



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Diseño de una Máquina de Medición de Desgaste Adhesivo

Juan Fernando Muñoz Sánchez
Laura Sofia Morales Ortega

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2024

Diseño de una Máquina de Medición de Desgaste Adhesivo

**Juan Fernando Muñoz Sánchez
Laura Sofia Morales Ortega**

Directora:

Ph.D. Adriana Gómez Gómez

Codirector:

Ph.D. Alexander Zuleta Durango

Línea de Investigación:

Diseño del producto

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2024

Declaración de obra original

Nosotros declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa nuestro trabajo original, excepto donde hemos reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Laura S. Morales O.

Laura Sofía Morales Ortega



Juan Fernando Muñoz Sánchez

Fecha 04/11/2024

Resumen

Este proyecto propone la creación de una máquina de medición de desgaste, diseñada específicamente para estudiar el fenómeno del desgaste adhesivo en metales en un contexto académico. El desgaste adhesivo, un tipo de desgaste que ocurre cuando materiales de dureza similar deslizan entre sí y sus superficies se adhieren y desgastan, es un problema común en industrias como la automotriz y la manufacturera. Este tipo de desgaste no solo afecta la vida útil de los componentes, sino que también representa costos adicionales en mantenimiento y reparaciones.

Ante la falta de equipos especializados y el elevado costo de los dispositivos comerciales de medición de desgaste, esta tesis busca desarrollar un equipo accesible y adaptable a los entornos de enseñanza e investigación de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. La máquina estará diseñada bajo estándares ASTM para asegurar que cumpla con los requisitos técnicos y de precisión necesarios en las mediciones. A través de esta herramienta, se espera proporcionar un recurso valioso que permita a estudiantes y profesores realizar prácticas y estudios sobre los procesos de desgaste, apoyando así la comprensión de este fenómeno y fortaleciendo la formación técnica en la ingeniería mecánica.

Abstract

Design of an Adhesive Wear Measurement Machine

This project proposes the design of a wear-measurement machine, specifically for studying adhesive wear in metals, tailored to meet the educational and research needs at Pontificia Universidad Javeriana Cali. Adhesive wear happens when similar hardness materials slide against each other, causing tiny bits of material to detach due to molecular bonding between surfaces. This wear process, which affects many industries, leads to higher maintenance costs and reduces machinery efficiency. Given the inflated cost of commercial wear testing machines, our project aims to create an accessible, cost-effective alternative. Designed according to ASTM standards, this machine will precisely measure friction and environmental conditions, supporting hands-on learning and advancing tribological research within an academic setting.

Keywords: Adhesive wear, wear measurement, tribology, metal surfaces, engineering education, ASTM standards, mechanical engineering, friction testing, equipment design, cost-effective.

Contenido

	Pág.
Resumen	IV
Lista de Figuras	IX
Lista de Tablas	XII
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	3
2. Justificación	7
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general.....	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. Marco teórico y estado del arte	10
4.1 Tribología	10
4.2 Fricción.....	10
4.2.1 Coeficiente de fricción.....	11
4.3 Desgaste	12
4.3.1 Desgaste Adhesivo.....	13
4.3.2 Modelo de Archard.....	13
4.4 Métodos de medición de desgaste.....	14
4.4.1 Tribómetro cuatro bolas.....	15
4.4.2 Tribómetro bola sobre disco	15
4.4.3 Tribómetro bloque sobre disco	16
4.4.4 Tribómetro placa sobre placa o lineal recíprocante.....	16
4.4.5 Pin sobre disco	17
4.5 Fundamentos del diseño	18
4.5.1 Norma ASTM G99	19
4.5.2 Norma ASTM G133.....	20
4.5.3 Norma ASTM D4172	21
4.5.4 Norma ISO 17025	21
4.6 Elementos finitos.....	22
4.7 Estado del arte.....	23
4.7.1 Tribómetro lineal recíprocante	24
4.7.2 Tribómetro esfera sobre disco	25
4.7.3 Tribómetro tipo perno en disco.....	29
4.7.4 UMT Tribolab.....	31
4.7.5 TE 53. Probador de fricción y desgaste multiusos por Phoenix Tribology.....	33
5. Metodología	34
5.1 Definición de especificaciones de requerimientos	34
5.2 Diseño conceptual	34
5.2.1 Casa de la calidad.....	35

