusión 360, se lo desarrolla por medio de un proceso meticuloso de investigación con base en fuentes bibliográficas teóricas y técnicas, así como revistas, artículos científicos, fichas técnicas, entrevistas, proyectos de titulación y blogs, lo que permite brindar fundamentar correctamente el alcance del proyecto y estructurarlo de la mejor forma para lograr alcanzar los objetivos planteados.

Cabe recalcar que el presente estudio se lo establece con una sección de cuatro capítulos como cuadro de cuerpo de texto.

1.7. Alcance

A través del presente proyecto investigativo con el tema de Análisis de frecuencia modal en discos de frenos a través de los softwares Inventor y Fusión 360 se basa en el estudio del comportamiento de un elemento fundamental del sistema de freno con aplicación en el sector

de la industria automotriz el cual es el encargado de generar una transformación de energía cinética para pasar a energía de frenado con disipación de calor al medio ambiente, esta consideración es de mucha importancia ya que un disco de frenos es un elemento que se encuentra sometido a variaciones bruscas de temperaturas elevadas las mismas que deben ser en el menor tiempo posible disipadas al medio ambiente sin que el disco de freno y sus elementos con los que trabajan sufran daños estructurales.

El sistema de frenado trabaja de manera intermitente cuando un vehículo se encuentra desplazándose en la que adquiere una energía cinética de manera considerable, pero si esta no es controlada de manera correcta el vehículo perderá el control y lo más probable es que se genere una colisión de este.

Otros factores importantes que intervienen en el funcionamiento de un sistema de freno en un vehículo lo es la velocidad que adquiere al desplazarse, la presión que actúa por parte de las pastillas de freno sobre el disco de freno, la rugosidad entre las pastillas de freno y el disco de freno, la presión ejercida por el conductor sobre el pedal de freno, los elementos de multiplicación de fuerza que actúan en el sistema como lo es básicamente el servofreno, entre otros.

Por lo expuesto anterior el presente proyecto investigativo pretende que un elemento de mucha importancia a ser analizado lo es el disco de freno el mismo que en funcionamiento soporta varios tipos de esfuerzos mecánicos como térmicos, por lo que a través de programas computacionales de ingeniería asistida por ordenados se generará el modelado así como la simulación para poder determinar su comportamiento con la aplicación de un métodos analítico en que se establecen cada uno de sus parámetros y propiedades físicas, para lograr de esta manera alcanzar los valores para poder al final interpretar los valores del comportamiento y ver las acciones que se pueden llegar a tomar para de esta manera mejorar la eficiencia y eficacia

de los discos de frenos que se aplican en el sistema de frenado de los vehículos así como mejorar significativamente su desempeño.

Capítulo II

Marco de Referencia

Para un correcto entendimiento se debe tener en cuenta cada uno de los conceptos que se emplearan en el desarrollo de este trabajo investigativo los mismos que potencializan cada una de sus secciones

2.1. Descripción del Sistema de Frenado de un Vehículo

Según (Calvo & Miravete de Marco, 2021) lo define como: “El sistema que cumple la función de disminuir la velocidad o incluso que se detiene en función de las necesidades marcadas por el conductor, por medio de la absorción de energía cinética y el rozamiento lo transforma en calor”.

Hay que tener en cuenta que un sistema de frenado en un vehículo debe cumplir características muy importantes como lo es poseer un alto grado de fiabilidad ya que en su correcto funcionamiento recarga la responsabilidad de evitar accidentes graves, así como las consecuencias que un accidente conlleva.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta en el desarrollo de un sistema de freno en un vehículo es que se pretende que la distancia que recorre al momento de aplicar el freno con la finalidad de que se detenga por completo debe ser la mínima, pero sin requerir de grandes esfuerzos por parte del conductor del vehículo.

Actualmente el avance en el desempeño de sistemas de freno sobre un vehículo a llegado a que el sistema de control se realice a cada una de las ruedas de manera independiente ya que de esta manera se ha determinado que mejora su desempeño sobre todo en condiciones complejas de frenado o de emergencia por parte del conductor.

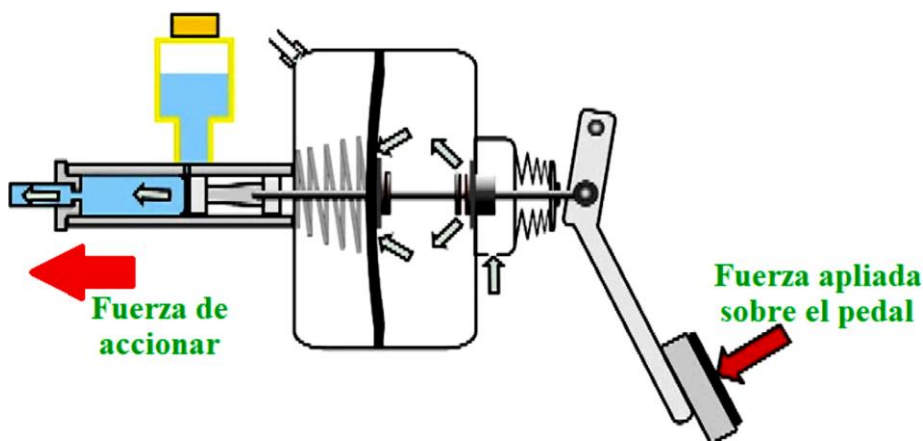
Hay que tomar en cuenta que la importancia del desempeño de un sistema de frenado sobre un vehículo es de mucha jerarquía a tal punto que este sistema es la base para el

desempeño sincronizado de otros sistemas del vehículo que trabajan tomando sus referencias en conducción para poder funcionar.

Otro de los aspectos a tomar en cuenta al momento de realizar un estudio a análisis del sistema de frenos de un vehículo son cada una de las actividades que con una frecuencia alta lo cumple en el momento que este es conducido, por este motivo cada uno de los componentes que conforman este sistema complejo de frenado deben tener la capacidad de ayudar a convertir de manera óptima la acción que el conductor realiza con su pie al aplicar una fuerza de frenado sobre el pedal de freno. Por este motivo uno de los tipos de sistemas de frenos como lo es el mecánico se vuelve algo deficiente en comparación al sistema de freno hidráulico en donde de un correcto cálculo y la conformación dimensional de sus componentes al ser relacionado con las características de la velocidad del vehículo y las características con que cuenta todo el vehículo en lo concerniente a su peso. El sistema de frenos del tipo hidráulico fundamentalmente se basa en la transformación de una cantidad mayor de fuerza que actúa entre la acción de frenado y el pedal de activación del freno como componente inicial hasta llegar a las pastillas de freno y que estas actúen sobre el disco de freno. Esto se puede apreciar claramente en la figura 1.

Figura 1

Mecanismo de Freno y Accionamiento de Fuerzas



Se debe observar que la fuerza que el pie del conductor realiza sobre el pedal es multiplicada dentro del mecanismo para luego ser transmitida a través del cilindro maestro tándem, el mismo que también es conocido por sus siglas CTM, esta acción provoca que el líquido de frenos se comprima. Esta fuerza al ser aplicada sobre la flecha del cilindro principal de freno estará en función directa de la geometría del pedal de freno, la misma que estará definiendo la influencia o grado con que es frenado el vehículo.

El modelo matemático utilizado para determinar el aumento de fuerza en un sistema de frenado es el siguiente:

Ecuación 1

Modelo Matemático para Determinación de Fuerza de Frenado F_o

$$F_o = F_p (\cos \alpha) \left(\frac{L_2 + L_1}{L_1} \right)$$

En los que se establece:

F_o corresponde a la Fuerza Resultante [N]

F_p corresponde a la Fuerza que es aplicada sobre el pedal de freno [N]

α corresponde al ángulo de inclinación que se genera entre la inclinación del pedal y el cilindro principal

L_o corresponde a la distancia del pivote del pedal al centro del vástago del cilindro maestro [mm]

L_p corresponde a la distancia del centro del vástago del cilindro maestro al punto de apoyo del pedal [mm]

Según (Lillo, 2006) determina que: “Las presiones promedio ejercidas sobre el pedal varían entre 2 y 3 kg, mientras que una pisada enérgica puede llegar a una presión de 10 kg”.

Como resultado de estas fuerzas del pedal de freno se puede llegar a determinar que es una fuerza suficiente para que al ser aplicada sobre un vehículo de baja masa o conocidos como pequeños se detenga.

Actualmente la industria automotriz ha determinado que la mejor opción en vehículos considerados medianos o pequeños, en lo relacionado al tipo de frenos a ser utilizados son los discos de freno en comparación con los de tambor, ya que posee una correcta área de contacto y además poseen una muy buena propiedad de ventilación, para el caso de vehículos de mayor peso o que se encuentre considerado en un rango de vehículos pesados se colocan frenos de tambor ya que estos brindan una mayor área de contacto, siendo óptimo para ese tipo de trabajo, pero la desventaja que se presenta es que no poseen una buena disipación del calor generados por su accionar.

Para cualquiera de los dos casos se utiliza un elemento multiplicador de fuerza y a este elemento se lo denomina servofreno.

Dentro de la clasificación de sistemas de freno para vehículos actualmente se tienen los siguientes:

- Frenos de tambor.
- Frenos de disco de carbón cerámico.
- Frenos de disco flotantes con pinzas fijas.
- Frenos de discos ranurados con pinzas fijas.
- Frenos de disco ventilados con pinzas fijas.
- Frenos de disco ventilados con pinzas flotantes.
- Freno de mano.

2.1.1. Freno de Tambor

Este es uno de los tipos de freno que se suele utilizar con mayor frecuencia en aplicaciones que se aplica mayor cantidad de carga sobre el sistema, también se lo conoce como freno de campana, siendo este un tipo de freno que funciona a través de la fricción del conjunto de zapatas las mismas que en conjunto presionan a la superficie interna de un tambor giratorio el mismo que se conecta a un eje o a la rueda.

Dentro de una subdivisión de tipos de frenos se tiene que los discos de tambor se clasifican en:

- Freno de tambor simplex.
- Freno de tambor dúplex.
- Freno de tambor twinplex.
- Freno de tambor dúo-servo.

El freno de tambor brinda algunas ventajas en comparación al freno de disco como lo son:

- Mayor superficie de fricción.
- Menor costo de fabricación.
- Su mantenimiento es menor y más económico.
- Brinda una temperatura de trabajo mucho más baja en comparación al freno de disco.

En lo concerniente a las desventajas que este tipo de freno presenta esta: el fallo provocado por el sobrecalentamiento, deformación u ovalamiento, pueden generarse grietas por este mismo efecto como lo es la temperatura y por último lo que suele provocar es mayor ruido o conocido como chirrido.

2.1.2. Freno de Disco

Dentro del sistema de freno del vehículo se encuentran unos elementos denominados discos de freno los cuales poseen una superficie de características especiales en las que las pastillas de freno interactúan para de esta manera se genere el frenado del vehículo, mientras el disco gira de manera solidaria a la rueda.

El coeficiente de fricción es uno de los factores de mucha influencia en el desempeño del sistema y se lleva a cabo entre estos dos elementos como lo son el disco de freno y las pastillas, en este punto es donde se genera un fenómeno termodinámico como lo es la

transformación de la energía cinética para pasar a energía calórica, esta transformación es la que permita que se produzca el fenómeno de frenado o desaceleración que normalmente se lo conoce como reducción de velocidad.

Cabe recalcar que para este aspecto el mecanismo disco de freno y pastillas no solo generan este tipo de transformación de energía sino que además debe cumplir con otro proceso termodinámico como le es que parte del calor que se producen se disipe en el menor tiempo posible al medio ambiente, por el motivo que si no se cumple esta condición el sistema de frenos llegaría a colapsar, perdiendo de esta manera la acción de frenado debido a un fenómeno entre el disco de freno y las pastillas denominado cristalización de superficies.

Según (Albert, 1993) define al freno de disco como: “Un freno que posee mejor ventilación, eficacia para la transformación de energía cinética del vehículo. Están conformados por una corona, circular, solidaria a la rueda situada en el hueco que deja el aro de la llanta de la rueda”.

Entre las formas de construcción de los frenos de disco se encuentra el acero macizo, siendo los de este tipo los más comunes y económicos, contando con un desempeño normal, pero con ciertas limitaciones en eficiencia, así mismo se fabrican discos de frenos que cuentan con una superficie con finas acanaladuras y/o perforaciones lo que permite durante el desempeño del frenado tener una mejor ventilación y por ende aumenta su eficiencia, a este tipo de disco se lo denomina como autoventilados pero se debe tomar en cuenta que poseen dos pistas que están separadas por un diseño tipo aletas en su interior, lo que se logra con este diseño es una mejor cohesión del disco de freno, logrando de esta manera que el flujo que aire que circula por su interior sea eficiente para el proceso de enfriamiento tanto en la parte de la superficie exterior como en el interior del disco de freno, esto se puede ver claramente en la figura 2.

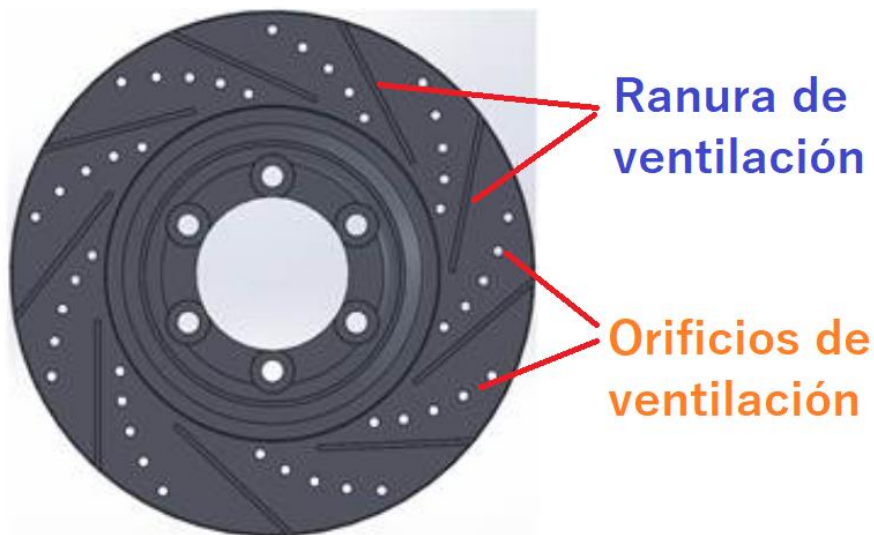
Figura 2*Diseño de Disco de Freno Ventilado*

Figura tomada de (Rojas, Pancha, Romero, & Lema, 2021)

En lo concerniente a los materiales utilizados en la fabricación de discos de frenos aplicados en el sector de la industria automotriz con una calidad media o comercial se encuentra la utilización de Fundición gris de granito laminar, por el motivo que este tipo de material brinda algunas prestaciones de estabilidad de forma garantizada, durante toda la vida útil de los discos de frenos, así mismo existen otros tipos de materiales utilizados de forma compuesta con base de carbono, siendo estos utilizados de manera regular en las modalidades de alta competición, así como en los frenos que se aplican en el tren de rodaje de los aviones y son puestos en acción al momento de aterrizaje, pero se debe también tomar en cuenta que sus costos también se incrementan significativamente y este es el factor por lo que no son utilizados de manera general en vehículos.

A continuación, se puede observar otros materiales aplicados en la fabricación de discos de frenos:

- Fundición gris nodular de granito laminar.
- Acero inoxidable.

- Aluminio.
- Aleaciones de aluminio.
- Titanio.
- Carbono.
- Cerámica.
- Silicio.
- Manganeso, entre otros.

En lo concerniente a tipos de frenos de disco estos se clasifican en:

- Discos de freno sólidos.
- Disco de freno ondulados.
- Disco de frenos rayados.
- Disco de freno mixtos.

El cuidado que se debe tener con este tipo de freno se recomienda revisar o cuidar el nivel de líquido de frenos, así como verificar constantemente el estado del circuito del sistema de freno y por último verificar y dar mantenimiento a las pastillas de freno o balatas ya que pueden presentar contaminación, cristalización o desgaste.

2.1.3. Freno de Mano

También conocido como freno de estacionamiento, parqueo o de emergencia, este es un freno que su función es inmovilizar a las ruedas del vehículo de manera permanente.

Según (Fryśkowski, 2017), normalmente este tipo de freno no se lo utiliza para detener el desplazamiento de un vehículo cuando este se encuentra en marcha, pero si se presenta una emergencia si puede ser utilizado.

La manera como funciona este tipo de freno es por medio de una palanca con la que se acciona el sistema y se encuentra ubicado lo más cerca al conductor.

La palanca con la que se activa o desactiva el sistema posee un varillaje y un cable normalmente de acero. Al accionar la palanca se genera una presión sobre la mordaza de las ruedas lo que hace que el vehículo se frenara en su totalidad.

Para su uso de forma correcta, lo único que se debe hacer es jalar de la palanca con un movimiento rápido y seco, luego de esta acción se encenderá un testigo en el tablero de instrumentos que indica su activación que por lo general suele ser con una luz roja y un símbolo con una letra P. Se debe tener muy en cuenta que cada vez que nuevamente se vaya a movilizar el vehículo el conductor no debe olvidar de desactivar el freno de mano, caso contrario realizará una acción incorrecta que afectará a la conducción como el sistema.

2.2. Criterios de Diseño para Discos de Freno

Como se puede observar en la figura 3 un disco de freno puede presentar distintos tipos de superficies sobre las cuales trabajan o accionan las balatas o pastillas de freno, cumpliendo la función de disminuir el desplazamiento o detener definitivamente el vehículo, este fenómeno se produce a que el disco de freno gira de manera solidaria con las ruedas.

El fenómeno físico denominado rozamiento entre las pastillas de freno y el disco provoca la transformación de la energía cinética que lleva en ese momento el vehículo en energía calorífica, obteniendo de esta manera la disminución de la velocidad.

Algo de mucha importancia al momento de diseñar o realizar un análisis del funcionamiento de un disco de freno es que se debe tomar en cuenta que un disco de freno no solo cumple la función descrita anteriormente como lo es el de transformar la energía cinética en energía calorífica, sino que adicionalmente este calor que se produce debe ser transmitido en el menor tiempo posible a la atmósfera, por el motivo que si se llega a concentrar ese calor en el sistema aumentaría significativamente y por ende se eleva su temperatura de funcionamiento provocado de esta manera un colapso del sistema como lo es disminución de la eficiencia del sistema o fundición de sus elementos.

Figura 3

Discos de Freno Utilizados en la Industria Automotriz



Nota: Discos de freno rayados, ventilados, perforados: Diferencias y funciones (Den, 2020) (<https://club.autodoc.es/magazin/discos-de-freno-rayado-ventilados-perforados-diferencias-y-funciones>).

En el presente estudio se aplica una metodología para el análisis modal de frecuencia en discos de freno desde las condiciones de modelado cuidando sus dimensiones geométricas hasta el desarrollo de su simulación bajo condiciones de desempeño y restricciones propias de su funcionamiento.

Para el desarrollo del análisis modal de vibraciones de un disco de freno se deben considerar la aplicación de algunas ciencias científicas como lo son: Termodinámica, Mecánica, Manufactura, Metalurgia, Acústica, Física, entre otras. Todas estas en conjunto permitirán trabajar en el análisis, pero adicionalmente se requiere de la selección de programas de simulación, así como de uno de análisis estructural, todo esto en conjunto permite lograr alcanzar el objetivo planteado.

En la fase de generación del análisis modal del disco de freno, es de mucha importancia la consideración en cada uno de los aspectos con que cuenta el disco de freno en estudio como

lo es el aspecto geométrico, material, peso, temperatura máxima que alcanza en funcionamiento, deformación térmica y la resistencia al agrietamiento.

