

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BANCO DE SIMULACIÓN DE VIBRACIONES

NICOLÁS TÉLLEZ MARTÍNEZ



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
TUNJA, BOYACÁ
2024**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BANCO DE SIMULACIÓN DE VIBRACIONES

NICOLÁS TÉLLEZ MARTÍNEZ

Trabajo de grado

IING. HELVER MAURICIO MUÑOZ BARAJAS

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS
TUNJA, BOYACÁ
2024**

Nota de Aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. DELIMITACIÓN.....	16
CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1. MARCO HISTÓRICO	17
2.2. MARCO DE ANTECEDENTES	17
2.3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	20
2.3.1. Vibraciones y fallas mecánicas	20
2.3.2. Bancos de prueba.....	28
2.3.3. Diseño mecánico	30
2.3.4. Discretización por el método de elementos finitos	31
2.3.5. Noción de mantenimiento industrial	33
2.3.6. Mantenimiento preventivo	36
2.4. MARCO NORMATIVO.....	38
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	40
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	40
3.2. FASES DEL PROYECTO	40
3.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	42
3.4. PRESUPUESTO	42
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. DISEÑO, CÁLCULOS Y ESPECIFICACIONES DEL BANCO DE SIMULACIONES	45
4.1.1. Propuestas de diseño, matriz de decisión, selección, cálculos	45

4.1.2. Planos estructurales del banco de prueba	50
4.2. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DEL BANCO DE SIMULACIONES....	64
4.3. SIMULACIONES EN INVENTOR	75
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.1. CONCLUSIONES.....	90
5.2. RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA.....	82
ANEXOS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1.	Relación de parámetros en el análisis de frecuencias.....	26
Figura 2.	Discretización de un cuerpo	32
Figura 3.	Tipos de mantenimiento	34
Figura 4.	Fases del mantenimiento preventivo.....	37
Figura 5.	Visión general de los recursos usados en el proyecto.....	43
Figura 6.	Información general sobre los costos del proyecto	44
Figura 7.	Propuesta de diseño 1, boceto de un banco con doble chumacera .	45
Figura 8.	Propuesta de diseño 2, boceto de un banco con doble chumacera y plataforma ligera	46
Figura 9.	Propuesta de diseño 3, boceto de un banco con volante de masas variables en voladizo	46
Figura 10.	Material de la estructura	50
Figura 11.	Plano del soporte estructural del banco	51
Figura 12.	Isométricos del banco de pruebas ensamblado	52
Figura 13.	Plano del eje con las ranuras de acople; Error! Marcador no definido.	
Figura 14.	Grafica de resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión y el material	56
Figura 15.	Dimensiones y características de las chumaceras	58
Figura 16.	Plano de la chumacera	60
Figura 17.	Plano del disco perforado	61
Figura 18.	Registro fotográfico de la construcción del banco de simulaciones..	64
Figura 19.	Especificaciones de la soldadura E-6013.....	65
Figura 20.	Formato WPS.....	65
Figura 21.	Motor	67
Figura 22.	El eje del banco	68
Figura 23.	Ensamblaje del eje y el motor	69
Figura 24.	Alineación y estabilización del conjunto eje-motor	70

Figura 25.	Disco.....	71
Figura 26.	Breaker	70
Figura 27.	Medición con pinza amperimétrica estando el motor encendido	74
Figura 28.	Ilustración comportamiento del breaker corriente - tiempo.....	72
Figura 29.	Ensamblaje final del banco, parte mecánica.....	73
Figura 30.	Render del banco.....	74
Figura 31.	Demostración del mallado (Discretización elementos finitos)	75
Figura 32.	Desplazamiento sin pesas	¡Error! Marcador no definido.
Figura 33.	Von Mises sin pesas	¡Error! Marcador no definido.
Figura 34.	Factor de seguridad sin pesas	¡Error! Marcador no definido.
Figura 35.	Desplazamiento con (2) pesas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 36.	Von Mises con (2) pesas.....	78
Figura 37.	Factor de seguridad con (2) pesas.....	79
Figura 38.	Desplazamiento con (1) pesa pegada al eje.....	80
Figura 39.	Von Mises con (1) pesa pegada al eje.....	80
Figura 40.	Factor de seguridad con (1) pesa pegada al eje.....	81
Figura 41.	Desplazamiento con (8) pesas alrededor del disco.....	82
Figura 42.	Von Mises con (8) pesas alrededor del disco.....	82
Figura 43.	Factor de seguridad con (8) pesas alrededor del disco.....	83
Figura 44.	Desplazamiento con (2) pesas, en sus extremos.....	84
Figura 45.	Von Mises con (2) pesas, en sus extremos.....	84
Figura 46.	Factor de seguridad con (2) pesas, en sus extremos.....	85

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.	Frecuencias de vibración para problemas típicos en máquinas.	27
Tabla 2.	Etapas y actividades básicas del mantenimiento	35
Tabla 3.	Cronograma de actividades.....	36
Tabla 4.	Matriz de decisión.....	42
Tabla 5.	Factores iniciales y especificaciones requeridas para el diseño del eje... ..	54
Tabla 6.	Propiedades del Acero 4340	54
Tabla 7.	Rango de tamaño de D y otras variables	57
Tabla 8.	Comparación entre los electrodos de soldadura 6013 y 7018	65
Tabla 9.	Resultados obtenidos discretización.....	76
Tabla 10.	Tabla de configuraciones y resultados.....	87
Tabla 11.	Tabla de resultados de configuraciones Von Mises y FC.....	87
Tabla 12.	Ilustración de configuraciones.....	89

RESUMEN

En el ámbito académico de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, se ha reconocido la necesidad de fortalecer la formación de los estudiantes en diferentes campos de acción tal como sucede con el mantenimiento preventivo de maquinaria industrial. En ese orden, la comprensión y aplicación práctica de este campo son fundamentales para garantizar la eficiencia y confiabilidad de los procesos industriales, así como para la preparación integral de los estudiantes en esta disciplina.

Este proyecto de grado surge como respuesta a la identificación de una limitación: la falta de un recurso práctico y versátil, como lo es un banco de simulación de vibraciones, que restringen las oportunidades de aprendizaje y la realización de proyectos de investigación aplicada en esta área. Dicha carencia impacta la calidad de la formación académica y limita el desarrollo de habilidades prácticas que todo ingeniero mecánico debe conocer.

En consecuencia, el objeto de este trabajo comprende el diseño y la construcción de un banco de simulación de vibraciones para la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás en la seccional Tunja, a través del cual se espera contribuir positivamente con la calidad formativa y el fomento de la investigación en el marco de la línea temática de mantenimiento preventivo de maquinaria industria.

Palabras clave: vibraciones, preventivo, medición, diseño, construcción

INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, la eficiencia operativa, representa un mayor beneficio a los procesos industriales, además que la confiabilidad de los equipos debe tener, requieren métodos, técnicas y herramientas que permitan prever y mitigar los efectos adversos que deterioren y reduzcan el tiempo de uso de la maquinaria, efectos producidos por las vibraciones, se convierten en una necesidad invaluable entender estos efectos nocivos. La simulación de vibraciones es un pilar fundamental en la ingeniería mecánica contemporánea, presentada como un rol crítico en la resolución de problemáticas inherentes al mantenimiento preventivo y predictivo de la maquinaria industrial ubicada en todos los sectores donde un ingeniero mecánico esté presente.

El banco de simulación de vibraciones permitirá a los ingenieros mecánicos recrear las condiciones de funcionamiento de maquinaria y evaluar de manera más acertada como las vibraciones afectan la integridad y desempeño. Esto mejora la capacidad para identificar a tiempo las posibles fallas, planear mejores rutinas de mantenimiento y la toma de decisiones correctas orientadas a la proyección de una vida útil más larga de la capacidad industrial a trabajar. De esta manera la capacidad de entender las vibraciones en equipos rotativos como un elemento fundamental en la formación de ingenieros y consecuentemente en la creación efectiva de soluciones que se encuentran en la industria en el campo de la confiabilidad de la maquinaria y su respectiva confiabilidad.

En ese orden, un banco de simulación de vibraciones es útil para que los estudiantes comprendan las bases teóricas de los conceptos en mantenimiento y adquieran competencias prácticas en el campo del mantenimiento de maquinaria y equipos industriales. Permite un análisis controlado y seguro sobre vibraciones que los ingenieros en formación van a encontrar y experimentar en el campo laboral, más específicamente en el área de mantenimiento; también funciona como apoyo para otros tipos de proyectos investigativos y de diseño en el área de la Ingeniería Mecánica. La falta de un banco de simulación de vibraciones en la facultad limita la capacidad para complementar la formación de los estudiantes en formación y elevará a la facultad en una posición favorable en la parte investigativa. Adaptar esta infraestructura respalda el nuevo programa de posgrado en mantenimiento y además de mejorar la calidad de la enseñanza reforzará los proyectos investigativos en curso.

El diseño y construcción del banco de simulación de vibraciones se presenta como una prioridad en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, la creación de este banco mejora la oferta académica de la facultad que se encuentra en constante mejora. El proyecto destaca como un buen impulso para el programa de pregrado de Ingeniería Mecánica y como una ventaja sobresaliente en la próxima especialización en mantenimiento que la facultad tendrá. Además de los beneficios educativos e investigativos que este proyecto puede aportar a la facultad de ingeniería mecánica y a la misma universidad Santo Tomás, es esencial destacar la importancia de los recursos financieros necesarios.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La humanidad se encuentra inmersa en un contexto globalizado complejo y desafiante que también tiene clara incidencia en el sector educativo exigiéndole calidad, competitividad, capacidad de innovación, y, sobre todo, la formación de profesionales calificados que puedan participar proactivamente en la sociedad y contribuir de manera diligente a la hora de dar solución a problemas en diferentes ámbitos. Desde esta perspectiva, se ha dado paso a un proceso de transformación educativa que exige repensar las escuelas y las universidades, así como su funcionamiento y los modelos educativos adoptados para enfrentar las demandas actuales y futuras. Particularmente, se ha buscado cambiar los paradigmas educativos tradicionales que giraban en torno al modelo de transmisión-recepción y la magistralidad para revolucionar las aulas dándole lugar a nuevas propuestas pedagógicas y didácticas que estimulen al máximo la construcción y la apropiación del conocimiento, además de propender por el desarrollo de habilidades y competencias asociadas a la resolución de problemas, el trabajo colaborativo, el método científico y la autonomía de los estudiantes.¹

A partir de lo anterior, en el contexto educativo de la Ingeniería Mecánica se ha evidenciado que, aunque se estudia la teoría de las vibraciones ampliamente, los conocimientos no logran ser asimilados por los estudiantes para poder ser aplicados y puestos en práctica en situaciones reales tanto en la academia como en la investigación. Bien lo explica Sánchez² cuando afirma que la formación ingenieril se caracteriza por la separación de la teoría y la práctica, la enseñanza enfática de la teoría sobre la práctica, la rigidez de las metodologías incorporadas y la escasez participativa de los estudiantes en sus propios procesos de aprendizaje, lo cual, justamente, refleja el arraigo al tradicionalismo. Aun así, una de las misionalidades de las instituciones de educación superior universitaria, técnica y tecnológica se remite a la formación integral de sus estudiantes, y si bien, en muchas ocasiones su noción se reduce a la integración de las dimensiones socioemocional y humana, lo cierto es que también concibe la existencia de coherencia y complementariedad entre los diferentes elementos curriculares que configuran un programa académico, lo cual incluye la combinación de la teoría y la práctica.³

En consecuencia, surge la necesidad de formular e implementar estrategias didácticas que fomenten el aprendizaje basado en la práctica donde prima la observación de fenómenos, la experimentación, el contacto con escenarios y problemas reales, el uso de

¹ GUTIÉRREZ, César Augusto. Herramienta didáctica para integrar las TIC en la enseñanza de las ciencias. En: *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*. Enero 2018, vol. 11, no. 1, p. 101-126.

² SÁNCHEZ, Guillermo. La relación teoría-práctica, otra faceta de la formación integral. En: *Ingeniería e Investigación*. Julio 1990, no. 21, p. 58-67. Doi: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n21.19698>

³ Ibid., p. 58-59.

equipos e instrumentos, la aplicación de conceptos, el pensamiento crítico y analítico, y la proposición de alternativas de solución para alcanzar el objetivo de formar profesionales íntegros. Desafortunadamente, en la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, y en específico, el programa de Ingeniería Mecánica, una de las mayores debilidades se relaciona con la carencia de iniciativas didácticas novedosas que enfatizan en la práctica, permitiendo así, el fortalecimiento de la educación que se oferta.

Considerando que el análisis de vibraciones es un tópico central y fundamental en la teoría del mantenimiento, ya sea preventivo, correctivo o predictivo de maquinaria industrial en la Ingeniería Mecánica contemporánea, en este trabajo se propone diseñar y construir un banco de simulaciones de vibraciones mecánicas para soportar los procesos educativo académicos y fomentar el enfoque investigativo en el campo del mantenimiento. Por una parte, la ingeniería de mantenimiento y las vibraciones son líneas de trabajo populares en la ingeniería mecánica debido a su relevancia.⁴ Luego, el desalineamiento, el desbalanceo y el rodamiento son problemas comunes que afectan la maquinaria industrial trayendo como consecuencias recalentamiento, desgaste, rupturas, pérdidas de eficiencia, excesos de ruido y otros daños colaterales que afectan las operaciones y a los trabajadores expuestos.⁵

Por último, es preciso mencionar que en contextos cotidianos, las organizaciones pueden verse perjudicadas gravemente debido a la inexistencia de un plan de mantenimiento para sus equipos y máquinas, o en su defecto, por la ineficiencia en las actividades de mantenimiento planificadas y ejecutadas, lo cual repercute negativamente en aspectos como el deterioro y las fallas de la maquinaria, retrasos en la producción, incumplimiento a clientes, aumento de costos por reparación y adquisición de nuevas máquinas, la pérdida de confiabilidad, riesgos sobre la salud y la seguridad de los trabajadores, y el detrimento de sus utilidades como negocio, entre otros.⁶ En ese orden, el mantenimiento de maquinaria industrial, en cualquiera de sus enfoques, es imprescindible para optimizar las operaciones de las organizaciones evitando imprevistos, y para ello, se requiere personal altamente capacitado y calificado para su realización. En consecuencia, intervenir en las prácticas que se implementan en los procesos educativos de los estudiantes de ingeniería mediante nuevas propuestas didácticas también contribuye a largo plazo si se considera su incorporación y su penetración en los mercados laborales.

⁴ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ingeniería mecánica. En: *Ingeniería e Investigación*. Enero 2001, no. 47, p. 87-98.

⁵ GONZÁLES, Héctor Álvaro, CARDONA, Jhon Fabio y MONROY, Gustavo. Diseño de un banco de pruebas de desalineamiento y desbalanceo mecánico. En: *Scientia Et Technica*. Octubre 2005, vol. 11, no. 28, p. 101-106.

⁶ GUAITARILLA, José David. Plan de mantenimiento preventivo para la máquina industrial de la Empresa Fluoroplásticos S.A.S. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería, 2019. 101 p.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En primer lugar, el desarrollo de este trabajo beneficia principalmente a la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, a la planta docente y a los estudiantes vinculados al programa de Ingeniería Mecánica, ya que la construcción del banco de pruebas constituye una herramienta didáctica que puede ser incluida dentro de los procesos formativos en pro de la calidad educativa, la innovación, la dinamización de asignaturas tan relevantes como la de Mantenimiento y la calificación de profesionales íntegros que en el futuro servirán a la sociedad. La práctica y la experimentación, así como todas las competencias asociadas son necesarias para que los estudiantes logren conectar, asimilar y apropiar la teoría con la realidad sin generar rupturas o fragmentación de saberes, además, también comprende una vía para que los estudiantes aprendan sobre instrumentación y el desarrollo de procesos investigativos, lo cual robustece su formación académica y profesional, su confianza para desenvolverse en escenarios laborales y su competitividad.

Desde el punto de vista del mantenimiento, la incorporación de herramientas didácticas como el banco de prueba para vibraciones representa un avance significativo en lo que se refiere a calificación y formación de profesionales, si bien esta línea de acción e investigación es de gran relevancia para la industria debido a las consecuencias y repercusiones que conllevan los fallos mecánicos en las operaciones y los resultados organizacionales, también es cierto que los programas de pregrado no tienen suficientes espacios para aprender y trabajar sobre vibraciones mecánicas y sus efectos en el mantenimiento. Los bancos de pruebas, en general, permiten realizar diferentes montajes para simular fallos mecánicos comunes que afectan la maquinaria con frecuencia, entonces, son herramientas didácticas versátiles, accesibles y de gran impacto para el desarrollo de competencias computacionales y experimentales en los estudiantes.

Finalmente, la relevancia de este trabajo se traslada al plano social y de país, puesto que se reconoce que cualquier esfuerzo de mejoramiento de la calidad en la formación de ciudadanos integrales y competitivos es fundamental para enfrentar los desafíos que el contexto y los mercados le imponen a las personas y a las organizaciones. El sector industrial es clave para la economía y el mercado laboral en el país, luego, el fortalecimiento del talento humano es una vía de acción clave para seguir creciendo y desarrollándonos bajo los conceptos de calidad, eficiencia, innovación, competitividad y sostenibilidad.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Construir un banco de simulación (parte mecánica) en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja para el análisis de vibraciones en maquinaria industrial en el marco del mantenimiento preventivo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Revisar la literatura, los antecedentes de investigación y la normativa vigente que envuelven la construcción de bancos de simulación para análisis de vibraciones a nivel académico e investigativo.
- Diseñar los componentes mecánicos y estructurales para la fabricación del banco de simulación para vibraciones usando CAD.
- Fabricar los componentes mecánicos y estructurales diseñados para la construcción del banco de simulaciones.

1.4. DELIMITACIÓN

Este trabajo comprende las etapas de diseño y construcción de un banco de simulaciones para vibraciones mecánicas, el cual será incorporado como herramienta de apoyo en los procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación en el marco del mantenimiento de maquinaria industrial de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja.

CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO HISTÓRICO

En lo que se refiere al contexto histórico de las prácticas de mantenimiento de maquinaria, White⁷ hace alusión a tres tipos principales que han predominado en el panorama industrial. En primer lugar, se encuentra el mantenimiento basado en el funcionamiento hasta-fallar, el cual, como su nombre lo sugiere, se trata de permitir que las máquinas operen indefinidamente hasta que una falla sea la causa de que se interrumpa sus servicios; es una práctica costosa, y, sobre todo, sorprende que es una práctica que persiste en gran parte de las empresas hoy en día. Seguidamente, apareció el mantenimiento periódico, popular en la década de los ochenta, donde la maquinaria es sujeta a jornadas de desarme y reacondicionamiento cada cierto tiempo antes de que falle o cumpla su vida útil, representando los enfoques preventivo y correctivos de acuerdo con la situación particular. Por último, en tiempos más recientes se ha enfatizado en las prácticas de mantenimiento predictivo para intervenir únicamente cuando se sabe que una máquina va a presentar una falla a partir de la proyección de la evolución de su estado actual y los síntomas que se identifican, y en el mantenimiento proactivo bajo el cual se busca la causa fundamental de una falla para corregirla y evitar que se alcance a expresar la falla alargando la duración de sus operaciones.

2.2. MARCO DE ANTECEDENTES

Desde la perspectiva de la educación profesional en niveles superiores orientados a la formación ingenieril, los bancos de simulación o de pruebas analíticas de vibraciones se han posicionado como herramientas didácticas estratégicas que contravienen los paradigmas de la educación tradicional, a su vez que representan una propuesta innovadora para fortalecer significativamente los procesos de formación a través de la integración de la teoría y la práctica. Dicho esto, la búsqueda de antecedentes se fundamentó en el rastreo de trabajos académicos donde se documentará el diseño y la construcción de bancos de simulación de vibraciones, especialmente, en el contexto de la educación universitaria en Colombia, los cuales se sintetizan en seguida.

En primer lugar, se cita a Bernal y Cortés⁸ de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, quienes desarrollaron un trabajo enfocado en la descripción, el análisis y la simulación de un banco de prueba para vibraciones usando el software de diseño NX de Siemens. En primera instancia, realizaron una revisión de literatura para indagar sobre los prototipos documentados del banco de pruebas de vibraciones por desbalance y

⁷ WHITE, Glen. Introducción al Análisis de Vibraciones. Massachussets, Estados Unidos: Azima DLI. 148 p.

⁸ BERNAL, Fabio Andrés y CORTÉS, Diego Fabián. Simulación de un banco de pruebas para análisis de vibraciones. Proyecto de grado Tecnología Mecánica. Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica, 2016. 55 p.

optaron por un montaje que constaba de un eje con un disco agujerado, el cual se acopla a un motor eléctrico y se encuentra soportado sobre un par de rodamientos. Posteriormente, modelaron cada componente de la configuración del banco seleccionado en 3D y su ensamblaje, además de simular el movimiento del sistema en conjunto empleado el programa NX 10 y analizar las deformaciones con el método de elementos finitos. En general, sus resultados indicaron que el banco era eficaz para analizar vibraciones en sistemas rota dinámicos, completamente funcional y con viabilidad de construirse en físico gracias a la disponibilidad/accesibilidad de los componentes.

García-León, Flórez y Pedroza⁹ realizaron una investigación cuyo objetivo estaba orientado a la elaboración de un diseño optimizado de una máquina que midiera vibraciones mecánicas, es decir, un banco de pruebas, con el fin de facilitar el desarrollo de experimentos diversos relacionados con fallas en los componentes mecánicos en la maquinaria industrial causadas por desbalance, desalineamiento y daños en rodamientos. En esencia, su diseño está constituido por un motor acoplado a un eje con un volante que se caracteriza por tener agujeros roscados y tornillos prisioneros mediante los cuales se posibilita la generación de vibraciones por desbalance, luego, los soportes están dotados con tornillos para desalinear los ejes que permiten manipular las vibraciones por desalineamiento, y por último, el montaje de rodamientos con fallas origina las vibraciones por rodamiento de manera sencilla. A lo largo del artículo, se describen las características claves de los componentes y se muestran los ensamblajes que se realizaron, así como los cálculos, las geometrías y los criterios de selección de materiales para cada componente del banco de prueba. Las virtudes de su diseño se relacionaron con una manipulación sencilla y ergonómica, exactitud en las medidas, ensamblaje seguro y fácil, y precisión en la captura de señales vibracionales.

De manera similar, Hoyos y Herrera¹⁰ presentaron el diseño y la construcción de un banco de pruebas para el análisis de vibraciones considerando que su registro puede dar cuenta de posibles fallas. El banco diseñado se fundamentó en la simulación de una máquina rotatoria de dos discos con el fin de generar vibraciones por desbalance de masas al girar el eje, el cual responde al modelo de un rotor de Jeffcott. Como parte de su trabajo, se hallaron los vectores de desplazamiento del eje para diferentes configuraciones de desbalance, el desarrollo del modelo dinámico de vibraciones laterales, la determinación de las frecuencias forzadas del rotor y la caracterización del funcionamiento del banco de prueba bajo diferentes escenarios de falla y desajustes para analizar las vibraciones generadas. De acuerdo con los autores, el banco de pruebas construido es capaz simular diferentes tipos de fallas (desalineación angular, problemas en los rodamientos y

⁹ GARCÍA-LEÓN, Ricardo Andrés, FLÓREZ, Eder y PEDROZA, Jesús. Diseño de un banco de pruebas para el análisis de vibraciones mecánicas. En: *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Junio de 2018, vol. 1, no. 33, p. 24-35.

¹⁰ HOYOS, Jaison Muriel y HERRERA, Camilo. Banco de pruebas para el análisis de vibraciones en maquinaria. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido. Medellín: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2021. 56 p.

desbalance), con buena eficiencia en la amortiguación y con medidas robustas de señales vibracionales.

A nivel internacional, también se identificaron algunos antecedentes. Por una parte, Jara y Sinchi¹¹ diseñaron y construyeron un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas con el objetivo de dotar los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca, Ecuador. De manera especial, se connota que los autores aplicaron una encuesta a los docentes de la carrera para poder considerar aquellos aspectos y requerimientos mínimos que debían considerarse en el diseño del banco a partir de lo cual se determinó su utilidad en las asignaturas de mantenimiento y elementos de máquinas de Ingeniería Mecánica, y la necesidad de incluir pruebas didácticas e industriales en torno a pruebas de balanceo dinámico, de alineación, de excentricidad y de rodamientos. Entre otros aspectos a resaltar de este trabajo, se encuentra la presentación de los cálculos explícitos y de los planos 2D de cada componente mecánico del banco, la disgregación de los costos del proyecto y la creación de un manual operativo para guiar y acompañar la implementación del banco de pruebas en los procesos de enseñanza.

Luego, Gangi et al.¹² de la Universidad Nacional de Córdoba, reportaron una investigación sobre el análisis de vibraciones de un sistema electromecánico en un banco de ensayo empleado para la simulación de fallas en maquinaria industrial. El banco de pruebas fue previamente construido por parte de los docentes del Laboratorio de Ingeniería y Mantenimiento [LIMI] con fines didácticos para soportar la asignatura de mantenimiento en Ingeniería Industrial. El diseño y la construcción del banco se remite a Gonzáles et al.¹³, quienes describen que se trata de un banco de pruebas construido para el análisis de fallas de desalineamiento y desbalanceo; se usó un motor trifásico de corriente alterna de jaula de ardilla unido a un eje para la transmisión de movimiento, además, tiene dos discos balanceados acoplado al eje con agujeros roscados para montar/desmontar tornillos opresores lo que permite generar condiciones de desbalance de masas. Asimismo, el soporte del sistema cuenta con un apoyo movable para desalinear el eje de acuerdo con las necesidades del estudio. Ambos documentos sirven como guía tanto para el diseño y la construcción de un banco de pruebas de vibraciones mecánicas, como para la realización de análisis y ensayos experimentales en el marco del mantenimiento de maquinaria industrial.