5.2.2	Selección de la máquina.....	35
5.2.3	Análisis funcional.....	36
5.2.4	Bosquejo conceptual.....	37
5.2.5	Sistemas y subsistemas.....	37
5.3	Diseño en detalle.....	37
5.4	Análisis mediante elementos finitos.....	37
6.	Requerimientos de diseño.....	38
6.1	Requerimientos del cliente.....	38
6.2	Requerimientos técnicos/tecnológicos del dispositivo.....	38
6.3	Requerimientos mecánicos del dispositivo.....	39
7.	Diseño conceptual.....	40
7.1	Casa de la calidad.....	40
7.2	Selección de máquina.....	45
7.2.1	Criterios de selección.....	45
7.2.2	Selección mejor alternativa.....	49
7.3	Análisis funcional de la máquina.....	50
7.4	Bosquejo conceptual de la máquina.....	53
7.5	Sistemas y subsistemas de la máquina.....	55
7.5.1	Sistema de sujeción de la muestra.....	55
7.5.2	Sistema de aplicación de carga.....	55
7.5.3	Sistema de movimiento controlado de la muestra.....	56
7.5.4	Sistema de control y automatización.....	56
8.	Restricciones.....	58
9.	Diseño en detalle.....	59
9.1	Definición de especificaciones técnicas.....	60
9.1.1	Elección y especificación del espacio.....	60
9.1.2	Selección del material a evaluar.....	61
9.1.3	Selección de rango de velocidad y carga.....	62
9.2	Diseño del sistema de movimiento controlado del disco.....	63
9.2.1	Diseño del subsistema de accionamiento.....	63
9.2.2	Diseño del subsistema de transmisión.....	66
9.3	Diseño del sistema de sujeción del pin y del disco.....	72
9.3.1	Selección sujeción del disco.....	73
9.3.2	Selección sujeción del pin.....	76
9.4	Diseño del sistema de aplicación de carga.....	78
9.4.1	Diseño del subsistema de carga variable.....	79
9.4.2	Diseño del subsistema de soporte de carga.....	80
9.5	Diseño estructura estable.....	84
9.6	Diseño del sistema de control y automatización.....	88
9.6.1	Diseño del subsistema de medición de condiciones ambientales.....	88
9.6.2	Diseño del subsistema de medición de coeficiente de fricción.....	91
9.6.3	Diseño del subsistema de visualización de parámetros de prueba.....	94
9.6.4	Diseño del sistema lógico.....	95
10.	Análisis mediante elementos finitos.....	101
10.1	Análisis eje de transmisión de potencia.....	101
10.1.1	Caso 1 – Bajo condiciones de funcionamiento normal.....	101
10.1.2	Caso 2 – Bajo condiciones ante situación de bloqueo.....	103

10.2	Análisis placa base.....	105
11.	Resultados	107
11.1	Diseño por costo (Design for Cost).....	107
11.2	Diseño por valor (Design for Value).....	111
12.	Conclusiones	113
13.	Recomendaciones	114
Bibliografía	115
Anexos	117

Lista de Figuras

Figura 1. Diseño conceptual de tribómetro lineal recíprocante [18].	25
Figura 2. Mesa de soporte [1].	25
Figura 3. Motor reductor SEW-EURODRIVE [1].	26
Figura 4. Sistema motor-disco [1].	27
Figura 5. Sistema de posicionamiento vertical [1].	27
Figura 6. Sistema de posicionamiento vertical [1].	28
Figura 7. Brazo que sostiene el contra cuerpo y la carga normal [1].	28
Figura 8. Set para soporte de contra cuerpo [1].	29
Figura 9. Tribómetro tipo perno en disco [19].	31
Figura 10. UMT tribolab [20].	32
Figura 11. Probador de fricción y desgaste multiusos TE 53 [21].	33
Figura 12. Casa de la calidad, requerimientos del cliente, requerimientos de ingeniería y su relación.	43
Figura 13. Relación entre requerimientos de ingeniería.	44
Figura 14. Árbol de decisiones para la selección de la mejor alternativa de diseño	50
Figura 15. Caja negra de la máquina.	51
Figura 16. Caja transparente de la máquina	52
Figura 17. Propuesta diseño conceptual de una máquina pin sobre disco para medir desgaste adhesivo.	54
Figura 18. Rediseño conceptual del diseño conceptual de una máquina pin sobre disco para medir desgaste adhesivo.	55
Figura 19. Modelo 3D de una máquina para medir desgaste tipo pin sobre disco, a) Vista isométrica modelo 3D, b) Modelo 3D del subsistema de transmisión de potencia, c) Vista 3D del subsistema de medición del coeficiente de fricción, d) Modelo 3D subsistemas de aplicación de carga, sujeción del pin y contrapeso	60
Figura 20. Motor reductor SEW EURODRIVE [26]	67
Figura 21. Unión del motor a la máquina a) Motor unido a la lamina mediante soportes de goma con rosca M8 b) soporte de goma con rosca M8 para unión del motor con la lámina.	68
Figura 22. Eje de transmisión de potencia del motor a el disco	69
Figura 23. Fuerza de fricción sobre el disco	69
Figura 24. Fuerza de fricción y fuerza normal sobre el disco	70
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre sobre el eje de transmisión de potencia	70
Figura 26. Diagramas de esfuerzo cortante, flector, a torsión y normal sobre el eje de transmisión de potencia del motor al disco	71
Figura 27. Mordazas tipo torno	74
Figura 28. Mordazas con prisionero [1]	74
Figura 29. Mordazas tipo prensa [1], [28].	74