Otro de los aspectos fundamentales para realizar este estudio es la determinación del tipo de material con que está constituido el disco de freno en estudio que para este caso pueden ser de fundición gris nodular de grafito laminar, el mismo que brinda características de estabilidad durante el periodo de vida útil del elemento, otro de los materiales compuestos con los que suelen estar elaborados es en matriz de carbono, siendo estos utilizados para sistemas e frenos de alta competición, pero su costo de fabricación son muy elevados.

Según (Vera, Morales, Peña, & Rodríguez, 2019), actualmente se están fabricando discos de freno de aluminio, pero con una base de carburo de silicio, pero con la consideración que esto permite tener un disco de freno de menor peso con una contradicción en la correcta disipación de temperatura, para contrarrestar esta deficiencia lo que se debe hacer es de aumentar sus dimensiones constructivas, pero esto afecta al factor de reducción de peso que es fundamental en una ventaja de un sistema de frenado en el vehículo.

Otros discos de frenos se componen básicamente de materiales como lo son fundición gris nodular de grafito laminar, el mismo que en su composición contiene hierro con silicio, manganeso y otros materiales los mismos que garantizan la calidad de este tipo de elemento de frenado.

Las propiedades como la resistencia a la tracción, expansión térmica, calor específico, conductividad térmica, entre otras, cambian de manera significativa sus valores con la variación de temperatura.

Por este motivo el sobrecalentamiento de las paredes del disco de freno o superficies de fricción es consecuencia exclusivamente por una mala disipación de calor que se traduce en un problema del sistema de frenado siendo esto un aspecto proporcional a la masa del vehículo, que se debe considerar al momento de su análisis.

Este problema se puede traducir en la generación de puntos rojos, grietas, fisuras en el material del disco de freno los mismos que son aspectos negativos para el desempeño de los discos de freno.

Entre los aspectos a considerar al momento de realizar un análisis modal de un disco de freno se tienen los siguientes:

- Efectos de la temperatura.
- Geometría del disco de freno.
- Problemas principales asociados a los discos de freno.

2.2.1. Efectos de la Temperatura

La generación de elevadas temperaturas al momento del funcionamiento del sistema de frenado permite a ser considerado este facto cuando se procede a diseñar o analizar sus componentes que producen rozamiento y a considerar el aumento de la superficie de contacto entre el disco o tambor y las pastillas o zapatas respectivamente.

Si la temperatura sobrepasa las condiciones normales de funcionamiento del sistema se produce un efecto negativo denominado desvanecimiento o en el lenguaje anglo conocido como fading, que se refiere a la fatiga de los frenos en un vehículo. Este fenómeno se encuentra directamente relacionado con la pérdida de la eficiencia del sistema de los frenos al momento de la conducción.

Según (Erazo, y otros, 2017) la causa por la que se puede producir este fenómeno se debe a la cristalización que se producen en la superficie de contacto o rozamiento que lo puede ser en los discos, tambores, zapatas o en las pastillas de freno, debido a la superación del límite de temperatura permisible del sistema o cambios bruscos de temperatura, este fenómeno provoca que el pedal del freno se vuelva duro a la hora de ejercer presión sobre este.

2.2.2. Geometría de Disco de Freno

Básicamente se caracteriza a la geometría del disco de freno por la constitución de una superficie circular plana la misma que con el pasar del tiempo los diseñadores han ido generando modificaciones y soluciones que pretenden mejorar en lo posible que se genere mayor disipación del calor que se genera en un disco al momento de producirse el frenado del vehículo.

2.2.3. Partes del Disco de Freno

Un disco de frenos básico y aplicado a vehículos de baja o mediana gama por lo general se encuentra constituido por 4 partes básicamente y estas son:

- Pista
- Fijación
- Campana
- Filtro térmico

La superficie de fricción o pista es denominada a la superficie en la cual se genera la fricción entre la pastilla o balata y el disco de freno, su constitución suele ser de materiales como carbono, silicio, manganeso, entre otros.

Filtro térmico o también conocido como Ranura térmica permite la regulación de la transferencia térmica al disco, influenciando de esta manera en su protección.

Fijación o Superficie de adaptación, que es una sección torneada con una rigurosa tolerancia con la finalidad que su montaje se realice de una manera precisa con sus componentes de acoplamiento.

Campana o Material de aleación de precisión, este es una superficie extremadamente homogénea por su procedimiento específico de aleación de materiales.

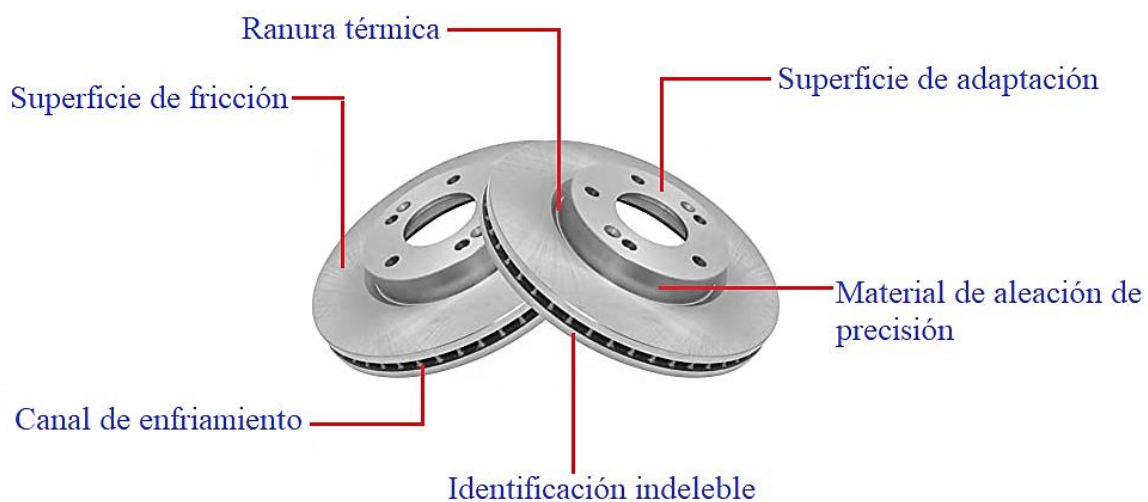
Identificación indeleble, en esta sección el fabricante coloca su información como lo es el número de pieza, espesor mínimo a ser rectificado y este suele ser todo estampado para su mayor seguridad.

Canal de enfriamiento, la función de esta sección es de disipar de manera óptima el calor mediante almas, columnas o aletas con sentido de dirección de flujo.

Cada una de estas partes se puede observar en la figura 4.

Figura 4

Partes del Disco de Freno



Dentro de las funciones principales que deben cumplir los discos de freno son el de transmitir el calor provocado por la transformación de energía a la atmósfera y mover o direccionar el aire alrededor del conjunto de freno similar a lo que haría el principio fundamental de un ventilador.

Esta característica se logra de manera estricta por su geometría de diseño del disco de freno que permite que se produzca esta circulación del aire desde el centro de la campana al exterior de la pista.

Los discos de freno macizos se encuentran formados básicamente por tan solo una pieza y solo poseen una superficie de fricción, lo que provocan que este tipo de freno disipe el calor

de una manera muy lenta, estos tipos de discos de freno se suelen colocar en vehículos pequeños que no requieren un sistema de frenado excesivo.

Así mismo existen discos ventilados y estos poseen la característica de generar una mejor disipación del calor provocado a través de un mayor espesor y separación entre las pistas, reduciendo de esta manera el grosor del material de fricción.

También hay en el mercado discos constituidos por dos piezas de manera independiente a los que se los utiliza sobre todo en vehículos de competición, se encuentran formados por una corona con un material base de hierro fundido y de un buje elaborado de aleaciones de aluminio, siendo estas dos partes solidarias a través de unos casquillos de fijación.

Durante el proceso o acción de frenado este disco presenta dos partes muy diferenciadas como lo es la campana que es la parte de menor temperatura y las bandas de frenado que es las que estarán sometidas a mayor temperatura. Con este tipo de disco de freno lo que se logra de manera significativa es el tener mayor resistencia a la deformación del elemento, esto se debe a que las bandas de frenado se suelen dilatar sin generar tensiones que generen grietas.

La ventaja que brinda este tipo de disco de freno en comparación a los otros modelos es que permite una deformación radial a las pistas pretendiendo que no se generen deformaciones de manera permanente, así como tensiones. Adicionalmente se reduce de manera considerable el peso de todo el conjunto. Una desventaja de manera general que se lo puede considerar es el costo que se genera en su fabricación por este motivo este tipo de disco de freno se lo suele utilizar en competencias y también en motocicletas en las que se ha logrado un correcto desempeño.

2.2.4. Problemas Principales Asociados a los Discos de Frenos

Los discos de frenos pueden presentar algunas anomalías que se deben de tomar en cuenta al momento de realizar un análisis modal o en caso de generar un diseño y entre estos son los siguientes:

- Ajustes incorrectos.
- Montaje incorrecto del cáliper.
- Excesiva holgura de los rodamientos del buje.
- Temperatura excesiva.
- Desgaste por el encima del límite permitido por el fabricante.
- Discos con presencia de grietas.

2.3. Coeficiente de Adherencia aplicado a Frenos

Para poder entender como es el comportamiento del sistema de frenado debemos tener en cuenta que este culmina con los neumáticos del vehículo los cuales adquieren adherencia que no es más que el producto de la fricción que experimenta el neumático sobre la superficie del suelo por donde se desplaza y la presión que es ejercida por el sistema de frenado, teniendo en cuenta que esta presión se eleva al momento que el vehículo toma una trayectoria de una curva, por el efecto de la fuerza centrífuga que transfiere todo el peso del vehículo a las ruedas externas.

De este fenómeno depende también la fuerza de transmisión con que actúa el frenado, condicionándolo de manera directa con la estabilidad lateral de todo el vehículo o también conocida como adherencia transversal que permite tomar una curva con estabilidad y el espacio o distancia de frenado que es otro fenómeno importante o conocido como adherencia longitudinal, que permite lograr que los neumáticos se adhieran de manera correcta tanto en las frenadas como en las aceleraciones que experimente el vehículo.

Un aspecto para tomar en cuenta al momento de establecer el coeficiente de adherencia son las condiciones con que cuenta cada uno de los neumáticos de manera particular como lo es el nivel de presión, las condiciones del labrado de la banda de rodadura o desgaste, material de construcción, propiedades del fabricante y el estado de la superficie o suelo.

El coeficiente de adherencia que se experimenta en los neumáticos de un vehículo y la superficie de desplazamiento o suelo, puede ser variable debido al coeficiente de fricción que este brinde, por este motivo cuando el coeficiente de adherencia es mayor es porque las condiciones que brinda la superficie es de una calzada limpia y seca, pero si las condiciones de la superficie de la calzada cambia a ser mojada o sobre hielo el coeficiente de adherencia será el mínimo y perjudicial para la conducción.

También se pueden presentar elementos externos que influyen en la variación del coeficiente de adherencia como lo son: el agua, suciedad, derrames de hidrocarburos sobre la calzada, entre otros que hacen que se disminuya el coeficiente de la fuerza de frenado y como consecuencia se puede dar que por la desesperación del conductor se produzca un bloqueo de las ruedas lo que no garantiza una correcta adherencia de las ruedas sobre la calzada y por ende no habrá transmisión de ninguna fuerza lateral, procediéndose a perder el control sobre el vehículo.

2.4. Deslizamiento del Vehículo

Cuando un vehículo se desplaza por una trayectoria o superficie, sus ruedas estarán sometidas a soportar fuerzas de frenado o impulsión, logrando de esta manera obtener como resultado procesos físicos muy complejos, debido a que los elementos conformados por gomas se llegan a tensar, lo que provoca la generación de movimientos deslizantes, aunque las ruedas no hayan adquirido un bloqueo en sí.

Para poder determinar la magnitud de deslizamiento y así interpretar la proporción que se genera con el resbalamiento al momento de que el vehículo se encuentra en movimiento sobre una trayectoria en cualquiera de sus condiciones físicas, se establece por medio del siguiente modelo matemático o ecuación:

Ecuación 2

Modelo Matemático para Determinación la Magnitud de Deslizamiento χ

$$\chi = \frac{(V_1 - V_p)}{V_p} (100)$$

En los que se establece:

χ corresponde a la magnitud de desplazamiento [%]

V_1 corresponde a la velocidad inicial que experimenta el vehículo [m/s]

V_p corresponde a la velocidad periférica que experimenta la rueda del vehículo

[m/s]

El modelo matemático expresado describe el deslizamiento de las ruedas provocado por el efecto de frenado ya que las ruedas giran a menor rango de velocidad en comparación a la que se desplaza el vehículo en marcha, por este motivo único se considera la presencia de la fuerza de frenado, claramente esto se puede observar en la figura 5.

Figura 5

Fuerzas que Actúan en el Deslizamiento de Vehículo



Dentro del análisis que se realiza durante este comportamiento se establece que cuando la rueda gira de manera libre, tanto la velocidad de desplazamiento del vehículo y de las ruedas son las mismas por ende el valor que expresa el deslizamiento posee un valor del 0% o nulo,

en cambio que cuando la rueda experimenta un bloqueo es decir no gira por el efecto de frenado, la velocidad periférica es de 0, en consecuencia, el deslizamiento llega al 100%.

2.5. Eficacia del Sistema de Frenado

Como ya se lo ha mencionado anteriormente el freno en un vehículo posee la única y poderosa función que es la de ayudar a disminuir la velocidad para de esta manera llegar a detener totalmente el vehículo o también poder llegar a esquivar algún tipo de obstáculo que se presente en la trayectoria o camino, así mismo el de conservar la fricción de las llantas contra el piso para lograr que las ruedas no vayan a patinar y perder eficiencia. Claro está que esto también involucra al tipo de freno y su aplicación en vehículos.

Por Este motivo los diseñadores y constructores de la industria automotriz intentan contar con mecanismos, así como distribuir correctamente el peso del vehículo, logrando de esta manera una adherencia útil, con esta consideración se tiene que una máxima eficacia del sistema de frenos en un vehículo es cuando alcanza el 100 % de su frenado el mismo que es igual a su peso. Claro está que no siempre se llega a ese porcentaje, por lo que una consideración o rango óptimo para un desempeño normal es considerado cuando este valor se encuentra en el rango de eficacia que va entre el 80 % y 100 %.

Cada uno de los análisis tratados nos llevan al ver la distancia o recorrido de frenado que se genera desde el punto inicial de frenado hasta llegar a detener completamente el vehículo, esto dependerá sin duda alguna de algunos factores y puede ser calculada por medio del siguiente modelo matemático.

Ecuación 3

Modelo Matemático para Determinación la Distancia de Frenado

$$l = \frac{1}{2} \left[\frac{m (V_1^2 - V_f^2)}{g(F_r)} \right]$$

En los que se establece:

l corresponde a la determinación de la distancia de frenado [m]

m corresponde a la masa del vehículo [kg]

g corresponde a la fuerza de gravedad [9,8 m/s²]

F_r corresponde a la fuerza de rozamiento [kg]

V_i corresponde a la velocidad inicial del vehículo [m/s]

V_f corresponde a la velocidad final del vehículo [m/s]

2.6. Temperatura en el Sistema de Freno

Antes de discutir sobre la acción de temperatura en el sistema de freno se debe tener en claro ciertos conceptos como lo son el del rozamiento o fricción seca, que de acuerdo con varios autores lo determinan como la resistencia que se presenta entre dos cuerpos secos que se oponen al movimiento entre estos y su movimiento es tangencial al contacto, provocando de esta manera pérdidas de energía por sus movimientos relativos que no es más que la energía dentro de una fase de transformación.

La magnitud del rozamiento que se genera no es más que la resistencia al movimiento tangencial el cual depende de los siguientes factores:

- La naturaleza de su superficie esto quiere decir de su rugosidad.
- La fuerza de contacto que se genera entre los dos cuerpos, pero en sentido normal al contacto.

Por este motivo se emplea la ley de Coulomb del rozamiento para poder establecer que para la fuerza de rozamiento asciende de manera lineal con el valor de la magnitud de la fuerza normal de contacto.

Ahora bien, para analizar sobre la temperatura al momento de funcionar un sistema de frenos en un vehículo esta se basa directamente en la fricción, a través de un estilo de conducción de energía agresiva por el motivo que la fricción o rozamiento aumenta de

sobremanera, lo que conlleva a que este incremento se de en los discos de frenos hasta llegar a un rango promedio de entre los 600 a 700 °C.

Bajo estas condiciones de cómo es la influencia de la temperatura sobre el sistema de freno de un vehículo, se puede llegar a tener en cuenta que con el transcurrir del tiempo, el calor provocado por el rozamiento tiene como consecuencia generar un desgaste de cada uno de sus componentes, por el motivo que el calor extremo que se produce durante el proceso de frenado es extremo. Por este motivo es que al sobrecalentarse los frenos de manera severa y al no poseer un correcto sistema de refrigeración, lo más probable es que el sistema empiece a dar fallas, así como deteriorar a sus elementos.

Un fenómeno que se genera cuando se eleva la temperatura del sistema de freno de un vehículo sobre lo preestablecido por el fabricante, se presenta la aparición de burbujas de gas o vapor dentro del circuito hidráulico de frenos. Cuando este fenómeno se presenta, el comportamiento del pedal que acciona el conductor del vehículo se vuelve blando, además de esto se hunde, lo que hace que se hunda hasta llegar al fondo del desplazamiento del pedal y en definitiva lo que se genera es la disminución de la eficiencia del frenado, así como de su consistencia.

Una de las recomendaciones que se pueden implementar al momento que esto ocurre es la de disminuir de manera paulatina el uso del freno, también controlando la velocidad del vehículo y esto se puede lograr de la siguiente manera: Cuando el vehículo se desplaza o desciende sobre una pendiente por largas distancias se recomienda ir frenando de forma intermitente para de esta manera poder controlar del desplazamiento del vehículo, así como el de reducir la carga que soporta el sistema de frenos, permitiendo de esta manera que las pastillas de freno se ventilen y no lleguen a sobrecalentarse.

Al momento de analizar el comportamiento del calor sobre los discos de freno se debe considerar el movimiento de dos cuerpos uno contrario del otro como lo son el disco de freno,

el mismo que posee su movimiento con una velocidad relativa aplicada en su área de contacto y el otro cuerpo son las pastillas de frenos que se encuentran fijas a la misma área de contacto o de acción.

Por esta acción se presenta un factor muy importante como lo es el índice total de energía disipada, el mismo que se genera por el contacto de las pastillas de freno juntamente con el disco de freno y se encuentra determinado debido a la fuerza de fricción y su velocidad relativa.

Para poder determinar el valor del calor que admite el disco de freno se utiliza el siguiente modelo matemático.

Ecuación 4

Modelo Matemático para Determinación el Calor Absorbido por el Disco de Freno

$$Q_{total} = \mu * p * V_p$$

Q_{total} corresponde al calor admitido por el disco de freno [W / m²]

μ corresponde a factor de rozamiento generado entre las pastillas de freno y el disco de freno [-]

p corresponde a la presión generada sobre el disco de freno [N / m²]

V_p corresponde a la velocidad inicial del disco de freno [m/s]

2.7. Método de Elementos Finitos

La definición que presenta (Aguilar, Corona, & Ortiz, 2008) es que: “Este es un método numérico muy general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física”.

Para tener claro la descripción a que se refiere este método de elementos finitos no es más que la división de toda la estructura que conforma el cuerpo del elemento conocido como dominio en el que se definen ciertos modelos de ecuaciones integrales que controlan el

comportamiento físico de estudio en una serie de subdivisiones que no intersecan entre si y a este comportamiento se lo denomina elementos finitos.