La revisión de antecedentes deja en evidencia la proyección que se ha tenido con el paso del tiempo en trabajar sobre el diseño, la simulación por software y la construcción de

¹¹ JARA, José Armando y SINCHI, Juan Gabriel. Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Tesis Ingeniería Mecánica. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2012. 268 p.

¹² GANGI, Sergio, PONTELLI, Daniel, BOAGLIO, Laura y BOLLATI, Juan. Análisis de vibraciones en banco de ensayo utilizado para simular fallas de equipos industriales. En: *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Marzo 2016, vol. 3, no. 1, p. 71-74.

¹³ GONZÁLES et al., Op., Cit., p. 101.

bancos de pruebas en físico para el análisis de vibraciones en maquinaria industrial con el propósito de acompañar y fortalecer los procesos de formación en la ingeniería. De igual modo, los bancos de pruebas se han reconocido como estrategias y herramientas didácticas que permiten integrar la práctica a la teoría mejorando la calidad y la pertinencia educativa, a su vez que se fomenta la consolidación de competencias y la profundización en el estudio de las vibraciones mecánicas que tienen gran protagonismo y relevancia en la industria teniendo en cuenta las fallas que se pueden generar en los sistemas y las repercusiones subsecuentes en términos de costos, tiempos de reparación y disminución de la producción, entre otros.

Sin embargo, desde la perspectiva de la transformación y el fortalecimiento educativo, cada institución universitaria tiene sus propias dinámicas y disponibilidad de recursos que constituyen limitantes en su progreso, así como en la actuación ante las necesidades de la sociedad frente a los profesionales que espera. Por lo tanto, este trabajo representa una iniciativa estratégica que contribuye al contexto educativo particular de la Universidad Santo Tomás en su seccional de Tunja en su misión de formar profesionales íntegros y capacitados para solucionar problemas proactivamente en situaciones reales.

2.3. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.3.1. Vibraciones y fallas mecánicas

En lo que se refiere al concepto, Rao¹⁴ define una vibración como el movimiento oscilatorio de un sistema donde las repeticiones se presentan en intervalos de tiempo establecidos. Ahora, un sistema vibratorio está conformado por un medio para almacenar energía potencial (un resorte o elástico), un medio para la conservación de la energía cinética (una masa o la inercia) y un medio para ceder dicha energía al ambiente gradualmente (un amortiguador). Desde esta mirada, una vibración se puede comprender a partir del comportamiento de la energía en el sistema: cuando oscila, la energía potencial se convierte en energía cinética y viceversa, sin embargo, si el sistema es amortiguado, una porción de esa energía es disipada cediéndose al ambiente y requiriendo de una fuente externa que sea capaz de compensar la energía perdida con el fin de mantener el sistema vibrando en un estado estable. Algunos ejemplos convencionales y familiares de un sistema vibratorio son los péndulos o los movimientos de cuerdas con pulsaciones.

Otras definiciones dadas para vibración que se encuentran en la literatura incluyen la Espino-Román et al¹⁵, quienes indican que se trata de la oscilación de un sistema

¹⁴ RAO, Singiresu. Vibraciones mecánicas. Traducido por Rodolfo Navarro Salas. 5 ed. México: Pearson Education, 2012. 1024 p.

¹⁵ ESPINO-ROMÁN, Piero, DAVINZÓN-CASTILLO, Yasser Alberto, OLAGUEZ-TORRES, Juana Eugenia, LIZARRAGA-LIZARRAGA, Alejandro, BENITEZ-GARCÍA, Israel, y NUÑEZ-NALDA, José Víctor. Prototipo

alrededor de un punto de equilibrio, es decir, una posición donde la sumatoria de fuerzas que actúan sobre el mismo se hacen nulas; y la de norma ISO 2041:2009¹⁶, donde la vibración se conceptualiza como aquella variación de una magnitud de movimiento o posición en función del tiempo, la cual se usa para describir un sistema mecánico al compararla con un valor de referencia. A pesar de las posibles diferencias que existen entre estas definiciones, lo cierto es que el movimiento vibracional es un fenómeno dinámico y cinemático que resulta de la aplicación, la acción o la interacción de una o más fuerzas sobre un sistema mecánico, una máquina, un elemento o una partícula; así, cuando actúa una fuerza, se genera un cambio de posición, la magnitud del desplazamiento varía con respecto a su estado original y se adquiere una velocidad inicial en el movimiento.¹⁷

Algunas propiedades características de las vibraciones son el desplazamiento, el periodo y la frecuencia definidas a continuación:

- **Desplazamiento:** se refiere a la cantidad de movimiento que experimenta un cuerpo al cambiar su posición inicial o con respecto a un sistema de referencia.¹⁸
- **Periodo:** es el tiempo que transcurre para que un movimiento periódico se repita.¹⁹
- **Frecuencia:** corresponde al número de ciclos que ocurren por unidad de tiempo y suele medirse en Hz (hercios).²⁰

Al tratarse de un movimiento, también se adoptan como parámetros la velocidad, la aceleración y los cambios que se evidencia con el paso del tiempo en las vibraciones. Pérez²¹ explica que la frecuencia es una propiedad interesante y simple pero significativa a la hora de analizar los movimientos oscilatorios pues no solo guarda relación con otras propiedades, sino que en el caso particular de los elementos rotativos, muy comunes en máquinas industriales, se corresponde con la velocidad angular facilitando la identificación de los problemas que afectan su funcionamiento u operación normal. Lo

didáctico para la enseñanza de vibraciones mecánicas mediante el diseño de un banco de pruebas de desbalance y velocidad crítica. En: *Revista Dyna*, vol. 92, no. 1, p. 395-398.

¹⁶ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Mechanical vibration, shock, and condition monitoring — Vocabulary. ISO 2041:2009. Geneve, Suiza, ISO, 2009, 9 p.

¹⁷ LEOS, Iván. Manual interactivo de prácticas de vibraciones mecánicas del equipo TM 16 empleando Visual Basic. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Aragón, 2013. 128 p.

¹⁸ OLARTE, William, BOTERO, Marcela y CAÑÓN, Benhur. Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción. En: *Scientia et Technica*. Abril 2010, vol. 16, no. 44, p. 354-356.

¹⁹ SETO, William. Vibraciones Mecánicas. Teoría y 225 problemas resueltos. Traducido por Guillermo Sánchez Bolívar. 1ra Ed. España: McGraw Hill, 1979. 199 p.

²⁰ Ibid., p. 1.

²¹ PÉREZ, Pablo. Estudio de la vibración en baja frecuencia de motor eléctrico. Tesis Ingeniería de Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, 2013. 269 p.

anterior, debido a que las periodicidades y la frecuencia de las oscilaciones varían en función de la magnitud, la dirección o el punto donde se aplican las fuerzas que generan el movimiento.

Las vibraciones mecánicas son movimientos que ocurren en diferentes tipos de sistemas mecánicos y estructurales, razón por la cual son de gran interés en el campo del mantenimiento de maquinaria industrial puesto que se asocian con múltiples fallas y problemas en su funcionamiento. Espino-Román et al.²² indican desgastes, fisuras por fatiga, roturas, daños en los sellos y ruido. Quintero y López²³ mencionan disminución en la eficiencia de los procesos, afectaciones en la exactitud y los acabados de los productos y baja productividad, así como fatiga, desgaste y ruptura de los componentes de las máquinas. Por su parte, López²⁴ explica que aunque toda máquina tiene vibraciones inherentes a las tolerancias de los elementos y componentes que la constituyen, los cambios en la vibración base en condiciones normales son señales claras de defectos y fallas incipientes; el autor enfatiza en los fallos por acoplamiento explicando que las causas más comunes son los desequilibrios mecánicos en las máquinas, la inestabilidad aerodinámica o hidráulica, falta de apriete, desalineamiento y desbalanceo.

2.3.1.1. Tipos de vibraciones

Con respecto a los tipos de vibraciones, se reconocen tres maneras diferentes de clasificación de acuerdo con Rao²⁵ y Pérez²⁶. Primero, se distinguen las vibraciones libres de las vibraciones forzadas:

- **Vibración libre:** hace referencia al movimiento vibratorio libre de un sistema, el cual, después de una perturbación inicial, continúa por sí mismo en vibración sin que existan fuerzas externas ejercidas sobre el sistema. La frecuencia con la que vibrará el sistema se conoce como frecuencia natural y será inherente al sistema dinámico.
- **Vibración forzada:** tal como su nombre lo sugiere, y contrario a la vibración libre, se trata de un movimiento vibratorio que resulta cuando el sistema es sometido a una fuerza de naturaleza externa, a menudo, repetitiva o prolongada en el tiempo.

El movimiento oscilatorio de un péndulo simple es un ejemplo ilustrativo de una vibración libre, mientras que las oscilaciones en las máquinas con motor son ejemplo de una

²² ESPINO-ROMÁN et al., Op., Cit., p. 1.

²³ QUINTERO, Héctor Fabio y LÓPEZ, Juan Fernando. Vibraciones Mecánicas: un enfoque Teórico-Práctico. Pereira: Editorial UPT. 352 p.

²⁴ LÓPEZ, Gabriel. Análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo. En: *Técnico Industrial*. Diciembre de 2004, no.255, p. 25-27.

²⁵ RAO, Op., Cit., p. 16.

²⁶ PÉREZ, Op., Cit., p. 25.

vibración forzada. Ahora, es preciso mencionar que cuando las frecuencias naturales y las frecuencias de las fuerzas externas son coincidentes en un sistema, se presenta el fenómeno de **resonancia**, en el cual, la amplitud de la vibración se incrementará indefinidamente conllevando a oscilaciones muy grandes que pueden ser peligrosas y desfavorables. En ese escenario, Seto²⁷ explica que la única manera de modular la vibración resonante en un sistema es a través de la cantidad de amortiguamiento incorporado o la previsión de las frecuencias al momento de diseñar y construir la máquina.

Seguidamente, los autores hacen la distinción entre las vibraciones que son amortiguadas de las que no lo son:

- **Vibraciones amortiguadas:** se refiere a las vibraciones donde hay pérdida o disipación de energía por fricción u otras resistencias en el sistema.
- **Vibraciones no amortiguadas:** en este caso, no hay fricción o resistencias en el sistema vibratorio que conlleven a la pérdida o disipación de energía.

Por último, se usa como criterio la existencia o no de un comportamiento lineal en el movimiento vibratorio:

- **Vibraciones lineales:** sucede cuando el sistema vibratorio y todos sus componentes se comportan linealmente, razón por la que incluye las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento.
- **Vibraciones no lineales:** contrario a las vibraciones lineales, alguno de los componentes básicos del sistema vibratorio no tiene este comportamiento eliminando la condición de linealidad tanto en el movimiento como en las ecuaciones que lo rigen.

Como es de esperarse, cuando el comportamiento de las vibraciones es lineal, su estudio se facilita puesto que se puede acudir al principio de superposición o a otras técnicas de análisis matemático más desarrolladas.²⁸

2.3.1.2. De los sistemas vibratorios

Como se mencionó anteriormente, los sistemas vibratorios están conformados esencialmente por un resorte (o elasticidad), una masa (o inercia) y un amortiguador, los

²⁷ SETO, Op., Cit., p. 1.

²⁸ RAO, Op., Cit., p. 14

cuales sirven como medios para conservar y transferir energía a través de este mismo o a sus alrededores.

Una clasificación fundamental de los sistemas vibratorios atiende a la cantidad de grados de libertad, es decir, a la cantidad mínima de coordenadas que son independientes y necesarias describir completamente el estado de un sistema en cualquier instante de tiempo.²⁹ Por lo tanto, se estudian sistemas que son de un solo grado de libertad en el caso más sencillo como los péndulos, los sistemas de masa-resorte o los sistemas torsionales donde basta una coordenada angular o cartesiana independiente para poder describir su estado y su movimiento. No obstante, a medida que los sistemas se complejizan, por ejemplo, con dos y/o más masas o resortes, se requieren más grados de libertad.

Dicho esto, surgen los **sistemas vibratorios discretos y continuos**, en los cuales se requieren finitos o infinitos grados de libertad, respectivamente, determinando la forma en la que se pueden estudiar y modelar a partir de metodologías analíticas o numéricas en la práctica.

2.3.1.3. Análisis de vibraciones

En primer lugar, el análisis de los sistemas vibratorios que son dinámicos se basa en las condiciones iniciales, las variables de entrada asociadas a las fuerzas externas aplicadas o excitaciones, y las variables de salida o respuesta que dependen del tiempo. En consecuencia, Rao³⁰ señala que el procedimiento de análisis, en general para cualquier aplicación, consta de 4 pasos:

Paso 1. Consiste en realizar el modelado matemático del sistema vibratorio mediante la representación de sus componentes y todos los detalles que puedan ser relevantes. Cuando no se conoce nada sobre el sistema, en ocasiones, se usa primero un modelo básico y elemental para tener un bosquejo inicial, y luego, se mejora gradualmente hasta obtener mayor precisión y representatividad de cómo funciona o se comporta el sistema.

Paso 2. Con el modelo matemático refinado, se deriva el conjunto de ecuaciones que rigen el comportamiento del movimiento oscilatorio en el sistema, y para ello, se deben realizar los diagramas del cuerpo libre y aplicar métodos físicos como las Leyes de Newton o las Leyes de Conservación. Como resultado, para un sistema discreto se obtendrán ecuaciones diferenciales, mientras que para un sistema continuo, las ecuaciones son diferenciales parciales lineales o no lineales según sea el caso.

²⁹ Ibid., p. 15.

³⁰ Ibid., p. 17-19.

Paso 3. En este paso se resuelve el conjunto de ecuaciones determinado para describir el movimiento oscilatorio del sistema vibratorio, ya sea mediante métodos analíticos o métodos numéricos.

Paso 4. Se interpretan los resultados considerando que, en un principio, se obtienen en medidas de desplazamiento, velocidad y aceleración de cada masa o cuerpo que conforman el sistema vibratorio. Luego, las interpretaciones deben realizarse a la luz de los objetivos que orientaron el análisis.

De otro lado, el análisis de vibraciones también consiste en una técnica que se implementa a nivel industrial para efectos de mantenimiento, ya que, gracias a la detección de síntomas de fallas o fallas propiamente, se pueden determinar las posibles causas generadoras y así tomar medidas de prevención, corrección y hasta predicción.³¹ Según Espino-Román et al.³² las vibraciones mecánicas y los problemas asociados no se pueden evitar siendo necesaria la implementación de sistemas de detección y localización de fallas en las máquinas, cada falla tiene un patrón de vibraciones específico pero su distinción exige que se realice un monitoreo de las condiciones vibracionales de la maquinaria y sus componentes de manera periódica.

Por supuesto, para el análisis de señales de vibración es esencial comprender la física del movimiento dinámico y diagnosticar sus características adecuadamente, lo que incluye, la rigidez, el amortiguamiento, las frecuencias, las fases, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del sistema sujeto a movimiento, pero dado que la mayoría de la maquinaria industrial es de tipo rotativo, las periodicidades, las frecuencias y la amplitud de las vibraciones son la clave para establecer su severidad e identificar defectos, síntomas incipientes o fallos presentes.³³

Olarte et al.³⁴ explican que todas las máquinas tienen vibraciones, sin embargo, cuando alguno de sus elementos o piezas falla, las características del movimiento vibracional se alteran. En ese sentido, el análisis de las señales vibracionales que se registran a través de sensores permite la identificación de cambios y la obtención de información clave sobre el lugar y el tipo de fallo. Estos autores, se describen dos técnicas básicas y tradicionales en el análisis de vibraciones como parte del mantenimiento de maquinaria industrial, siendo estas:

- **Análisis de frecuencias:** se realiza con base al espectro resultante del registro de la señal de vibración; la gráfica del espectro se distingue por tener la frecuencia en el eje horizontal, y el desplazamiento, la velocidad o la aceleración en el eje vertical, siendo más común usar la velocidad cuando se trata de máquinas

³¹ GARCÍA-LEÓN et al, Op., Cit., p. 24.

³² ESPINO-ROMÁN et al., Op., Cit., p. 1.

³³ QUINTERO y LÓPEZ, Op., Cit., p. 16-19.

³⁴ OLARTE et al., Op., Cit., p. 221.

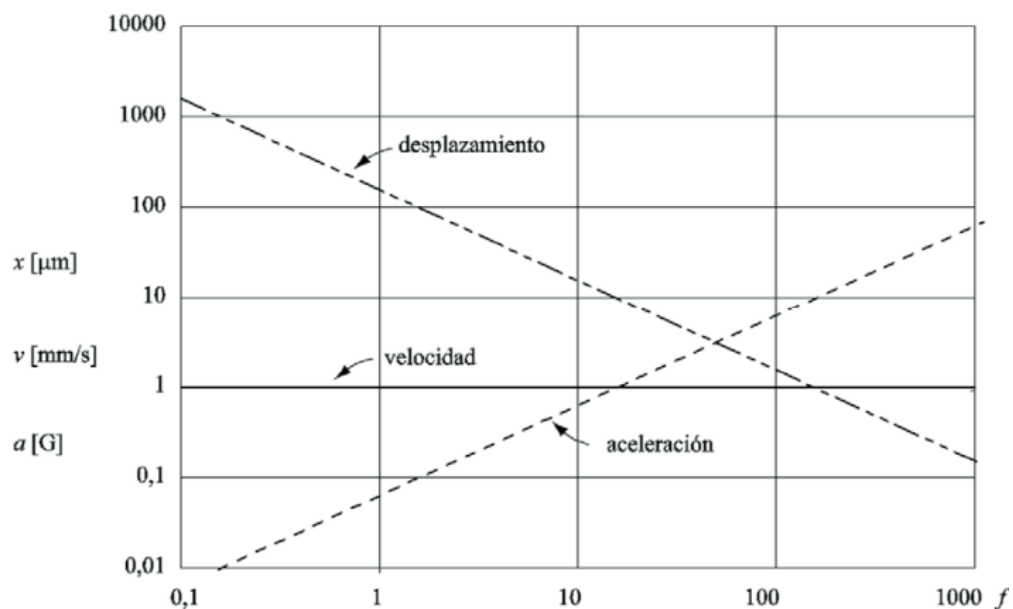
rotatorias. Mientras la frecuencia indica la causa de la vibración, la amplitud es indicativo de la gravedad de la falla.

- **Análisis de tiempos:** es una técnica complementaria al análisis de frecuencias que suele ser útil cuando los espectros son muy parecidos, cuando hay fallas con espectros similares o cuando las máquinas operan a velocidades muy bajas, entre otros casos, y, por lo tanto, contribuye con la confirmación del diagnóstico.

Cabe mencionar que, para los análisis, se toman como referencia las tolerancias reportadas por los fabricantes directamente o las normas técnicas aplicables.

En la Figura 1, se muestra la relación de los parámetros desplazamiento, velocidad y aceleración con la frecuencia, dejando en evidencia que la técnica de análisis debe tener presente la magnitud de la frecuencia de la máquina y el parámetro con mayor amplitud de señal para que los cambios puedan identificarse adecuadamente.

Figura 1. Relación de parámetros en el análisis de frecuencias



Fuente: Tomado de Quintero y López, 2016.

Quintero y López³⁵ en su texto describen otra técnica de análisis, que si bien sigue la idea de trabajar con las señales respecto al tiempo o a la frecuencia de las vibraciones, adopta la diferencia de fases como criterio. La fase es la posición relativa de un cuerpo que vibra

³⁵ QUINTERO y LÓPEZ, Op., Cit., p. 19-20.

con respecto a otro en un instante de tiempo definido que puede estar en reposo o en movimiento. Ahora bien, siguiendo esta definición, la técnica de análisis de diferencia de fases permite comparar dos vibraciones en el tiempo haciéndole seguimiento a los máximos, los mínimos y los ceros de las señales de las oscilaciones. Por lo general, se aplica para comparar la diferencia de fases entre las vibraciones axiales de los descansos de los motores o entre las vibraciones horizontales y verticales cuyas diferencias revelan problemas de desbalance, desalineamiento, resonancia y ejes deformados, entre otros.

Por último, vale la pena mencionar que debido a que los análisis de vibraciones se enfocan, como su nombre lo sugiere, en el análisis de los espectros vibracionales, así, se suele emplear la transformada de Fourier para descomponer las señales de frecuencia y amplitud de parámetros.

En la Tabla 1, se reportan algunas frecuencias de vibración y el origen de la falla más probable para los casos de interés.

Tabla 1. Frecuencias de vibración para problemas típicos en máquinas.

Problema	Frecuencia	Dirección de las vibraciones
Desbalanceo	f_0	Radial
Desalineamiento	$f_0, 2f_0, 3f_0$	Radial y axial
Elementos deteriorados de rodamiento	Frecuencias altas mayores a 20kHz con relación a rodamientos	Radial y axial

Fuente: Tomado de Quintero y López, 2016.

El desbalanceo y el desalineamiento son causas muy comunes de vibraciones anormales en la maquinaria industrial; en ambos casos, la frecuencia es proporcional al desequilibrio, luego, cuando se trata de desalineamiento, este puede ser angular, lineal o una combinación.

2.3.2. Bancos de prueba

Un banco de prueba, también conocido como banco de ensayos o banco de simulaciones, son estructuras modulares integradas, como mínimo, por un sistema mecánico y un sistema electrónico, que permiten reproducir un fenómeno físico, así como un amplio rango de condiciones en las que se desarrolla para poder realizar experimentos, pruebas o ensayos, como su nombre lo sugiere, en torno a su comportamiento.³⁶ Su significado también se asocia a la simulación de un ambiente de producción, a través de la cual, se busca probar un elemento de una máquina específico para evaluar su funcionamiento y su correcta operación de manera aislada, siendo útil para fomentar la seguridad industrial y la mejora continua.³⁷

En este caso particular, el banco de pruebas es una máquina industrial, que, en conjunto con el análisis de vibraciones, permiten recrear las condiciones de trabajo de otras máquinas en el marco del mantenimiento preventivo a través de lo cual se pueden investigar o realizar seguimientos a las posibles fallas mecánicas que tengan lugar poniendo en riesgo las operaciones y su funcionamiento.

Como se ha mencionado previamente, las máquinas son sistemas dinámicos con entradas y salidas, por lo tanto, integrando el análisis de vibraciones con el banco de prueba, se procede a realizar mediciones de las vibraciones de una máquina o un elemento de máquina para generar diagnósticos de fallas y proponer soluciones de mantenimiento preventivo y oportuno para las empresas. En esencia, se debe montar un transductor en el banco de prueba para realizar el monitoreo, por lo general, es un acelerómetro, y se miden los desplazamientos, velocidades o aceleraciones que producen las vibraciones mientras la máquina o elementos de máquina están en operación.³⁸ En el transductor, las señales medidas se capturan en función del tiempo, por ejemplo, en términos de amplitud vs, tiempo, como señales análogas que después se convierten a señales digitales, las cuales pueden ser analizadas directamente o transformadas a otros dominios de acuerdo con la técnica de análisis seleccionada.³⁹

Jara y Sinchi⁴⁰ describen cada uno de los problemas o fallas que se pueden presentar en las máquinas industriales, y los cuales, pueden ser simulados en los bancos de prueba:

³⁶ PINZÓN, Juan Eduardo. Construcción de un banco de prácticas para alineación de ejes en máquinas rotativas para los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño Sede Cúcuta. Trabajo de grado Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial. Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, 2020, 76 p.

³⁷ Ibid., p.48.

³⁸

³⁹

⁴⁰ JARA y SINCHI, Op., Cit., p. 75-96.

- **Desbalanceo:** también se conoce como un desequilibrio que se presenta en aquellas situaciones donde el centro de rotación y el centro de gravedad de un eje no coinciden existiendo una distribución de masa anómala.
- **Desalineación:** se refiere a aquellas vibraciones que se generan a partir de las afectaciones que los parámetros de geometría y dimensionalidad causan sobre los elementos rotativos. Se distingue la desalineación angular que implica la variación de distancias entre los ejes de las máquinas y los acoples generando altas vibraciones axiales, y la desalineación paralela donde la geometría no es adecuada para los acoplamientos y no se cumple la colinealidad de los ejes (el eje transmisor, no está en línea con el eje transmitido).
- **Excentricidad:** son problemas que surgen en aquellas situaciones donde el centro de rotación de un elemento en una máquina y el centro de rotación geométrico del acople no son coincidentes.
- **Rodamientos:** es donde más se producen defectos y existe un riesgo alto de falla, lo cual distorsiona su funcionamiento normal y conlleva a saltos, choques y vibraciones en los elementos; las fallas pueden relacionarse con malos ensambles, sobreesfuerzos y corrosión.

Dependiendo del diseño del banco, se pueden simular o realizar análisis de vibraciones para todos estos problemas y fallos, o solo algunos de ellos. Además, en suma, a los problemas enunciados, pueden también incluirse las fallas en bandas y engranajes, entre otros, considerando que muchas máquinas cuentan con estos sistemas.

Para efectos de este trabajo, el diseño del banco de prueba comprende un banco de desbalance, por lo cual, el ensamble fundamental es un eje con un disco que ese conecta a un motor eléctrico sobre un soporte fijo; el disco es agujerado permitiendo que se generen diferentes condiciones o escenarios de desbalanceo a partir de la inserción de tornillo (masas) en los agujeros, de su distancia con respecto al centro y de su distribución dentro del área del disco (en diferentes lugares).

Desde una perspectiva didáctica, los bancos de prueba o ensayos constituyen herramientas que sirven para fortalecer y soportar los procesos de formación de los estudiantes en las instituciones técnicas, tecnológicas y universitarias, fomenta el espíritu investigador, facilita el desarrollo de habilidades y competencias en torno a la experimentación, la resolución de problemas, el trabajo práctico, el pensamiento lógico-

matemático y la competitividad, además de conciliar la teoría con la práctica que frecuentemente se encuentran fracturadas en la academia.⁴¹

2.3.3. Diseño mecánico

El diseño de elementos de máquinas constituye una parte fundamental para los profesionales de diseño industrial e ingeniería que se especializan en la creación de aparatos, equipos, maquinaria o sistemas con componentes mecánicos para satisfacer necesidades específicas de los clientes. En ese sentido, un diseñador o ingeniero debe tener el conocimiento y las capacidades requeridas no solo para diseñar elementos individuales, sino también para integrarlos y ensamblarlos como parte de un equipo o un sistema mecánico.