Figura 30. Sistema de sujeción mediante tapa y contratapa [28].	75
Figura 31. Sistema diseñado para la sujeción del disco mediante tapa y contratapa	76
Figura 32. Sujeción tipo broquero	76
Figura 33. Sujeción mediante prisionero	77
Figura 34. Broquero ½" BOSCH 20 UNF 2 A seleccionado para realizar la sujeción del pin [29]	78
Figura 35. Modelo 3D del sistema de aplicación de carga	78
Figura 36. Soporte para pesas diseñado	80
Figura 37. Sistema completo de soporte de carga	81
Figura 38. Modelo 3D subsistema de soporte de carga a) base para el brazo principal, b) brazo principal, c) eje brazo principal d) U del brazo principal.	82
Figura 39. Modelo 3D subsistema de soporte de carga a) base para el brazo principal, b) eje celda de carga c) contrapeso d) eje contrapeso	83
Figura 40. Rodamiento SKF 624 2Z	83
Figura 41. Modelo 3D con nombres de la estructura principal ensamblada.	84
Figura 42. Modelo 3D estructura principal a) estructura base con tubos estructurales 20x20x2mm, b) l'amina principal de recubrimiento, c) lámina base de soporte de la máquina general y el motor, d) lámina frontal 1, e) lámina frontal 2	85
Figura 43. Modelo 3D de puerta trasera de la máquina y la manija.	86
Figura 44. Nivelador de la máquina de tipo M10 x 100 mm de longitud	87
Figura 45. Modelo 3D del esquema general de la cubierta de la máquina	88
Figura 46. Modelo 3D subsistema de medición de condiciones ambientales a) Ubicación de los sensores en la máquina, b) Sensores de humedad y temperatura.	89
Figura 47. Sensor de temperatura [31].	90
Figura 48. Sensor de humedad [32].	90
Figura 49. Modelo general de la estructura del subsistema de medición de coeficiente de fricción con sus nombres.	91
Figura 50. Celda de carga Omega LCGD-25 [32].	92
Figura 51. Eje de transmisión de fuerza del brazo principal a la celda de carga.	93
Figura 52. Modelo 3D base para sujeción de la celda de carga	94
Figura 53. Pantalla HMI C400 Allen Bradley [33] su ubicación en la máquina y la ubicación de los botones de emergencia y de encendido y apagado.	95
Figura 54. Orden lógico de activaciones y desactivaciones en paralelo.	99
Figura 55. Subproceso de inicialización y diagnóstico de la máquina.	99
Figura 56. Graficet del proceso de la máquina.	100
Figura 57. Simulación 1 esfuerzo de Von Mises en eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido)	102
Figura 58. Simulación 1 a eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido) para hallar factor de seguridad.	103
Figura 59. Simulación 2 esfuerzo de Von Mises en eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido)	104
Figura 60. Simulación 2 a eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido) para hallar factor de seguridad.	105
Figura 61. Simulación esfuerzo de Von Mises en placa base de la máquina (lámina de acero 1020 laminado en frío)	106
Figura 62. Simulación a placa base de la máquina (placa de acero 1020 laminado en frío) para hallar factor de seguridad.	106

Lista de Tablas

Tabla 1. Información programas revisados en la región del Valle del Cauca	4
Tabla 2. Información acerca de los grupos de interés.....	6
Tabla 3. Notación para el propósito de los requerimientos de diseño.....	41
Tabla 4. Ponderación para los requerimientos de diseño	41
Tabla 5. Relaciones para los requerimientos de diseño de la matriz.....	41
Tabla 6. Porcentajes de importancia de los requerimientos de los clientes de acuerdo con los resultados de la encuesta	42
Tabla 7. Pesos relativos de requerimientos de ingeniería a partir de la casa de la calidad	45
Tabla 8. Comparación de cada tipo de máquina respecto a cada criterio.....	48
Tabla 9. Comparación de importancia o preferencia de cada valor cardinal de acuerdo con la escala de Saaty para la AHP.....	49
Tabla 10. Comparación de criterios con alternativas para obtener la mejor alternativa .	50
Tabla 11. Materiales de prueba y características.....	61
Tabla 12. Caracterización del desgaste según las velocidades	62
Tabla 13. Variables utilizadas en los cálculos, valores, unidades y resultados	65
Tabla 14. Resumen de los resultados de análisis de equilibrio fuerzas sobre el eje de transmisión de potencia	71
Tabla 15. Resultados de factor de seguridad.....	72
Tabla 16. Opciones de selección para la sujeción del disco de prueba de la máquina de desgaste abrasivo.....	73
Tabla 17. Opciones de selección para la sujeción del pin de prueba de la máquina de desgaste abrasivo.....	76
Tabla 18. Simbología, y tipo de I/O para desarrollo de GRAFCET.....	97
Tabla 19. Análisis costos de productos comerciales para la construcción de máquina de medición de desgaste adhesivo.....	108
Tabla 20. Piezas con su respectivo material y gramaje	109
Tabla 21. Precio por kilogramo de cada material y kilogramos totales por material	109
Tabla 22. Precio total de cada material.....	110
Tabla 23. Presupuesto y factores externos a los materiales y componentes de la máquina	110
Tabla 24. Ponderación de demandas y deseos.....	111
Tabla 25. Evaluación y justificación del diseño	111