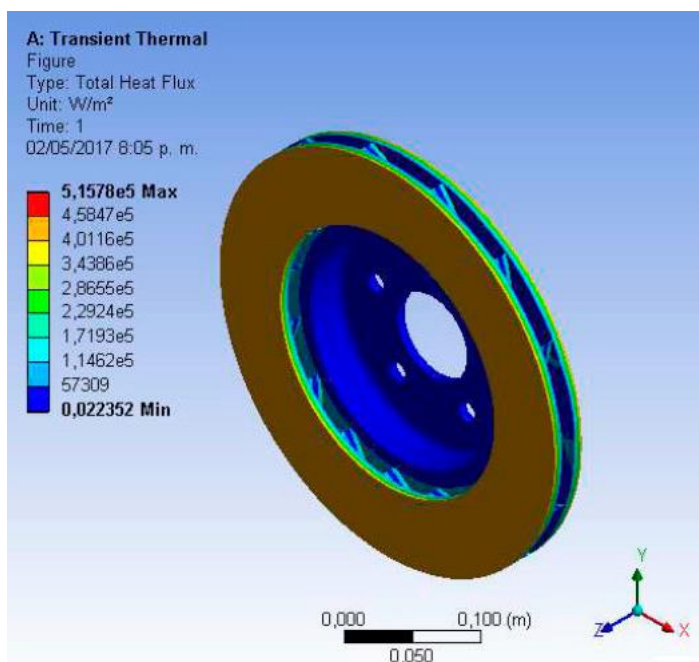
Si el estudio utiliza el término de discretización se refiere al conjunto de elementos finitos que permite que se forme una partición del dominio.

Cada una de las divisiones generadas en la estructura se crean una serie de intersecciones o puntos representativos a los mismos que se los denomina nodos y el conjunto de nodos en la estructura del elemento en estudio se denomina malla.

Existen en la actualidad un sinnúmero de softwares o programas computacionales que permiten realizar este estudio de elementos finitos los mismos que calculan el campo de desplazamientos para luego con la ayuda de relaciones constructivas y cinéticas analiza las tensiones y deformaciones de manera respetiva, uno de estos ejemplos se puede observar en la figura 3.

Figura 6

Ejemplo de Aplicación de Proceso del Método de Elementos Finitos



La aplicación del método de elementos finitos generalmente se emplea por las prestaciones que brinda como lo es su generalidad, así como la facilidad de resolver dominios en los que sus cálculos son complejos tanto en dos como en tres dimensiones.

Otras bondades que brinda tanto este método como estos programas computacionales es que se puede realizar estudios referentes a la difusión de calor sobre elementos o mecanismos, también en estudios en los que interviene un estudio de mecánica de fluidos que para estos casos los que se calcula es la velocidad de transferencia de calor y las presiones de campo electromagnético.

2.7.1. El Método de Diferencias Finitas

Existen varios métodos por los cuales se permiten realizar estudios de análisis para llegar a una solución lo más aproximadas a la realidad de acuerdo con los modelos matemáticos y ecuaciones diferenciales que se encuentran definidas en una región de trabajo, en la misma se definen ciertas condiciones de frontera o contorno, así como condiciones iniciales que permiten el inicio del proceso para llegar a obtener las soluciones de los problemas planteados por el estudio.

En definitiva, el método de diferencias finitas es el método que de modo general permite la resolución aproximada del planteamiento de ecuaciones diferenciales para obtener derivadas parciales definidas en recintos finitos.

2.8. Frecuencia Modal

Una de las técnicas utilizadas en las ciencias mecánicas lo es el análisis modal que en definitiva se refiere a una técnica de análisis dinámico de las estructuras, teniendo como objetivo la estimación de cada una de las propiedades dinámicas como lo son las frecuencias y los modos naturales, así como de igual manera que el amortiguamiento. Este análisis modal puede ser aplicado o determinado de manera teórica o experimental.

Si se aplica el análisis teórico este se fundamenta en técnicas analíticas o simulaciones de problema planteado, en cambio que el análisis experimental se fundamenta en ensayos y posee cuatro pasos fundamentales que son los siguientes:

- Excitación de la estructura.
- Medición mediante acelerómetros.
- Tratamiento digital.
- Análisis de las señales.
- Aplicación de modelos.

De igual manera este tipo de metodología también se la suele aplicar un método de monitorización de la vida estructural del elemento en estudio, para poder entender de manera ejemplificada cuando una estructura presenta un daño su rigidez disminuye de manera que afecta a su frecuencia, así como sus modos naturales, esto quiere decir que afecta directamente a su manera de vibrar. Este cambio se puede detectar y comparar con su estado de referencia inicial cuando la estructura no ha sufrido ningún tipo de daño.

Además, cuando se utiliza esta técnica de análisis modal es muy probable poder detectar la localización e intensidad con la que se produjeron los daños para así en un futuro poder prever el resto de la vida las condiciones de vida del componente estructural o mecanismo en estudio.

Dentro de este estudio se presentan algunos parámetros modales que son las frecuencias de resonancia, el patrón de vibración de resonancia de la forma modal y la amortiguación del elemento o estructura. El modelo matemático se encuentra basado en cada uno de estos parámetros que no es más que un modelo lineal que brinda una descripción completa de su comportamiento lineal de la estructura.

En definitiva, para poder entender que es una frecuencia modal, se debe tener en cuenta que una estructura exhibe un sinnúmero de múltiples frecuencias naturales de vibración, las

mismas que se producen cuando son excitadas por un tipo de aceleración, una fuerza o un determinado desplazamiento. Dependiendo del tipo de movimiento que experimenta la estructura al provocar un desplazamiento considerado como frecuencia modal se denomina forma modal y estas se relacionan con la implicación de torsión, flexión, contracción y elongación o también por la combinación de cualquiera de estos efectos.

Existen algunos tipos de frecuencias modales, entre los que se tienen los siguientes:

- *Modo de cuerpo rígido.* – Generado por un movimiento de traslación en direcciones de rotación sobre los ejes globales, esto se genera cuando el modelo no se encuentra restringido en una o más direcciones y no se deforma solo se mueve con respecto a la ubicación inicial u original.
- *Modos fundamentales.* – Este se fundamenta en el primer modo o cuando experimenta una frecuencia muy baja y de esta forma excluya los modos de cuerpo rígido.
- *Modos armónicos.* – Básicamente este tipo de modo es un múltiplo de uno de los múltiplos fundamentales. Las formas que se estudian de los modos armónicos son mucho más complejas que los del modo fundamentales por el motivo que poseen un punto de inflexión.

Se pueden generar movimientos simples hacia abajo o hacia arriba para un determinado modo, lo que se interpreta que un simple movimiento provocado a un extremo, de lado a lado o de atrás para adelante probablemente puede generar una frecuencia más alta y esta irá variando de acuerdo con el aumento o disminución de la frecuencia de vibración de la estructura en análisis.

Para la generación de un análisis correcto se debe tener en cuenta que los factores que presentan una influencia sobre las frecuencias naturales, así como de las formas de los modos, que son los siguientes:

- Las cargas de compresión o tracción que son aplicadas a la estructura.
- Rigidez del material y de la estructura.
- Forma que posee la estructura según sus restricciones.
- La forma que posee la estructura.
- La masa con que cuenta la estructura y como esta se distribuye.

2.9. Procesamiento del Análisis Modal a través del Método de Elementos Finitos

Para el presente estudio investigativo y al aplicar un método de elementos finitos para lograr alcanzar los objetivos planteados se toma muy en cuenta que los problemas físicos de manera real y lograr llegar a una solución de manera aproximada, esto se puede simplificar su proceso de acuerdo con el un número determinado de fases o pasos. Para lo cual la planificación es un factor muy importante por el motivo que es necesario la toma de decisiones que logran simplificar tanto el modelo real para así llegar a obtener un modelo simplificado físicamente. De esta manera se administra de mejor manera y con un ahorro de estos cada uno de los recursos inmersos en el proceso como lo es el tiempo y la exactitud de los resultados.

La secuencia planteada para el desarrollo del modelo por análisis modal a través de elementos finitos es la siguiente:

- Mundo real.
- Mundo físico simplificado.
- Modelo matemático.
- Modelo de elementos finitos discretizado.

Para obtener el modelo real del estudio, así como al modelo físico simplificado, se procede a asumir algunas propiedades físicas, la geometría del problema planteado y los esquemas físicos, e ignorando algunos aspectos con respecto a su geometría que no poseen influencia directa con la obtención de los resultados.

Luego para alcanzar el modelo matemático se procede a realizar suposiciones como lo son las propiedades de los materiales con los que se elaboró el elemento, las condiciones de carga a las que se encuentra sometido, para posteriormente aplicar los modelos matemáticos a problemas complejos.

La complejidad en el uso de los modelos matemáticos normalmente se suele aplicar de una o más ecuaciones diferenciales las mismas que describen la modificación de cada una de las variables de interés, también se debe aplicar la simplificación de su geometría si el caso lo amerita.

Para la obtención de una solución del modelo estructural con el método de elementos finitos, se deben seguir la sugerencia de los siguientes pasos:

- Identificación del tipo de modelo.
- Especificación de cada una de las propiedades del material, aplicación de cargas. o esfuerzos y la designación de las restricciones del modelo.
- Discretización de la geometría del elemento que permita la generación de un mallado óptimo.
- Resolución del sistema de ecuaciones lineales.
- Automatización de los ítems de interés dependiendo de las variables de solución planteadas.
- Revisión y análisis de los resultados obtenidos de forma gráfica en cada uno de los nodos detectados para así poder identificar cada una de las zonas críticas del estudio.

2.10. Selección de Programa Computacional por Utilizar

Es de suma importancia seleccionar correctamente un programa computacional que brinde las mejores herramientas para un estudio de análisis modal para el disco de frenos en estudio en el que se maneje todos los procesos, así como funciones de manera óptima.

También se deben tener algunos criterios para poder seleccionar el programa computacional a ser utilizado, como se puede observar a continuación:

- Afinidad entre programas
- Reputación del programa
- Especialización
- Plataforma y evolución del programa
- Migración de datos
- Seguridad de la información
- Velocidad y precisión del procesamiento de datos

2.10.1. *AutoDesk Inventor*

Este programa permite la integración de cada uno de los datos tanto en dos y tres dimensiones en un único entorno, obteniendo de esta manera una correcta representación virtual del elemento que para este estudio es el disco de freno, permitiendo inspeccionar su forma como el ajuste y el funcionamiento durante su simulación.

Entre las funciones que brinda Inventor se tienen las siguientes:

- Modelado paramétrico
- Modelado de ensamblajes
- Creación de dibujos
- Colaboración mediante vistas compartidas
- Trabajar con datos no nativos
- Interoperabilidad con BIM
- Configuraciones de diseño
- Diseño automatizado de armazones
- Chapa
- Definición basada en modelos

- Centro de contenido
- Generador de forma

2.10.2. *AutoDesk Fusión 360*

Este es una plataforma de programa computacional que permite desarrollar diseño asistido por ordenador o CAD, manufactura asistida por ordenador o CAM, ingeniería asistida por ordenador o CAE y de circuitos modelados en tres dimensiones en la nube tanto para el diseño, así como para la manufactura de productos.

Las ventajas que brinda al usuario este programa son las siguientes:

- Es una herramienta integral de desarrollo de producto
- Unión de diseños e ingeniería
- Entorno de modelado flexible
- Traducción, importación y exportación de archivos
- Diseño generativo y simulación avanzada
- Gestión integrada de datos
- La colaboración es clave
- Fabricación
- Funciona con hardware existente
- Renderizado y visualización 3D

Capítulo III

Método de Modelado

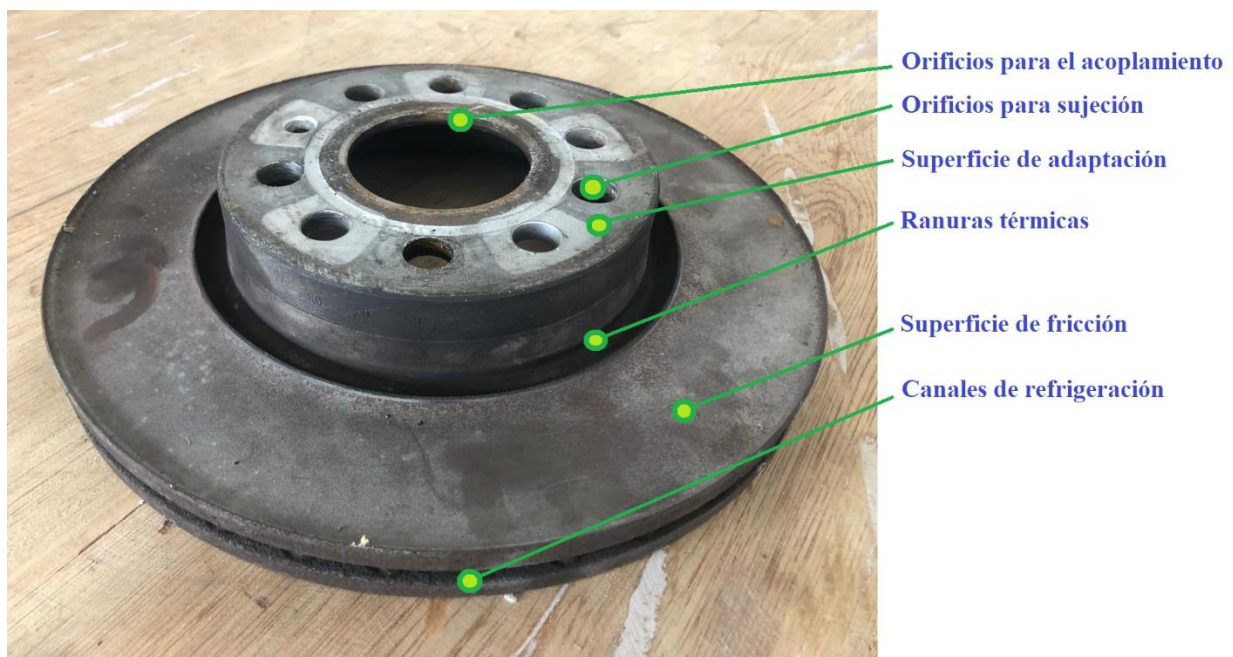
3.1. Herramientas para el Modelado y Análisis del Disco de Freno

La metodología que se aplica para el presente proyecto investigativo referente al análisis de frecuencia modal aplicada a un disco de freno y poder determinar la vibración generada se presenta bajo un proceso consecutivo de pasos secuenciales hasta llegar al objetivo planteado para el estudio.

El inicio de este proceso se da con la investigación de funcionamiento del mecanismo, así como de la información técnica generada por el fabricante de los elementos, así mismo como el observar las características físicas del elemento. En la figura 7 se puede apreciar las características físicas del disco de frenos que será sometido al proceso de análisis modal por medio de elementos finitos, como lo es la superficie de fricción, canales de refrigeración, superficie de adaptación, ranuras térmicas, orificios para sujeción y orificios para el acoplamiento.

Figura 7

Partes de Disco de Freno hacer Analizado



Dentro de las características que presenta el disco de freno hacer analizado en el presente proyecto investigativo son las siguientes:

- Posee amplia área de superficie de fricción que ayuda a un correcto acoplamiento con las pastillas de freno y generar la fricción requerida.
- Posee canales de refrigeración las mismas que permiten que se genere una correcta evacuación de temperatura del elemento generada al momento que está en funcionamiento con activación del freno.
- El material con que está elaborado permite eliminar o evitar un fenómeno generado por los frenados bruscos denominado fading.
- Sus características físicas proporcionan mayor potencia de frenado para el vehículo.
- El mantenimiento que requiere es mucho más sencillo en comparación a uno de tambor, pero con la aclaración que suele ser de mayor costo.

En la figura 8 se puede observar el disco de freno hacer analizado.

Figura 8

Disco de Freno hacer Analizado



Una vez que se tiene conocimiento de cada una de las características del disco de freno a ser estudiado se procede a la extracción de cada una de las medidas a través de la aplicación de los fundamentos de metrología.

3.1.1. *Obtención de Medidas del Disco de Freno*

Para la toma de cada una de las medidas del disco de freno y de acuerdo con el tipo de precisión que se requiere, se procede a la utilización de un calibrador pie de rey como se puede apreciar en la figura 9, con el que se procede a la toma de todas las dimensiones que se requiere para generar el proceso de bocetado y el modelado en tres dimensiones.

Figura 9

Extracción de Dimensiones de Disco de Freno



Tabla 1

Medidas de Disco de Freno

Descripción	Dimensión (mm)
Diámetro exterior	296
Espesor del disco	26
Diámetro de orificios de sujeción	15
Diámetro de ranura térmica	135
Altura total	43.9
Distancia de área de refrigeración	10
Diámetro interior	68

3.1.2. Selección de Programa Computacional para Modelado y Análisis Modal

Una vez obtenida la información referente a cada una de las dimensiones que conforman el disco de freno se procede a continuar con una fase de mucha importancia para el proyecto como lo es la selección del paquete de programas a ser aplicados para la investigación planteada en este estudio, para lo cual se ha revisado las características de cada uno, así como las herramientas con las que brindan para el desarrollo, para lo cual se han determinado los siguientes:

- AutoDesk Inventor - 2023.
- AutoDesk Fusión 360 - 2023.

Una de las ventajas que brindan estos dos programas es que son de la misma casa comercial, esto quiere decir que poseen una conectividad entre los dos lo que permite que se importen las fases de modelado para generar la simulación por el motivo que cada uno posee herramientas que se complementan de una manera óptima para poder realizar y alcanzar el objetivo planteado en la parte práctica del proyecto.

AutoDesk Inventor es un programa computacional que posee herramientas óptimas que permiten la conjunción de un sinnúmero de datos que trabajan para generar proyectos tanto en dos y tres dimensiones en un mismo entorno de trabajo, obteniendo de esta manera un manejo y visualización virtual del producto generado de manera final, permitiendo de esta forma realizar cualquier tipo de ajustes, visualizaciones e inspecciones del funcionamiento de elemento o también denominado como producto final, en cualquier instante que el diseñador lo requiera.

Básicamente AutoDesk Inventor cuenta con las siguientes herramientas:

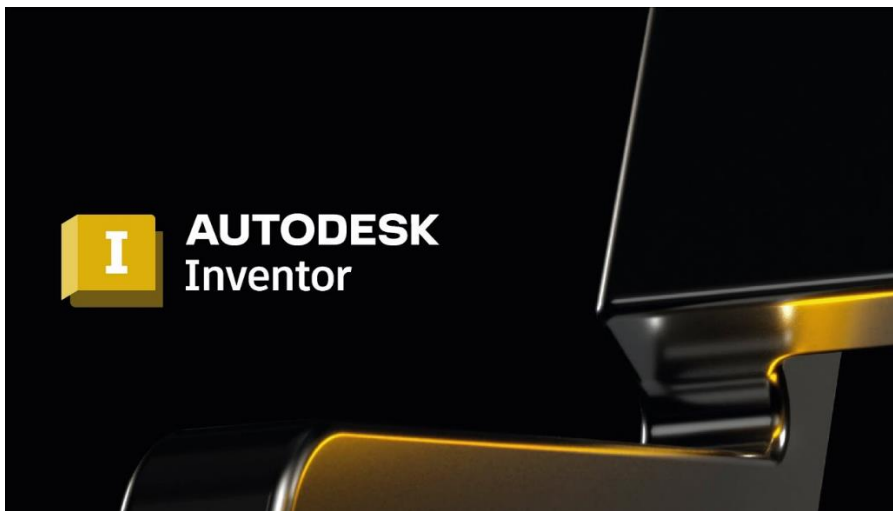
- Bocetado
- Dibujo en 2D o generación de modelos en 2D
- Diseño mecánico en 3D

- Documentación de la información
- Simulación en modo profesional
- Composición de capacidades de diseño de forma paramétrica, libre, directa y fundamentándose en reglas.

La presentación de la versión de AutoDesk Inventor que se aplica para el presente estudio se la puede apreciar en la figura 10.

Figura 10

AutoDesk Inventor 2023



Posteriormente el programa computacional a ser aplicado al presente proyecto investigativo y que permitirá alcanzar la finalidad del objetivo planteado lo es AutoDesk Fusión 360.