Ahora, con precisión, el objetivo del diseño mecánico se relaciona con la obtención de un producto útil que, además de satisfacer esas necesidades específicas del clientes, también cumpla con los requerimientos de seguridad, eficiencia, confiabilidad, economía y practicidad si se trata de un equipo o sistema de manufactura⁴². Para el caso particular de este trabajo, el banco de simulaciones está dirigido a diferentes usuarios, estudiantes y docentes principalmente, para realizar análisis y ensayos académicos o investigativos.

Ciertamente, el diseño mecánico implica que los diseñadores o ingenieros posean una gama extensa de conocimientos, competencias y habilidades que les permitan desempeñarse adecuadamente en el ámbito laboral. Algunas de ellas, son el trazado, el dibujo técnico, el diseño asistido, conocimientos sobre materiales, conocimientos sólidos de física, mecánica de fluidos y termodinámica, así como también se precisan habilidades gerenciales, comunicativas y resolutivas en el campo de acción.⁴³ Por supuesto, previo a la elaboración del diseño, se deben definir las necesidades y expectativas de los clientes (o usuarios), las funcionalidades, los parámetros de diseño y los criterios de evaluación que permitan determinar cuál es la opción más óptima.⁴⁴

2.3.3.1. Diseño de ejes

El eje es uno de los componentes mecánicos más relevantes en muchas máquinas y sistemas, como sucede con el banco de simulaciones para vibraciones en el que se enfoca este trabajo. Se trata de un dispositivo de naturaleza mecánica que es capaz de

⁴¹ GIRALDO, Carlos Alberto. Diseño y construcción de un banco didáctico de engranajes para transmisión de potencia en la Universidad Antonio Nariño sede Neiva. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, 2021, 113 p.

⁴² MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. Pearson Education, México, 2006, 475 p.

⁴³ Ibid., p. 7.

⁴⁴ Ibid., p. 11.

transmitir movimiento rotacional y potencia desde un motor a otras partes giratorias en el sistema, entonces, cuando se da el proceso de transmisión a una velocidad de rotación determinada, el eje queda sujeto a un torque que le es inherente produciendo un esfuerzo cortante torsional en este.⁴⁵ Por otra parte, los ejes también se usan para sostener otros elementos transmisores de potencia como engranajes, poleas, bandas o catarinas para cadenas, los cuales tienden a ejercer una fuerza perpendicular sobre el eje.

A continuación, se presenta la ecuación general de diseño para ejes de acuerdo con Mott, según se explica, esta es compatible con la norma ANSI B106.IM -1985:

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \sqrt{\left[\frac{K_t M}{S_n'} \right]^2 + \frac{3}{4} \left[\frac{T}{S_y} \right]^2} \right]^{1/3} \quad Ec. 1.$$

Donde K_t es la concentración de esfuerzos que se producen por variaciones geométricas, N es el factor de diseño, S_n' es valor de resistencia a la fatiga según el material seleccionado, M corresponde a los momentos flexionantes, T es el torque al que se ve sometido el eje y S_y es el esfuerzo de fluencia.

Esta ecuación, se empleó en los cálculos de diseño del eje para el banco de simulaciones de vibraciones.

2.3.4. Discretización por el método de elementos finitos

El método de elementos finitos (MET o FEM por sus siglas), constituye un método numérico popular para resolver ecuaciones diferenciales, lo cual resulta de gran utilidad en muchas disciplinas del campo ingenieril y de las ciencias naturales cuando no se tiene una solución analítica.⁴⁶ Su fundamento se remite a la discretización de un cuerpo, estructura o dominio objeto de estudio, lo que significa dividirlo, o realizar una partición de éstos en subdominios o partes más pequeñas que no se intersecan entre sí, siendo denominados elementos finitos.⁴⁷ Luego, cada elemento se distingue por tener un conjunto de puntos representativos -nodos- que son adyacentes al mismo elemento finito formando una malla, aunque se aclara que, como los elementos finitos son continuos, existen nodos de frontera que se comparten por varios elementos.⁴⁸ En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la discretización que se usa en el método de elementos finitos.

⁴⁵ Ibid., p. 531.

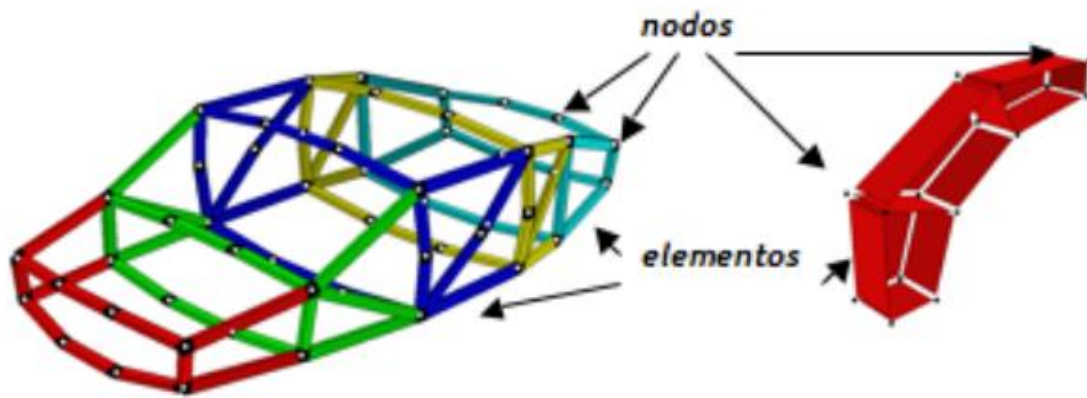
⁴⁶ ORTIZ, Armando; RUIZ, Osvaldo; ORTIZ, Juan Armando. Modelado de procesos de Manufactura. México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013, 267 p.

⁴⁷ Ibid., p. 233.

⁴⁸ Ibid., p. 234.

En esa misma línea, Celigueta⁴⁹ describe la discretización en el caso de sistemas continuos y su deformación en el espacio, la cual puede darse en diferentes direcciones y modos; concretamente el autor explica que el método de elementos finitos recurre a la estrategia de discretización para un continuo determinado, el cual, es dividido con superficies imaginarias en elementos contiguos y disjuntos entre sí; éstos elementos se caracterizan por tener formas geométricas simples. Así, el problema sobre el continuo se traslada a un problema en el desplazamiento o el comportamiento de cualquier otra propiedad en los nodos, los cuales se convierten en un conjunto de incógnitas básicas independientes que si pueden ser determinadas.

Figura 2. Discretización de un cuerpo



Fuente: Ortíz et al., 2013.

Dicho lo anterior, los cálculos se realizan sobre la malla de elementos discretizados inicialmente y el conjunto de ecuaciones para una variable desconocida se puede representar como un sistema de ecuaciones linealizadas para el sistema continuo donde la adyacencia y la conectividad entre nodos son claves.⁵⁰ En consecuencia, Ortiz et al. agregan que, una propiedad muy relevante del método es la convergencia considerando que las soluciones numéricas de discretizaciones sucesivamente más finitas converge con rapidez hacia una solución exacta.

⁴⁹ CELIGUETA, Juan Tomás. Métodos de los Elementos Finitos para Análisis Estructural. España: Tecnun, 2011, 287 p.

⁵⁰ ORTIZ et al., Op., Cit., p. 234.

El método de Elementos Finitos es típicamente desarrollado en programas computacionales debido a que las discretizaciones y la cantidad de nodos pueden implican demasiada capacidad de cálculo. No obstante, resulta ser un método usado ampliamente debido a que es general, práctico y puede ser adaptado a una gran cantidad de sistemas complejos y continuos.

2.3.5. Noción de mantenimiento industrial

Una primera aproximación conceptual sobre el mantenimiento, lo define como un conjunto de técnicas y sistemas que facilitan la prevención de averías en la maquinaria mediante la planeación y ejecución de revisiones y reparaciones con el propósito de brindar garantías de salud y un buen funcionamiento de estos.⁵¹ De manera similar, Mayorga y Quishpe⁵², al igual que Olarte et al.⁵³, se refieren al mantenimiento de la maquinaria industrial como un conjunto de acciones y actividades orientadas a su conservación de tal manera que se puedan garantizar sus servicios en óptimas condiciones, sin interrupciones y con máximos rendimientos productivos. Según estos autores, los objetivos del mantenimiento son:

- Identificar, reducir o evitar, y reparar fallas mecánicas en la maquinaria.
- Reducir la gravedad de las fallas que se puedan presentan a futuro.
- Garantizar funcionamiento normal de la maquinaria eliminando fallos o daños que conduzcan a interrupciones u operación discontinua de esta.
- Mitigar los riesgos a la salud y la seguridad de los trabajadores.
- Optimizar costos, gastos y recursos.
- Garantizar que la maquinaria alcance su tiempo de vida útil, e incluso, que se prolongue.

En suma, los autores destacan la necesidad de que el personal de mantenimiento se encuentre capacitado, pues es un área que requiere conocimientos técnicos específicos y experiencia.

Gonzáles et al.⁵⁴ agregan que el mantenimiento industrial representa una estrategia que propende por el estado óptimo de la maquinaria, la prestación de servicios y una

⁵¹ VALDIVIESO, Juan Carlos. Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Extruplas S.A. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2010. 115 p.

⁵² MAYORGA, Alex y QUISHPE, Jeverson. Deontología aplicada al mantenimiento de maquinaria industrial por ingenieros mecánicos. En: *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Mayo 2019. [En línea]. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/05/deontologia-maquinaria-industrial.html>

⁵³ OLARTE et al., Op., Cit., p. 220.

⁵⁴ GONZÁLES, Jesús Vicente, LOYO, Jesús, LÓPEZ, Miguel Ángel, PÉREZ, Pedro y CRUZ, Alfredo. Mantenimiento industrial en máquinas herramientas por medio de AMFE. En: *Revista Ingeniería Industrial*. Julio 2018, vol. 17, no. 3, p. 209-225.

producción de calidad, a su vez que enfatiza en el mejoramiento continuo de los procesos operativos debido a que se vincula con las actividades que se gestionan a nivel administrativo en organizaciones e industrias. Desde esta perspectiva, el mantenimiento puede comprenderse como una vía estratégica de conservación y optimización de sus activos fijos, de su eficiencia operativa y financiera, y de sus atributos de calidad, productividad y competitividad considerando el contexto complejo y exigente de los mercados.⁵⁵ Luego, a partir de una buena planificación para el mantenimiento, se puede conseguir una incidencia positiva en diferentes ámbitos, para ilustrar, en los costos de producción, en la calidad de los productos, en la capacidad operativa, en la capacidad de respuesta y de adaptación de la empresa ante situaciones desafiantes, en la gestión del recurso humano desde la perspectiva de salud y seguridad laboral, en la competitividad y eficiencia de los recursos, y en la imagen que se proyecta a sus grupos de interés.

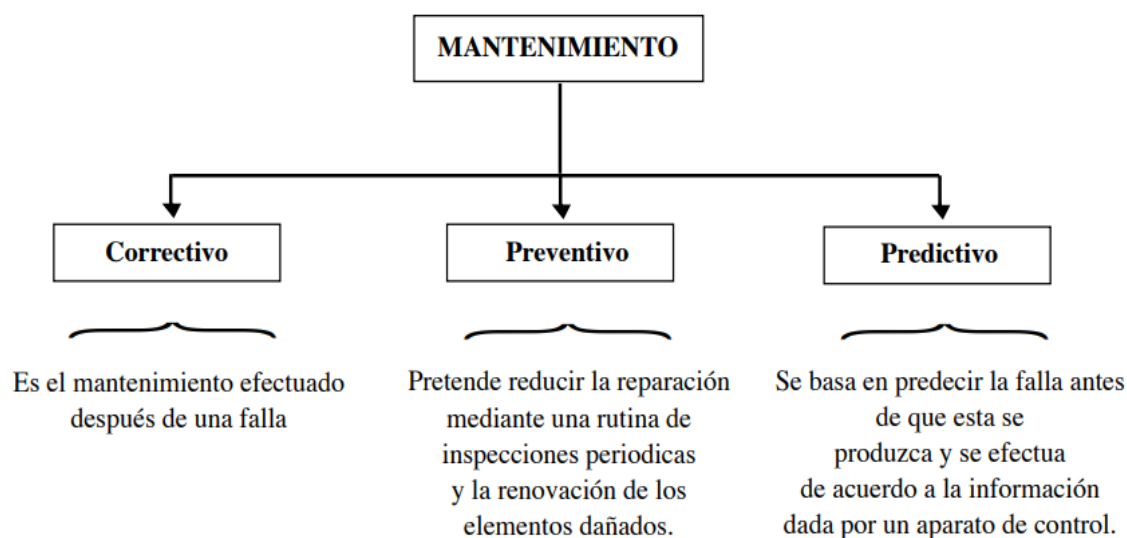
En lo que respecta al concepto de mantenimiento, se cree relevante aclarar que no se trata de una actividad estática, sino que es dinámica, y por lo mismo, requiere intervención constantemente, revisiones, cambios y mejoras en su etapas de planificación y ejecución.⁵⁶ En la Figura 3, se presenta un esquema sencillo donde se ilustran los tipos de mantenimiento según Penkova⁵⁷.

Figura 3. Tipos de mantenimiento

⁵⁵ VALDIVIESO, Op., Cit., p. 44.

⁵⁶ MONTILLA, Carlos Alberto. Fundamentos de Mantenimiento Industrial. Pereira: Editorial UTP, 2016. 212 p.

⁵⁷ PENKOVA, María. Mantenimiento y análisis de vibraciones. En: Ciencia y Sociedad. Octubre – Diciembre 2007, vol. 32, no. 4.



Fuente: Penkova, 2007.

2.3.5.1. Etapas del proceso de mantenimiento

Siguiendo a Olarte⁵⁸, en la Tabla 2 se sintetizan y relacionan las etapas del proceso de mantenimiento y las actividades básicas atribuidas a cada una, así como el área responsable dentro de una organización.

Tabla 2. Etapas y actividades básicas del mantenimiento

Etapas	Acciones básicas	Responsabilidad
Planeación	Elegir los sistemas, equipos y máquinas a analizar.	Administrativa
	Elaborar presupuestos.	
	Recomendar cambios y compras.	
Programación	Desarrollar el cronograma de actividades.	Operativa
	Instruir cada actividad.	
	Determinar insumos, repuestos y requerimientos de equipo/herramientas.	

⁵⁸ OLARTE, Op., Cit., p. 29.

	Asignar al personal ejecutante.	
	Establecer tiempos de ejecución.	
Ejecución	Realizar instalaciones, ajustes, modificaciones, calibraciones, reparaciones, inspecciones, limpiezas y demás actividades programadas en el marco del mantenimiento.	Operativa
Medición	Realizar la recolección de información y procesarla. Calcular indicadores y realizar informes. Documentar las actividades y sus resultados.	Administrativa y Operativa
Control y seguimiento	Se realiza la comparación de los resultados frente a lo planificado. Se toman decisiones. Se formulan nuevas acciones y planes a seguir para lograr mejoras.	Administrativa

Fuente: Elaboración propia con base en Olarte, 2010.

Como se observa, las responsabilidades no son únicamente operativas, también se requiere liderar y administrar todas gran parte de las actividades para poder garantizar aspectos como la planificación, la programación del mantenimiento, la disposición de recursos y los procesos de toma de decisiones, los cuales son esenciales dentro del mantenimiento de maquinaria.

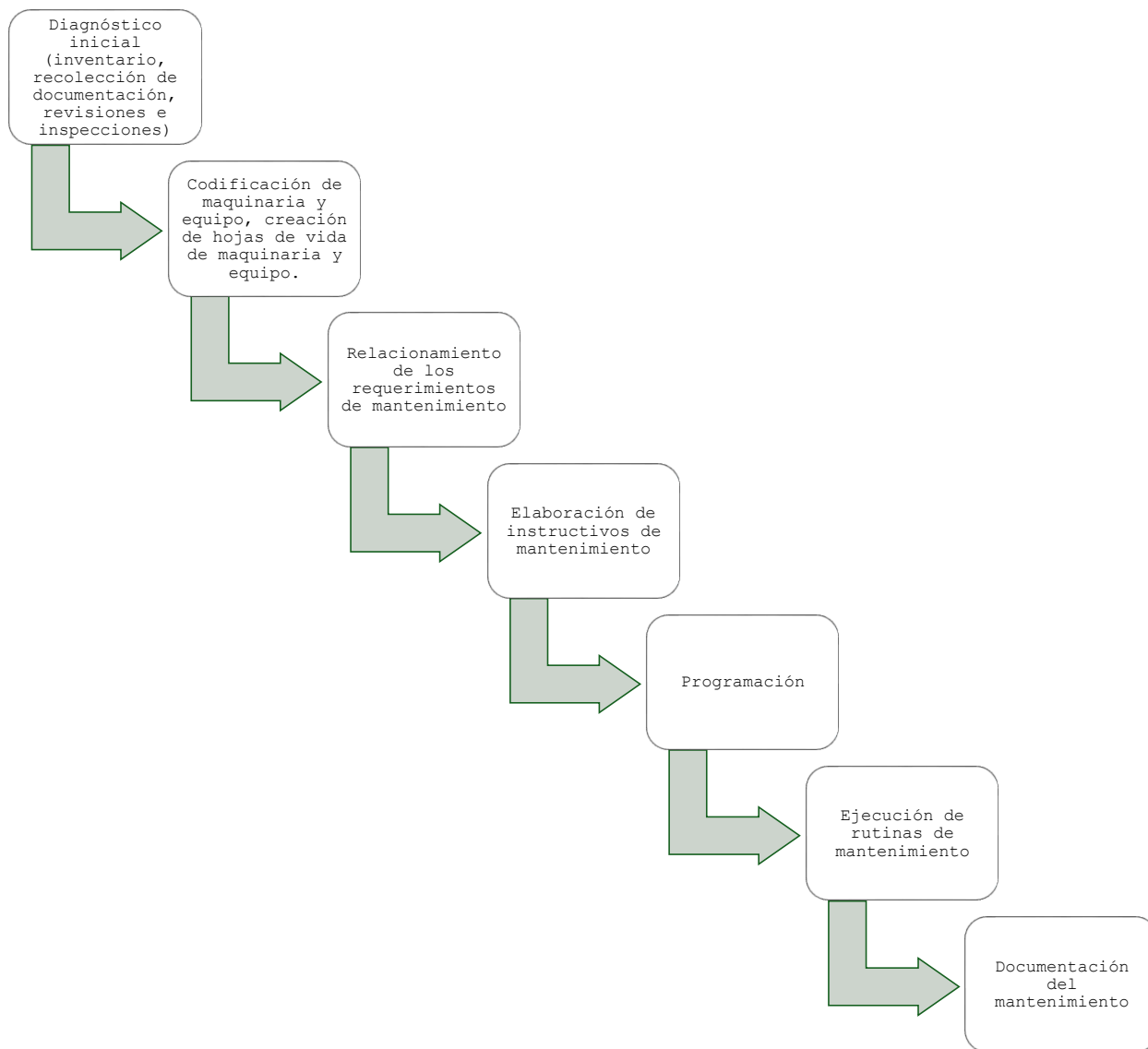
2.3.6. Mantenimiento preventivo

En primer lugar, se cita a Montilla⁵⁹, quien describen el mantenimiento preventivo como un sistema cuyo objetivo es evitar que ocurran fallas en la maquinaria, aunque también es un concepto que se usa en toda la cadena de producción, y para ello, se planean y ejecutan actividades básicas propias del mantenimiento con cierta frecuencia teniendo en cuenta el ciclo productivo. Como ventajas frente a otros enfoques de mantenimiento, se sugiere que incrementa la confiabilidad de la maquinaria, brinda mejores condiciones de seguridad, alarga la vida de los activos, reduce costos hasta cierto punto y disminuye los tiempos muertos. En contraste, como desventajas se señala la exigencia de un

⁵⁹ MONTILLA, Op., Cit., p. 33.

diagnóstico inicial, puede generar sobrecargas de trabajo tanto de la maquinaria como del personal de mantenimiento y puede incrementar los costos por motivo de las inspecciones. En la Figura 4, se presentan las fases del mantenimiento preventivo según el autor.

Figura 4. Fases del mantenimiento preventivo



Fuente: Elaboración propia con base en Montilla, 2016.

De otro lado, White⁶⁰ describe el mantenimiento preventivo como aquel que es periódico debido a que, a través del análisis estadístico e histórico de la vida de las máquinas, se pueden tomar decisiones para programar revisiones y reacondicionamientos cada cierto lapso de tiempo antes de que ocurra la falla esperada. Asimismo, explica que el mantenimiento preventivo incluye actividades tales como el cambio de filtros, el cambio de aceites, la lubricación, la limpieza y las inspecciones que se le realizan a la maquinaria, las cuales van más allá de la reparación o el reemplazo de piezas y componentes.

En adición, Martínez y Martínez⁶¹ realizan énfasis en que el mantenimiento preventivo se encarga de identificar y tratar las causas de fallos y no los fallos en sí mismos, además, usan como vías de acción la medición de variables operativas para realizar un análisis diagnóstico que les permita conocer el estado de la maquinaria y esos posibles puntos críticos que puedan convertirse en un problema. No hay que dejar de lado que existen diferentes técnicas de análisis como termografías o ultrasonidos, entre otros, sin embargo, una de las técnicas más destacadas y usadas en la industria es el análisis de vibraciones, razón por la cual se orienta este trabajo al banco de simulación para vibraciones mecánicas.

2.4. MARCO NORMATIVO

El marco normativo de este trabajo se divide en dos partes. Primero, la normatividad a nivel nacional que soporta y regula la educación superior en el país, y luego, la normatividad relacionada con vibraciones, análisis y monitoreo, así como la gestión de mantenimiento de maquinaria. A continuación, se relacionan:

- Ley 30 de 1992⁶² es una ley que regula el servicio público de la educación superior en específico. Según se describe, la educación superior debe propender por la calidad educativa, la profundización de la formación integral y el desarrollo de competencias y habilidades científicas, técnicas e investigativas necesarias para la vida profesional.
- Ley 115 de 1994⁶³ también conocida como Ley General de Educación, la cual regula el servicio público de la educación y se regula tanto la educación informal como la formal en todos sus niveles. Se establece como parte de los fines educativos el pleno desarrollo de los individuos, la formación de calidad y que

⁶⁰WHITE, Op., Cit., p. 55.

⁶¹MARTÍNEZ, Luis Lezáun y MARTÍNEZ, Francisco Javier. Mantenimiento: algunas consideraciones sobre el análisis de vibraciones en máquinas rotativas. En: *Revista Dyna*. Enero-Febrero 2000.

⁶²COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 30 (20 de diciembre de 1992). Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior. En: Diario Oficial. Diciembre, 1992. Nro. 40.700.

⁶³COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 115 (de febrero 8 de 1994). Por la cual se expide la ley general de educación. En: Diario Oficial. Febrero, 1994. Nro. 41.214.

garantice la participación de las personas en la sociedad, la adquisición y la generación de conocimiento científico y técnico, y la formación en la práctica de trabajo como fundamento de un desarrollo integral, entre otros aspectos. También define y organiza el sector y la prestación del servicio.

- ISO 10816: 2005⁶⁴, se trata de una norma técnica donde se brindan orientaciones generales y procedimientos sobre vibraciones mecánicas, mediciones en partes no rotatorias y en partes no reciprocantes, y evaluación. No incluye consideraciones sobre vibraciones torsionales.
- ISO 2041:2009⁶⁵, brinda vocabulario esencial para efectos de estandarización sobre vibraciones mecánicas, golpes y condiciones de monitoreo.
- ISO 13881: 2015⁶⁶, se orienta en las condiciones de monitoreo y diagnóstico de máquinas brindando directrices generales. Incluye orientaciones sobre desarrollo y aplicación de pronósticos, incluyendo la determinación de datos, características, procesos y comportamientos para lograr precisión. Se presentan conceptos y enfoques claves.
- ISO 13373:2015⁶⁷, brinda orientaciones y guía para condiciones de monitoreo y diagnóstico de vibración en máquinas, pero realiza énfasis en el proceso de diagnóstico.

⁶⁴ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Mechanical vibration -Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -Part 1: General Guidelines. ISO 10816:2005. Geneve, Suiza, ISO, 1995, 26 p.

⁶⁵ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION, Op., Cit., p 1.

⁶⁶ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Condition monitoring and diagnostics of machines -Prognostics -Part 1: General Guidelines. ISO 13381:2015. Geneve, Suiza, ISO, 2015, 21 p.

⁶⁷ INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Condition monitoring and diagnostics of machines -Vibration condition monitoring -Part 3: Guidelines for vibration diagnosis. ISO 13373:2015. Geneve, Suiza, ISO, 2015, 36 p.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Para efectos de este trabajo se seleccionó un tipo de **investigación aplicada** debido a que su implementación ha permitido no solo cumplir con los objetivos planteados, sino que sus finalidades también comparten la preocupación de los autores frente a la necesidad de integrar la teoría con la práctica en programas de Ingeniería y de proporcionar una formación profesional sólida con habilidades esenciales de diseño, instrumentación, planificación de experimentos, investigación y resolución de problemas reales.⁶⁸

De acuerdo con Vargas⁶⁹, la investigación aplicada, tal como su nombre lo sugiere, busca aplicar o utilizar los conocimientos aprendidos previamente para conducir proyectos o trabajos investigativos de manera sistemática y rigurosa con el propósito de ponerlos en práctica para intervenir y solucionar problemas de la vida cotidiana. En ese sentido, sus bases se fundamentan en las relaciones dicotómicas entre “saber - hacer”, “conocimiento - práctica”, y “explicación – aplicación”. Luego, es de gran relevancia destacar que aunque se diferencia de la investigación básica, depende de esta debido a que es la que proporciona el marco teórico, conceptual y legal que soporta la aplicación.