Introducción

El desgaste adhesivo es un tipo de desgaste que ocurre cuando dos superficies metálicas en contacto, bajo movimiento relativo, tienden a unirse debido a la adhesión molecular. Este fenómeno, que puede parecer insignificante a nivel microscópico, tiene efectos significativos en el rendimiento de maquinaria y componentes industriales, lo que resulta en una menor eficiencia operativa, aumentos en los costos de mantenimiento y, en muchos casos, fallas prematuras de los equipos [1]. En sectores como el automotriz, aeroespacial y manufacturero, donde el control y monitoreo de desgaste es crucial para asegurar la fiabilidad y longevidad de los equipos, entender el desgaste adhesivo es esencial para evitar interrupciones en la operación y prolongar la vida útil de los componentes [2].

En Colombia, y especialmente en instituciones académicas como la Pontificia Universidad Javeriana Cali, la falta de equipos especializados para estudiar el desgaste de materiales limita la formación práctica y el avance en la investigación tribológica [3]. Actualmente, en esta universidad no existen dispositivos específicos para medir el desgaste adhesivo en ninguno de sus laboratorios, lo que restringe las oportunidades de aprendizaje experimental para los estudiantes y frena el desarrollo de estudios aplicados en el área de tribología. La adquisición de un equipo comercial que permita realizar estas mediciones implica un alto costo de inversión, que en muchos casos supera los 100.000 USD, lo cual está fuera del alcance de muchos programas educativos [4], [5].

Este proyecto de tesis propone el diseño de una máquina de medición de desgaste adhesivo que será económica y adecuada para los entornos educativos y de investigación de la universidad. Al implementar un diseño bajo estándares ASTM, se garantizará que el equipo cumpla con normas reconocidas internacionalmente, facilitando la recolección de datos precisos y confiables sobre el comportamiento del desgaste en materiales metálicos. Además, este dispositivo permitirá evaluar el coeficiente de fricción y las condiciones

ambientales (como la temperatura y humedad) durante las pruebas, proporcionando a los estudiantes y docentes datos importantes para analizar el desgaste en condiciones controladas.

La máquina de desgaste adhesivo propuesta está pensada no solo como una herramienta de medición, sino como un recurso didáctico que complementará la formación teórica de los estudiantes con prácticas experimentales, ayudándoles a comprender de manera directa los efectos del desgaste adhesivo en distintos materiales y bajo diversas condiciones de carga. En términos económicos, el diseño y desarrollo de un equipo propio representa una ventaja significativa para la universidad, ya que reduce la dependencia de equipos importados costosos y permite a la institución optimizar sus recursos financieros, destinando fondos adicionales para otros proyectos de investigación o mejoras en infraestructura.

De esta forma, el diseño de esta máquina contribuirá al fortalecimiento de la educación en tribología y desgaste en la universidad, promoviendo la investigación aplicada y brindando a los futuros ingenieros mecánicos una herramienta esencial para su formación. Además, este proyecto representa una oportunidad para crear conocimiento propio y sentar las bases para futuras investigaciones en desgaste y eficiencia de materiales, que son aspectos clave en la ingeniería de materiales y el diseño de productos duraderos.

1. Planteamiento del problema

Es fundamental reconocer en que consiste el desgaste y cómo funciona, por lo cual; el desgaste es la pérdida gradual de material en una superficie sólida, debido a la acción mecánica. En específico, el desgaste adhesivo se produce cuando dos superficies no muy rugosas, entre las cuales existe un nivel de dureza similar, deslizan entre sí; lo anterior produce un desprendimiento de material debido a la adhesión molecular entre los cuerpos en contacto. Este es uno de los casos más graves de desgaste, debido a que se caracteriza por altas tasas de desgaste y un gran coeficiente de fricción [1].