Fusión 360 es una plataforma que permite generar sistemas de ingeniería asistida por ordenador CAE, manufactura asistida por ordenador CAM, diseño asistido por ordenador CAD, placas de circuitos impresos PCB y modelado 3D el mismo que se basa en la nube para diseño y para la fabricación de productos de manera profesional, ahorrando de esta manera recursos como dinero y tiempo, lo que permite obtener piezas de alta calidad y en un menor tiempo.

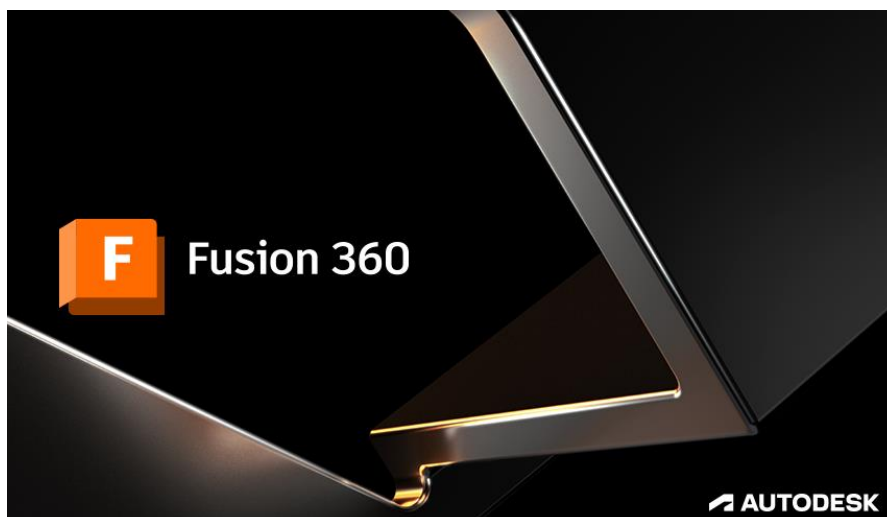
Con las herramientas que brinda AutoDesk Fusión 360 permite realizar los siguientes proyectos:

- Diseño y modelado flexible.
- Montajes interactivos.
- Creación de piezas y chapas.
- Diseño generativo innovador.
- Electrónica unificada y diseño de PCB.
- Simulación SPICE con botón pulsador.
- Captura esquemática jerárquica ilimitada.
- Simulaciones de enfriamiento de electrónica.
- CAD y CAM integrados.
- Colaboración en la nube y gestión de datos.
- Representación de documentación fotorrealistas.
- Verificación, pruebas y simulación FEA.

La presentación de la versión de AutoDesk Fusión 360 que se aplica para el presente estudio se la puede apreciar en la figura 11.

Figura 11

AutoDesk Fusión 360



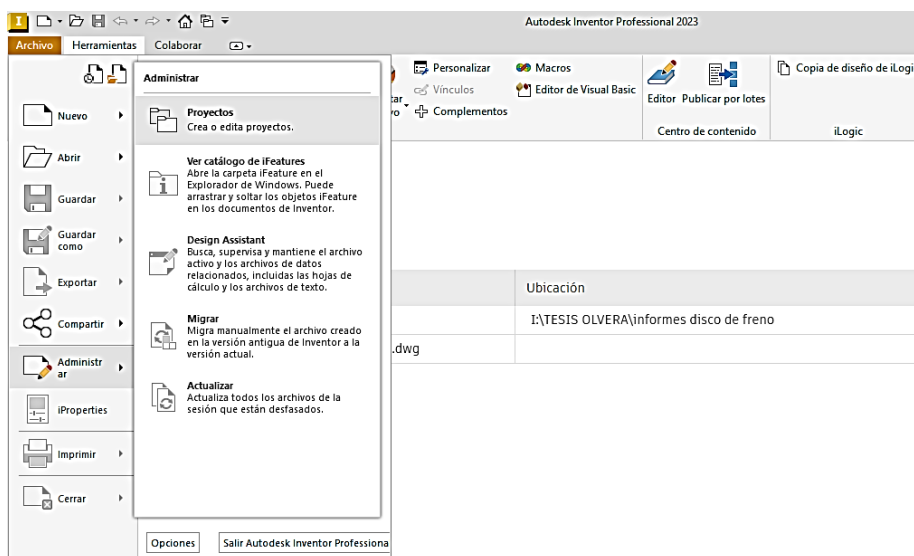
3.1.3. Modelado de Disco de Frenos

Para dar inicio al modelado del disco de frenos y al tener toda la información técnica se procede a utilizar el programa de AutoDesk Inventor, en el que como primer paso se recomienda crear un nuevo proyecto, como se puede observar en la figura 12, este proceso inicial se recomienda porque todos los archivos de piezas o ensambles se almacenarán en este elemento.

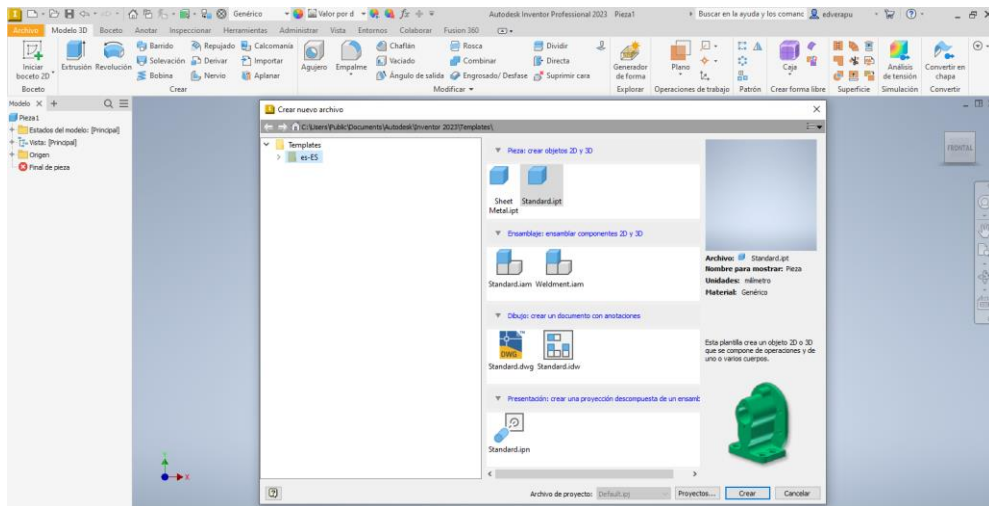
La secuencia que se debe seguir es la siguiente: Archivo – Administrar – Proyectos, para lo cual posteriormente aparece una nueva ventana donde se colocan todos los datos como nombre del proyecto y sobre todo algo muy importante como lo es la ubicación de la carpeta del proyecto donde se almacenarán todos los archivos generados por el programa y para finalizar con esta acción se selecciona terminar.

Figura 12

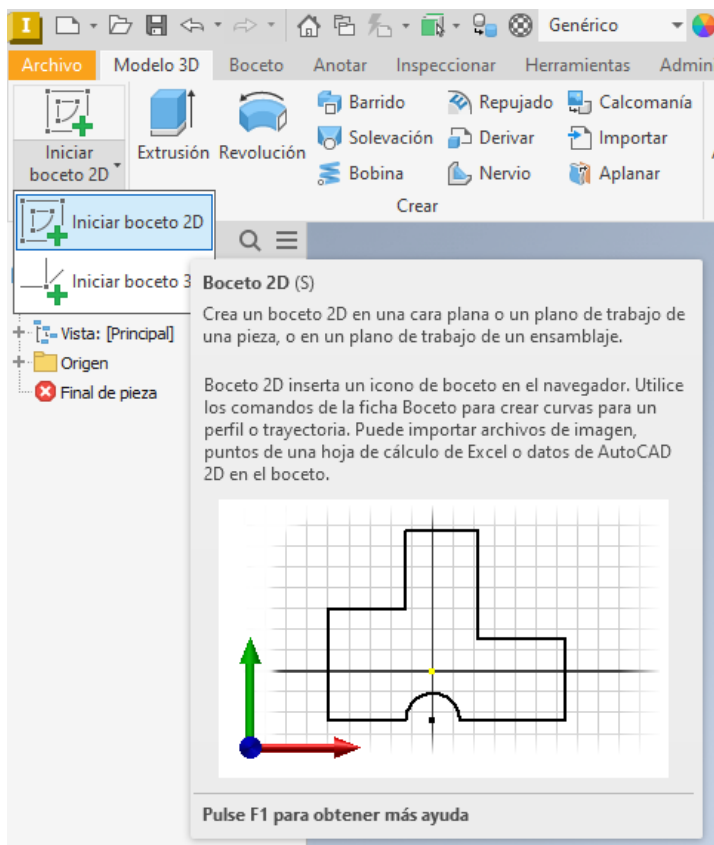
Creación de Nuevo Proyecto AutoDesk Inventor 2023



Una vez generado el proyecto se procede a crear una nueva pieza para iniciar con el modelado del disco de freno para lo cual se sigue la secuencia de Archivo – Nuevo – Pieza, luego se desplaza una nueva ventana en la que se procede a la selección de la opción de Standard.ipt, se culmina la opción con el ícono de crear, como se muestra en la figura 13.

Figura 13*Creación de Nuevo Proyecto AutoDesk Inventor 2023*

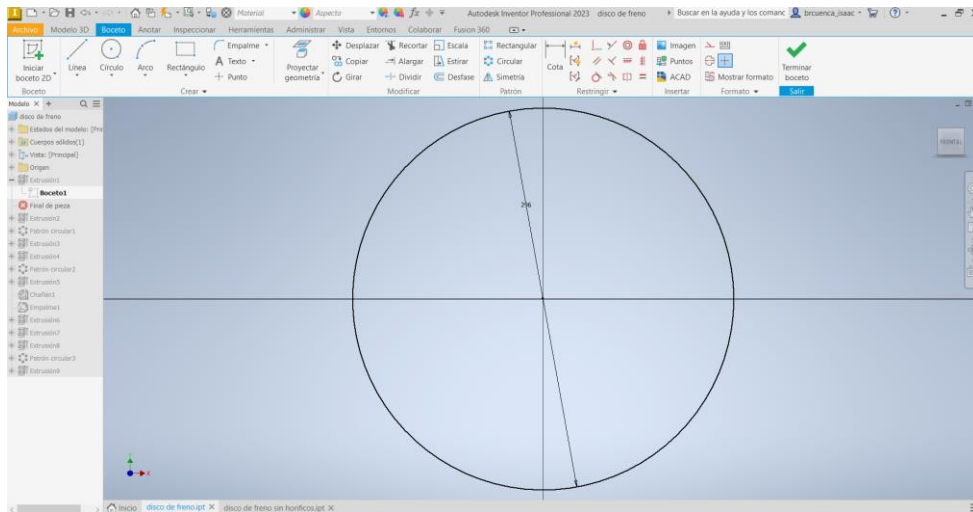
Posteriormente se inicia la creación del boceto el mismo que se lo realizará en 2D, como se puede observar en la figura 14, para posteriormente determinar sobre que plano de coordenadas se va a trabajar.

Figura 14*Creación de Nuevo Boceto en 2D AutoDesk Inventor 2023*

El inicio del boceto en 2D, se lo realiza con el diámetro externo del disco de freno, el mismo que para el modelo a trabajar es de 296 mm, como se muestra en la figura 15.

Figura 15

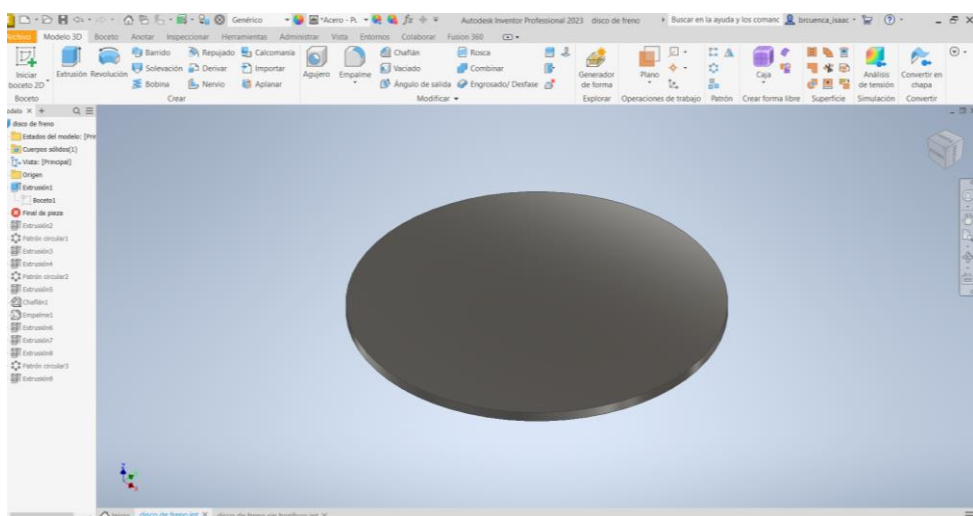
Inicio de Boceto de Disco de Freno



Una vez generado el diámetro se procede a finalizar el primer boceto, para después con herramientas 3D proceder a generar la respectiva extrusión con un espesor de 8 mm, como se puede apreciar en la figura 16.

Figura 16

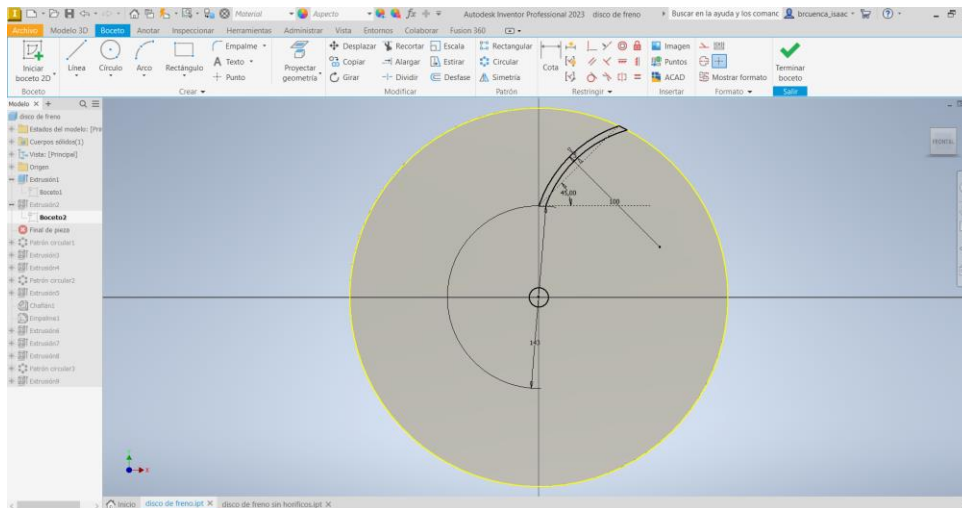
Extrusión de Base de Disco de Freno



La generación de la base para el modelado del disco de freno es muy importante porque al trabajar en 3D ayuda a la visualización e interpretación del modelo del disco, para lo cual una vez terminado este proceso, se continua con el diseño 2D de las paredes de los elementos

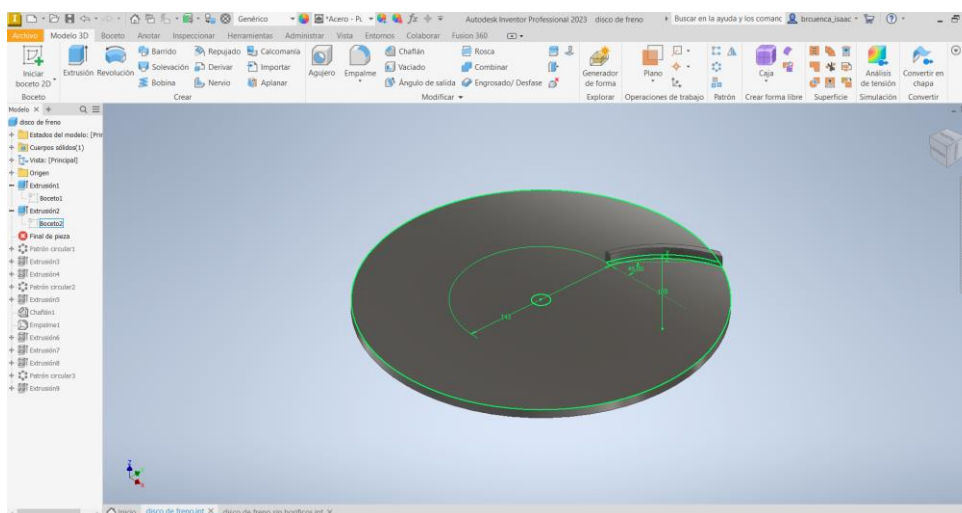
de refrigeración, a través de un patrón, el mismo que poseen un inicio geométrico en un círculo interior de 143 mm, un arco con un radio de 100 mm, una inclinación de 45° y un desfase de 5 mm, como se puede apreciar en la figura 17.

Figura 17
Generación de Aletas de Refrigeración



Una vez breado el boceto 2D del patrón de refrigeración se procede a la extrusión de este con una altura de 10 mm, como se muestra en la figura 18.

Figura 18
Extrusión de Patrón de Refrigeración

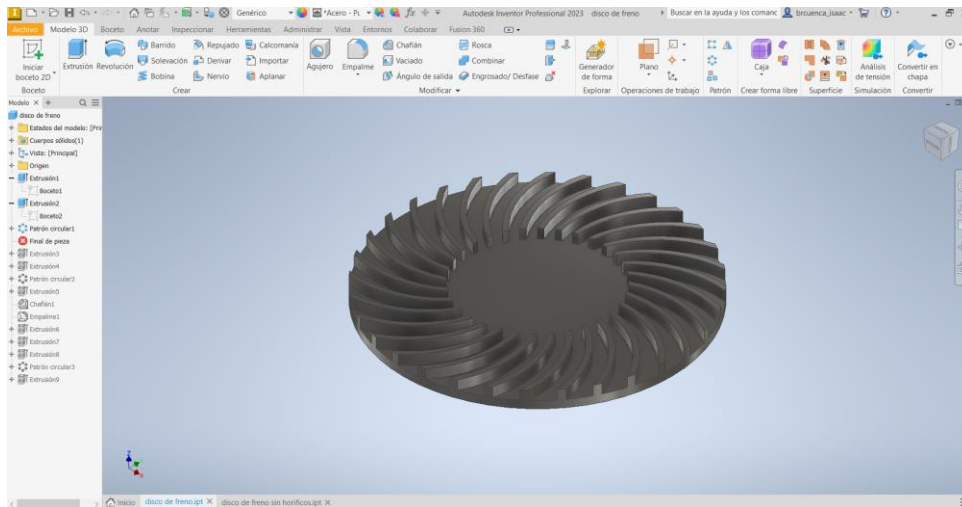


Esta fase es de mucha importancia para el avance del modelado y tomando en cuenta que esta sección de elemento creado será procesada a través de una matriz polar y de multiplique por todo el círculo base del disco interno con un relleno de los 360° , al finalizar

esta sección la matriz quedará unida con la base del disco, como se puede apreciar de manera clara en la figura 19.