3.2. FASES DEL PROYECTO

Considerando los objetivos del trabajo, se planteó una metodología secuencial que iniciaba con la revisión de literatura y de antecedentes de investigación, para continuar con el diseño del banco de prueba y finalizar con su construcción. En ese orden de ideas, a continuación, se describen cada una de las 6 fases definidas para el desarrollo del trabajo:

- I. **Planteamiento de problema y revisión de la propuesta:** Se realizó un análisis a profundidad de la idea de proyecto para describir y delimitar el problema de investigación. Lo anterior, implicó la una revisión preliminar de literatura, así como la exploración de las necesidades del escenario en el cual se enmarca el proyecto, es decir, la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja.
- II. **Revisión de literatura y planteamiento de objetivos:** se llevó a cabo una revisión de literatura de manera exhaustiva para construir el marco referencial del trabajo, lo cual incluye los antecedentes, el marco teórico, el marco conceptual y el marco normativo. En cuanto a los antecedentes, se realizó el rastreo de otros trabajos académicos e investigativos enfocados en

⁶⁸ CASTELLANOS, Javier Mauricio y CARREÑO, Ariel Rene. Proyectos de Investigación Aplicada para el desarrollo de competencias en estudiantes de Ingeniería. En: *El Hombre y la Máquina*. Mayo-Diciembre, 2013, no. 42-43, p. 73-81.

⁶⁹ VARGAS, Zoila Rosa. La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. En: *Educación*. 2009, vol. 33, no. 1, p. 155-165.

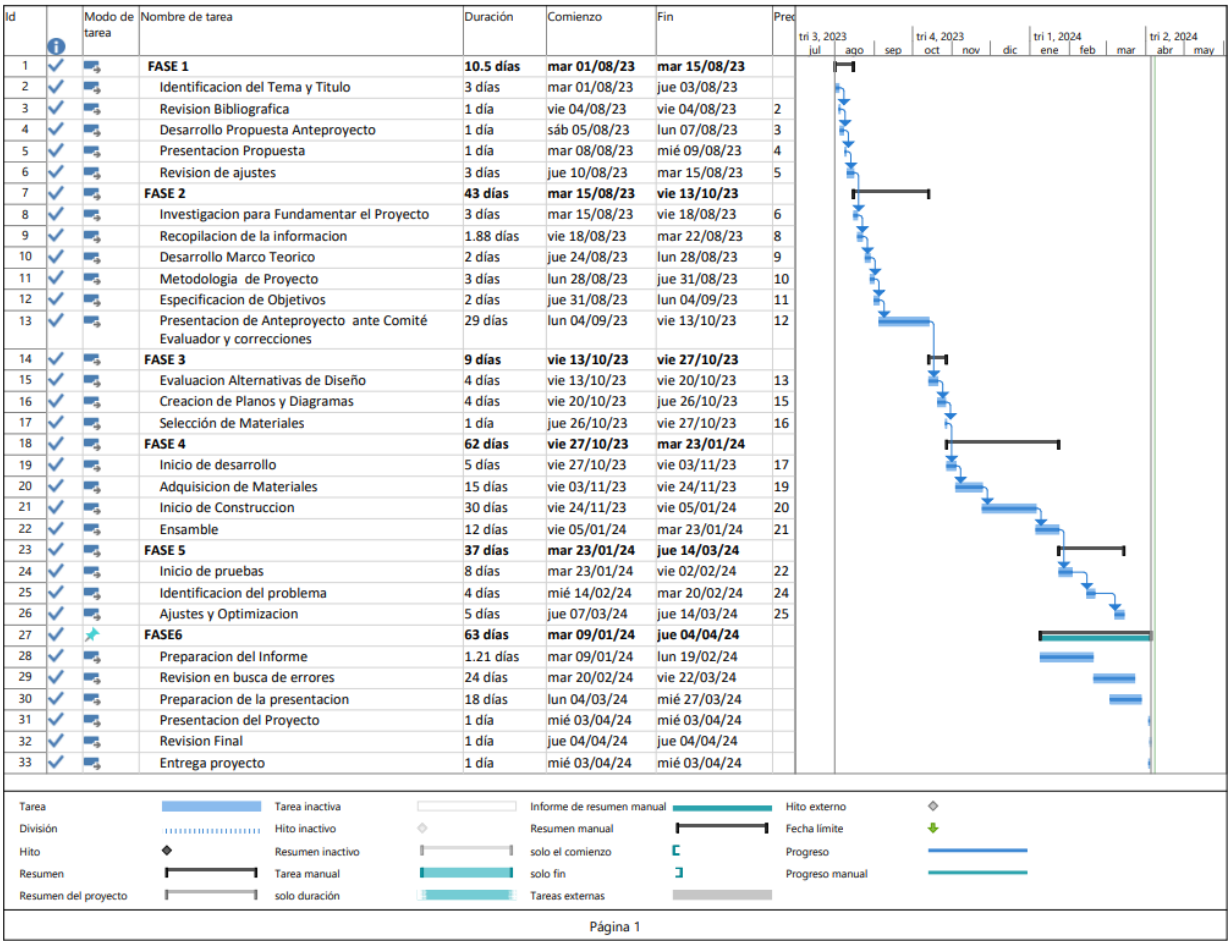
el diseño y construcción de bancos de simulación (o pruebas) para analizar vibraciones mecánicas, especialmente, en instituciones de educación superior para fines didácticos. Luego, algunas categorías temáticas para la elaboración de los marcos incluyeron vibraciones mecánicas y su análisis como técnica, el mantenimiento y el mantenimiento preventivo. Por último, junto con la delimitación del problema de estudio y la revisión del estado del arte, se dio paso al planteamiento de los objetivos.

- III. **Propuesta de diseño, ejecución de cálculos y modelado en software CAD:** a partir de la revisión de literatura, especialmente de los antecedentes, se construyó una propuesta de diseño estructural y mecánico para el banco de simulación para vibraciones y se realizaron los cálculos necesarios, lo cual permitió determinar las especificaciones técnicas para su construcción. En esta fase, se incluyó el modelado 3D del diseño usando CAD (Diseño Asistido por Computadora) para crear los planos que guiaron la su construcción en etapas posteriores.
- IV. **Construcción y ensamblaje:** en esta fase, fue necesario adquirir los materiales y componentes necesarios para la construcción del banco de simulaciones de acuerdo con las especificaciones y el diseño predefinido. Asimismo, se procedió con su fabricación y ensamblaje tomando como soporte los planos desarrollados en la fase de diseño. Cabe mencionar, que en esta fase se documentó todo el paso a paso y se registraron todos los costos en los que se incurrió.
- V. **Pruebas de funcionamiento** Una vez construido el banco, se procedió a realizar y simular pruebas para validar su funcionamiento y precisión operativa en relación con la simulación de vibraciones mecánicas. De esta manera, se brindan garantías de fiabilidad y validez para ser incorporado en prácticas académicas e investigativas.
- VI. **Presentación y evaluación:** se refiere a la presentación de los resultados ante un comité académico, lo que incluye la documentación de todo el proceso de diseño y construcción, así como la evidencia que da cuenta del producto final, es decir, el banco de simulación de vibraciones.

3.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la Tabla 3 se presenta el cronograma de trabajo. El diagrama de Gantt fue elaborado con Microsoft Project, y como se observa, se distinguen las 6 fases descritas en la metodología.

Tabla 3. Cronograma de actividades



Fuente: Autor.

3.4. PRESUPUESTO

Ahora bien, en la Figura 5 se presenta una visión general de los recursos que fueron necesarios para desarrollar este proyecto, y en la Figura 6, se muestra una síntesis de los costos generales en los que se incurrió.

Figura 5. Visión general de los recursos usados en el proyecto



Fuente: Autor.

Figura 6. Información general sobre los costos del proyecto



Fuente: Autor.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

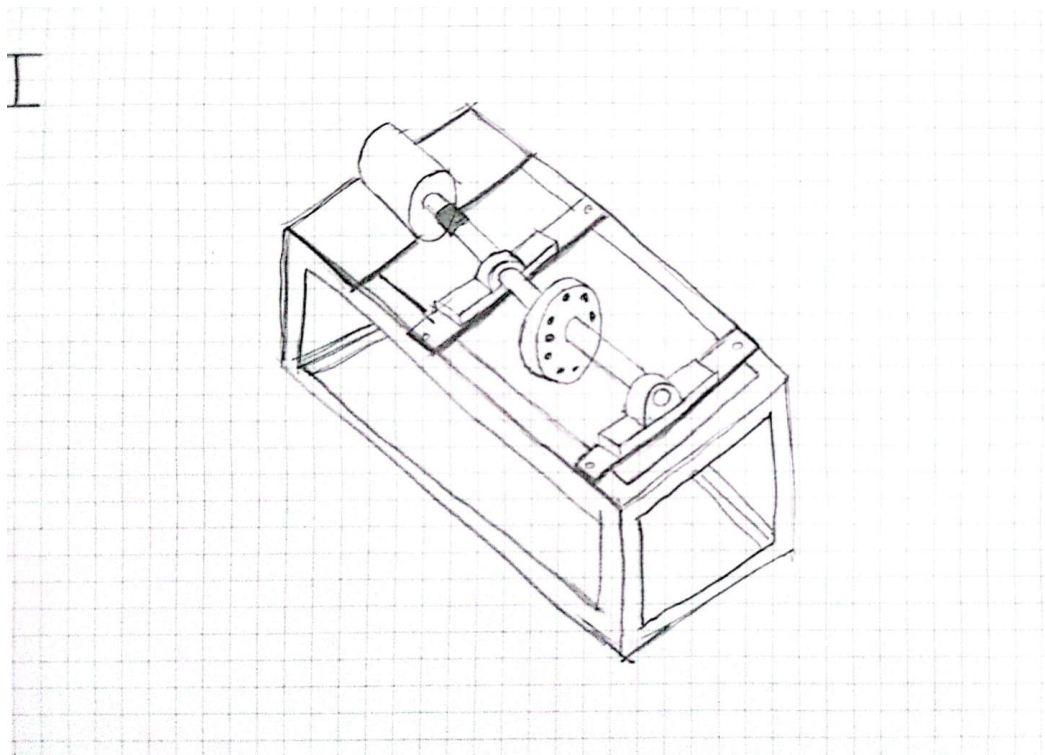
4.1. DISEÑO, CÁLCULOS Y ESPECIFICACIONES DEL BANCO DE SIMULACIONES

4.1.1. Propuestas de diseño, matriz de decisión, selección y cálculos

En esta sección, se presentan tres (3) propuestas de diseño mecánico para el banco de simulaciones a construir. Por una parte, la revisión de literatura y antecedentes fue fundamental para poder identificar los aspectos de diseño más relevantes, así como las diferentes configuraciones de la parte mecánica que pueden tener los bancos que se usan para análisis de vibraciones y rotaciones. Luego, los bocetos constituyen evidencia de las opciones de diseño con las mejores cualidades que fueron consideradas por los autores antes de seleccionar un diseño definitivo.

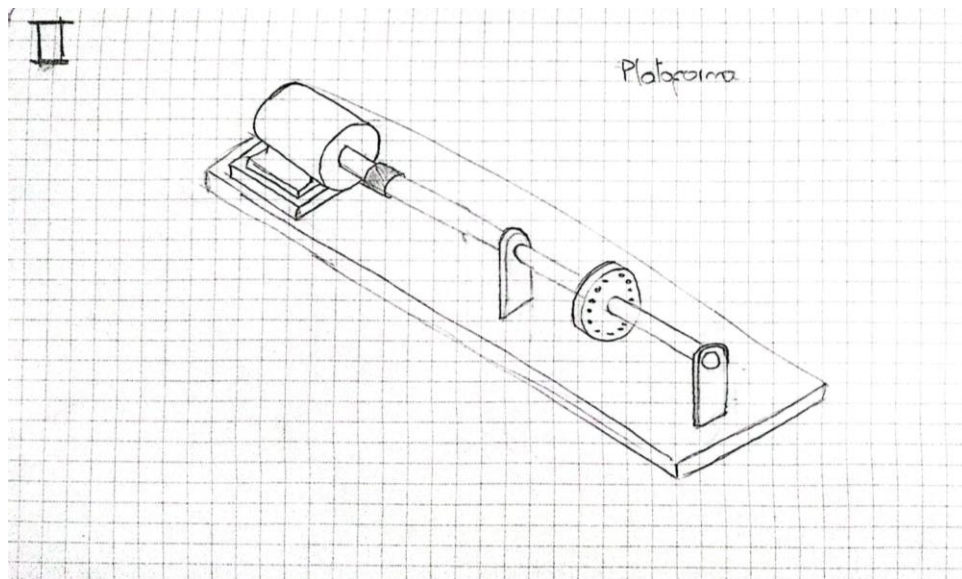
En las Figuras 7-9 se presentan las tres opciones, el primero, comprende el diseño de un banco con doble chumacera, el segundo, es un banco con doble chumacera sobre una plataforma ligera, y el tercero, corresponde a un banco con volante de masas variables en voladizo.

Figura 7. Propuesta de diseño 1, boceto de un banco con doble chumacera



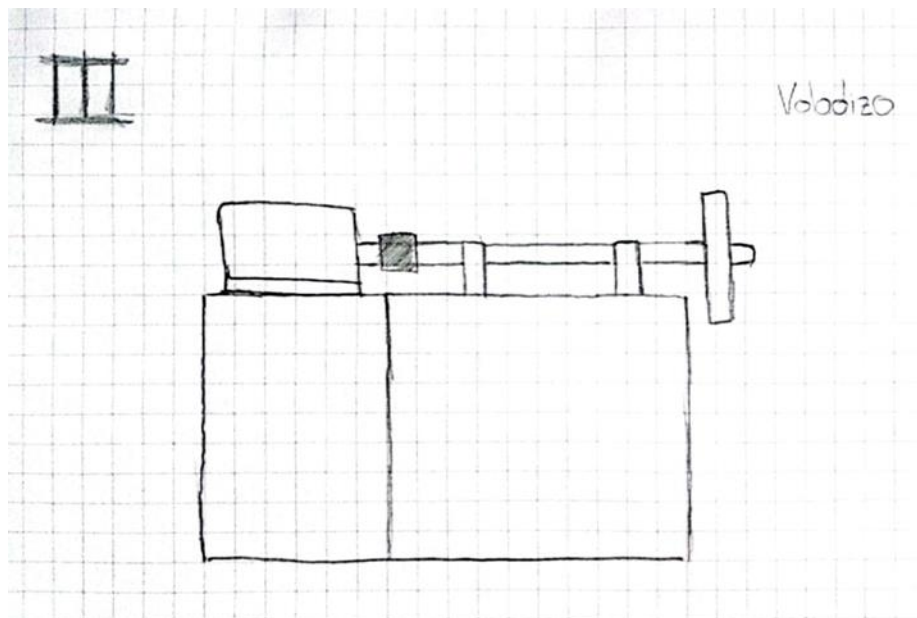
Fuente: Autor.

Figura 8. Propuesta de diseño 2, boceto de un banco con doble chumacera y plataforma ligera



Fuente: Autor.

Figura 9. Propuesta de diseño 3, boceto de un banco con volante de masas variables en voladizo



Fuente: Autor.

- **Matriz de decisión.**

- **Especificaciones de los Bocetos.**

1. **Propuesta de diseño 1:** Boceto de un banco con doble chumacera.
2. **Propuesta de diseño 2:** Boceto de un banco con doble chumacera y plataforma ligera.
3. **Propuesta de diseño 3:** Boceto de un banco con volante de masas variables en voladizo.

- **Criterios de Evaluación**

Para evaluar estos bocetos, consideramos los siguientes criterios:

1. **Estética:** Apariencia y diseño visual.
2. **Funcionalidad:** Comodidad y ergonomía.
3. **Costo:** Precio de fabricación.
4. **Durabilidad:** Resistencia(materials) y vida útil.
5. **Sostenibilidad:** Impacto ambiental y uso de materiales ecológicos.

- **Ponderaciones de los Criterios**

- Estética: 20%
- Funcionalidad: 20%
- Costo: 20%
- Durabilidad: 30%
- Sostenibilidad: 10%

- **Evaluación de los Bocetos**

Asignamos una puntuación del 1 al 5 para cada criterio en cada boceto.

- ✓ **Boceto 1: Banco con doble chumacera**

- Estética: 5
- Funcionalidad: 5
- Costo: 4

- Durabilidad: 4
 - Sostenibilidad: 3
- ✓ **Boceto 2: Banco con doble chumacera y plataforma ligera**
- Estética: 3
 - Funcionalidad: 3
 - Costo: 5
 - Durabilidad: 4
 - Sostenibilidad: 3
- ✓ **Boceto 3: Banco con volante de masas variables en voladizo**
- Estética: 3
 - Funcionalidad: 2
 - Costo: 4
 - Durabilidad: 3
 - Sostenibilidad: 3

Tabla 4. Matriz de decisión.

			Porcentaje%			
		Estetica	20%			
		Funcionalidad	20%			
		Costo	20%			
		Durabilidad	30%			
		Sotenibilidad	10%			
	Estetica 20%	Funcionalidad 20%	Costo 20%	Durabilidad 30%	Sostenibilidad 10%	Puntuacion final
Boceto 1	5(1.0)	5(1.0)	4(0.8)	4(1.2)	3(0.3)	4.3
Boceto 2	3(0.6)	3(0.6)	5(1.0)	4(1.2)	3(0.3)	3.7
Boceto 3	3(0.6)	2(0.4)	4(0.8)	3(0.9)	3(0.3)	3.0

Fuente: Autor.

Análisis de Resultados

1. **Boceto 1 (Doble chumacera):** Puntuación total = 4.3
2. **Boceto 2 (Doble chumacera y plataforma ligera):** Puntuación total = 3.7
3. **Boceto 3 (Volante de masas variables en voladizo):** Puntuación total = 3.0

Basado en la matriz de decisión, el Boceto 1, (Boceto de un banco con doble chumacera) obtiene la puntuación más alta (4.3), lo que sugiere que es la mejor opción considerando los criterios evaluados.

Teniendo en cuenta las propuestas y matriz de decisión del diseño, se optó por seleccionar el boceto 1 que corresponde a un banco de simulaciones con doble chumacera, el cual, estructuralmente, se incorpora sobre un rodamiento y cuenta con conexión directa al motor, además, el conjunto se apoya en un marco con dos rodamientos de soporte que permiten un ligero giro del eje. Así pues, a continuación, se describen con mayor detalle las razones que llevaron a realizar la selección de la propuesta de diseño 1, siendo estas:

- **La reproducción realista de condiciones operativas.** La conexión directa entre el motor y el banco de simulaciones sobre el rodamiento garantiza una reproducción más fiel de las condiciones operativas reales. Este enfoque minimiza las pérdidas de energía y permite una transmisión eficiente de las vibraciones generadas, lo que se traduce en simulaciones más precisas y representativas de las simulaciones en diferentes contextos de análisis.
- **La flexibilidad y capacidad de adaptación del sistema en la simulación de cargas y tensiones.** La inclusión de dos rodamientos de apoyo en el marco proporciona una flexibilidad adicional al sistema e incrementa su capacidad de adaptabilidad al permitir un ligero giro del eje, puesto que a partir de ello ofrece la posibilidad de simular una gran variedad de condiciones de carga y tensión. Lo anterior resulta esencial para investigaciones que buscan analizar y evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operativos en el ámbito académico o de investigación.
- **Una menor influencia de fricciones indeseadas.** La conexión directa entre el motor y el banco de simulaciones sobre un rodamiento reduce las fuentes potenciales de fricción no deseada. La eliminación o minimización de estas fricciones contribuye a una respuesta más precisa del sistema a las vibraciones inducidas, evitando así, distorsiones que podrían afectar negativamente la validez de los resultados de la simulación.
- **La eficiencia energética y su estabilidad.** La estructura sobre rodamiento junto con los apoyos giratorios promueve una mayor eficiencia energética al reducir las pérdidas por fricción y permitir un rendimiento más estable durante las pruebas. Esto no solo optimiza el consumo de energía, sino que también contribuye a la

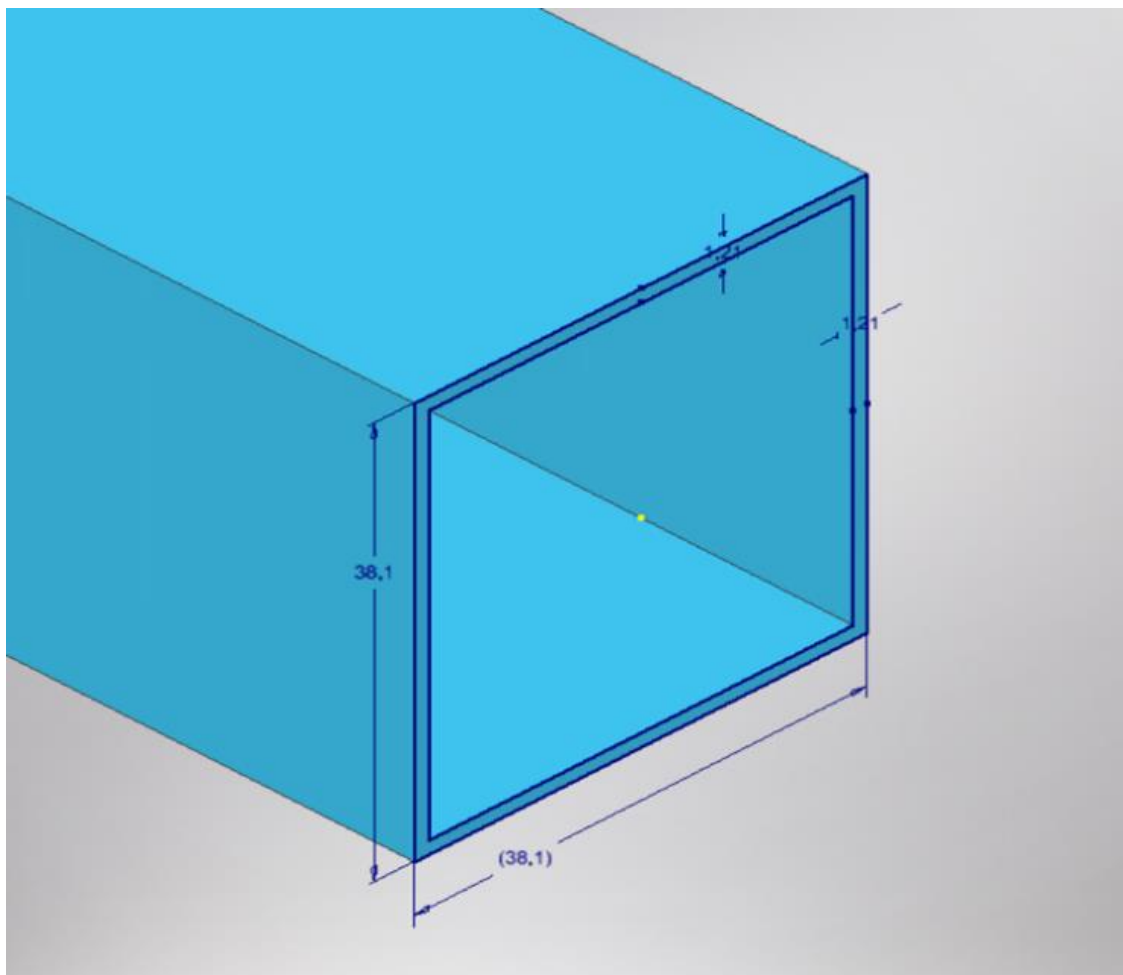
consistencia y confiabilidad de las mediciones realizadas en el banco de simulación de vibraciones.

4.1.2. Planos estructurales del banco de prueba

En esta sección se muestran los planos estructurales del banco y de sus componentes, los cuales fueron elaborados usando Autodesk Inventor Professional 2024, así como los cálculos que se realizaron.

En primer lugar, se adoptó como material de trabajo para la estructura los tubos cuadrados de referencia HR50⁷⁰ hechos en acero, con perfil de 1 ½ pulgadas y un espesor de 1.21 mm como se ilustra en la Figura 10 en seguida.

Figura 10. Material de la estructura

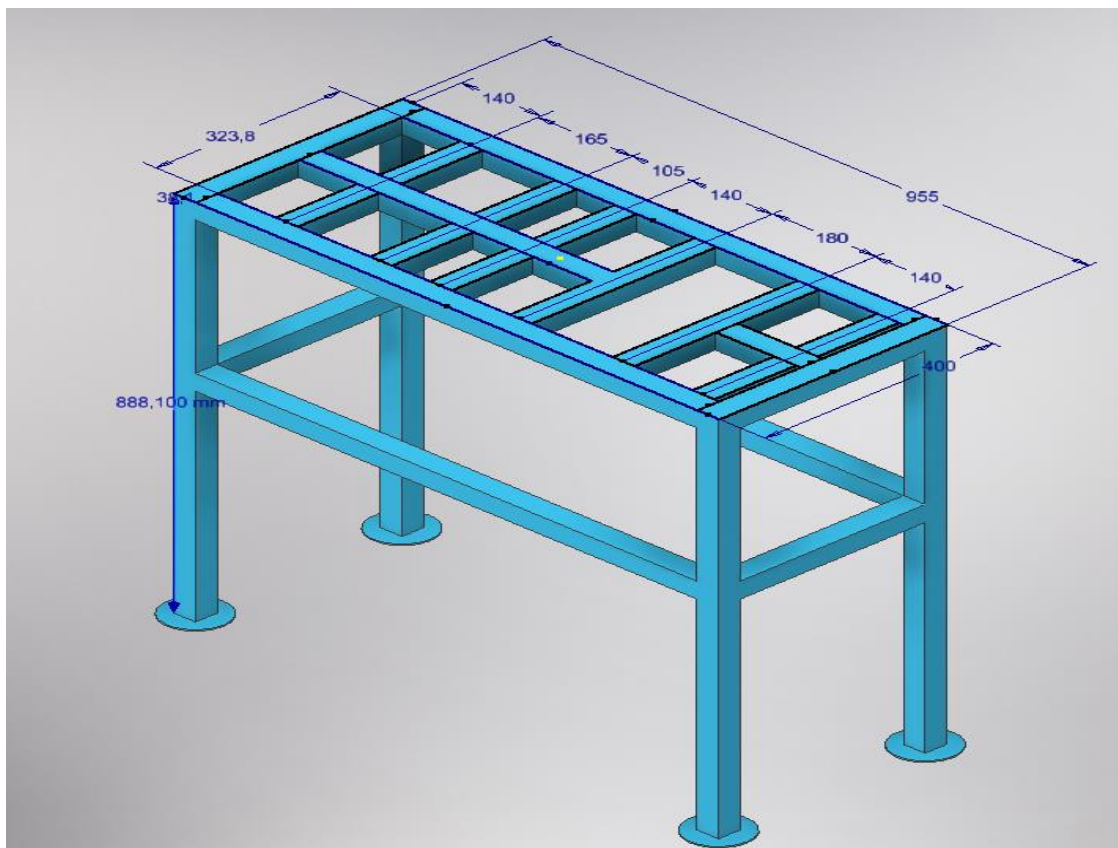


⁷⁰ Información tomada del catálogo de Homecenter.