A nivel internacional y escala global, el desgaste adhesivo es un problema significativo que afecta a diversas industrias, incluyendo la manufacturera, la automotriz y la aeroespacial. Se estima que el 23 % del gasto energético mundial se origina por contactos tribológicos; el 20 % se usa para vencer la fricción y el 3 % para remanufacturar y fabricar partes de repuestos o que han sufrido desgaste. En adición, se estima que, mediante el uso de nuevas tecnologías, la pérdida de energía debido a la fricción se puede reducir en un 40 % a largo plazo, y en un 18 % a corto plazo, lo que significaría un ahorro del 1.4 % del PIB anual mundial, y un 8,7 % de ahorro energético a largos términos [2]. Por otro lado, el desgaste adhesivo es un desafío considerable en diversas industrias de Colombia, particularmente en aquellas que dependen de maquinaria pesada y equipos industriales. Este tipo de desgaste no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también impone costos significativos de mantenimiento y reparación, que pueden llegar a representar entre el 1 % y 2 % del PIB, según estimaciones basadas en países industrializados [2]. A pesar del creciente número de programas y cursos especializados en mantenimiento industrial y gestión del desgaste ofrecidos por universidades y centros técnicos, la oferta educativa no alcanza a cubrir la demanda del mercado. En las diez universidades principales del país en

cuanto a ingeniería, en pregrado, ninguna presenta materias exclusivas al tema de desgaste adhesivo en superficies lo cual se ilustra mediante la Tabla 1.

Tabla 1. Información programas revisados en la región del Valle del Cauca

Universidad revisada	Facultad revisada	Programas revisados
Universidad del Valle	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería de Materiales 2. Ingeniería Mecánica
Pontificia Universidad Javeriana Cali	Facultad de Ingeniería y Ciencias	1. Ingeniería Mecánica
Universidad Nacional (Sede Bogotá)	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica
Universidad Autónoma de Occidente	Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas	1. Ingeniería Mecánica
Universidad EAFIT	Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica
Universidad de los Andes	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica
Universidad de Antioquia	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería de Materiales 2. Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica
Universidad Industrial de Santander	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica
Universidad del Atlántico	Facultad de Ingeniería	1. Ingeniería Mecánica

Esta situación genera una escasez de personal capacitado, lo que agrava el impacto económico del desgaste en la industria nacional.

La importancia del desarrollo de una máquina de medición de desgaste en la Universidad Javeriana Cali radica en la generación de una valiosa fuente de conocimiento para los ingenieros mecánicos, investigadores y demás personas que puedan acceder a ella. Actualmente, la Javeriana Cali no cuenta con una máquina de medición de desgaste en ninguno de sus 21 laboratorios [3], lo que limita las oportunidades de estudio para estudiantes, investigadores y futuros usuarios interesados en realizar ensayos de desgaste. Sin esta herramienta, se pierden valiosas oportunidades académicas y de investigación.

Además, es crucial considerar los efectos negativos que puede tener un estudio insuficiente sobre el desgaste de materiales, especialmente en aplicaciones industriales y de ingeniería donde este fenómeno afecta la vida útil y eficiencia de los equipos como fue mencionado en el primer párrafo. Desde una perspectiva metodológica y teórica, el desarrollo de la máquina no solo ofrecerá una oportunidad para ampliar el conocimiento de los estudiantes, sino que también permitirá la recolección sistemática de datos relacionados con el desgaste, facilitando investigaciones más precisas y relevantes en este campo. Lo cual enriquecerá tanto el proceso de aprendizaje como la capacidad investigativa de la universidad.

Otro aspecto relevante es el beneficio económico que conlleva desarrollar una máquina internamente. La adquisición de una máquina de medición de desgaste en el mercado puede alcanzar valores elevados, entre 130000 USD y 240000 USD [5] y [4]. Lo anterior representa un costo considerable en comparación con el desarrollo de una máquina propia para uso universitario. La producción interna de esta máquina no solo reduciría costos, sino que también beneficiaría directamente a la universidad, a sus estudiantes y al programa de ingeniería mecánica, potenciando su infraestructura tecnológica y académica.

A continuación, se presentan los grupos de interés, además en la Tabla 2 se amplía la información acerca de cada uno de estos:

1. **Estudiantes de ingeniería de la PUJ:** Especialmente en áreas de la ingeniería mecánica y civil. Pueden usar la máquina para estudiar fenómenos de desgaste en diferentes artefactos y estructuras.
2. **Laboratorios y centros de investigación de la universidad:** Que utilizarán la máquina para realizar experimentos y pruebas. Su interés radica en la funcionabilidad, precisión y capacidad de la máquina para adaptarse a diversos proyectos de investigación.
3. **Industrias manufactureras:** Empresas que produzcan o utilicen piezas sujetas a desgaste abrasivo tales como la automotriz, aeroespacial, construcción. Estas pueden utilizar la máquina para probar la durabilidad de sus materiales o piezas, mejorando la calidad del producto. Además, internamente equipos que se encarguen del mantenimiento de maquinaria de las diferentes industrias. La

máquina les permite anticipar desgaste y planificar de mejor manera el mantenimiento preventivo.