Figura 19

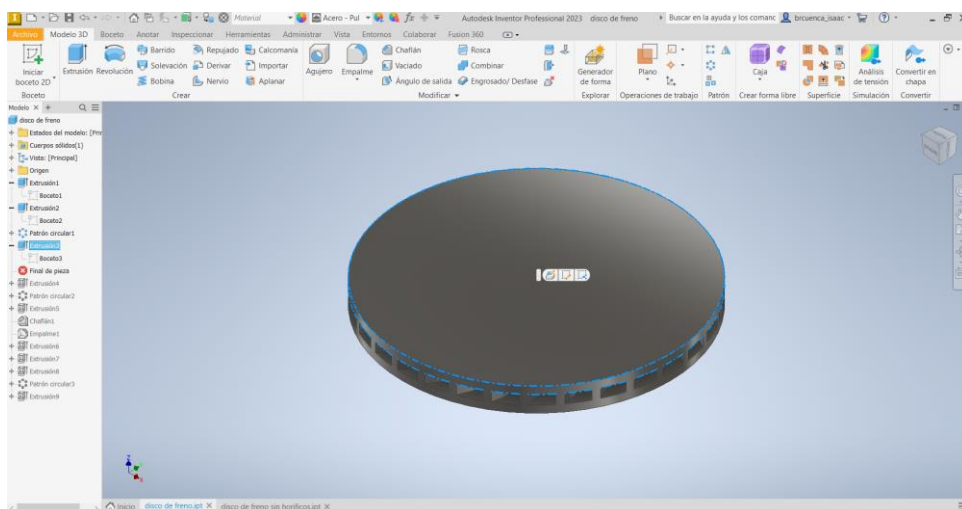
Aplicación de Réplica de Patrón en Creación de Conductos de Refrigeración



Posteriormente se procede a repetir el primer paso, con la finalidad de crear la base superior respetando las mismas dimensiones tanto en diámetros como espesor de extrusión, obteniendo de esta forma el conjunto de la superficie de fricción y los conductos de refrigeración del disco de frenos, como se puede ver en la figura 20.

Figura 20

Creación de Base Superior de Superficie de Fricción

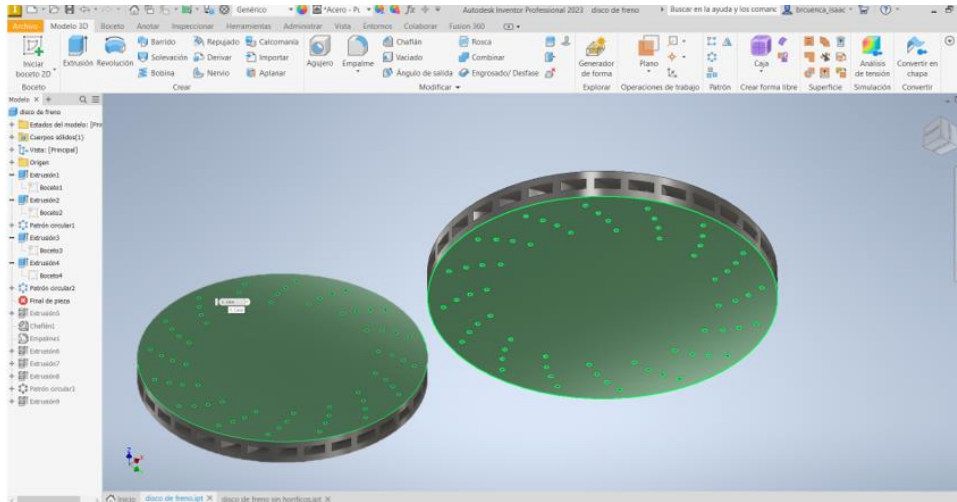


Continuando con el proceso del modelado del disco de freno, se procede a crear el patrón de los orificios de perforación sobre las superficies de fricción, con un diámetro de cada

orificio de 4 mm, y de igual manera una vez concluido el patrón en 2D se lo procede a multiplicar por medio de una matriz polar con un relleno de 360° , como se puede apreciar en la figura 21.

Figura 21

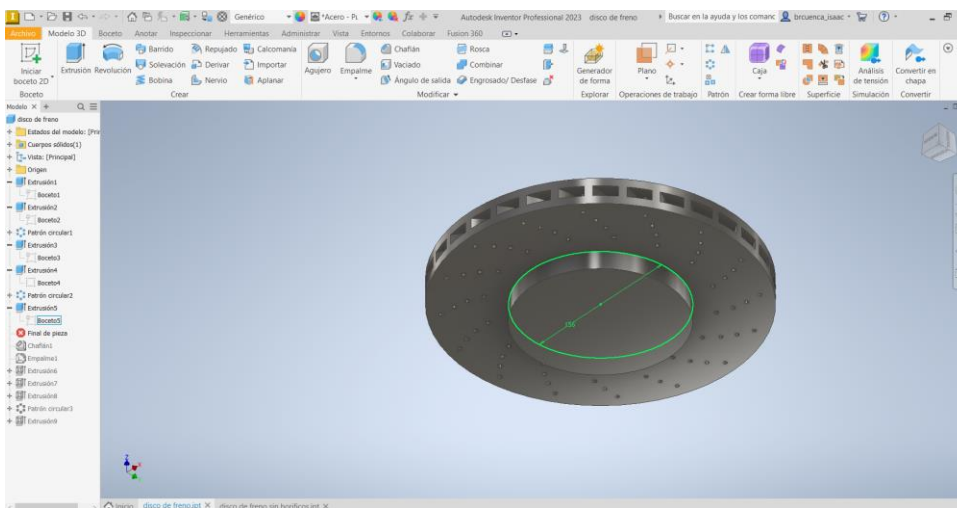
Creación de Perforaciones sobre Superficie de Fricción



Continuando con el modelado se procede dibujar el boceto para la creación de la ranura térmica con una base de diámetro 156 mm, como se puede absorber en la figura 22, en el caso de la extrusión es de 18 mm.

Figura 22

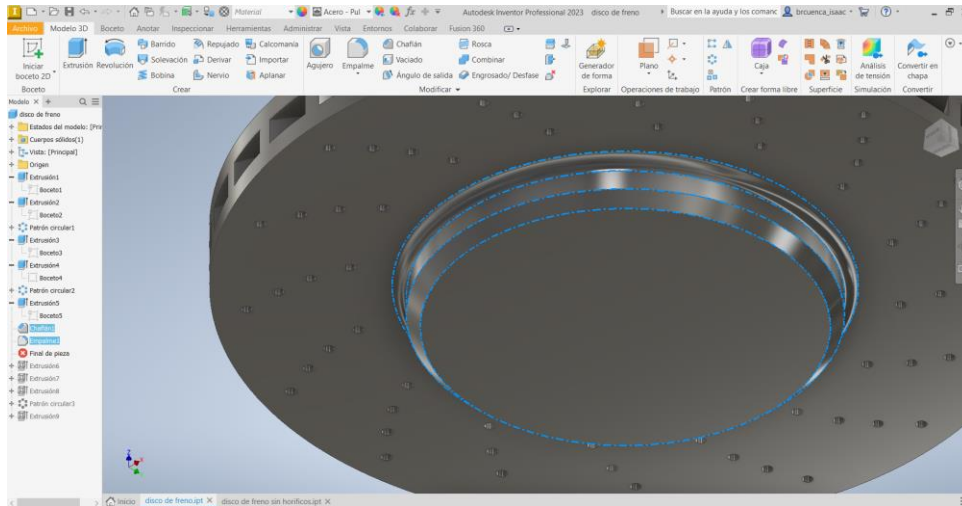
Creación de Ranura Térmica



Esta parte del disco requiere de la creación de un doble chaflán en el perfil de la ranura térmica con el fin de acoplamiento con el mecanismo que trabaja el disco de freno, este detalle se puede apreciar en la figura 23.

Figura 23

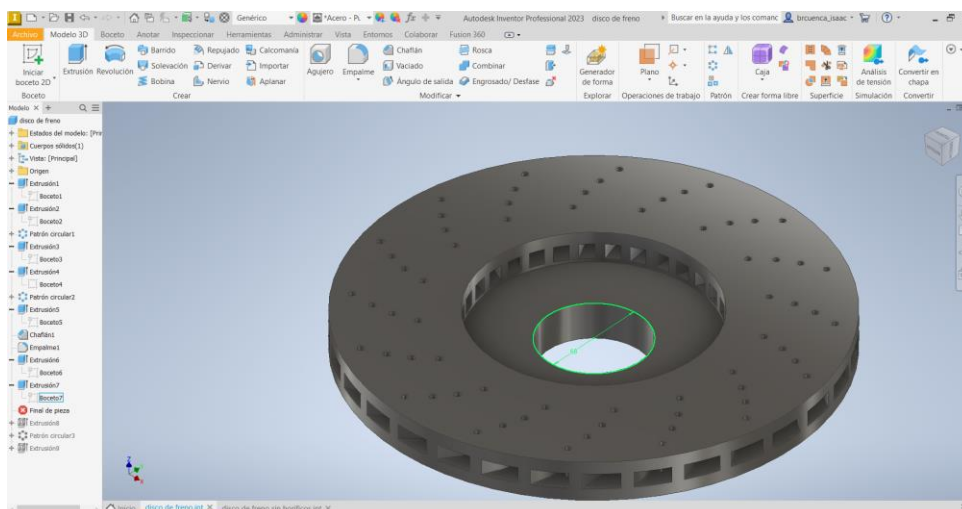
Creación de Doble Chaflán de Ranura Térmica



Posteriormente se procede a realizar la zona de sujeción del disco de freno, con una doble extrusión y un orificio central de un diámetro correspondiente a 68 mm, como se puede apreciar en la figura 24.

Figura 24

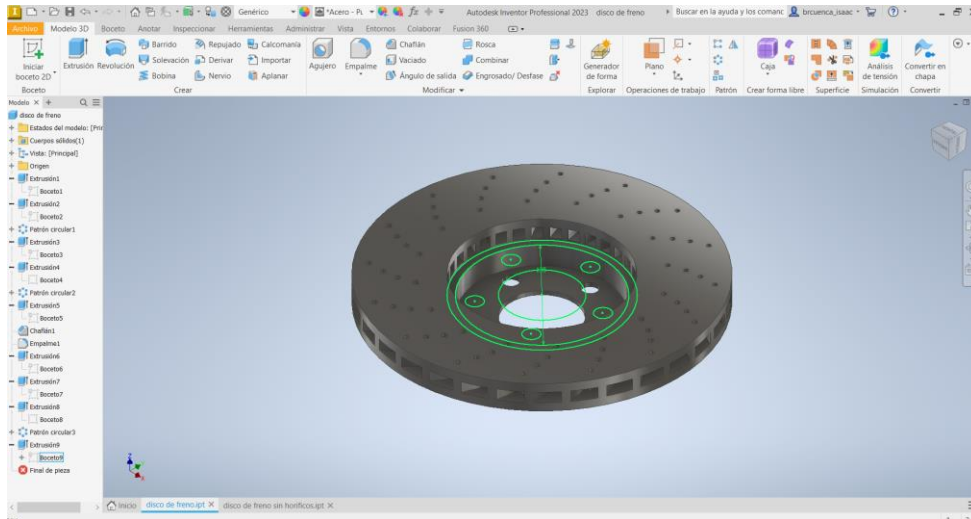
Creación de Zona de Sujeción de Disco de Freno



Finalmente se procede a la creación de los orificios para la sujeción del disco de freno los mismos que para el presente modelo son en un número de 5 y cada uno posee un diámetro de 15 mm, como se puede observar en la figura 25.

Figura 25

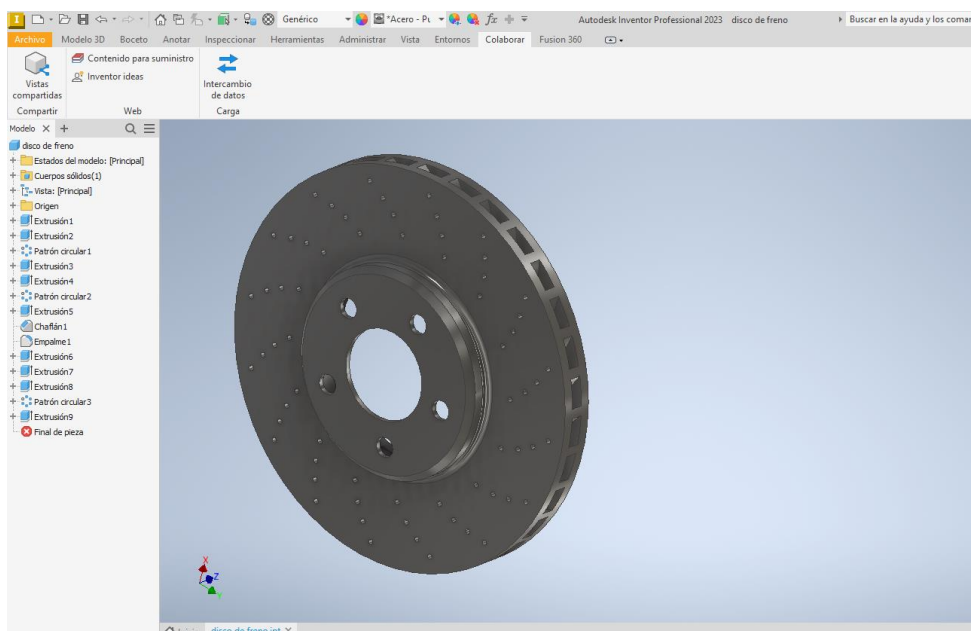
Creación de Orificios de Sujeción de Disco de Freno



Luego de generar la respectiva extrusión de estos bocetos el modelado del disco de frenos en estudio queda concluido como una fase del proceso la misma que se realizó con el programa AutoDesk Inventor como se puede apreciar en la figura 26.

Figura 26

Finalización de Modelado de Disco de Freno



3.1.4. Simulación de Frecuencia Modal a través de AutoDesk Fusión 360

Esta fase de la investigación se considera la principal ya que es el objetivo de esta, para lo cual se debe interpretar correctamente cada concepto de este y con la ayuda que brinda el programa AutoDesk Fusión 360 que posee herramientas exclusivas para el desempeño de este tipo de análisis.

Se debe tener en cuenta que todo elemento mecánico, así como los mecanismos presentan en su funcionamiento vibraciones y muchos fenómenos físicos se familiarizan con algunas fuentes de vibración como, por ejemplo:

- La vibración del piso cuando por una carretera pasa un camión.
- El traqueteo provocado por los motores de un avión al despegar.
- La vibración por las ondas generadas por un parlante de alta potencia con su entorno.
- El volante de un automóvil cuando se desplaza y hay un desequilibrio o desbalanceo en sus neumáticos.

Este tipo de vibraciones que se generan de manera prolongada provocan un daño a la estructura de cualquier tipo de mecanismo o maquinaria y muchas veces se convierte en un fenómeno inevitable, por lo que es un factor principal tomar acciones inmediatas para controlarlo, con esto se procura evitar que la fatiga del metal con que está elaborado el elemento y sobre todo tratar que no se produzca un fallo en el elemento o mecanismo.

Hay que tener presente que toda vibración se la interpreta a través de frecuencias, ya que por su naturaleza una vibración se la considera como un movimiento repetitivo, así como al conjunto de secuencias de vibración se las denomina ciclos, por este motivo es que a una frecuencia es definida como el número total de ciclos en un determinado periodo que se genera en un rango de tiempo y se lo expresa en ciclos por segundo, el mismo que es equivalente a un Hertz.

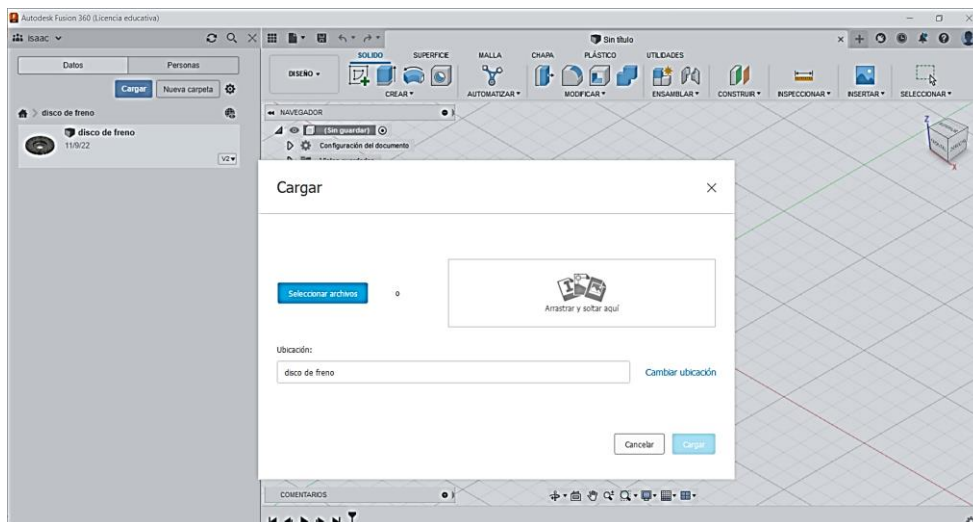
Cuando se trata de una frecuencia natural se refiere a una estructura que ha sido afectada por esfuerzos de compresión o tracción generados por cargas puntuales aplicadas sobre la estructura, siendo el programa AutoDesk Fusión 360 uno de los que posee una gran herramienta que permite realizar el cálculo de modos precargados.

Continuando con la fase de simulación de manera inicial se debe proceder a la importación del archivo del modelado desde el proyecto creado en el programa de AutoDesk Inventor al programa de AutoDesk Fusión 360, tomando en cuenta que el archivo que se va a importar debe estar generado con una extensión .ipt, por el motivo que el disco de freno es un solo elemento ya que si fuera un ensamble debería poseer una extensión .iam.

Luego se procede a abrir el programa Fusión 360, en el que se presenta una ventana correspondiente al administrador de proyectos, en este punto se localiza el proyecto del trabajo realizado en Inventor con el nombre que se le generó al disco de freno, para así poder cargarlo en el programa como se puede apreciar en la figura 27.

Figura 27

Localización de Proyecto en AutoDesk Fusión 360



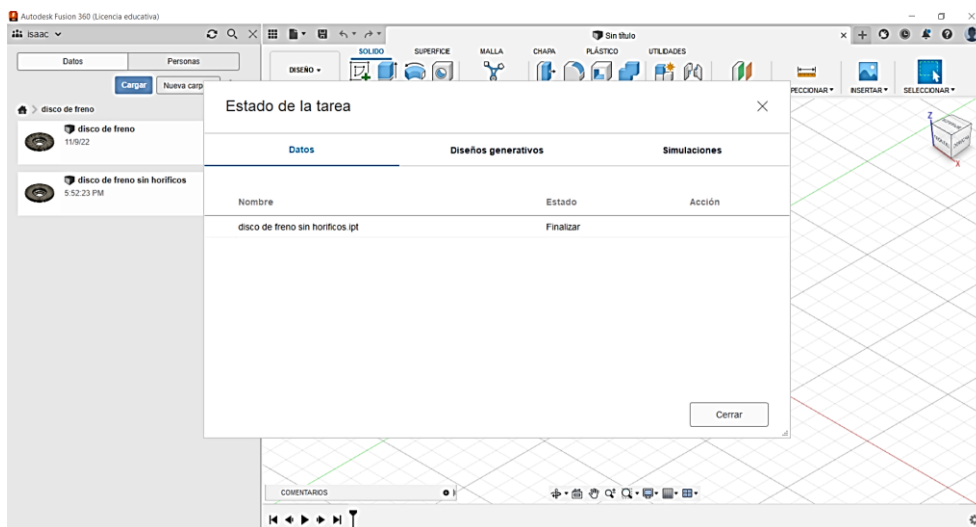
Una vez que se encuentre cargado o importado el proyecto se procede a iniciar el proceso para llegar a la simulación final del análisis de frecuencia modal de vibraciones del disco de

freno, con la aclaración que para este proyecto dentro del proyecto se importa un solo elemento ya que no es un ensamble.

Con la importación lo que sucede es que el programa de AutoDesk Fusión 360 convertirá al archivo generado en Inventor en uno con extensión propia para poder trabajar sobre dicho archivo, esto se puede apreciar en la figura 28.