Fuente: Autor.

Ahora, la estructura tiene un tamaño de 40cm de ancho, 83cm de altura y 95.5cm de largo. Cabe destacar que sus dimensiones se establecieron con el propósito garantizar accesibilidad y comodidad para la gran mayoría de personas durante su operación y manipulación de todos los componentes móviles que lo conforman. En la Figura 11, se muestra el isométrico del perfil correspondiente a la construcción del banco de pruebas.

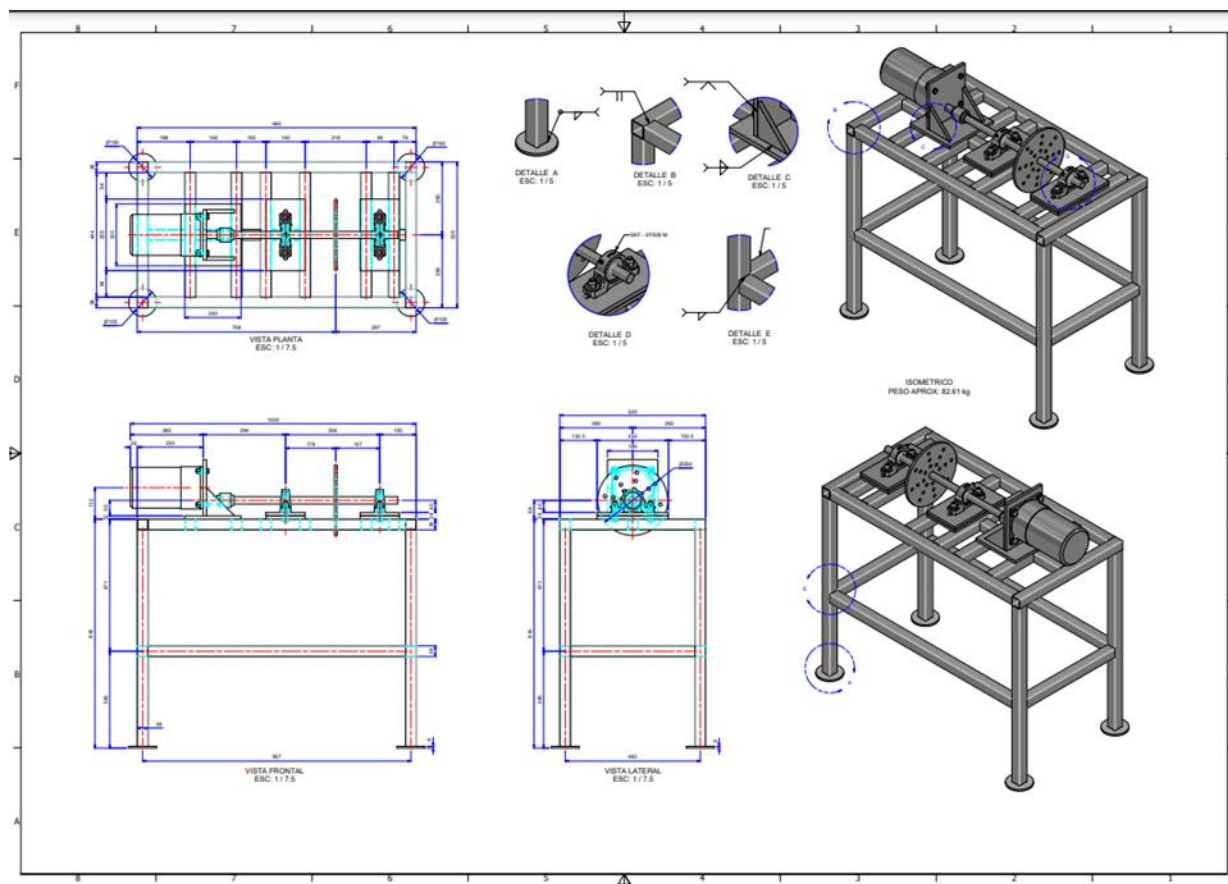
Figura 11. Plano del soporte estructural del banco



Fuente: Autor.

En la Figura 12, se muestra el isométrico estructural del banco después de ensamblar los diferentes componentes sobre el soporte principal.

Figura 12. Isométricos del banco de pruebas ensamblado

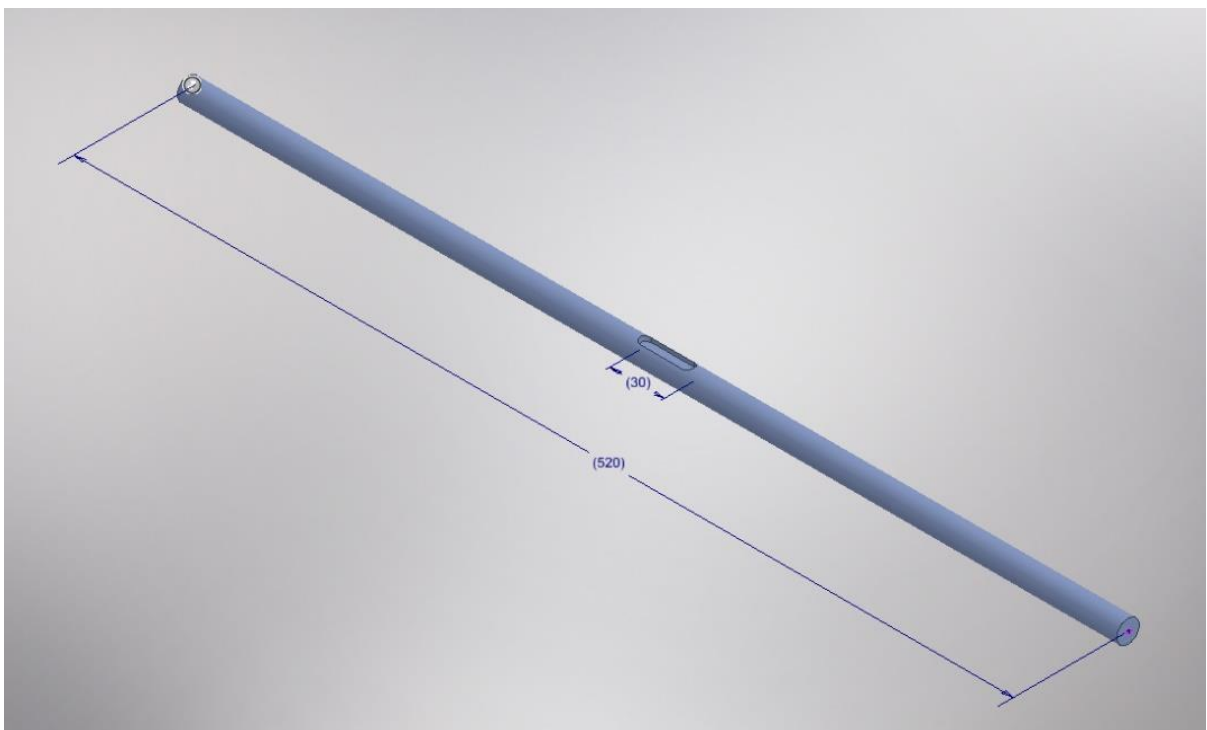


Fuente: Auto.

4.1.2.1. Eje del banco

El diseño del eje se elaboró con la herramienta *Design Accelerator* de *Autodesk Inventor Professional 2024*, pues ésta facilita la creación, los ensamblajes y los cálculos que se requieren para ello (Figuras 13).

Figura 13. Plano del eje con las ranuras de acople



Fuente: Autor.

Con respecto a la creación de ejes en *Design Accelerator*, vale la pena mencionar que es posible generar un cálculo efectivo y rápido de estos añadiendo los valores del material que se ha elegido, en este caso acero 4340, el cual es común y es efectivo para la fabricación de ejes. El programa permite poner los apoyos en la ubicación que se desee, además de contar con la opción de añadir fuerzas y pares de torsión que mejoran la calidad del cálculo.

Para el diseño del eje se requirieron varios factores iniciales que son fundamentales para su diseño, modelado y fabricación, siendo estos: el tipo de material, la cantidad de apoyos

y la información de la ficha técnica del motor. En la Tabla 4, se presentan las características principales del material y del motor.

Tabla 5. Factores iniciales y especificaciones requeridas para el diseño del eje

Factor	Descripción
Material	Acero 4340
Motor	Gear Motor – Mitsubishi de 0.4 Hp. Con Velocidad de 230 a 278 rpm. Velocidad prom: 254rpm Potencia: 0.3kW Torque: 0.0112 Nm Diámetro Flecha de salida: 5/8"

Fuente: Autor.

Con respecto al material, se seleccionó el acero 4340 debido a que se caracteriza por una alta solidez, una buena tenacidad, resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga. En la Tabla 5 se amplían sus propiedades.

Tabla 6. Propiedades del Acero 4340

Estado del suministro	Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Límite elástico (kg/mm ²)	Alargamiento (%)	Reducción de área (%)	Dureza Brinell HB
Laminado en caliente	65/75	44	20	50	210/240
Calibrado	75/85	63	10	30	240/260
Bonificado	85/100	78	16	45	260/320

Fuente: Cía. General de Aceros, 2020.

Cabe señalar, que, para la selección del material, se procedió a determinar si este material era adecuado o no para el tipo de maquina a construir. Entonces, se realizaron los siguientes cálculos:

1. El torque (o momento de torsión) producido por un motor se calculó usando la Ecuación 2 (Ec. 2).

$$\text{Torque: } \frac{\text{Potencia (en vatios)}}{2\pi \times \text{Velocidad angular (en } \frac{\text{rad}}{\text{s}})} \quad \text{Ec. 2}$$

Para convertir la potencia de HP a vatios, utilizamos su factor de conversión, el cual es de 1 HP=745.7 vatios. Así pues, primero convertimos la potencia de 0.4 HP a vatios:

$$\text{Potencia} = 0,4 * 745,7 \text{ vatios} = 298,3 \text{ vatios}$$

Luego, se realizó la conversión de la velocidad angular de RPM a radianes por segundo:

$$\text{Velocidad angular (} \frac{\text{rad}}{\text{s}}) = \frac{\text{Velocidad angular (en RPM)} \times 2\pi}{60}$$

$$\text{Velocidad angular (} \frac{\text{rad}}{\text{s}}) = \frac{254 \times 2\pi}{60} = 26,6 \text{ rad/s}$$

Con base a los resultados anteriores, se calculó finalmente el torque producido por el motor aplicando la Ec. 2:

$$\tau = \frac{298.3 \text{ vatios}}{2\pi \times 26.6 \text{ rad/s}} = \frac{298.28}{166.76} = 1,79 \text{ Nm}$$

En consecuencia, el torque estimado que es producido por el motor en el eje es de aproximadamente 1.79 Nm.

Tomando como punto de referencia este resultado y determinar si el material seleccionado, un acero 4340 con una longitud de 52 cm y un diámetro de 2,54 cm, podía soportar la magnitud del torque, se procedió a calcular la tensión en el material y a compararla con la resistencia a la tracción del acero 4340. Para ello, primero se calculó el radio del eje: si el diámetro era de 2,54 cm, el radio sería la mitad, o sea, 0,0127 m. Seguidamente, se calculó la tensión en el material utilizando la fórmula para el momento torsor τ (Ec. 3) que se presenta a continuación:

$$\tau = T \cdot \frac{\pi}{2} \cdot r^3 \cdot L \quad \text{Ec. 3}$$

Despejando la tensión T y sustituyendo los valores correspondientes:

$$T = \frac{2 \cdot \tau}{\pi \cdot r^3 \cdot L}$$

$$T = \frac{2 \cdot 1,79}{\pi * (0,0127)^3 * 0,52}$$

$$T = \frac{3,58}{\pi \cdot (0,00000008499) \cdot 0,52} = 26967327,15 \text{ Pa}$$

La tracción típica del acero 4340 suele ser alrededor de 75 Kg/mm² y en pascales nos da 735498750 Pa. Si se compara con el valor obtenido de la tensión calculada, se observa que la tensión es menor a la tracción del material, por lo cual se evidencia que el eje debería ser capaz de soportar el torque producido por el motor en el banco de simulaciones.

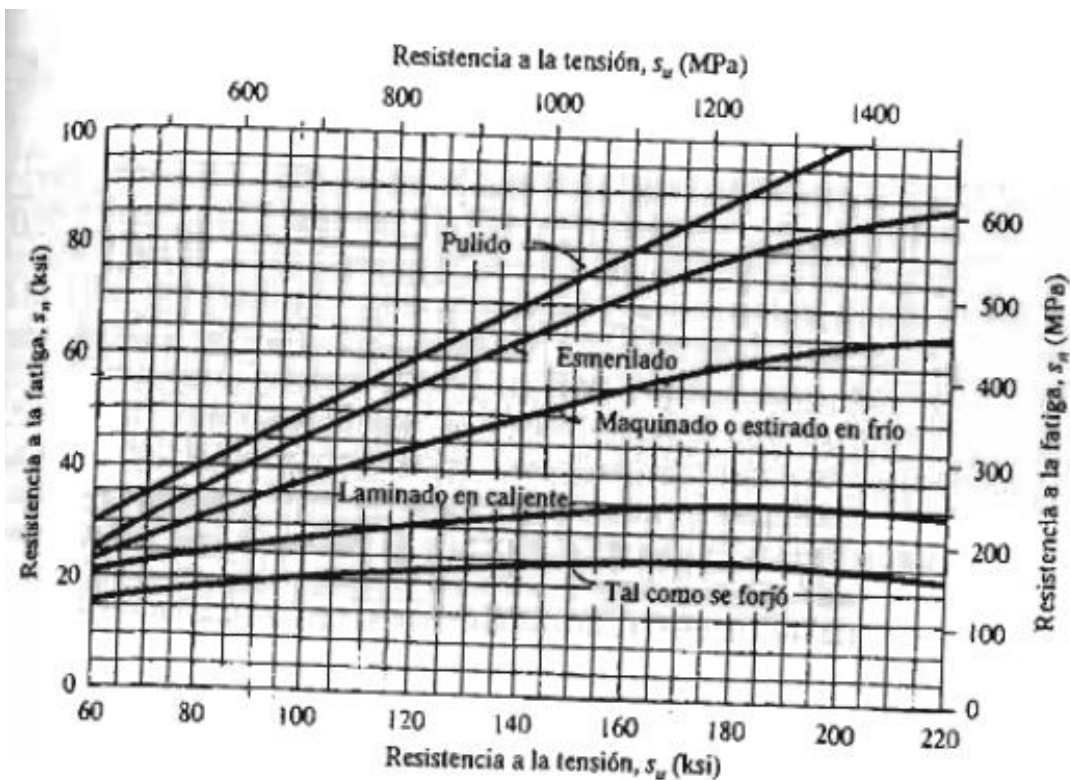
Por otra parte, para el diseño del eje se usó la ecuación 1 referenciada en el marco teórico. Siguiendo a Mott, el valor del factor de diseño N fue de 2, pues este representa elementos de máquinas con bajas cargas dinámicas. Asimismo, el valor de la resistencia a la fatiga, vital a la hora de calcular el diámetro real del eje, se calculó con la siguiente ecuación:

$$S'_n = S_n(C_m)(C_{st})(C_r)(C_s) \quad Ec. 4$$

Donde C_m es el factor de material, C_{st} : es el factor de tipo de esfuerzo, C_r es el factor de confiabilidad y C_s es el factor de tamaño.

También se tuvo presente el costo que podría tener un proceso de maquinado que daría mayor resistencia a la fatiga. Dicho lo anterior, la resistencia a la fatiga aproximadamente de 20ksi de acuerdo con la gráfica de la Figura 14.

Figura 14. Grafica de resistencia a la fatiga en función de la resistencia a la tensión y el material



Fuente: Tomado de Mott, 2006.

Otros valores definidos fueron $C_m = 1$ para aceros forjados, $C_{st} = 1$ para esfuerzos flexionantes, factor de confiabilidad se utiliza del 0.99 con un valor de factor de $C_r = 0.81$ según la Tabla 6.

Tabla 7. Rango de tamaño de D y otras variables

Unidades del Sistema Estadounidense Tradicional	
Rango de tamaño	Para D en pulgadas
$D \leq 0.30$	$C_s = 1.0$
$0.30 < D \leq 2.0$	$C_s = \left(\frac{D}{0.3}\right)^{-0.11}$
$2.0 < D < 10.0$	$C_s = 0.859 - 0.02125D$
Unidades SI	
Rango de tamaño	Para D en mm
$D \leq 7.62$	$C_s = 1.0$

$7.62 < D \leq 50$	$C_s = \left(\frac{D}{7.62}\right)^{-0.11}$
$50 < D < 250$	$C_s = 0.859 - 0.000837D$

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

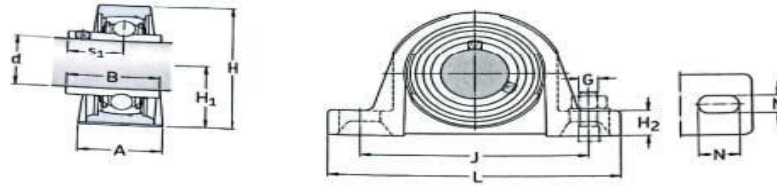
Se estima que los ejes tendrán un rango de diámetro entre $0.30 < D < 2.0$ pulgadas, por lo cual, para realizar el cálculo se empleó una medida máxima de 2.0 pulgadas y $C_s=0.81$. Por último, considerando que los factores y la resistencia a la fatiga ya están calculados, se procedió a reemplazar estos valores en la fórmula de la resistencia a la fatiga real (S_n') = 13122psi.

4.1.2.2. Las chumaceras

Una chumacera (también conocida como soporte de cojinete o rodamiento) es un componente mecánico utilizado para soportar y guiar un eje rotativo; pueden tener diferentes diseños y tamaños dependiendo de la aplicación específica para la que se requiera. Dicho esto, se seleccionaron dos chumaceras de 1 pulgada, cuyas características se señalan en la Figura 15.

Figura 15. Dimensiones y características de las chumaceras

**Soportes de pie con rodamientos Y para altas temperaturas
y ejes en pulgadas
d 3/4 - 2 7/16 pulg**



Dimensiones														Capacidad de carga estática C ₀	Masa	Designaciones Unidad de rodamiento Y con jaula de chapa de acero	
d	A	B	H	H ₁	H ₂	J	L	N	N ₁	G	s ₁			kN	kg	—	jaula enteriza de grafito de tipo corona
pulg	mm																
3/4	32	31	64	33,3	14	97	127	20,5	11,5	10	18,3	6,55	0,57	SY 3/4 TF/VA201	SY 3/4 TF/VA228		
1	36	34,1	70	36,5	16	102	130	19,5	11,5	10	19,8	7,8	0,73	SY 1. TF/VA201	SY 1. TF/VA228		
1 3/16	40	38,1	82	42,9	17	117,5	152	23,5	14	12	22,2	11,2	1,10	SY 1.3/16 TF/VA201	SY 1.3/16 TF/VA228		
1 1/4	45	42,9	93	47,6	19	126	160	21	14	12	25,4	15,3	1,45	SY 1.1/4 TF/VA201	SY 1.1/4 TF/VA228		
1 7/16	45	42,9	93	47,6	19	126	160	21	14	12	25,4	15,3	1,45	SY 1.7/16 TF/VA201	SY 1.7/16 TF/VA228		
1 1/2	48	49,2	99	49,2	19	135,5	175	24,5	14	12	30,2	19	1,80	SY 1.1/2 TF/VA201	SY 1.1/2 TF/VA228		
1 11/16	48	49,2	107	54	20,6	143,5	187	22,5	14	12	30,2	21,6	2,2	SY 1.11/16 TF/VA201	SY 1.11/16 TF/VA228		
1 3/4	48	49,2	107	54	20,6	143,5	187	22,5	14	12	30,2	21,6	2,20	SY 1.3/4 TF/VA201	SY 1.3/4 TF/VA228		
1 15/16	54	51,6	114	57,2	22	157	203	26	18	16	32,6	23,2	2,70	SY 1.15/16 TF/VA201	SY 1.15/16 TF/VA228		
2	60	55,6	127	63,5	23,8	171,5	219	27,5	18	16	33,4	29	3,60	SY 2. TF/VA201	SY 2. TF/VA228		
2 1/16	60	55,6	127	63,5	23,8	171,5	219	27,5	18	16	33,4	29	3,55	SY 2.3/16 TF/VA201	SY 2.3/16 TF/VA228		
2 7/16	60	65,1	139,7	69,9	26	190,5	240	29	18	16	39,7	36	4,45	SY 2.7/16 TF/VA201	SY 2.7/16 TF/VA228		

Fuente: Catalogo General SKF.

Las chumacera seleccionadas son Chumacera UCP204 con soporte de banco para eje marca TransLink.⁷¹ Estas chumaceras estarán soportadas por dos estructuras de tubería cuadrada de tal manera que permita mantener el eje diseñado alineado con la flecha del motor, a su vez que facilita cierto grado de desajuste en el eje X para que el banco pueda funcionar en diferentes condiciones de operación y experimentación.

Las selecciones de la chumacera de 1 pulgada fueron por las siguientes especificaciones:

Capacidad de carga: Las chumaceras de 1 pulgada suelen tener una mayor capacidad de carga en comparación con otras opciones más pequeñas. Esto es crucial en un banco

⁷¹ Catálogo de la Corporación RST.

de medición de vibraciones, donde se pueden aplicar fuerzas y cargas variables durante las pruebas.

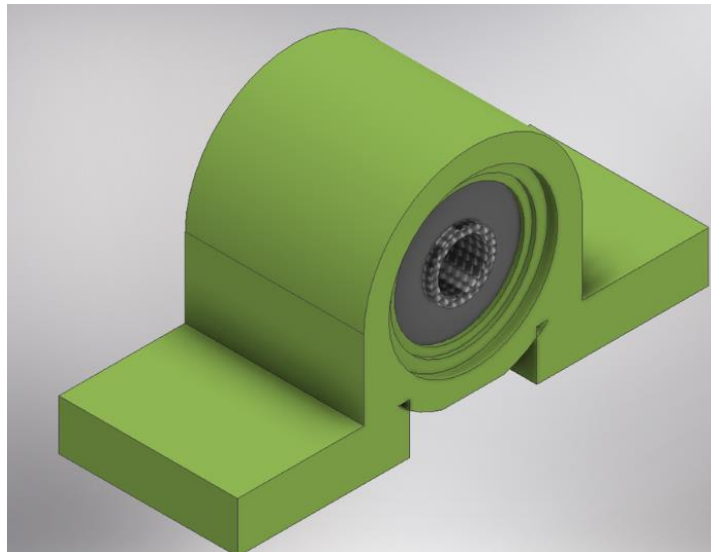
Estabilidad y resistencia: Las chumaceras de 1 pulgada tienden a ser más robustas y resistentes, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren estabilidad y resistencia a vibraciones intensas. En un banco de medición de vibraciones, es fundamental que las chumaceras sean capaces de soportar condiciones adversas sin comprometer la precisión de las mediciones.

Precisión: Las chumaceras de mayor tamaño, como las de 1 pulgada, ofrecen una mayor precisión en la alineación del eje y en la transmisión de movimientos. Esto es esencial en un banco de medición de vibraciones, donde incluso pequeñas desviaciones pueden afectar significativamente los resultados de las pruebas.

Compatibilidad con equipos de medición estándar: Las chumaceras de 1 pulgada suelen ser compatibles con una amplia gama de equipos de medición estándar utilizados en bancos de vibración, lo que facilita la integración y la interoperabilidad con otros componentes del sistema de medición.

En comparación con otras opciones de chumaceras más pequeñas, como las de 3/4 de pulgada o 1/2 de pulgada, las chumaceras de 1 pulgada ofrecen un equilibrio óptimo entre capacidad de carga, estabilidad, precisión y compatibilidad, lo que las convierte en la elección preferida para aplicaciones críticas como los bancos de medición de vibraciones.

Figura 16. Plano de la chumacera



Fuente: Autor.

4.1.2.3. Disco perforado

El disco perforado es una pieza fundamental del proyecto, en ella se van a ubicar agujeros pasantes lisos y/o roscados, lo cual permitirá manipular las condiciones de operación y experimentación usando masas.