4. **Fabricantes de equipos de pruebas:** Quienes podrían utilizar el diseño como base para desarrollar productos comerciales destinados a laboratorios e industrias.

Tabla 2. Información acerca de los grupos de interés

Grupo de Interés	Característica principal
Estudiante de ingeniería de la PUJ	Usan la máquina pedagógicamente, estudiando y comprendiendo así fenómenos de desgaste en artefactos y estructuras. Especialmente estudiantes de Ingeniería Mecánica y Civil.
Laboratorios y centros de investigaciones de la PUJ	Utilizan la máquina para realizar experimentos y pruebas. Buscan funcionalidad, precisión y capacidad de adaptarse a diferentes proyectos de investigación.
Industrias manufactureras	Empresas de sectores automotriz, aeroespacial y construcción que prueban la durabilidad de materiales sujetos a desgaste. Buscan mejorar la calidad del producto y planificar mejor el mantenimiento preventivo de maquinaria.
Fabricantes de equipos de pruebas	Podrían usar el diseño como base para desarrollar productos comerciales destinados a laboratorios e industrias.

A partir de lo anterior, se presenta la oportunidad de realizar el diseño de una máquina de medición de desgaste adhesivo en metales, teniendo en cuenta unos requerimientos que se definirán más adelante y las normas estandarizadas necesarias. Este proyecto busca desarrollar una máquina de medición de desgaste versátil y accesible para profesores, estudiantes y otros usuarios en la Universidad Javeriana Cali. Además, se proyecta que el costo de desarrollo será inferior al de adquirir una máquina comercial, lo que representaría un beneficio económico significativo para la universidad y contribuiría al fortalecimiento de sus capacidades investigativas y académicas.

2. Justificación

El diseño de una máquina para medir el desgaste adhesivo se justifica, ya que este tipo de desgaste es una de las principales causas de fallas o roturas en componentes mecánicos, afectando su vida útil. Además, conocer el momento óptimo para reemplazar piezas es crucial para la economía de las empresas: un reemplazo prematuro implica gastos adicionales e innecesarios, incrementando los costos de producción y operación. Por otro lado, mantener un componente en uso más allá de su tiempo óptimo puede comprometer tanto el rendimiento y la calidad de este como la seguridad e integridad del entorno en que opera. Un desgaste no detectado a tiempo puede llevar a daños irreversibles en la maquinaria o el sistema, haciendo insuficiente un simple reemplazo de la pieza afectada [6].

En el contexto pedagógico del problema, resulta fundamental justificar el diseño de una máquina de medición de desgaste adhesivo con fines académicos, dado que existe una necesidad creciente de contar con un equipo que no solo sea asequible, sino también eficiente y adaptable a las demandas de los programas universitarios. La incorporación de una máquina con estas características no solo facilitaría el acceso a herramientas especializadas para estudiantes y profesores, sino que también representaría un significativo ahorro económico para la institución. De este modo, se reduciría, la dependencia de equipos costosos o importados, permitiendo a la universidad optimizar sus recursos financieros. Además, disponer de esta tecnología internamente fomentaría un ambiente propicio para la investigación aplicada, impulsando proyectos de innovación y facilitando el desarrollo de experimentos que antes habrían sido limitados o descartados por falta de acceso a equipos adecuados. A nivel pedagógico, esta máquina contribuiría al fortalecimiento de las capacidades en la enseñanza, ya que permitiría una formación más práctica y directa sobre este campo del conocimiento, acercando así a los estudiantes a la

realidad experimental de los fenómenos de desgaste, algo que es crucial para una comprensión profunda de disciplinas relacionadas con la ingeniería y la ciencia de materiales.

3. Objetivos

Los objetivos propuestos para el desarrollo del proyecto de diseño de una máquina de medición de desgaste se presentan a continuación.

3.1 Objetivo general

Diseñar una máquina para medir el desgaste adhesivo de diferentes metales, mediante el proceso de diseño mecánico.

3.2 Objetivos específicos

- Definir los requerimientos del cliente y los requerimientos del diseño mediante investigaciones en la literatura, normas técnicas y entrevistas.
- Definir el tipo de máquina para medir desgaste que se ajuste a las restricciones de diseño y a los requerimientos.
- Realizar el diseño conceptual mediante la identificación de la función y subfunciones del sistema de la opción seleccionada.
- Diseñar cada sistema y subsistema de la máquina, manteniendo el enfoque principal en la parte mecánica.
- Validar los componentes críticos del diseño a nivel de esfuerzos mecánicos mediante el método de elementos finitos.