Figura 28

Importación de Archivo de Disco de Freno de Inventor a Fusión 360



3.1.5. Generación de Análisis Modal de Disco de Freno

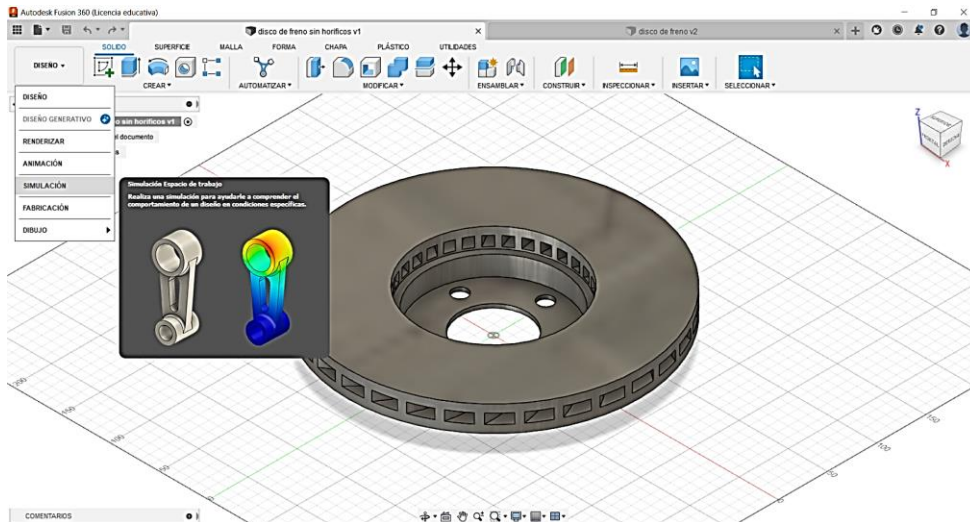
El objetivo que se plantea en esta sección del proceso es la de encontrar los modos de vibración a través de una comparativa entre dos diseños de un disco de freno en el que uno es un disco simple, esto quiere decir que no posee los conductos de refrigeración ni perforaciones en la superficie de fricción y el otro disco si posee estas características.

De esta manera al finalizar el proceso se obtiene una interacción entre las cantidades de masa que posee cada uno y ver como esta característica influye en la generación de vibraciones del elemento en estudio como lo es el disco de freno las mismas que se definen por las frecuencias que estos generan al instante que entra en funcionamiento y a la velocidad con la que gira el disco en conjunto con la rueda.

Para inicial el proceso en Fusión 360 se empieza iniciando una simulación de espacio de trabajo la cual permite realizar una simulación que permite comprender cada uno de los comportamientos del diseño bajo cada una de las condiciones específicas del fenómeno, este paso se lo puede apreciar en la figura 29.

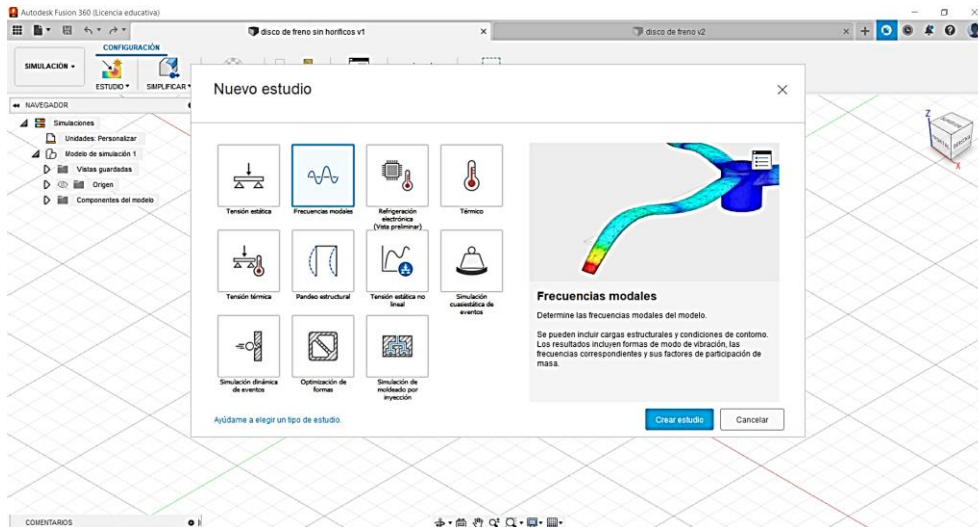
Figura 29

Simulación de Espacio de Trabajo

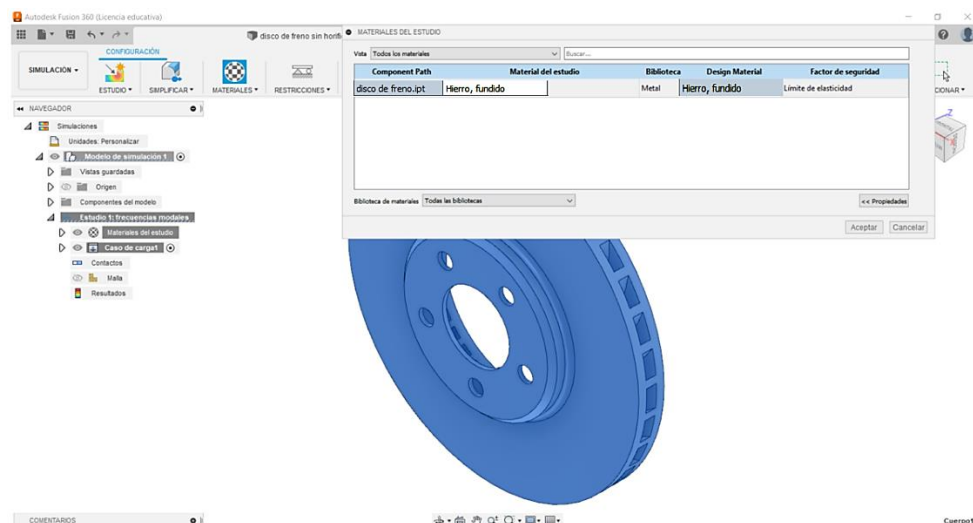


En este punto se desplaza una nueva ventana denominada nuevo estudio, en la que se presentan varias opciones como lo son: tensión estática, refrigeración electrónica, térmico, tensión térmica, pandeo estructural, tensión estática no lineal, simulación cuasiestática de eventos, simulación dinámica de eventos, optimización de formas, simulación de modelado por inyección y frecuencia modal que es la que se procede a seleccionar para el propósito del estudio como se puede ver en la figura 30, la misma que permite determinar las frecuencias modales del modelado de disco de frenos, siendo esta una herramienta que permite incluir cargas estructurales, así como las condiciones de contorno, del elemento en estudio los mismo que influyen de manera directa al proceso.

Las soluciones que se generen es este proceso incluyen formas del modo de vibraciones, las frecuencias proporcionadas y cada uno de los factores de participación de la masa del elemento.

Figura 30*Creación de Estudio con Selección de Frecuencias Modales*

Una vez que se haya creado el estudio se procede a la designación del material con el que está constituido el disco de freno a través de los materiales que se encuentran precargados en el programa, este procedimiento se puede apreciar en la figura 31.

Figura 31*Selección del Material*

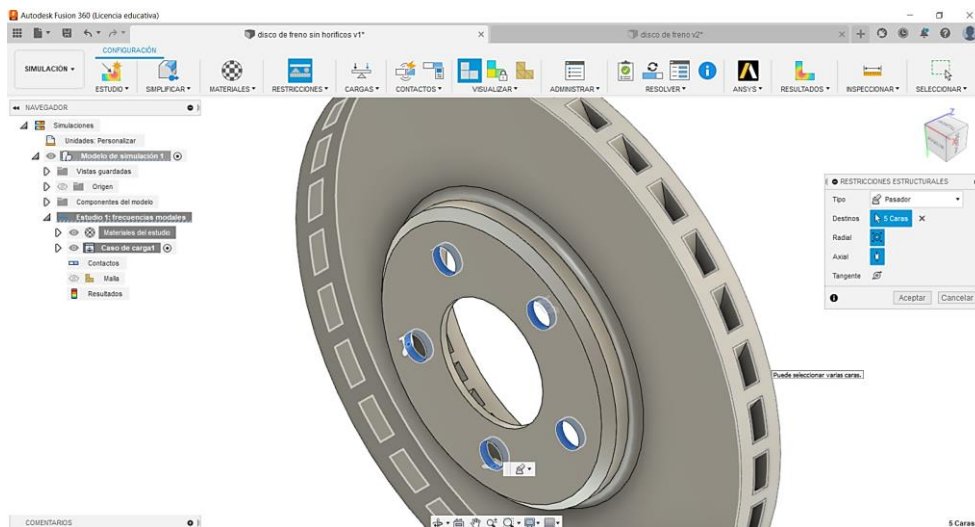
Esta designación del material consiste en seleccionar la superficie o superficies del elemento, para luego crear el conjunto de selección, también se puede aplicar un material por medio del cuadro de diálogo que se desplaza como preferencias, procediendo a seleccionar la

ficha del material, para luego designar el nombre al material, para ser buscado dentro de la biblioteca o según su categoría y se finaliza con la selección del ícono de aceptar.

Continuando con el proceso se procede a determinar cada una de las restricciones que intervienen en el desempeño del disco de freno en relación con todo su mecanismo, empezando por las del tipo pasador como se puede apreciar en la figura 32, siendo estas aplicadas a la superficie interna que genera el diámetro de los orificios por donde pasan los espárragos o pasadores de tornillería que para el modelo en estudio es de 5 orificios, por este motivo es que este tipo de restricción se la conoce como del tipo pasador.

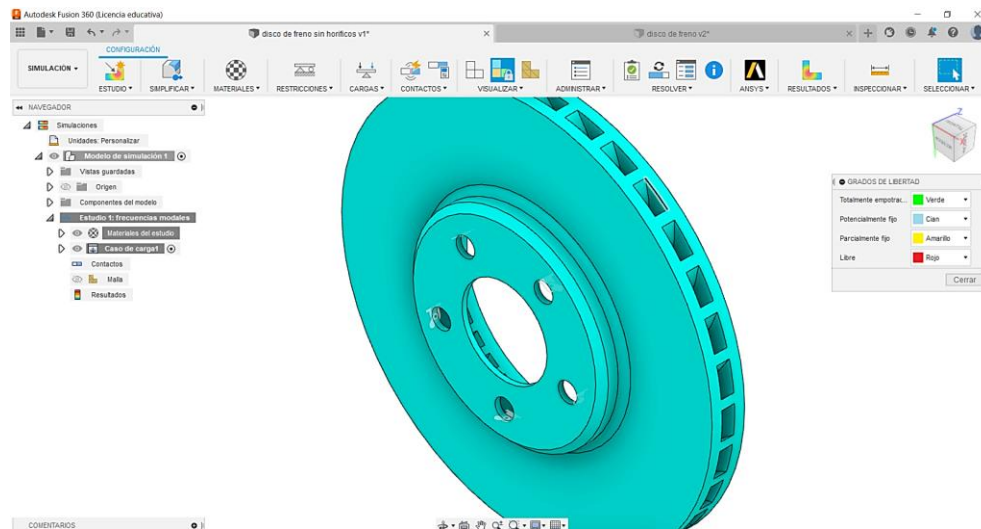
Figura 32

Designación de Restricción del Tipo Pasador



En esta operación el propio programa indica a través de una ventana que se ha generado una restricción del tipo radial y axial. A continuación, se procede a revisar los grados de libertad, este paso permite observar cómo se generó la selección de las restricciones como se muestra en la figura 33, lo que nos asegura sin duda alguna que el proceso continúe de manera correcta.

Para este caso de proceso de asignación de restricciones sobre el disco de freno se debe presentar que se encuentra fijado completamente y no se aplican ningún tipo de cargas sobre la superficie del elemento.

Figura 33*Visualización de los Grados de Libertad*

Así mismo se debe generar contactos automáticos por el motivo que cada una de las formas físicas del elemento son diferentes y este proceso se lo comprueba generando nuevamente los grados de libertad.

Una vez que se comprueba cada uno de los aspectos indicados se procede a verificar el comando print check el mismo que debe estar con una luz testigo de color verde para de esta manera continuar con el proceso siguiente.

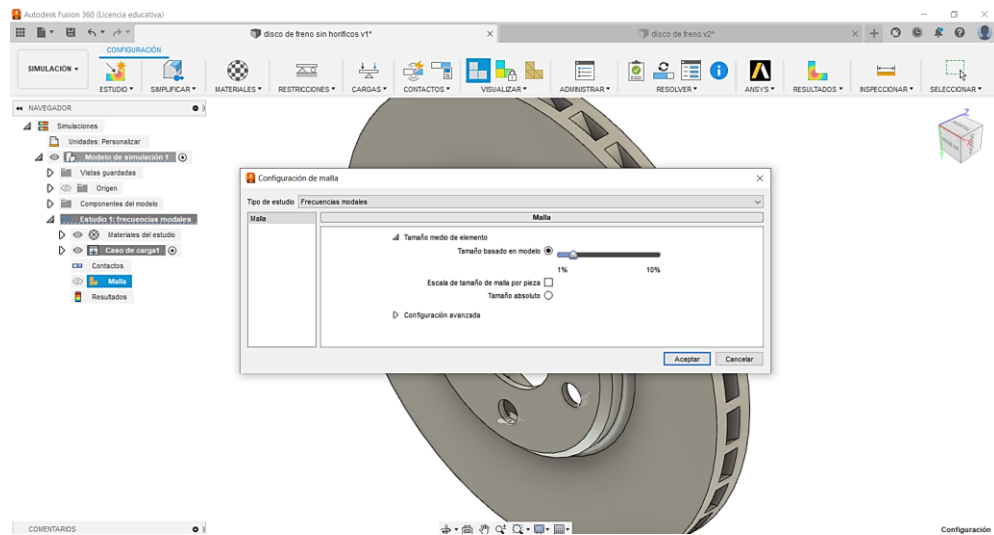
En lo concerniente a la malla que se autogenera el programa sobre el disco de freno esta se debe disminuirla en lo que corresponde al tamaño de la malla, por el motivo que de esa manera se obtienen unos valores de comportamiento de mayor precisión en el momento que se esté creando la simulación, esto se puede apreciar claramente en la figura 34.

Con esta disminución de los nodos del mallado en toda la superficie del disco de freno se permite que durante el proceso de transición hasta llegar a una solución se genere un resultado de mayor precisión.

Dependiendo de la complejidad de cada una de las formas sencillas y complejas de la pieza o del ensamble, este proceso de creación de una malla se tomará un tiempo en ser procesada.

Figura 34

Visualización de Print Check e Inicio de Creación de Malla

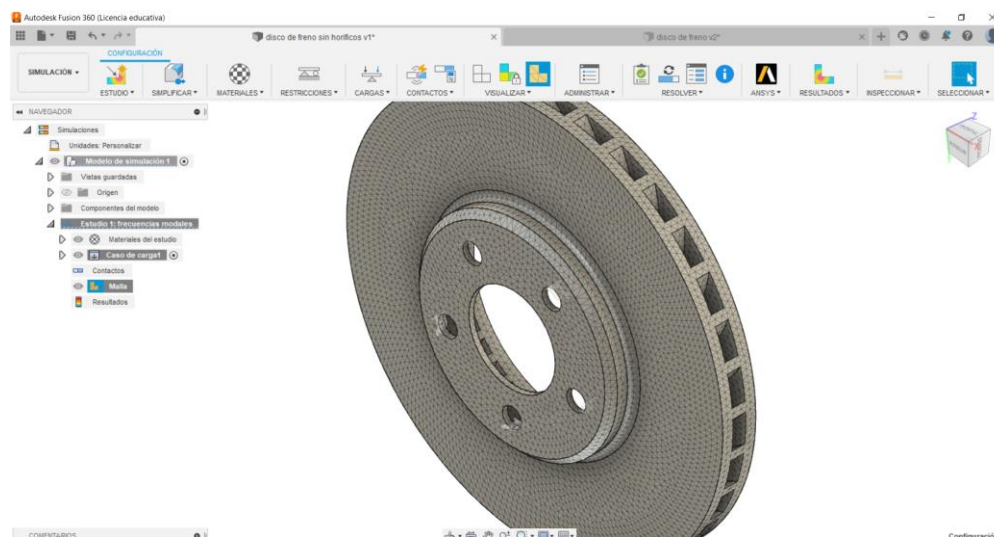


Según (Borja & Enríquez, 2014) cuando ya se inicia la fase de generación de malla esta opción iniciara un proceso que su fin es el de calcular una malla de todo el disco de frenos que se encuentra en la fase de simulación, pero en ese momento se encuentra en fusión de cada uno de los parámetros preestablecidos, este proceso se inicia en cada uno de los contactos automáticos del elemento o ensamble.

El resultado obtenido del mallado del disco de frenos a través del programa Fusión 360 se puede apreciar en la figura 35.

Figura 35

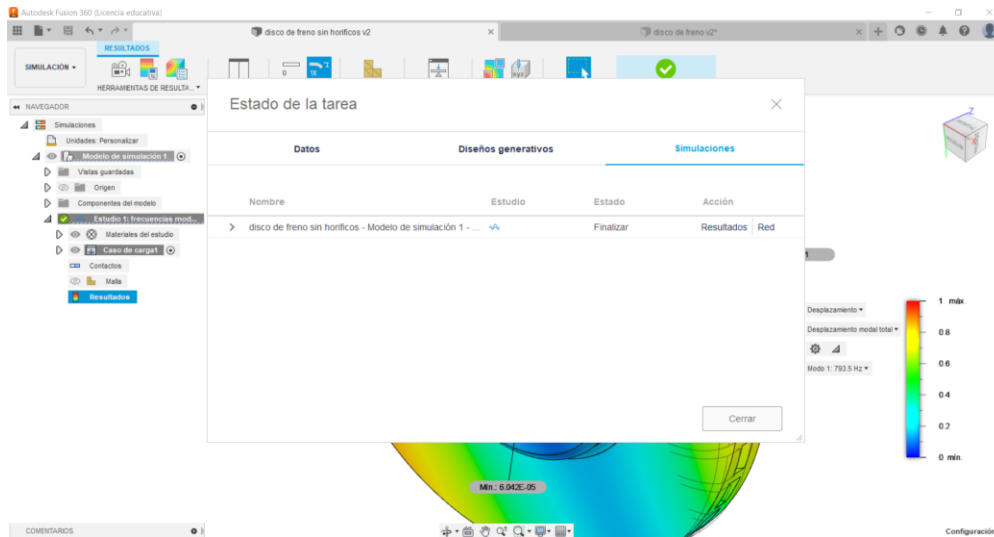
Generación de Mallado de Disco de Freno



Una vez que se genera el mallado del disco de freno se procesa con el siguiente proceso que es la generación resolución, el mismo que tardará un tiempo hasta alcanzar la obtención de los resultados, como se puede apreciar en la figura 36.