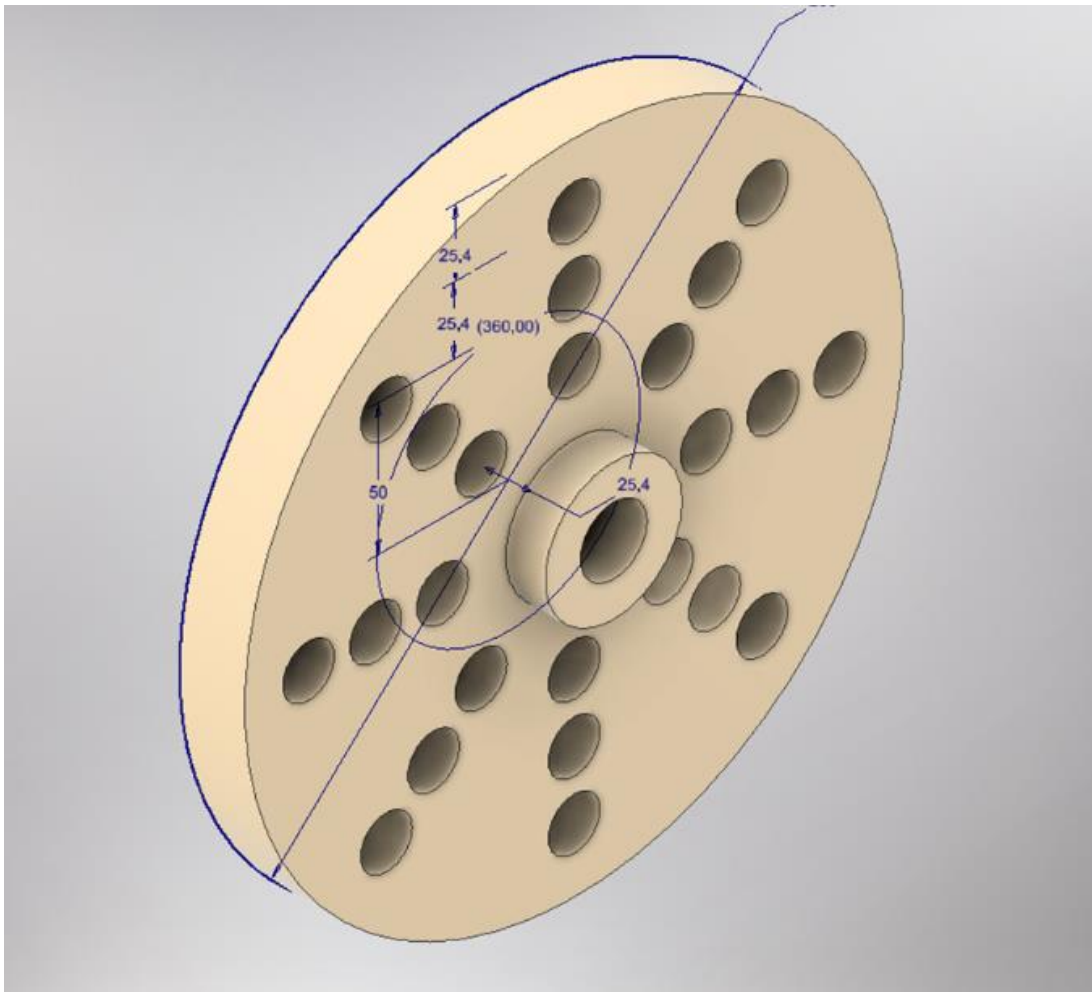
Algunos parámetros que se deben tener en cuenta para el funcionamiento y selección del disco son los siguientes:

- **Material del disco perforado:** El material del disco perforado debe ser lo suficientemente resistente para soportar el peso de los contrapesos y las vibraciones generadas, es por esta razón que se escogió el teflón, al ser un material baja fricción, resistencia a la corrosión, estabilidad dimensional y durabilidad, que pueden contribuir a mediciones precisas y confiables durante períodos prolongados de tiempo.
- **Dimensiones del disco:** Las dimensiones del disco perforado deben ser adecuadas para alojar los pesos necesarios y permitir un espacio suficiente para la vibración sin interferencias, es decir que no tenga ningún inconveniente o choque con alguna otra parte del banco
- **Diseño de los agujeros perforados:** Los agujeros perforados en el disco deben ser diseñados de manera que permitan la sujeción segura de los contrapesos y proporcionen una flexibilidad en las diferentes configuraciones a analizar, es por esta razón que los agujeros realizados dan un diámetro acorde a los contrapesos a usar en este caso se usaron tornillos milimétricos de 12 mm de diámetro y 25 mm de largo.
- **Equilibrado dinámico:** El tipo específico de equilibrio dinámico necesario para el disco en un banco de medición de vibraciones dependerá de varios factores, incluyendo la velocidad de rotación, el diseño del disco, las cargas aplicadas y los requisitos de precisión de las mediciones de vibración. Es importante realizar el equilibrio dinámico adecuado para garantizar mediciones precisas y evitar problemas como vibraciones excesivas, desgaste prematuro y daño al equipo.
- **Consideraciones de seguridad:** Asegúrate de que el diseño del disco y su instalación en el banco de pruebas cumplan con las normas de seguridad aplicables, para evitar posibles accidentes o daños en el banco.
- **Compatibilidad con la fijación de contrapesos:** La compatibilidad con la fijación de contrapesos, fue un factor que se tomó en cuenta para garantizar un equilibrio adecuado del disco y mediciones precisas y confiables de vibraciones en el banco de medición. Es importante seguir las especificaciones del fabricante y las mejores prácticas de ingeniería durante el diseño e instalación del disco y los contrapesos para garantizar un funcionamiento seguro y eficaz del sistema.
- **Tolerancias dimensionales:** Es esencial que las tolerancias dimensionales se definan claramente en las especificaciones de diseño del banco de vibraciones y que se verifiquen durante la fabricación, instalación y puesta en servicio del sistema. El incumplimiento de las tolerancias dimensionales puede afectar

negativamente la precisión y la confiabilidad de las pruebas de vibración realizadas en el banco, lo que podría conducir a resultados inexactos o no representativos

- **Normatividad para tener en cuenta:** ASME Boiler and Pressure Vessel Code (Su objetivo principal es garantizar la seguridad y la integridad de los equipos), ISO 10816 (proporciona pautas para la evaluación de la vibración de maquinaria industrial), ASTM E1012 (establece métodos para la evaluación de la sensibilidad y la exactitud de los instrumentos de medición de vibraciones)
- La pieza se conforma por un cilindro de teflón, seleccionado debido a su bajo costo y fácil maquinado, de un diámetro de 200mm y una altura de 25mm; cuenta con una perforación al centro de 22mm y su respectivo espacio para la chaveta a través de la cual se une al eje diseñado. Luego, en el área disco se realiza un trazo de 8 líneas distribuidas en forma de un octágono, cada línea posee 3 perforaciones, lo cual resulta en un total de 24 agujeros como se observa en la Figura 17.

Figura 17. Plano del disco perforado



Fuente: Autor.

La distribución de los agujeros se distribuye como sigue: del centro al primer agujero hay 25mm, y luego, cada agujero está separado entre centros del siguiente agujero, 20mm. Cada agujero tiene 12mm de diámetro, esta medida se usa para facilitar masas de diferente tipo que permitan generar la vibración de la máquina.

Finalmente, es preciso mencionar que para poder generar un desbalance en el banco durante las simulaciones se usarán masas, las cuales, por comodidad, serán tornillos de acero de diferente longitud, ya que permitirán un fácil armado en el momento de realizar un análisis o ensayo.

4.2. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLAJE DEL BANCO DE SIMULACIONES

La construcción y ensamblaje del banco inició con la fabricación del armazón o estructura de soporte para el cual se usó tubo metálico cuadrado de $\frac{1}{2}$ " calibre 18 siendo idóneo por su peso y tamaño. Asimismo, el banco fue soldado con electrodo 6013, el cual es común para este tipo de metales. Las evidencias de la construcción del banco se presentan en la Figura 18.

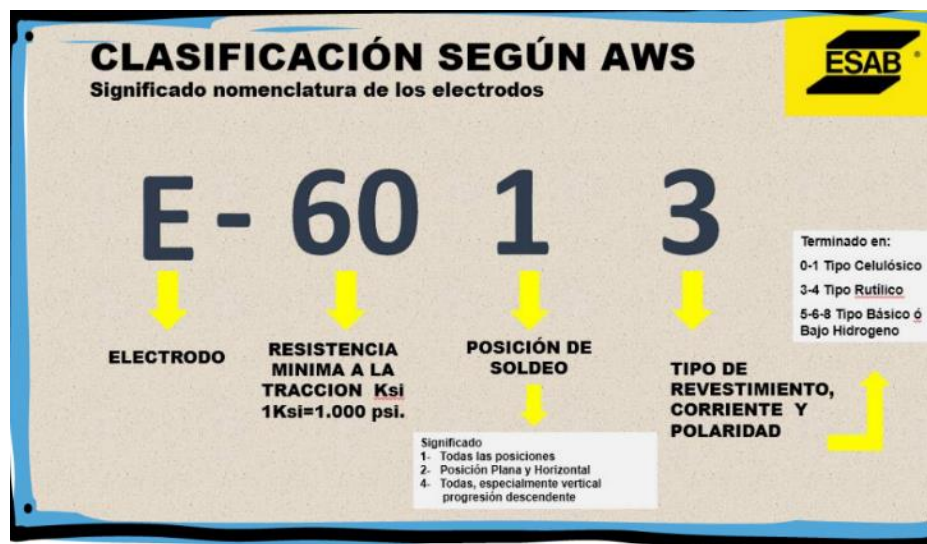
Figura 18. Registro fotográfico de la construcción del banco de simulaciones



Fuente: Autor.

Con respecto a la soldadura 6013, se indica que esta consiste en un tipo de soldadura de penetración profunda con rendimiento de arco suave y estable, la cual sirve para soldar en todas las posiciones, a su vez que es apta e idónea para metales y aceros. Tal como se observa en la Figura 19, este tipo de electrodo indica resistencia mínima a la tracción (30), soldadura en todas las posiciones (1), y un tipo de revestimiento, corriente y polaridad rutílico (3).

Figura 19. Especificaciones de la soldadura E-6013



Fuente: Tomado de ESAB.

La elección del electrodo de soldadura SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) 6013 se realizó con base a un análisis sobre sus características frente al electrodo de soldadura 7018 considerando que se necesitaba soldar un tubo de una pulgada de grosor con espesor 1.21 mm. En la Tabla 7, se presenta de manera sintética dicha comparación:

Tabla 8. Comparación entre los electrodos de soldadura 6013 y 7018

Aspectos por comparar	Comparación
Tipo de electrodo	El electrodo 6013 es un electrodo de propósito general, muy comercial, conocido por su facilidad de uso y versatilidad. Es adecuado para soldar una amplia gama de materiales, incluyendo acero al carbono y acero de baja aleación. De otro lado, el electrodo 7018 es un electrodo de bajo hidrógeno, diseñado para soldar aceros de alta resistencia y alta aleación, proporcionando una soldadura de alta calidad y mayor resistencia a la fractura.
Espesor del material	Para materiales más delgados, como el tubo con 1,21 mm de espesor, el electrodo 6013 puede ser preferible debido a su menor corriente de soldadura y menor penetración. Esto puede ayudar a evitar la distorsión excesiva y la perforación a través del material, lo que puede ocurrir con el electrodo 7018, que tiende a producir una mayor penetración.
Facilidad de uso	Es más fácil de usar, especialmente para soldadores menos experimentados. Tiene una menor sensibilidad a la limpieza de la superficie y al precalentamiento del materia que el 7018.

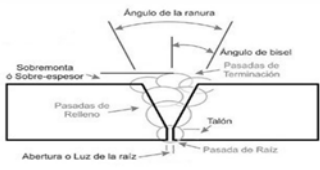
Fuente: Autor.

Figura 20. Formato WPS

		WPS: CPBT 0001	
		HOJA:	1 de 1
		EMISION:	11/04/2024
		REVISION:	1

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS)		SI ☒
PRECALIFICADO	X	CALIFICADO POR ENSAYO
Identificación #		Smaw 6013

Nombre del responsable	Nicolás Téllez Martínez		
Proceso(s) de soldadura	SMAW		
DISEÑO DE JUNTA UTILIZADO			
Tipo:	A tope sin bisel		
Sencilla	☐	Doble Soldadura	☒
Respaldo:	SI ☐	No ☐	
Material de respaldo:			
Apertura de raíz	1/8"	Dimensión de cara de raíz	1/8"
Angulo de la ranura:	60°	Radio (J-U)	-
Sanear raíz:	SI X	No	
Método:	DISCO ABRASIVO Y/O GRATA		
METALES BASE			
Especificación del material	Perfil cuadrado de 1"		
Tipo o Grado	1 pulg		
Espesor	Ranura	1	-
Diámetro (Tubo)	-		
METALES DE APORTE			
Especificación AWS	A5.1		
Clasificación AWS	E6013		
PROTECCIÓN			
Fundente	Gas	Composición	
	Tasa de flujo	Tamaño copa de gas	
Electrodo-Fundente (Clase)			
PRECALENTAMIENTO			
Temperatura de precalentamiento, Min.	0°C		
Temperatura entre pases, Min.	0°C	Máx.	-
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA			
Pase o capa(s) de soldadura	Proceso	Metales de aporte	Corriente
		Clase	Diámetro
		Tipo & Polaridad	Amperios o velocidad de alimentación del alambre
		Velocidad de avance	
		Detalles de la junta	



Fuente: Autor.

En resumen, para un tubo de una pulgada y media de grosor con un espesor de 1,21 mm, es recomendable utilizar el electrodo de soldadura 6013 debido a su facilidad de

uso, menor penetración y menor riesgo de perforación a través del material, justificando la elección en este trabajo.

En la Figura 21, se muestra el motor utilizado (Gear Motor – Mitsubishi de 0.4 Hp. Con Velocidad de 230 a 278 rpm).

Figura 21. Motor



Fuente: Autor.

Cabe destacar que, en la elección del motor se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

1. En la tesis Banco de Pruebas para el Análisis de Vibraciones en Maquinaria de la universidad de Buenaventura⁷², fue usado un motor monofásico con una velocidad de 3600 (RPM) y con una potencia de 1.5 HP, además de un eje de similitud en sus características al usado en este trabajo. Por conclusión y análisis, se tomó la decisión de implementar el motor propio, ya que el material para el eje es de mejores características y propiedades, el motor es menos potente con 0.4 HP y menos rápido 254 rpm, el cual nos produce seguridad en el momento de ser usado.
2. Es un motor de 0.4 HP y nos da una velocidad de 254 rpm, lo cual, es una velocidad ideal para el funcionamiento y una potencia suficiente para el requerimiento dando un par de torsión de 26967327,15 Pa.
3. Es un motor que se conecta a un voltaje de 110 V, y esto, hace que sea más fácil y posible de usar donde uno lo requiera al no requerir corriente bifásica o trifásica su uso en diferentes ambientes presenta mayor viabilidad.

⁷² HOYOS y HERRERA, Op. Cit., p.30.

4. Esta opción de motor queda abierta, ya que esta máquina es construida para uso de aprendizaje en la Universidad Santo Tomas, es decir, si algún estudiante quiere hacerle modificaciones, es posible hacerlas.

En la Figura 22, se muestra el eje respectivo, es decir, un eje en acero 4340 con una longitud de 520mm. Al respecto, cabe resaltar que el eje fue mecanizado, se le hizo una chaveta de $\frac{1}{4}$, 3 cm de longitud y 3 mm de profundidad, mediante el cual se acopla el disco de teflón.

Figura 22. El eje del banco



Fuente: Autor. Maquinado de cuñero en fresa.

Ahora, en el eje principal y en el eje del motor, se incluyó un acople tipo araña 125 para poder hacer la unión entre estos, y se incorporó un caucho en la mitad para poder unirlos manteniendo la presión entre las piezas. En la Figura 23, se muestra este ensamblaje.

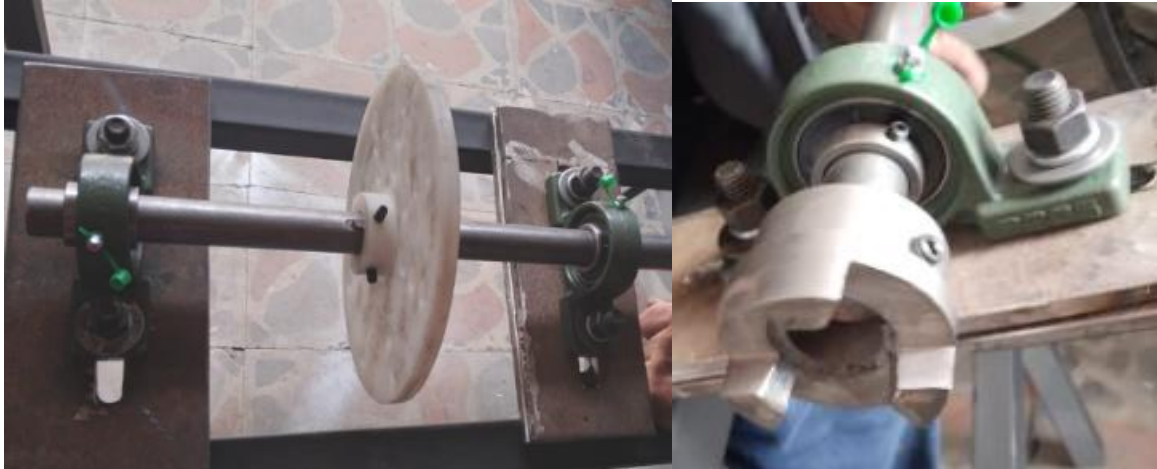
Figura 23. Ensamblaje del eje y el motor



Fuente: Autor. Acople tipo araña 125.

A continuación, se usaron dos chumaceras de una (1) pulgada como guías y soporte del eje y el disco. Estas se ubicaron encima de unas platinas aseguradas con tornillos contribuyendo con la alineación y estabilización del conjunto eje-motor. Igualmente, se incorporaron platinas para nivelar el motor con el eje.

Figura 24. Alineación y estabilización del conjunto eje-motor



Fuente: Autor.

Por otro lado, se procedió a mecanizar el disco en teflón con dos prisioneros para ajustar; se hicieron agujeros, cada uno de 12 mm de diámetro, repartidos en toda el área del disco como se describió previamente. Este disco fue colocado en la mitad de las dos chumaceras el cual su propósito es identificar las variaciones en la vibración medida, producida por el desbalance generado por diferentes masas añadidas (tornillos) y la incidencia del aumento en la distancia entre el centro geométrico y la ubicación de estas.

Figura 25. Disco



Fuente: Autor.

Adicionalmente, en la Figura 26 se muestra el breaker de 16 A que se incorporó para controlar el encendido y el apagado del banco de simulaciones, señalando que contará con una conexión a una fuente de 110V.

Figura 26. Breaker



Fuente: Autor.

Para determinar si un disyuntor de 16 amperios era adecuado para proteger un motor de 0.4 HP, se calculó la corriente nominal del motor y se comparó con la capacidad del disyuntor. Entonces, la potencia nominal del motor es de 0.4 HP y su equivalente en vatios es 298.28 W. Luego, la corriente nominal se obtuvo aplicando la siguiente ecuación:

$$Corriente = \frac{Potencia}{Voltaje.} \quad EC.5$$

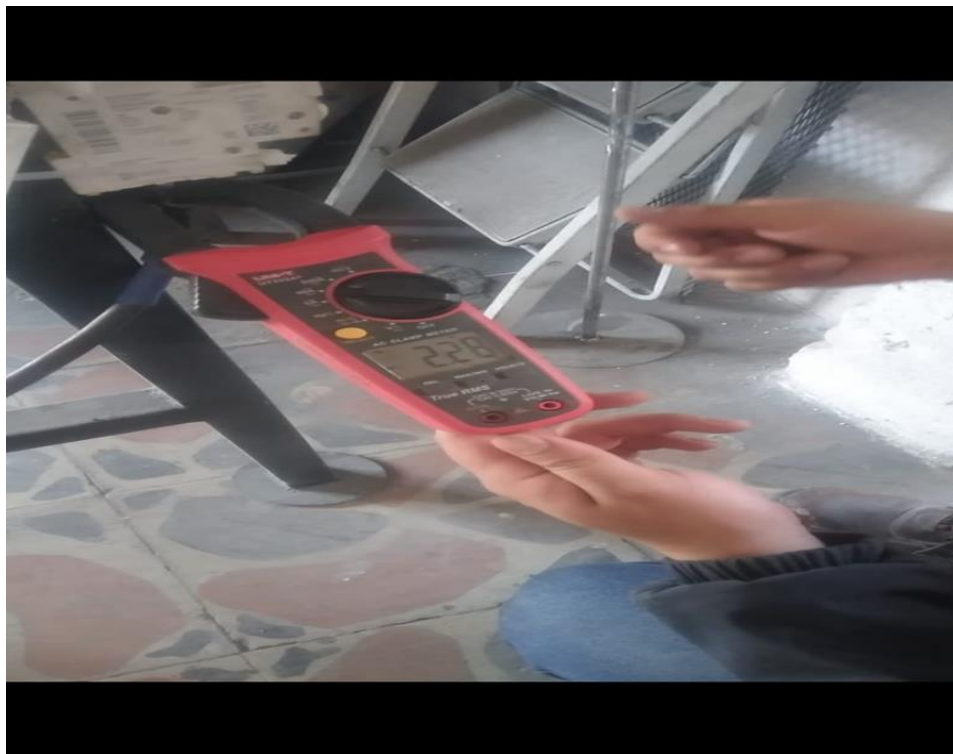
Así pues, con un voltaje de 110 V:

$$Corriente = \frac{298.28 \text{ W}}{110V} = 2.71 \text{ A}$$

Por lo tanto, corriente nominal del motor es de aproximadamente 2.71 amperios, lo cual implica que un breaker de 16 amperios es suficiente para proteger el motor considerando que tiene una capacidad significativamente mayor que la corriente nominal del breaker.

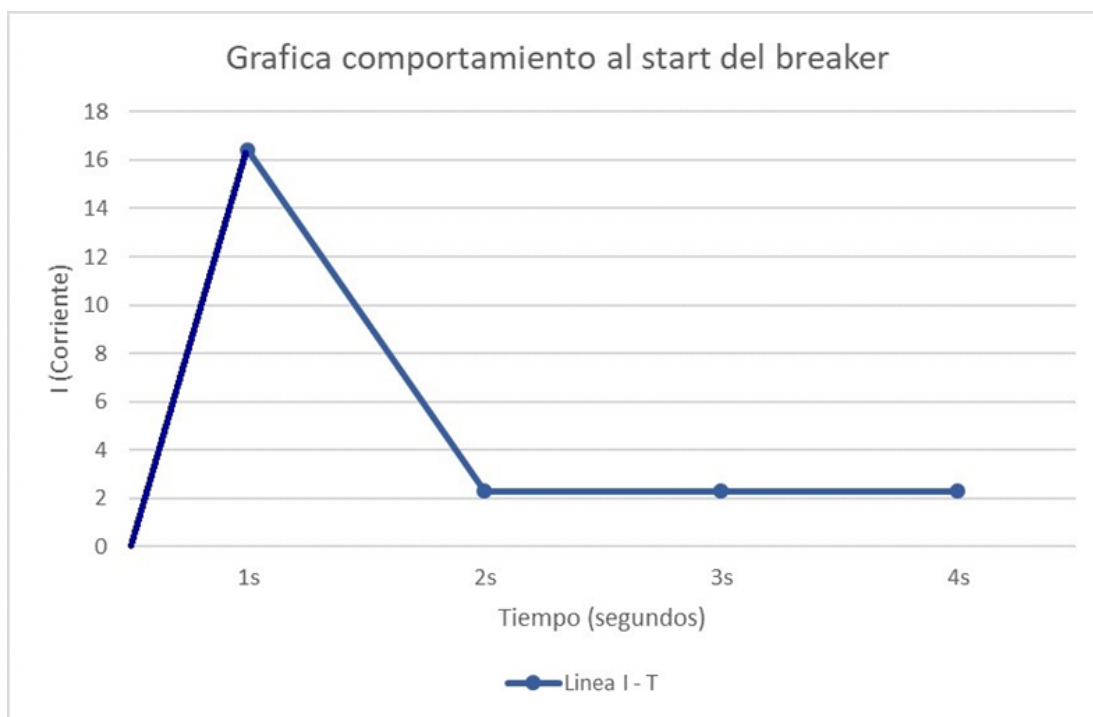
Se hicieron unas pruebas con una pinza amperimétrica para comprobar y tener seguridad al momento de ser usado el banco con este Breaker (Figura 27).

Figura 27. Medición con pinza amperimétrica estando el motor encendido.



Fuente: Autor.

Figura 28. Ilustración comportamiento del Breaker, corriente – tiempo.



Fuente: Autor.

Por último, se realizó el ensamble de cada una de las piezas y conjuntos dando como resultado la parte mecánica del banco para medición de vibraciones, Figura 29.

Figura 29. Ensamblaje final del banco, parte mecánica



Fuente: Autor.

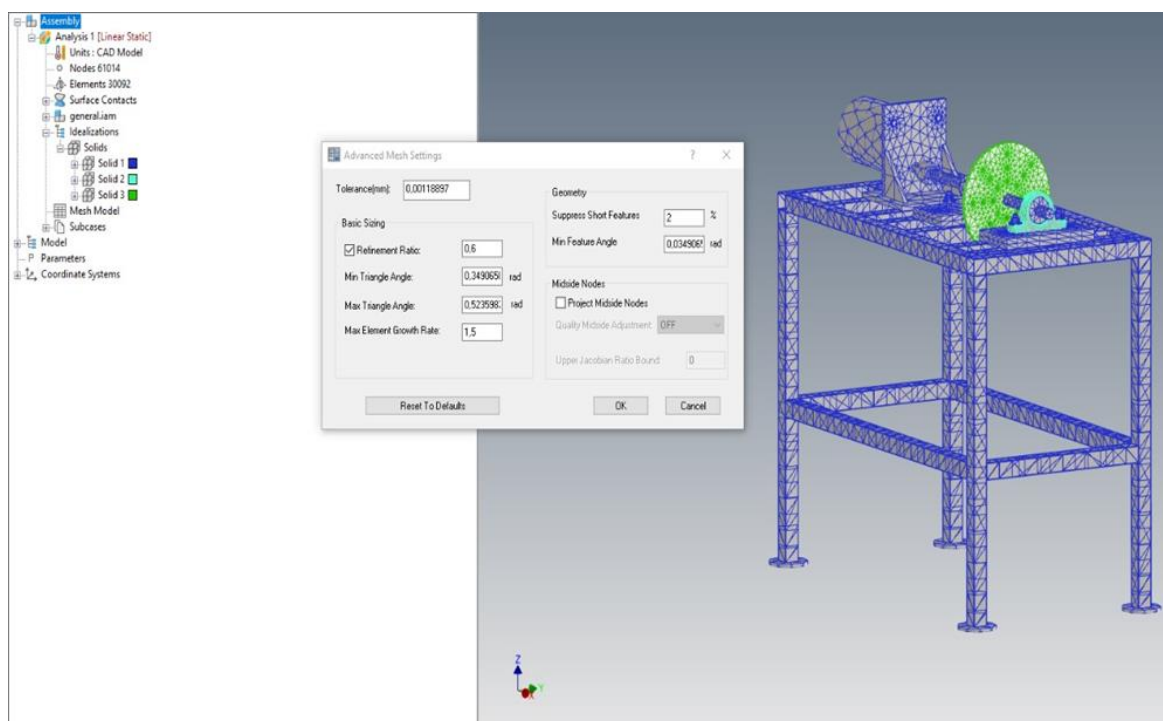
Figura 30. Render del banco.