4. Marco teórico y estado del arte

El diseño de una máquina de medición de desgaste en metales involucra distintas disciplinas y conocimientos de la ingeniería mecánica, por lo que a continuación, se presenta información detallada sobre los aspectos teóricos que deben ser considerados en este proceso de diseño.

4.1 Tribología

La tribología es la ciencia que estudia la interacción entre superficies en movimiento relativo, abarcando fenómenos como la fricción, la lubricación y el comportamiento de los materiales cuando están en contacto. Esta disciplina es fundamental en una amplia gama de aplicaciones industriales, ya que su comprensión permite optimizar el diseño de componentes mecánicos, mejorar la eficiencia energética y reducir el desgaste y los fallos en sistemas mecánicos. La tribología considera variables como la naturaleza de los materiales, las condiciones del entorno, la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada, buscando predecir y mitigar problemas asociados con la interacción entre superficies. A través del análisis tribológico, es posible no solo mejorar la vida útil de los componentes, sino también diseñar soluciones de lubricación más efectivas, reducir pérdidas de energía y aumentar la eficiencia operativa en maquinaria y sistemas industriales [1].

4.2 Fricción

Para este proyecto, es vital conocer y entender el concepto de fricción, ya que es uno de los factores principales que influye en el desgaste de las superficies en contacto. Al comprender cómo se comporta la fricción bajo diferentes condiciones de carga, velocidad

y materiales, es posible predecir y controlar el desgaste adhesivo, que es el foco del diseño de la máquina de medición.

La fricción se define como la resistencia al movimiento de un cuerpo sobre otro cuerpo, o de una superficie con otra superficie. Existen tres leyes fundamentales sobre fricción:

- La fuerza de fricción, F siempre actúa en sentido contrario al movimiento relativo entre las dos superficies en contacto.
- La fuerza de fricción es independiente del área de contacto entre las superficies.
- La fuerza de fricción es una función de la carga normal N y el coeficiente de fricción μ como se muestra en la ecuación (1)

$$F = \mu N \quad (1)$$

La fricción depende de múltiples factores, entre ellos las características microscópicas de las superficies en contacto y el coeficiente de fricción. A nivel microscópico, las superficies no son perfectamente planas, sino que presentan asperezas, depresiones y valles. El contacto real entre dos superficies ocurre solo en las puntas de estas asperezas. Esto genera una deformación plástica localizada, la cual debe romperse al iniciar el deslizamiento, contribuyendo a la fricción adhesiva [1], [7], [8].

4.2.1 Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción se clasifica en dos tipos: estático y cinético. El coeficiente de fricción estático es la fuerza que se opone al inicio del movimiento relativo entre dos superficies en contacto, y suele ser mayor que el coeficiente cinético, que actúa cuando el movimiento ya ha comenzado y se opone a este desplazamiento. Estos coeficientes no son propiedades intrínsecas del material, sino que dependen de factores como la rugosidad superficial, la presencia de lubricantes, las condiciones de medición y las características térmicas y mecánicas de los materiales. Los valores típicos del coeficiente de fricción pueden variar ampliamente: desde 0.03 en superficies muy bien lubricadas, hasta valores

de 0.5 o 0.7 en deslizamiento en seco, e incluso pueden alcanzar valores cercanos a 5 en superficies metálicas limpias [1], [8].

En particular, el coeficiente de fricción actúa como un indicador clave del tipo y la intensidad de las interacciones tribológicas que se producen durante el deslizamiento relativo. El desgaste adhesivo se origina cuando las asperezas de las superficies en contacto se adhieren entre sí a nivel microscópico, generando uniones que, al romperse debido al movimiento, arrancan material y contribuyen a la degradación de las superficies. Este mecanismo suele ir acompañado de variaciones en el coeficiente de fricción, ya que la formación y ruptura de estas uniones adhesivas afectan directamente la resistencia al movimiento. Por lo tanto, existe una correlación directa entre ambos fenómenos: el análisis del comportamiento del coeficiente de fricción a lo largo del tiempo permite inferir la presencia y evolución del desgaste adhesivo, lo que convierte a la fricción en una herramienta fundamental para estudiar y caracterizar este tipo de desgaste.

4.3 Desgaste

El desgaste, en general, se define como el deterioro progresivo de una o ambas superficies que se encuentran en contacto en un movimiento relativo. Durante este proceso, las capas superficiales de un sólido se fracturan o desprenden, lo que provoca daños en los componentes [1]

El desgaste es una respuesta integral del sistema y no depende exclusivamente de las propiedades del material. La importancia de comprender y estudiar este fenómeno radica en la posibilidad de identificar el momento adecuado para reemplazar una pieza o hacerle mantenimiento, evitando así daños futuros en maquinaria y sistemas [1].