Figura 36

Procesamiento de Resultados

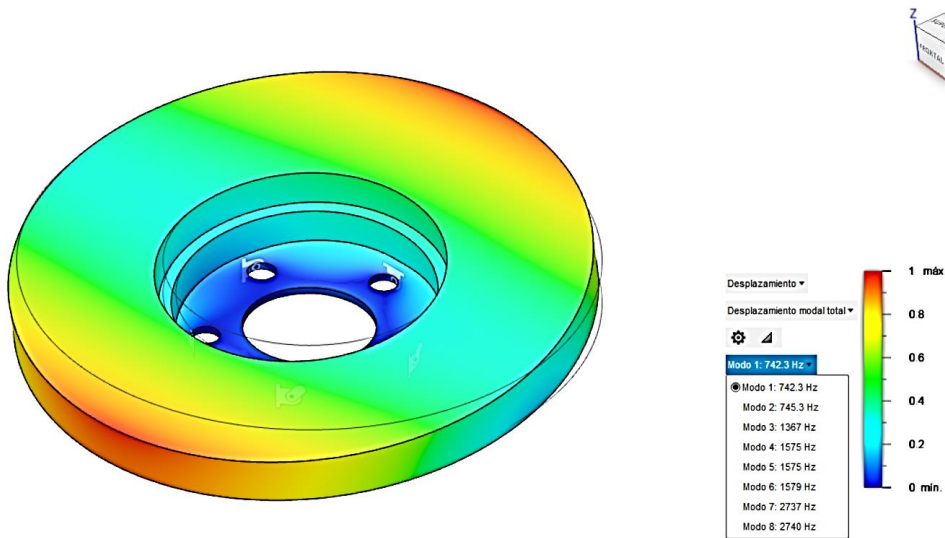


Luego de este proceso automáticamente se obtienen los resultados o solución de la simulación en el mismo que se desplaza en la pantalla una ventana en la que se observa cada uno de los módulos generados de frecuencia que se presentan en el estudio. En este punto se debe percatar cual es el valor de la frecuencia que generó el procesamiento del programa a través de la simulación, esto se puede apreciar en la figura 37, teniendo en cuenta que también se presentan otros resultados a ser interpretados, entre estos están los siguientes:

- Características del material
- Casos de carga
- Puntos de contactos
- Cuantificación de resultado máximo
- Cuantificación de resultado mínimo
- Desplazamientos
- Desplazamiento modal total

Figura 37

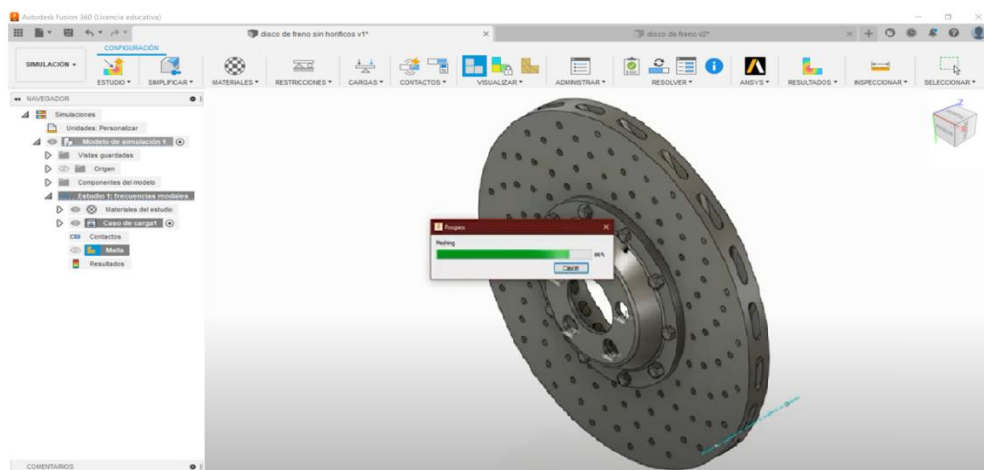
Obtención de Resultados en Disco de Frenos sin Orificios



Bajo estos resultados y para poder interpretarlos y compararlos se procede a repetir el mismo procedimiento, pero con un disco de freno que no cuenta con orificios y poder determinar el valor de frecuencia cuando se varía la masa del disco de freno, como se muestra en la figura 38.

Figura 38

Repetición de Proceso con un Disco de Freno Perforado

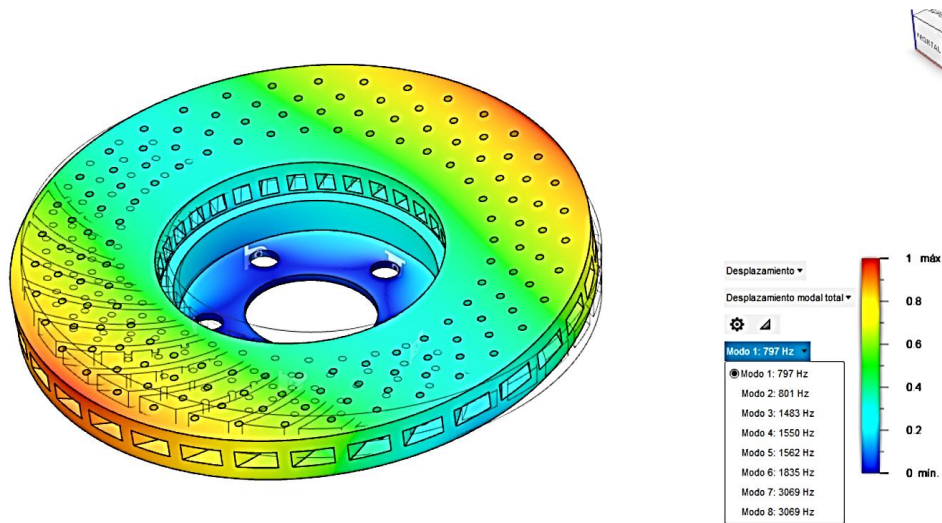


Continuando con el procedimiento de generación de resolución se obtiene los resultados donde se puede apreciar claramente las diferencias en la ventana que muestra los valores de frecuencia obtenidas con esta disminución de masa del disco de freno por medio de la

perforación en la zona de fricción, estos resultados y su comportamiento se puede apreciar en la figura 39.

Figura 39

Obtención de Resultados en Disco de Frenos con Orificios



3.1.6. Resumen de Obtención de Resultados con un Disco de Freno sin Orificios

Luego de haber realizado la simulación el programa Fusión 360 ha generado los valores cuantitativos de los valores de frecuencia los mismos que se aprecian en la tabla 2, en las que el programa precisa los desplazamientos en cada una de las coordenadas de acuerdo a los rangos de modos de frecuencia que se generan al momento que el disco de freno se encuentra girando y en las que los orificios de sujeción se encuentran como una condición determinada a una restricción fija y con una tolerancia de 0.1 mm.

Tabla 2

Resumen de Resultados de Disco de Frenos sin Orificios

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 742.3 Hz	0.248900009	16.4590001	0.0001
Modo 2: 745.3 Hz	16.5258005	0.249799993	0.0011
Modo 3: 1367 Hz	0.0004	0.0001	91.8012977
Modo 4: 1575 Hz	0	0	0.0014
Modo 5: 1575 Hz	0.0001	0	0.0045
Modo 6: 1579 Hz	0	0	0
Modo 7: 2737 Hz	0.363499997	79.409802	0
Modo 8: 2740 Hz	79.3280005	0.362300011	0

3.1.7. Resumen de Obtención de Resultados con un Disco de Frenos con Orificios

Al igual que con el disco de frenos analizado anteriormente se realiza el mismo procedimiento de preparación y simulación de elemento, pero con la característica que el disco de freno a ser analizado posee perforaciones en su superficie de fricción, siendo los resultados generados por el programa Fusión 360 los que se muestran en la tabla 3, tomando en cuenta que por efecto de los orificios generados la masa del disco de freno es disminuida en comparación al análisis anterior.

Tabla 3

Resumen de Resultados de Disco de Frenos con Orificios

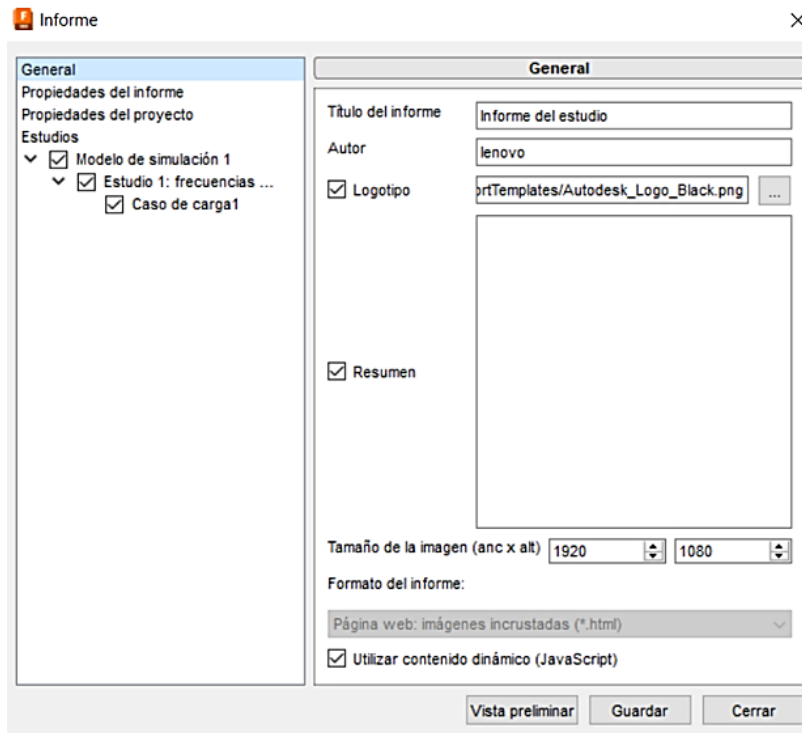
Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 794.3 Hz	0.197299989	15.6106994	0
Modo 2: 796.9 Hz	15.6540006	0.197599991	0.0001
Modo 3: 1483 Hz	0.0001	0	89.496398
Modo 4: 1571 Hz	0	0	0.0066
Modo 5: 1572 Hz	0	0	0.0115
Modo 6: 1819 Hz	0	0	0.035700001
Modo 7: 3056 Hz	0.339700002	78.0174971	0
Modo 8: 3057 Hz	77.9487014	0.340800011	0

3.1.8. Generación de Informe del Estudio Modal de Frecuencia de Discos de Frenos

Una de las herramientas que brindan los programas de AutoDesk como lo son Inventor y Fusión 360, es la de importar un informe de las soluciones que se generan luego de un análisis, para lo cual se requieren seguir una secuencia de pasos para obtenerlos luego de haberse generado los resultados, en este proceso se debe seleccionar generación de informe en el que hay que ingresar cierta información que se requiere como lo son las propiedades del informe, las propiedades del proyecto y el tipo de estudio que se realizó, esto se puede apreciar claramente en la figura 40, en esta ventana se requiere colocar información como lo es el título del informe, el nombre del autor o diseñador, la dirección del almacenamiento, tamaños de las imágenes que se van a crear, entre otras opciones.

Figura 40

Generación de Informe en AutoDesk Fusión 360



El informe que se genera, el programa lo crea en una extensión HTML, el mismo que se podrá ser observado en línea pero posteriormente puede ser editable o trabajar en formato PDF.

Los informes que se crean para el presente estudio investigativo, tanto en la simulación de un disco de freno con y sin perforaciones se puede observar en los Anexos 1 y 2 respectivamente.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

4.1. Análisis Transitorio

Luego de haber realizado el modelado y simulación referente al análisis de frecuencia modal sobre un disco de freno a través de dos programas computacionales de AutoDesk como lo son Inventor y Fusión 360, se procede en esta sección del proyecto al análisis de cada uno de los resultados obtenidos.

Se debe tener en cuenta que para tener un parámetro comparativo se realiza la simulación con un disco de frenos sin perforaciones en la superficie de fricción y otro que, si posee dichas perforaciones, con la finalidad de tener una variación en la masa que posee cada uno de los discos y poder observar su comportamiento.

Inicialmente los valores que se generaron en el proceso de mallado sobre el cuerpo de los discos de frenos presentan las siguientes características de malla:

- Posee un orden de elemento parabólico.
- Presenta generación de mallado en curvas del cuerpo.
- Posee un ángulo de giro máximo en curvas de 60° .
- Cuenta con una relación del tamaño máximo de la malla adyacente de 1.5.
- La relación de aspecto máximo del mallado es de 10
- El porcentaje de tamaño promedio mínimo de la malla creada de acuerdo con el porcentaje del tamaño promedio es del 20 %.

En lo concerniente a las características de malla adaptable posee las siguientes características:

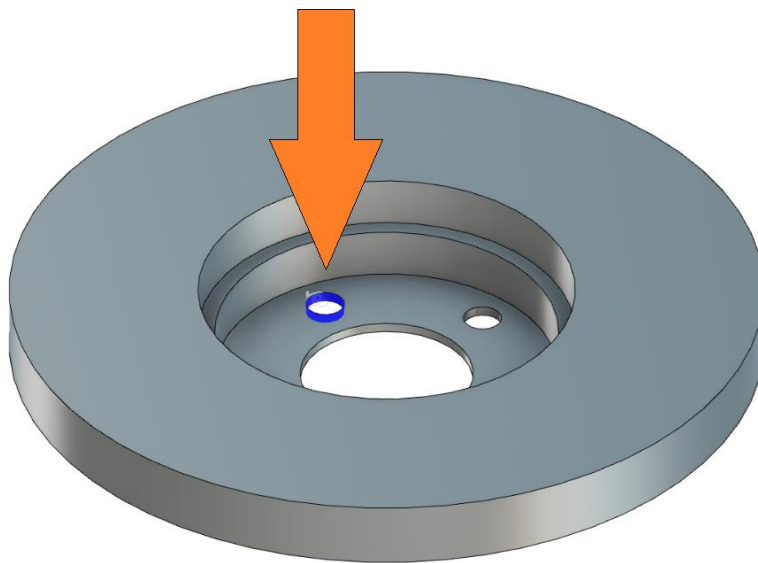
- El número de pasos de refinado es de 0.
- La tolerancia de convergencia de resultados es del 20%.
- El modo de frecuencia es de 1.

Respecto a los tipos de restricciones aplicadas al disco de freno, las mismas que se concentraron en los orificios de sujeción, se puede apreciar en la figura 41 y se presentan de la siguiente manera:

- Aplicación sobre los pasadores.
- Restricción radial del tipo fijo.
- Restricción axial del tipo fijo.
- Restricción tangente del tipo libre.

Figura 41

Resultado de Aplicación de Restricciones



El análisis que se genera por parte de la comparativa de los dos modelos de discos de frenos en la realización del mismo proceso, pero con variación de masa ocasionada por la aplicación de perforaciones en uno de los cuerpos en estudio se procede a realizar un análisis de acuerdo con la solución obtenida con la siguiente consideración.

La simulación que brinda el programa AutoDesk Fusión 360, muestra claramente ocho modos de frecuencia tomando en consideración entre uno y otro de acuerdo con el aumento de la frecuencia de manera progresiva, de los que se discute las variaciones de desplazamiento en cada uno de los ejes de participación como lo es X, Y y Z.

Para el presente análisis se toma como muestra 3 modos empezando con la menor frecuencia, uno intermedio y el de máxima frecuencia, sin que este se exceda, por el motivo que puede llegar a un punto de alta resonancia, pudiendo de esta manera ocasionar que el disco de freno colapse estructuralmente.

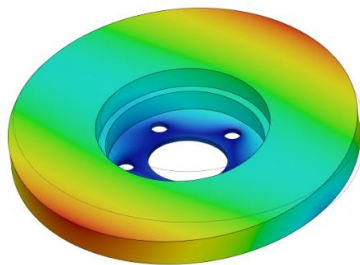
En la figura 42, se puede observar el comportamiento modal de vibración a la mínima frecuencia en la que para el disco de freno simple es de 742.3 Hz y en el disco perforado es de 794.3 Hz.

Figura 42

Resultado de Modo Total a Menor Frecuencia

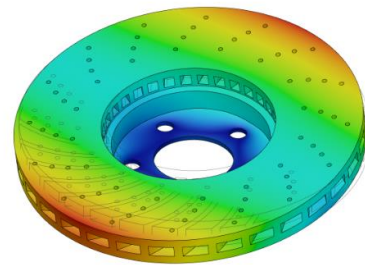
☐ **Desplazamiento modal total**

☐ **Modo 1: 742.3 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



☐ **Desplazamiento modal total**

☐ **Modo 1: 794.3 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



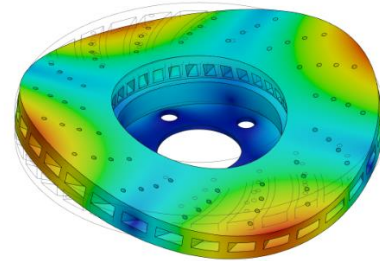
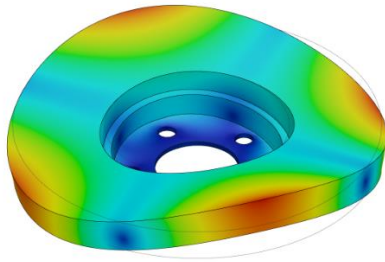
Claramente se puede observar que el disco de freno que contenga mayor cantidad de masa expresa menor frecuencia esto quiere decir menor vibración en comparación al disco de freno que posee orificios en la superficie de fricción y por ende menor masa.

En la figura 43 se presenta el comportamiento a una frecuencia intermedia para cada uno de los discos de freno en la que el disco de freno simple experimenta una frecuencia de 1575 Hz y para el caso del disco de freno perforado en la zona de fricción se genera una frecuencia de 1571, por lo que en este cuarto modo se puede observar un mínimo valor de frecuencia en el que se puede interpretar que en este punto intermedio la frecuencia mayor la posee el disco de freno que no posee reducción de masa al colocar orificios de perforación sobre la superficie de fricción.

Figura 43*Resultado de Modo Total a Mediana Frecuencia*

☐ **Modo 4: 1575 Hz Desplazamiento modal total**
0  1

☐ **Modo 4: 1571 Hz Desplazamiento modal total**
0  1

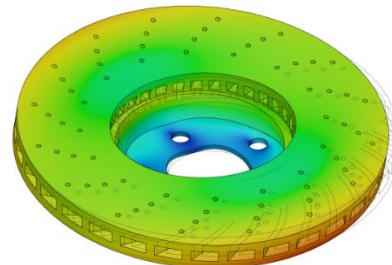
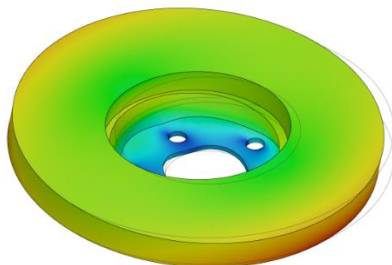


Para finalizar con el análisis de los modos obtenidos se procede al modo de mayor frecuencia el mismo que para el disco de freno simple es de 2740 Hz, en comparación que al poseer menor cantidad de masa que lo es el disco de frenos perforado en la superficie de fricción que presenta el valor de 3057 Hz, lo que demuestra que en este modo el disco que posee menor masa adquiere una mayor frecuencia de vibración de manera considerable, esto se puede apreciar en la figura 44.

Figura 44*Resultado de Modo Total a Máxima Frecuencia*

☐ **Modo 8: 2740 Hz Desplazamiento modal total**
0  1

☐ **Modo 8: 3057 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



4.2. Análisis de Resultados Obtenidos

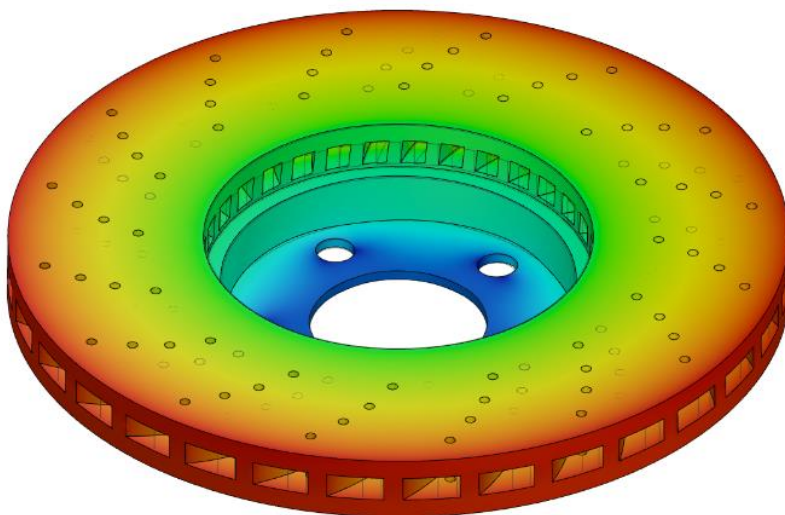
De manera globalizada el presente trabajo investigativo del análisis de frecuencia modal de un disco de freno realizado por los programas computacionales de AutoDesk Inventor y

Fusión 360, se obtuvo valores cuantitativos con valores máximos y mínimos, así como valores cualitativos de manera gráfica con la ayuda de escalas colorimétricas, que permiten interpretar el comportamiento estructural de los discos de frenos bajo las respectivas condiciones de restricción.