Fuente: Autor.

4.3. SIMULACIONES EN INVENTOR

Figura 31. Demostración del mallado (Discretización elementos finitos), modelo completo.



Fuente: Autor.

Tabla 9. Resultados obtenidos discretización.

# Ítems	Características	Resultados
1	Elementos Diseñados	63
2	Tipo de malla	Triangular

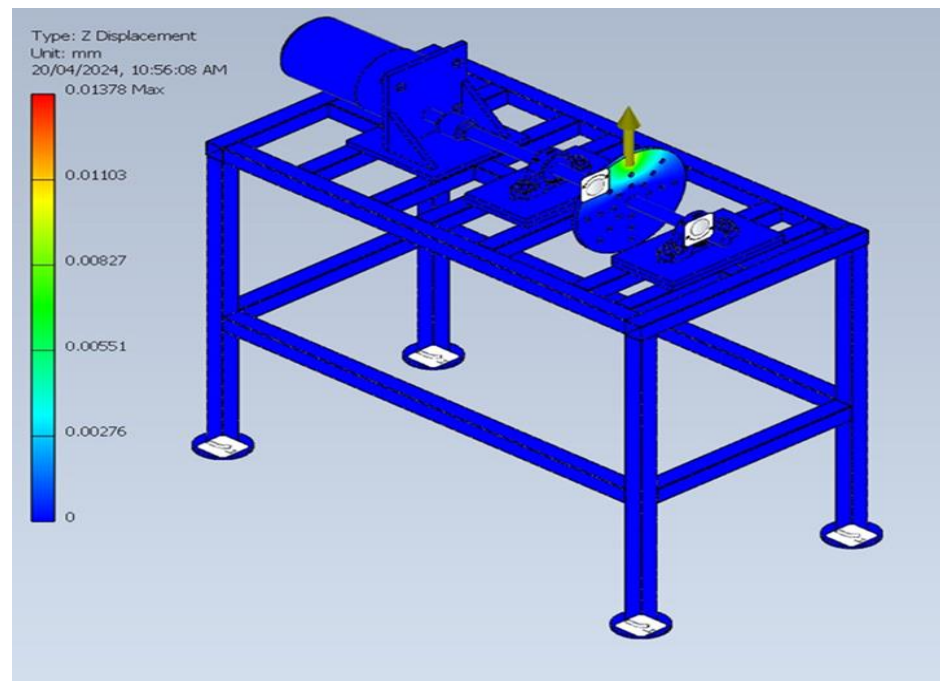
3	Delimitación	0,34 rad Min - 0,52 rad Máx.
4	Nodos	61014
5	Elementos	30092

Fuente: Autor.

A partir de las figuras 35 hasta la 46, se muestra la simulación del banco de vibraciones donde los pesos son tornillos incrustados en el disco según el diseño.

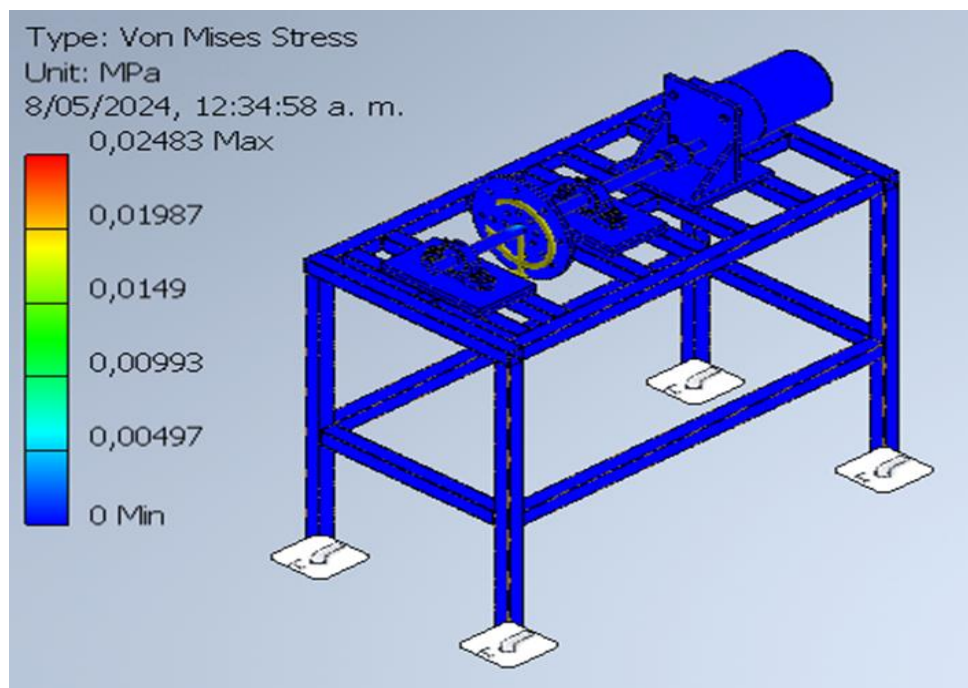
- **Simulación 1:** Disco sin pesas.

Figura 32. Desplazamiento sin pesas.



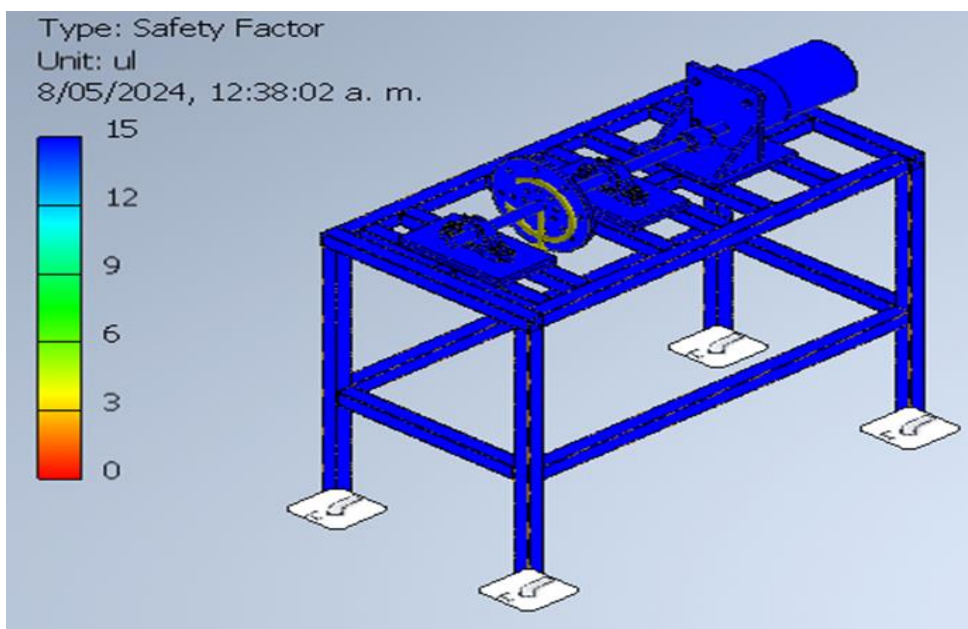
Fuente: Autor.

Figura 33. Von Mises sin pesas.



Fuente: Autor.

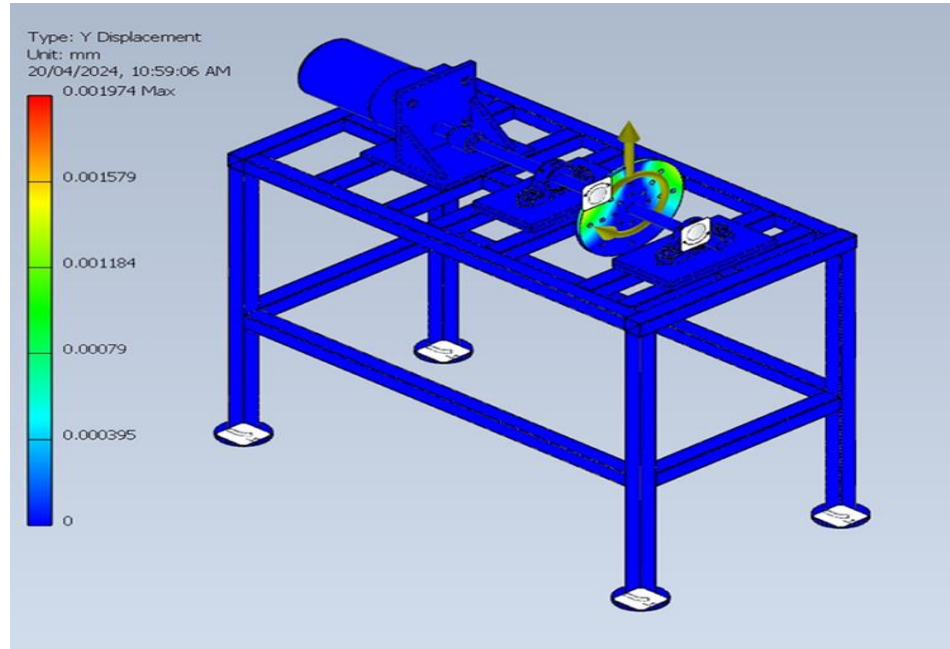
Figura 34. Factor de seguridad sin pesas.



Fuente: Autor.

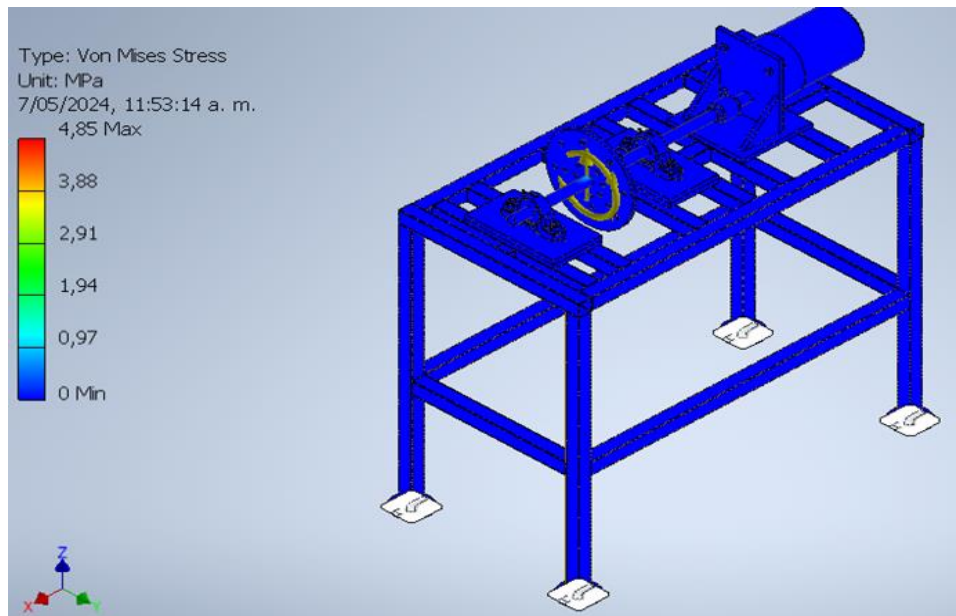
- **Simulación 2:** Disco con (2) pesas.

Figura 35. Desplazamiento con (2) pesas.



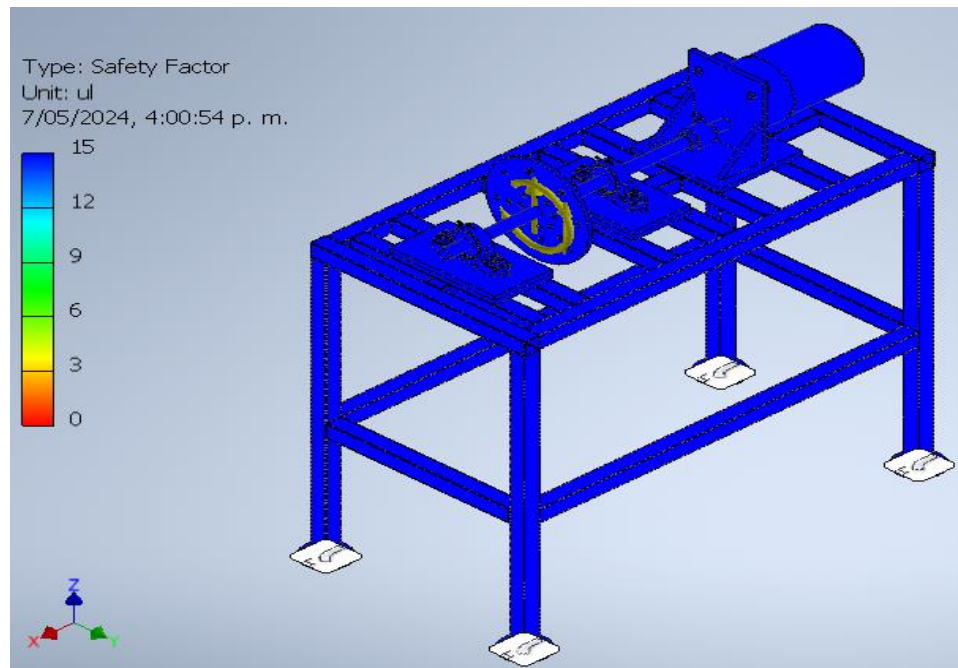
Fuente: Autor.

Figura 36. Von Mises con (2) pesas.



Fuente: Autor.

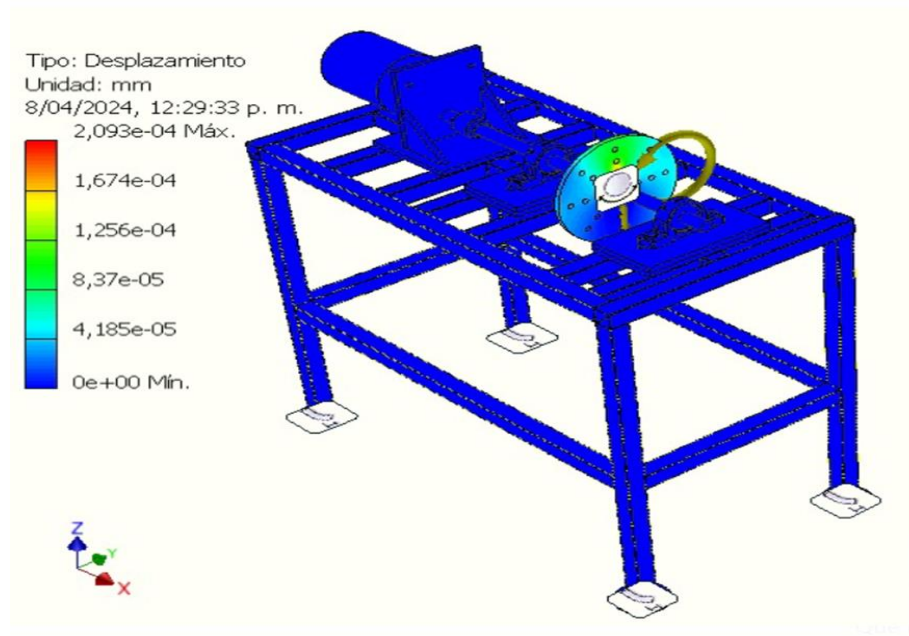
Figura 37. Factor de seguridad con (2) pesas.



Fuente: Autor.

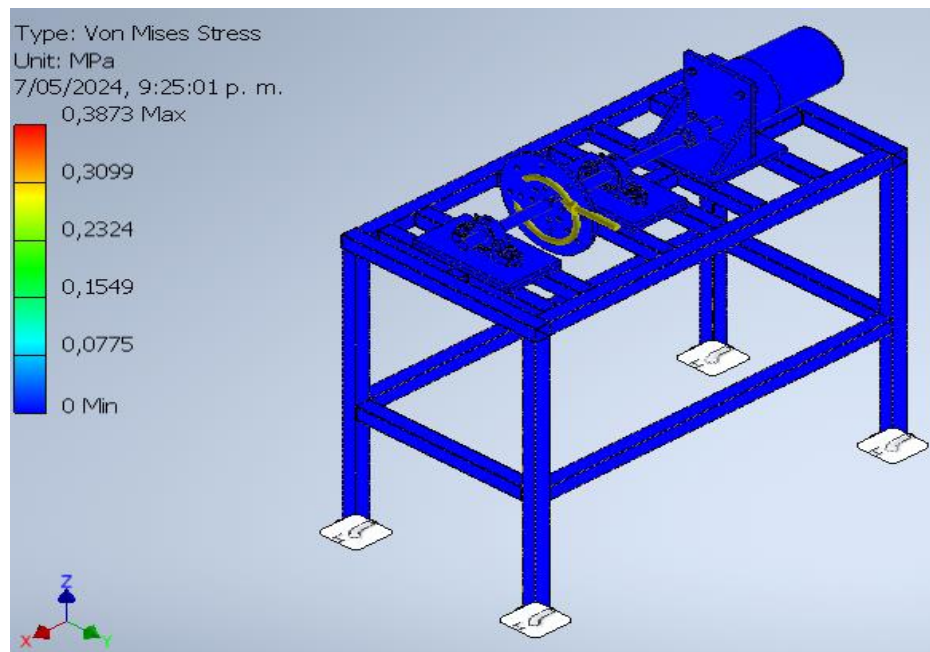
- **Simulación 3:** Disco con (1) pesa pegada al eje.

Figura 38. Desplazamiento con (1) pesa pegada al eje.



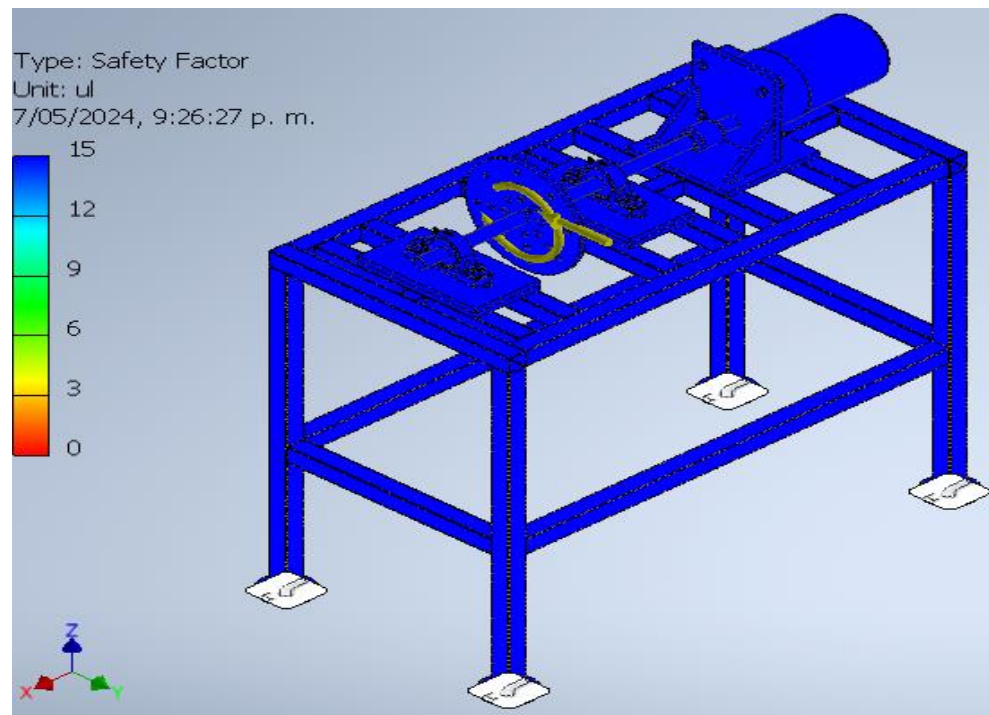
Fuente: Autor.

Figura 39. Von Mises con (1) pesa pegada al eje.



Fuente: Autor.

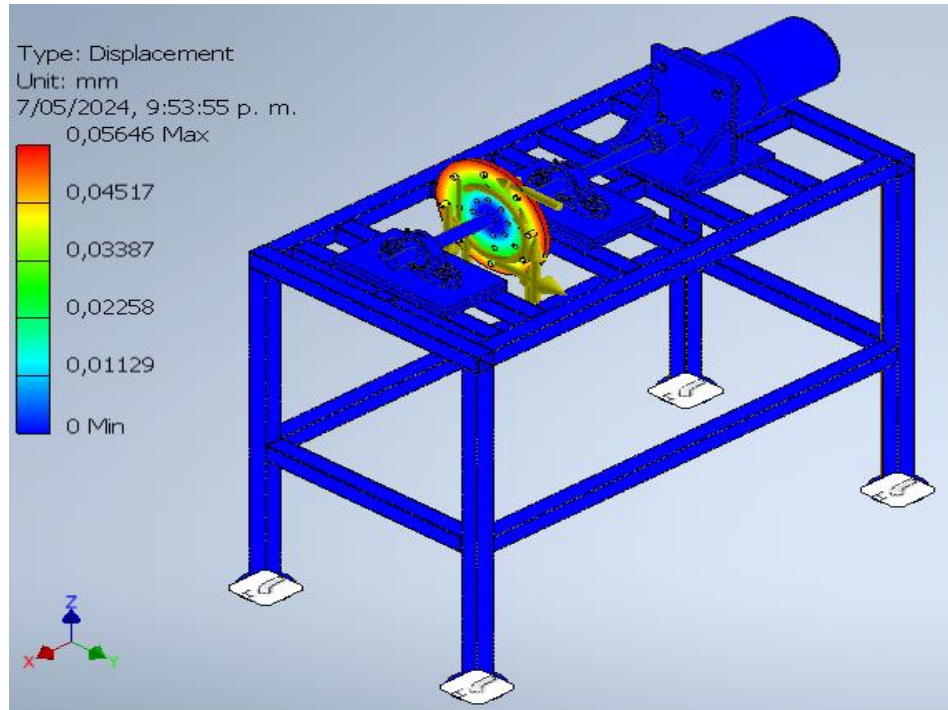
Figura 40. Factor de seguridad con (1) pesa pegada al eje.



Fuente: Autor.

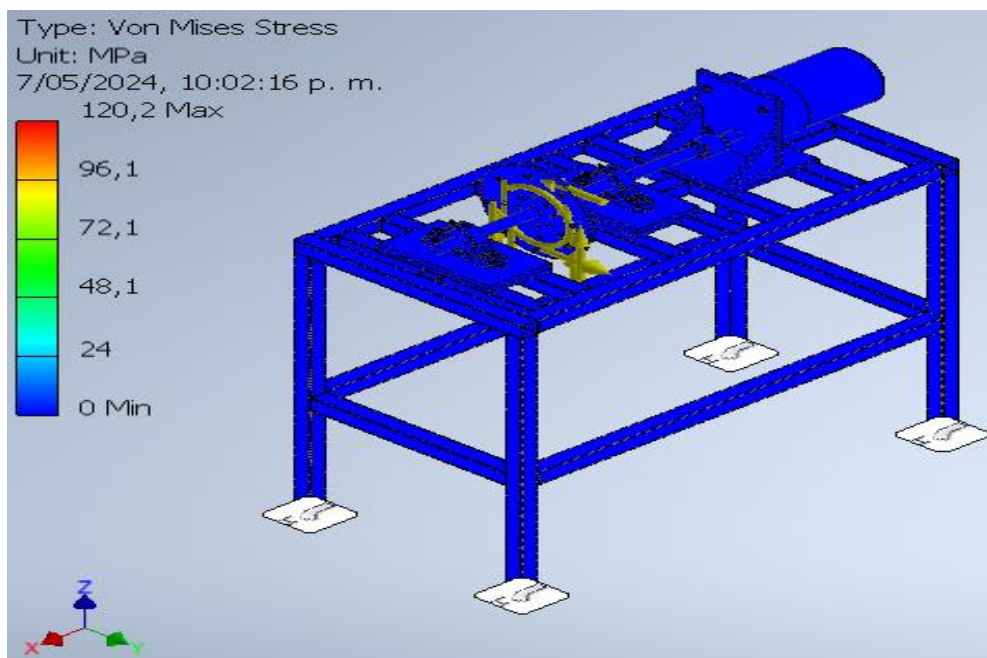
- **Simulación 4:** Disco con (8) pesas, alrededor de todo el disco.

Figura 41. Desplazamiento con (8) pesas.