Para iniciar el análisis cualitativo, este se presenta de acuerdo al comportamiento estructural en los que por medio del modelado y la simulación de frecuencia modal nos da como resultado el modelado con la respectiva las escalas colorimétrica en la que las frecuencias producen los respectivos desplazamientos que provocan las vibraciones del elementos, bajo este fenómeno se aprecia que en los puntos de sujeción en donde no se presentan desplazamientos y se encuentran con la presencia de color azul intenso y en los extremos de color rojo intenso que es donde se produce mayor desplazamiento por efecto de la vibración siendo estos en los extremos del disco de freno con referencia al radio generado a partir de los orificios restringidos o de sujeción, pero teniendo en cuenta del tipo de modo porque la variación de la frecuencia influye en la generación de vibraciones con respecto al comportamiento del disco de freno, esto se puede apreciar claramente en la figura 45.

Figura 45

Resultado de Modo Total de Manera Cualitativa



Una vez realizado el análisis cualitativo se procede a realizar el cuantitativo para lo cual de acuerdo a los valores obtenidos en la solución de simulación se determina de manera evidente que la frecuencia modal que se produce en un disco de frenos depende de la frecuencia generada y esto dependerá directamente de la velocidad que gire el mecanismo conjuntamente con la rueda del vehículo, para lo cual una de las características importantes es que se producirá menos vibraciones cuando el disco de freno tenga mayor masa esto quiere decir que al tratar de alivianar el peso del elemento se aumentarán las vibraciones, como se puede apreciar claramente en la tabla 2 y 3 de resultados obtenidos en los distintos modos generados en la simulación, en la que por ejemplo al tomar el máximo modo nos da una diferencia de frecuencia generada de 317 Hz.

Conclusiones

A través del presente trabajo investigativo referente al análisis de frecuencia modal en discos de frenos a través de los softwares Inventor y Fusión 360 se llega a las siguientes conclusiones:

Se modeló dos tipos de disco de frenos como lo es uno de superficie de fricción simple y otro con perforaciones a través del programa de AutoDesk Inventor como primera fase respetando cada una de las dimensiones, así como su geometría basada en información técnica y conservando sus propiedades dentro del comportamiento estructural con aplicación de restricciones propias del mecanismo de frenos de disco, los cuales fueron del tipo fijo en los puntos de sujeción o conocidos como orificios para pasadores.

Se realizó el estudio del comportamiento de cada uno de los discos de frenos modelados a través del programa AutoDesk Fusión 360 tanto de sus características cualitativas como cuantitativas en las que se determina por medio de 8 modos la variación de las frecuencias generadas que van de menor a mayor, respetando esta última condición por el motivo que no se pretende llegar a un punto de resonancia ya que si se llega a este punto indudablemente se produciría un daño estructural del disco de frenos en estudio.

Se obtuvo los resultados del proceso de simulación de frecuencia modal en los que por medio de una escala colorimétrica la zona que presenta menor desplazamiento a causa de las vibraciones en función de la frecuencia producida lo es la parte donde se encuentran las restricciones de fijación del disco de freno y los mayores desplazamientos se concentran en los perfiles exteriores de la zona de fricción y para ciertos modos los desplazamientos son mayores en los extremos de los radios de los puntos de fijación.

De manera cuantitativa se puede determinar que en un modo de mayor frecuencia y comparando entre un disco de frenos simple y uno perforado la diferencia de frecuencia es de 317 Hz, lo que se puede concluir que un disco de freno mientras va incrementando el valor de

frecuencia se experimenta mayor vibración y que si un disco de freno disminuye su masa por ende aumenta significativamente sus vibraciones.

Recomendaciones

Luego de haber realizado el estudio referente al análisis de frecuencia modal en discos de frenos a través de los softwares Inventor y Fusión 360 se llega a las siguientes recomendaciones:

Se debe respetar cada una de las dimensiones, características y propiedades técnicas, así como geometría y restricciones del elemento a ser modelado, esto permite que los resultados sean los más cercanos a la realidad.

Otra de las recomendaciones es la determinación del tipo y dimensiones del mallado adecuado que se aplica a la simulación, la cual permitirá obtener un procesamiento y solución óptima del problema.

Finalmente, las características y propiedades del computador a ser utilizado son de mucha importancia para el procesamiento y desarrollo en este tipo de estudios investigativos.

Bibliografía

- Albert, M. (1993). *Frenos ABS*. Barcelona: Marcombo S.A.
- Aron, S. (5 de Mayo de 2019). *Dassault Systemes*. Obtenido de <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/tag/analisis-estructural/>
- Autodocclub. (02 de 12 de 2020). *club.autodoc.es*. Obtenido de club.autodoc.es: <https://club.autodoc.es/magazin/discos-de-freno-rayado-ventilados-perforados-diferencias-y-funciones>
- Bilbao, A., Aguirrebeitia, C., Martínez, C., & Heras, M. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática*. Madrid: Paraninfo.
- Borja, L., & Enríquez, R. (2014). Estudio para la recuperación de cigüeñales de motores Diésel. *Facultad de Ingeniería Automotriz. UIDE*, 129.
- Calvo, J., & Miravete de Marco, A. (2021). *Mecánica del automóvil (actualizada)*. Barcelona: Reverté S.A.
- Den. (02 de 12 de 2020). *AUTODOC CLUB*. Obtenido de <https://club.autodoc.es/magazin/discos-de-freno-rayado-ventilados-perforados-diferencias-y-funciones>
- Erazo, W., Quiroz, J., Salazar, B., Pallo, A., Quiroz, L., & Zambrano, V. (2017). Modelación del parámetro de identificación de diagnóstico PID's, del sensor de temperatura de refrigerante del motor ECT del sistema de control de inyección electrónica de combustible EFI, mediante regresión no lineal. *INNOVA Research Journal*, 112-122.
- Exzar, C. (2019). *Análisis comparativo del freno de tambor y freno de disco para optimizar la eficiencia del sistema de frenos en vehículo de servicio público de 800 cm³ de cilindrada*. Chiclayo: Universidad César Vallejo.

- Fryśkowski, B. (2017). Electric field distribution in spark plugs insulators – modeling and computer simulation. *Diagnostyka*, 87-93.
- Lillo, S. (2006). *Comportamiento termodinámico en un disco macizo y uno auto-ventilado*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Ortiz, J. (2018). *Estudio del sistema de frenado en los vehículos ligeros (turismos)*. Barcelona: UPC.
- Reyes, A. (2014). Validación de modelos hidrodinámicos de tres modelos topológicos de lagunas facultativas secundarias. *Scielo*, 637-654.
- Ríos, N., Valdés, J., Pineda, H., Daza, M., Pinilla, A., Becerra, D., . . . Sierra, A. (2020). *Introducción a la dinámica computacional de fluidos en Ingeniería Química*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Rojas, C., & Jaramillo, J. (2012). *Mejora de eficiencia de los sistemas de dirección y frenos del vehículo Toyota 1000 año 1977*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Rojas, V., Pancha, J., Romero, V., & Lema, J. (2021). Análisis de la eficiencia de un disco de freno convencional ventilado con respecto a un disco hiperventilado mediante mecanizado. *Ingenius*, 62-69.
- Vera, E., Morales, D., Peña, A., & Rodríguez, A. (2019). *Ergonomía para pilotos de monoplaça*. Guayaquil: Colloquium.
- Erazo, W. G., Quiroz, J. L., Salazar, B. J., Pallo, A. D., Quiroz Erazo, L. A., & Zambrano Leon, V. D. (2017). Modelación del parámetro de identificación de diagnóstico PID's, del sensor de temperatura de refrigerante del motor ECT del sistema de control de inyección electrónica de combustible EFI, mediante regresión no lineal. *INNOVA Research Journal*, 2(12), 112-122.
<https://doi.org/10.33890/innova.v2.n12.2017.308>

Fryškowski, B. (2017). Electric field distribution in spark plugs insulators – modeling and computer simulation. *Diagnostyka*, 18(1), 87-93.

Puebla, E. G. V., Neira, D. J. M., Pinargote, A. J. P., & Vargas, A. R. R. (2019, July). Ergonomía para pilotos de monoplaça. In *Biblioteca Colloquium*.

Anexos

Anexo 1: Informe de Análisis de Frecuencia Modal en Disco de Freno Simple

30/11/22, 10:14

Informe del estudio

Modelo de simulación 1:1

Estudio 1: frecuencias modales

Propiedades del estudio

Tipo de estudio	Frecuencias modales
Fecha de la última modificación	2022-11-15, 18:32:18

Configuración

General

Tolerancia de contacto	0.1 mm
Número de modos	8
Rango de frecuencia [Hz]	No
Calcular modos precargados	No
Precisión mejorada	No

Amortiguamiento

Malla

Tamaño medio de elemento (% del tamaño del modelo)	
Sólidos	2
Escala de tamaño de malla por pieza	No
Tamaño medio de elemento (valor absoluto)	-
Orden de elemento	Parabólico
Crear elementos de malla curva	Sí
Ángulo de giro máx. en curvas (grad.)	60
Relación de tamaño máx. de malla adyacente	1,5
Relación de aspecto máxima	10
Tamaño mínimo de elemento (% del tamaño medio)	20

Refinado de malla adaptable

Número de pasos de refinado	0
Tolerancia de convergencia de resultados (%)	20
Modo de frecuencia	1

Materiales

Componente	Material	Factor de seguridad
Cuerpo1	Aluminio	Límite de elasticidad

Aluminio

Densidad	2.7E-06 kg / mm ³
Módulo de Young	68900 MPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Límite de elasticidad	275 MPa
Resistencia máxima a tracción	310 MPa
Conductividad térmica	0,23 W / (mm C)
Coefficiente de dilatación térmica	2,36E-05 / C
Calor específico	897 J / (kg C)

30/11/22, 10:14

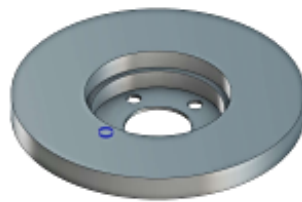
Informe del estudio

☐ **Contactos**☐ **Malla**

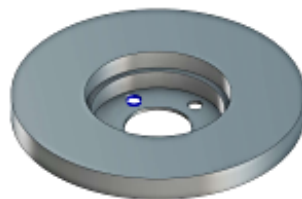
Tipo	Nodos	Elementos
Sólidos	83968	54816

☐ **Caso de carga1**☐ **Restricciones**☐ **Pasador1**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ **Entidades seleccionadas**☐ **Pasador2**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

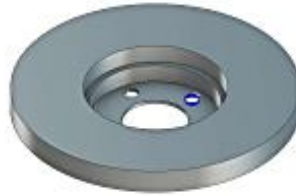
☐ **Entidades seleccionadas**

30/11/22, 10:14

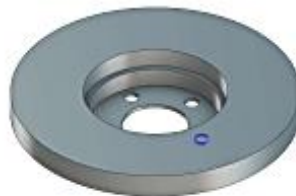
Informe del estudio

☐ Pasador3

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ Entidades seleccionadas**☐ Pasador4**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ Entidades seleccionadas**☐ Pasador5**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ Entidades seleccionadas



Resultados

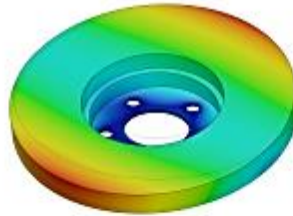
Resumen de resultados

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 742,3 Hz	0,248900009	16,4590001	0,0001
Modo 2: 745,3 Hz	16,5258005	0,249799993	0,0011
Modo 3: 1367 Hz	0,0004	0,0001	91,8012977
Modo 4: 1575 Hz	0	0	0,0014
Modo 5: 1575 Hz	0,0001	0	0,0045
Modo 6: 1579 Hz	0	0	0
Modo 7: 2737 Hz	0,363499997	79,409802	0
Modo 8: 2740 Hz	79,3280005	0,362300011	0

Desplazamiento modal total

Modo 1: 742.3 Hz Desplazamiento modal total

0  1

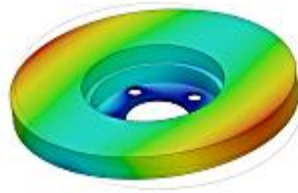



Modo 2: 745.3 Hz Desplazamiento modal total

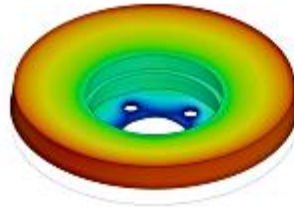
0  1

30/11/22, 10:14

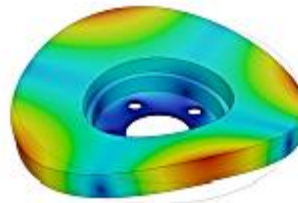
Informe del estudio



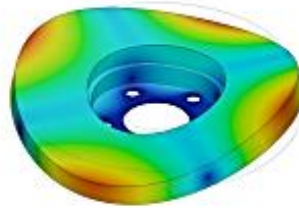
☐ **Modo 3: 1367 Hz Desplazamiento modal total**
0  1




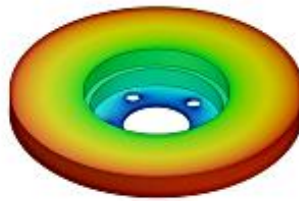
☐ **Modo 4: 1575 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



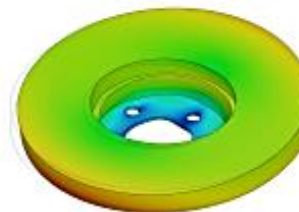
☐ **Modo 5: 1575 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



☐ **Modo 6: 1579 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



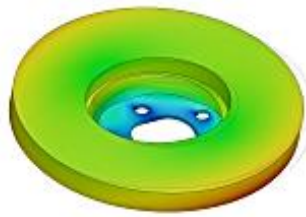
☐ **Modo 7: 2737 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



☐ **Modo 8: 2740 Hz Desplazamiento modal total**
0  1

30/11/22, 10:14

Informe del estudio



Anexo 2: Informe de Análisis de Frecuencia Modal en Disco de Freno Perforado

30/11/22, 10:15

Informe del disco con orificios

Modelo de simulación 1:1

Estudio 1: frecuencias modales

Propiedades del estudio

Tipo de estudio	Frecuencias modales
Fecha de la última modificación	2022-11-09, 19:25:07

Configuración

General

Tolerancia de contacto	0,1 mm
Número de modos	8
Rango de frecuencia [Hz]	No
Calcular modos precargados	No
Precisión mejorada	No

Amortiguamiento

Malla

Tamaño medio de elemento (% del tamaño del modelo)	
Sólidos	2
Escala de tamaño de malla por pieza	No
Tamaño medio de elemento (valor absoluto)	-
Orden de elemento	Parabólico
Crear elementos de malla curva	Sí
Ángulo de giro máx. en curvas (grad.)	60
Relación de tamaño máx. de malla adyacente	1,5
Relación de aspecto máxima	10
Tamaño mínimo de elemento (% del tamaño medio)	20

Refinado de malla adaptable

Número de pasos de refinado	0
Tolerancia de convergencia de resultados (%)	20
Modo de frecuencia	1

Materiales

Componente	Material	Factor de seguridad
Cuerpo1	Aluminio	Límite de elasticidad

Aluminio

Densidad	2.7E-06 kg / mm ³
Módulo de Young	68900 MPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Límite de elasticidad	275 MPa
Resistencia máxima a tracción	310 MPa
Conductividad térmica	0.23 W / (mm C)
Coefficiente de dilatación térmica	2.36E-05 / C
Calor específico	897 J / (kg C)

30/11/22, 10:15

Informe del disco con orificios

☐ **Contactos**

☐ **Malla**

Tipo	Nodos	Elementos
Sólidos	416423	263435

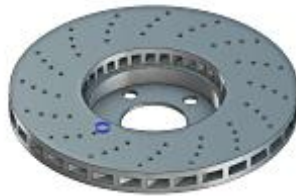
☐ **Caso de carga1**

☐ **Restricciones**

☐ **Pasador1**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

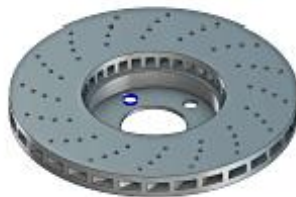
☐ **Entidades seleccionadas**



☐ **Pasador2**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ **Entidades seleccionadas**

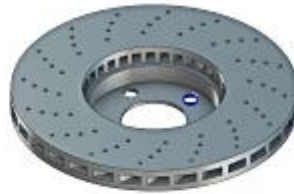


30/11/22, 10:15

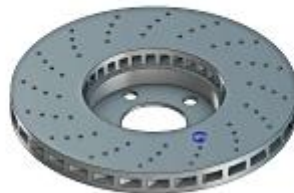
Informe del disco con orificios

☐ Pasador3

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

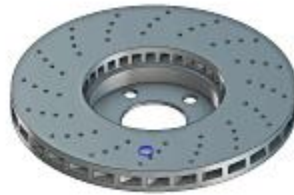
☐ Entidades seleccionadas**☐ Pasador4**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ Entidades seleccionadas**☐ Pasador5**

Tipo	Pasador
Radial	Fijo
Axial	Fijo
Tangente	Libre

☐ Entidades seleccionadas



Resultados

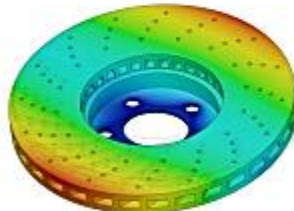
Resumen de resultados

Frecuencia	Participación X	Participación Y	Participación Z
Modo 1: 794,3 Hz	0,197299989	15,6106994	0
Modo 2: 796,9 Hz	15,6540006	0,197599991	0,0001
Modo 3: 1483 Hz	0,0001	0	89,496398
Modo 4: 1571 Hz	0	0	0,0066
Modo 5: 1572 Hz	0	0	0,0115
Modo 6: 1819 Hz	0	0	0,035700001
Modo 7: 3056 Hz	0,339700002	78,0174971	0
Modo 8: 3057 Hz	77,9487014	0,340800011	0

Desplazamiento modal total

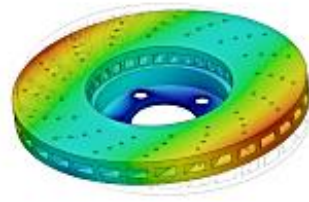
Modo 1: 794.3 Hz Desplazamiento modal total


0  1

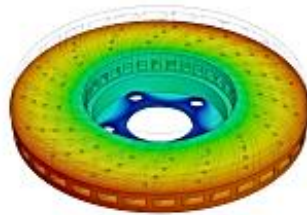


Modo 2: 796.9 Hz Desplazamiento modal total

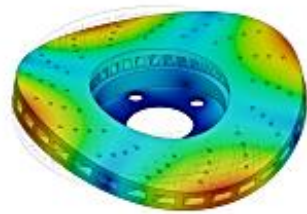
0  1



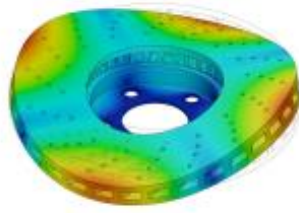
Modo 3: 1483 Hz Desplazamiento modal total
0  1




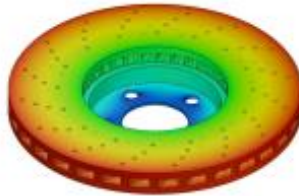
Modo 4: 1571 Hz Desplazamiento modal total
0  1



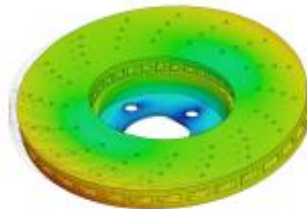
Modo 5: 1572 Hz Desplazamiento modal total
0  1



☐ **Modo 6: 1819 Hz Desplazamiento modal total**
0,004  1



☐ **Modo 7: 3056 Hz Desplazamiento modal total**
0  1



☐ **Modo 8: 3057 Hz Desplazamiento modal total**
0  1

30/11/22, 10:15

Informe del disco con orificios