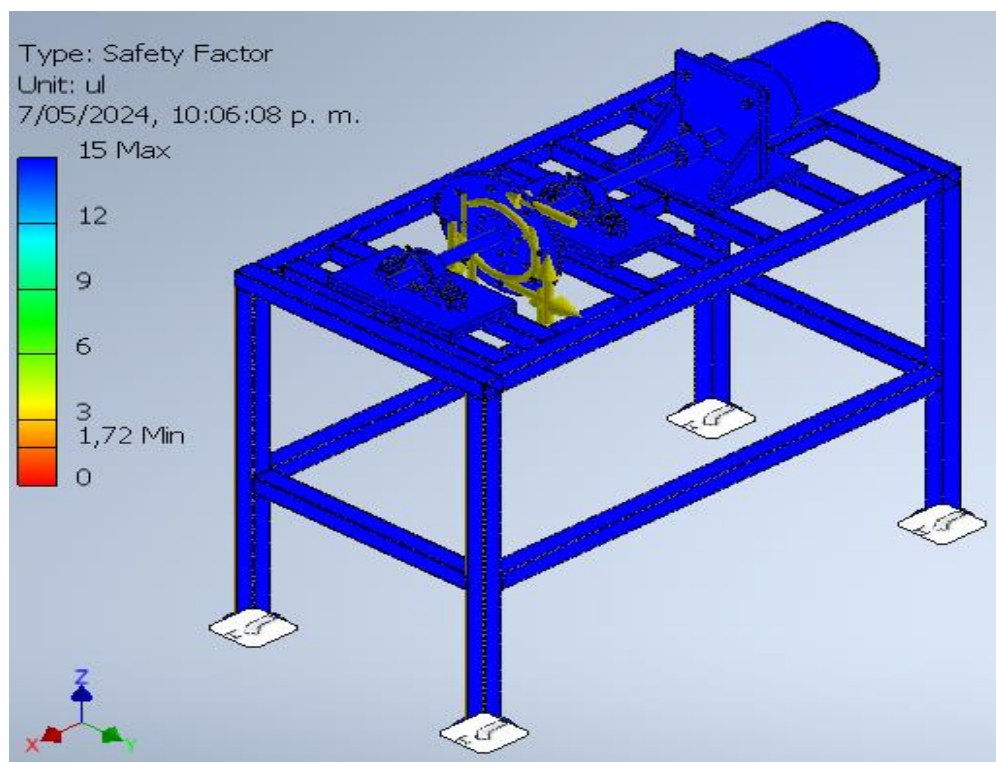
Fuente: Autor.

Figura 42. Von Mises con (8) pesas.



Fuente: Autor.

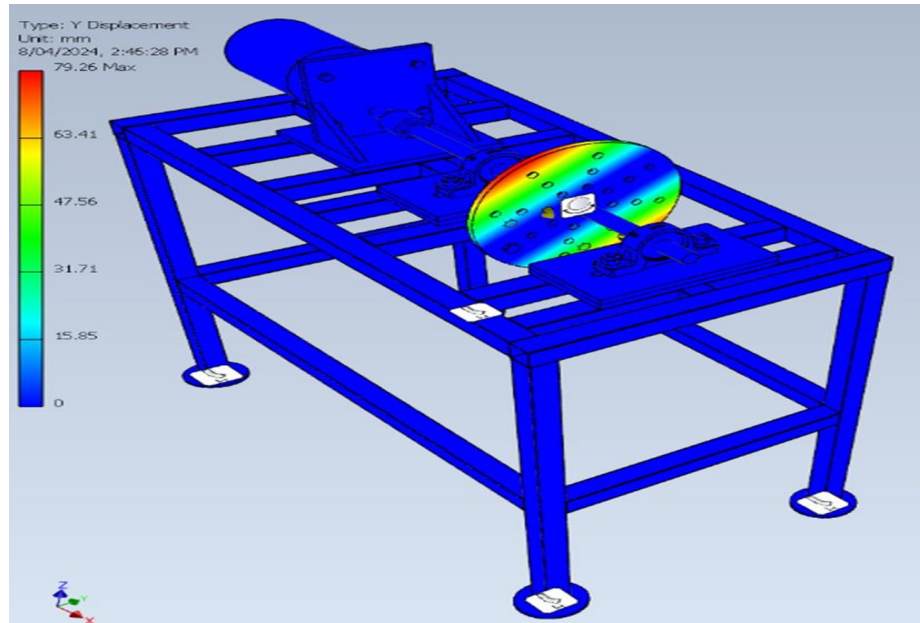
Figura 43. Factor de seguridad con (8) pesas.



Fuente: Autor.

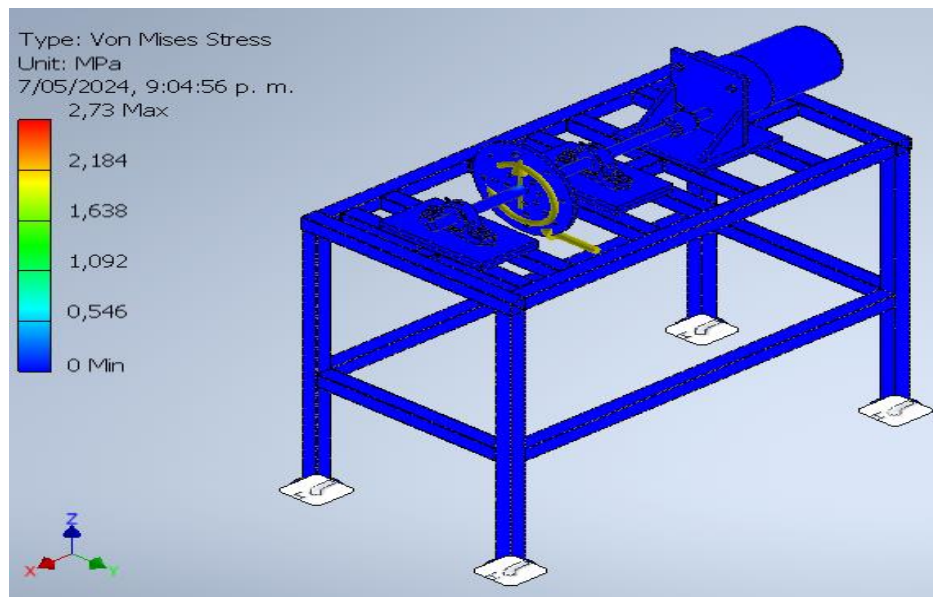
- **Simulación 5:** Disco con (2) pesas, cada pesa en un extremo, es decir (1) pesa en la parte inferior y (1) pesa en la parte superior.

Figura 44. Desplazamiento con (2) pesas en los extremos.



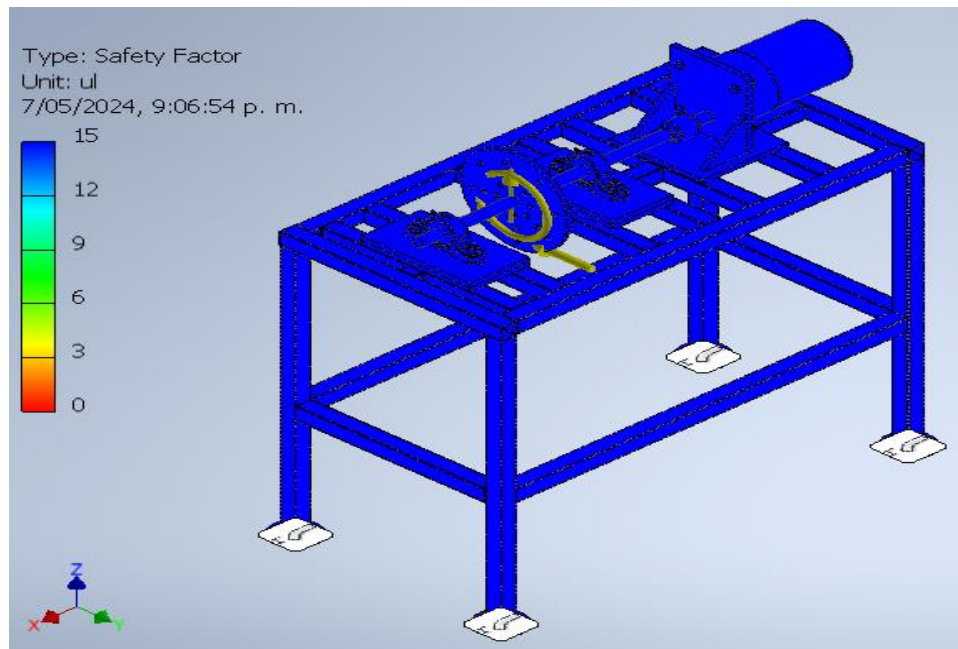
Fuente: Autor.

Figura 45. Von Mises con (2) pesas en los extremos.



Fuente: Autor.

Figura 46. Factor de seguridad (2) pesas en los extremos.



Fuente: Autor.

A partir de las simulaciones del banco en diferentes escenarios, se puede evidenciar que, cuando las pesas son puestas cerca al centro del disco se genera un desbalance mínimo, ya que el peso o los pesos están cerca al eje y la fuerza o el torque es sobre el mismo eje. En contraste, si las pesas se ubican en los extremos del disco, ya sean todos, o uno en cada extremo, se genera un máximo desbalance, ya que los pesos están alejados del eje; por eso, se evidencia una mayor fuerza producida en el disco y el eje.

Tabla 10. Tabla de configuraciones y resultados

# Simulaciones.	Rango de resultados desplazamiento (mm).
1. Sin pesas.	0,00276 – 0,01378 Máx.
2. Con (2) pesas.	0,00395 – 0,01974 Máx.
3. Con (1) pesa pegada al eje	4,185e-05 – 2,093e-04 Máx.
4. Con (8) pesas alrededor de todo el disco, en sus extremos.	0,01129 – 0,05646 Máx.
5. Con (2) pesas, una en cada extremo, parte superior e inferior del disco.	15,85 – 79,26 Máx.

Fuente: Autor.

Tabla 11. Tabla de resultados de configuraciones Von Misses y Factor de seguridad.

Configuraciones.	Von Mises. (Mpa)	Factor de Seguridad.	Estado.
#1	0,00497 – 0,02483	0 - 15	Aprobado
#2	0,97 – 4,85	0 - 15	Aprobado
#3	0,0775 – 0,3873	0 - 15	Aprobado
#4	24 – 120,2	0 - 15	Aprobado

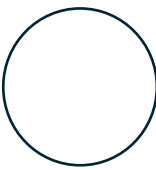
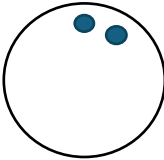
#5	0,546 – 2,73	0 - 15	Aprobado
----	--------------	--------	----------

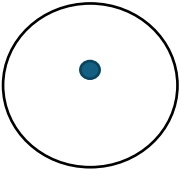
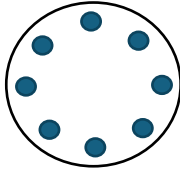
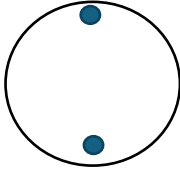
El tipo de simulación “Von Mises” es usada para evaluar la resistencia de un componente y predecir el inicio del fallo generado por las tensiones aplicadas ante cargas mecánicas, este tipo de análisis muestra las áreas críticas, donde pueden ocurrir fallos o deformaciones en el material.

Como se pudo observar anteriormente en las simulaciones, son arrojados unos valores máximos los cuales indican lo que puede soportar el banco, medida en (Mpa), pero también muestra un rango de colores, lo que representa en que parte puede existir algún fallo, que se evidencia cuando hay enrojecimiento en algún lugar o parte del banco, pero en este caso como se pudo observar el banco se muestra en azul, no muestra ni se evidencia enrojecimiento en alguna parte del banco, es decir, no nos está detectando ningún fallo o afectación.

El factor de seguridad cuantifica un margen de seguridad, el cual permite evidenciar si es seguro o no usar la máquina, en todas las simulaciones muestra un rango de 0 a 15, y un rango de colores, con el cual se puede observar donde puede ocasionarse algún fallo y que pueda ser crítico el uso del banco, pero en este caso no se evidencia ni enrojecimiento ni un punto como tal de factor de seguridad, es decir no genera enrojecimiento en ningún lugar del banco.

Tabla 12. Ilustración de configuraciones.

N°	Imagen	Numero de contrapesos
1		Sin contrapesos.
2		Con (2) pesas.

3		Con (1) pesa pegada al eje.
4		Con (8) pesas alrededor del disco.
5		Con (2) pesas, cada una en un extremo

Fuente: Autor.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El diseño y la construcción de un banco de simulaciones para vibraciones, objetivos de este trabajo, representan una oportunidad para fortalecer los procesos académicos e investigativos a la hora de realizar diagnósticos, análisis y ensayos relacionados con la presencia de vibraciones en la maquinaria industrial, especialmente, para efectos de las operaciones de la ingeniería del mantenimiento. Por una parte, a los docentes les ofrece una herramienta didáctica de apoyo en las clases que imparten, y luego, a los estudiantes les permite transitar de la teoría a la práctica dándole paso al desarrollo de conocimientos, competencias y habilidades necesarias para su desempeño como futuros profesionales.

Asimismo, el conocimiento generado a través de la investigación y la construcción del banco de simulación de vibraciones puede tener un impacto positivo en la industria regional a través de la mejora de la eficiencia y la confiabilidad de los procesos productivos, lo que a su vez puede impulsar el crecimiento económico y la competitividad de la región siendo el primer banco de este tipo y de carácter académico en el departamento de Tunja.

La disponibilidad de esta herramienta permitirá llevar a cabo investigaciones aplicadas más profundas y precisas en el campo del mantenimiento preventivo de maquinaria industrial, lo cual puede conducir al desarrollo de nuevas técnicas y metodologías para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los procesos industriales que los próximos usuarios del banco tendrán la oportunidad de mejorar.

En cuanto al banco, su diseño sencillo facilita su uso y comprensión como una herramienta de desarrollo académico y práctico, además de ser fácilmente accesible para muchos estudiantes nuevos generando temas de discusión que aborden desde el diseño estructural hasta la dinámica del movimiento. Se muestra paso a paso el proceso de diseño y ensamblaje, así como los cálculos en los que se incurrió con el fin de documentar todo el desarrollo del banco para que en el futuro se puedan replicar este tipo de iniciativas, mejorarlas y complementarlas desde la parte eléctrica, la cual no se aborda en este trabajo.

5.2. RECOMENDACIONES

Primero, se recomienda completar la parte eléctrica del banco para garantizar su pleno funcionamiento, y con ello, la elaboración de una guía de uso para acompañar a docentes y estudiantes durante su manipulación.

Luego, se recomienda que antes de llevar a cabo cualquier experimento, es importante planificar cuidadosamente los parámetros a medir, las condiciones de operación y los procedimientos de seguridad a seguir. Esto garantizará la efectividad y seguridad de los experimentos realizados.

Por otra parte, es esencial realizar un mantenimiento regular del banco de simulación de vibraciones para garantizar su correcto funcionamiento y prolongar su vida útil. Esto incluye la lubricación de partes móviles, la revisión de conexiones eléctricas, la calibración de la nivelación y verificación de espacios despejados.

Para finalizar, se recomienda llevar un registro detallado de todos los experimentos realizados en el banco de simulación de vibraciones, incluyendo los parámetros medidos y las condiciones de operación. Estos datos deben ser analizados cuidadosamente para obtener conclusiones significativas y mejorar la eficacia del banco. No hay que desmeritar las posibles fallas, aunque sean datos erróneos o funcionamiento diferente, se puede tomar como un dato interesante, todo dato se debe registrar y argumentar.

BIBLIOGRAFÍA

- BERNAL, Fabio Andrés y CORTÉS, Diego Fabián. Simulación de un banco de pruebas para análisis de vibraciones. Proyecto de grado Tecnología Mecánica. Bogotá, D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica, 2016. 55 p.
- CASTELLANOS, Javier Mauricio y CARREÑO, Ariel Rene. Proyectos de Investigación Aplicada para el desarrollo de competencias en estudiantes de Ingeniería. En: *El Hombre y la Máquina*. Mayo-Diciembre, 2013, no. 42-43, p. 73-81.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 30 (20 de diciembre de 1992). Por la cual se organiza el servicio público de la Educación Superior. En: Diario Oficial. Diciembre, 1992. Nro. 40.700.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 115 (de febrero 8 de 1994). Por la cual se expide la ley general de educación. En: Diario Oficial. Febrero, 1994. Nro. 41.214.
- ESPINO-ROMÁN, Piero, DAVINZÓN-CASTILLO, Yasser Alberto, OLAGUEZ-TORRES, Juana Eugenia, LIZARRAGA-LIZARRAGA, Alejandro, BENITEZ-GARCÍA, Israel, y NUÑEZ-NALDA, José Víctor. Prototipo didáctico para la enseñanza de vibraciones mecánicas mediante el diseño de un banco de pruebas de desbalance y velocidad crítica. En: *Revista Dyna*, vol. 92, no. 1, p. 395-398. Doi: <https://doi.org/10.6036/8101>
- GANGI, Sergio, PONTELLI, Daniel, BOAGLIO, Laura y BOLLATI, Juan. Análisis de vibraciones en banco de ensayo utilizado para simular fallas de equipos industriales. En: *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Marzo 2016, vol. 3, no. 1, p. 71-74.
- GARCÍA-LEÓN, Ricardo Andrés, FLÓREZ, Eder y PEDROZA, Jesús. Diseño de un banco de pruebas para el análisis de vibraciones mecánicas. En: *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Junio de 2018, vol. 1, no. 33, p. 24-35.
- GIRALDO, Carlos Alberto. Diseño y construcción de un banco didáctico de engranajes para transmisión de potencia en la Universidad Antonio Nariño sede Neiva. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, 2021, 113 p.
- GONZÁLES, Héctor Álvaro, CARDONA, Jhon Fabio y MONROY, Gustavo. Diseño de un banco de pruebas de desalineamiento y desbalanceo mecánico. En: *Scentia Et Technica*. Octubre 2005, vol. 11, no. 28, p. 101-106.
- GONZÁLES, Jesús Vicente, LOYO, Jesús, LÓPEZ, Miguel Ángel, PÉREZ, Pedro y CRUZ, Alfredo. Mantenimiento industrial en máquinas herramientas por medio de AMFE. En: *Revista Ingeniería Industrial*. Julio 2018, vol. 17, no. 3, p. 209-225.

GUAITARILLA, José David. Plan de mantenimiento preventivo para la máquina industrial de la Empresa Fluoroplásticos S.A.S. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería, 2019. 101 p.

GUTIÉRREZ, César Augusto. Herramienta didáctica para integrar las TIC en la enseñanza de las ciencias. En: *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*. Enero 2018, vol. 11, no. 1, p. 101-126.

HOMECENTER. [En línea]. Tubo cuadrado 1-1/2 x1-1/2 pg x1.1mm C18x6m. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/183862/tubo-cuadrado-1-1-2-x-1-1-2pg-x-11mm-c18-x-6m/183862/>

HOYOS, Jaison Muriel y HERRERA, Camilo. Banco de pruebas para el análisis de vibraciones en maquinaria. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido. Medellín: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2021. 56 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -Part 1: General Guidelines. ISO 10816:2005. Geneva, Suiza, ISO, 1995, 26 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Mechanical vibration, shock, and condition monitoring — Vocabulary. ISO 2041:2009. Geneve, Suiza, ISO, 2009, 9 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Condition monitoring and diagnostics of machines -Prognostics -Part 1: General Guidelines. ISO 13381:2015. Geneva, Suiza, ISO, 2015, 21 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. Condition monitoring and diagnostics of machines -Vibration condition monitoring -Part 3: Guidelines for vibration diagnosis. ISO 13373:2015. Geneva, Suiza, ISO, 2015, 36 p.

JARA, José Armando y SINCHI, Juan Gabriel. Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Tesis Ingeniería Mecánica. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2012. 268 p.

LEOS, Iván. Manual interactivo de prácticas de vibraciones mecánicas del equipo TM 16 empleando Visual Basic. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Aragón, 2013. 128 p.

LÓPEZ, Gabriel. Análisis de vibraciones para el mantenimiento predictivo. En: *Técnico Industrial*. Diciembre de 2004, no.255, p. 25-27.

MARTÍNEZ, Luis Lezáun y MARTÍNEZ, Francisco Javier. Mantenimiento: algunas consideraciones sobre el análisis de vibraciones en máquinas rotativas. En: *Revista Dyna*. Enero-Febrero 2000.

MAYORGA, Alex y QUISHPE, Jeverson. Deontología aplicada al mantenimiento de maquinaria industrial por ingenieros mecánicos. En: *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Mayo 2019. [En línea]. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/05/deontologia-maquinaria-industrial.html>

MONTILLA, Carlos Alberto. Fundamentos de Mantenimiento Industrial. Pereira: Editorial UTP, 2016. 212 p.

MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas. Pearson Education, México, 2006, 475 p.

OLARTE, William, BOTERO, Marcela y CAÑON, Benhur. Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción. En: *Scntia et Technica*. Abril 2010, vol. 16, no. 44, p. 354-356.

ORTIZ, Armando; RUIZ, Osvaldo; ORTIZ, Juan Armando. Modelado de procesos de Manufactura. México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013, 267 p.

PENKOVA, María. Mantenimiento y análisis de vibraciones. En: *Ciencia y Sociedad*. Octubre – Diciembre 2007, vol. 32, no. 4.

PÉREZ, Pablo. Estudio de la vibración en baja frecuencia de motor eléctrico. Tesis Ingeniería de Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, 2013. 269 p.

PINZÓN, Juan Eduardo. Construcción de un banco de prácticas para alineación de ejes en máquinas rotativas para los laboratorios de la Universidad Antonio Nariño Sede Cúcuta. Trabajo de grado Tecnología en Mantenimiento Electromecánico Industrial. Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, 2020, 76 p.

QUINTERO, Héctor Fabio y LÓPEZ, Juan Fernando. Vibraciones Mecánicas: un enfoque Teórico-Práctico. Pereira: Editorial UPT. 352 p.

RAO, Singiresu. Vibraciones mecánicas. Traducido por Rodolfo Navarro Salas. 5 ed. México: Pearson Education, 2012. 1024 p.

SÁNCHEZ, Guillermo. La relación teoría-práctica, otra faceta de la formación integral. En: *Ingeniería e Investigación*. Julio 1990, no. 21, p. 58-67. Doi: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n21.19698>

SETO, William. Vibraciones Mecánicas. Teoría y 225 problemas resueltos. Traducido por Guillermo Sánchez Bolívar. 1ra Ed. España: McGraw Hill, 1979. 199 p.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Ingeniería mecánica. En: *Ingeniería e Investigación*. Enero 2001, no. 47, p. 87-98.

VALDIVIESO, Juan Carlos. Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Extruplas S.A. Tesis Ingeniería Mecánica. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería Mecánica, 2010. 115 p.

VARGAS, Zoila Rosa. La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. En: *Educación*. 2009, vol. 33, no. 1, 155-165.

WHITE, Glen. Introducción al Análisis de Vibraciones. Massachussets, Estados Unidos: Azima DLI. 148 p.

ANEXOS

Manual de Uso del Banco de Medición de Vibraciones

¡Bienvenido al Banco de Medición de Vibraciones! Este manual proporciona instrucciones detalladas para utilizar correctamente el banco, que consta de un motor, un eje con dos chumaceras y un disco en el medio. Antes de comenzar, asegúrese de leer y comprender completamente estas instrucciones para garantizar un uso seguro y efectivo del equipo.

Componentes del Banco:

1. Motor:

- Potencia: 0.4 HP
- Conexión eléctrica: Conectado a un break de 16 A.
- Función: Proporciona la energía necesaria para hacer funcionar el banco y generar vibraciones controladas.

2. Eje:

- Conectado al motor.
- Soportado por dos chumaceras.
- Función: Transmite el movimiento del motor al disco ubicado en el centro del banco.

3. Chumaceras:

- Dos chumaceras que sostienen el eje.
- Soportan el eje y permiten su rotación suave.
- Importantes para mantener la alineación y estabilidad del eje durante el funcionamiento del banco.

4. Disco:

- Ubicado en la mitad de las dos chumaceras.
- Es utilizado para aplicar cargas (contrapesos) y realizar mediciones de vibraciones en el banco.

Instrucciones de Uso:

5. Preparación:

- Verifique que el banco esté correctamente conectado a una fuente de alimentación eléctrica.
- Asegúrese de que el break de 16 A esté activado antes de encender el motor

6. Encendido del Motor:

- Gire el interruptor de encendido del motor a la posición "ON".
- El motor comenzará a funcionar y el eje comenzará a girar.

7. Ajuste del Desequilibrio:

- Utilice una llave adecuada para aflojar los tornillos en el disco en caso que sea necesario.
- Añada o retire peso del disco mediante la adición o eliminación de contrapesos.
- Ajuste los tornillos hasta alcanzar el desequilibrio deseado. Se recomienda empezar con un desequilibrio bajo e ir incrementando gradualmente según sea necesario.

8. Medición de Vibraciones:

- El sensor que se utiliza para la medición es el que nos brinda la Universidad Santo Tomas, coloque el sensor de vibraciones en el punto deseado de medición. Se recomienda colocarlo cerca del disco para obtener lecturas precisas.
- Encienda el sensor de vibraciones y asegúrese de que esté correctamente calibrado.
- Registre las lecturas de vibración en función del tiempo o de la frecuencia, según sea necesario para su experimento.

9. Operación:

- Una vez que el motor esté en funcionamiento, el banco estará listo para realizar mediciones de vibraciones o cualquier otra prueba planificada.
- Antes de ser encendido el banco asegúrese de colocar los contrapesos del disco bien asegurados.
- Si se va a realizar una medición de vibraciones, asegúrese de que el equipo de medición esté correctamente configurado y listo para registrar los datos.

10. Apagado:

- Cuando haya terminado de usar el banco, gire el interruptor de encendido del motor a la posición "OFF".
- Asegúrese de desconectar el banco de la fuente de alimentación eléctrica y de cualquier equipo adicional utilizado para mediciones.

11. Mantenimiento:

- Realice inspecciones regulares del banco para asegurarse de que todos los componentes estén en buen estado.
- Lubrique las chumaceras según sea necesario para garantizar un funcionamiento suave del eje.
- Mantenga el área alrededor del banco limpia y libre de obstrucciones.

Advertencias de Seguridad:

12. Nunca opere el banco sin la supervisión adecuada.
13. No sobrecargue el banco más allá de su capacidad nominal ya que está conectado con el motor de 0.4 hp y 254 rpm.
14. En caso que quiera ser cambiado el motor se puede hacer, también por si se desea colocar un variador de velocidad también se podría, pero haciendo los cálculos necesarios.
15. Mantenga las manos y objetos sueltos alejados del eje en movimiento y el disco.
16. Siempre use equipo de protección personal adecuado al operar el banco.

Siguiendo estas instrucciones y precauciones, puede utilizar el Banco de Medición de Vibraciones de manera segura y efectiva para realizar pruebas y mediciones según sea necesario. Si tiene alguna pregunta o inquietud, no dude en ponerse en contacto con el personal responsable del banco.

¡Gracias por utilizar nuestro equipo!