La cuantificación del desgaste se realiza midiendo la pérdida de peso o volumen por unidad de tiempo o por unidad de distancia recorrida. Existen diversos tipos de desgaste. Entre ellos está el desgaste abrasivo, que ocurre cuando un objeto sólido se desliza sobre partículas de otro material de igual o mayor dureza. También se presenta cuando una superficie dura o rugosa se desliza sobre una más blanda (desgaste entre dos cuerpos) o cuando hay partículas entre dos superficies blandas (desgaste entre tres cuerpos).

Otro tipo es el desgaste por fatiga, en el cual las asperezas y las capas superficiales se ven afectadas por altos esfuerzos repetitivos, generando grietas tras el contacto con otras superficies. También está el desgaste corrosivo, que se produce a partir de reacciones químicas que llevan a la pérdida de material. Finalmente, el desgaste adhesivo, que es el foco central de este proyecto, se describe a continuación [1].

4.3.1 Desgaste Adhesivo

El desgaste adhesivo es un fenómeno que ocurre cuando dos superficies metálicas en contacto y en movimiento se adhieren entre sí, lo que resulta en la transferencia de material de una superficie a otra. Este tipo de desgaste se produce debido a la formación de uniones de soldadura en fase sólida en la interfaz de deslizamiento, donde las fuerzas adhesivas superan las fuerzas del cuerpo de al menos uno de los materiales involucrados. Como resultado, el material más débil se desgasta, lo que puede llevar a la acumulación de residuos que agravan el desgaste.

Factores que influyen en el Desgaste Adhesivo: Varios factores afectan el desgaste adhesivo, entre los que se incluyen la geometría de las piezas, la carga aplicada, la velocidad de movimiento y la temperatura. Por ejemplo, se ha observado que un aumento en la carga tiende a incrementar el desgaste, especialmente al superar un umbral crítico. Además, temperaturas elevadas pueden acelerar el proceso de desgaste, ya que incrementan la actividad molecular y reducen la resistencia del material, facilitando así la erosión. La selección de materiales y el acabado de las superficies son cruciales para mitigar el desgaste, lo que resalta la importancia de comprender estos mecanismos en el diseño y la ingeniería de materiales [9].

4.3.2 Modelo de Archard

El modelo más ampliamente reconocido para la cuantificación del desgaste, que considera las propiedades de los materiales, la carga aplicada y la velocidad de deslizamiento entre dos cuerpos, fue formulado por J.F. Archard [10]. Archard establece que el volumen total de desgaste es proporcional al área de contacto y a la distancia recorrida durante el deslizamiento, expresándolo de la siguiente manera:

$$V = k A_r L \quad (2)$$

Donde V es el volumen de desgaste, k es la constante de proporcionalidad entre el área real de contacto A_r , la distancia de deslizamiento y el volumen de desgaste, L es la distancia de deslizamiento.

Este modelo también puede ser expresado como se muestra en la Ecuación (3), la cual es válida para contacto en seco únicamente.

$$V = k L \frac{W}{H} \quad (3)$$

Donde k es el coeficiente de desgaste, L es la distancia deslizada, W es la carga aplicada y H es la dureza o suavidad del material. El coeficiente de desgaste es una función de varias propiedades del material, su valor numérico se encuentra previamente definido para cada uno de los materiales [7].

4.4 Métodos de medición de desgaste

Existen diversos métodos experimentales para estudiar el desgaste adhesivo, los cuales se utilizan en investigaciones de laboratorio para entender los mecanismos que generan el desgaste o para simular aplicaciones prácticas y obtener datos útiles sobre las tasas de desgaste y los coeficientes de fricción. La selección adecuada, el control y la medición de las variables que influyen en el desgaste son esenciales, ya que pequeñas variaciones en las condiciones de deslizamiento pueden cambiar drásticamente el mecanismo dominante y la tasa de desgaste. Entre los métodos más comunes para medir el desgaste se encuentran el pin sobre disco, donde un pin se presiona contra un disco en rotación; el bloque sobre anillo, en el cual un bloque se desliza sobre un anillo; el pin sobre superficie plana y el bola sobre superficie plana, que emplean un pin o una bola en contacto con una superficie plana. Estos métodos permiten evaluar la fricción y el desgaste bajo diferentes condiciones de carga, velocidad de deslizamiento y ambiente. Además, algunos de estos métodos están estandarizados por normativas internacionales, como la ASTM G99 para el desgaste con geometría pin sobre disco, la ASTM G77 para bloque sobre anillo y ASTM G98

para el desgaste por *galling* con pin sobre superficie plana rotativo. Estos procedimientos proporcionan información valiosa sobre el comportamiento tribológico de los materiales en contacto deslizante [11].

4.4.1 Tribómetro cuatro bolas

La máquina de desgaste de cuatro bolas evalúa el comportamiento de lubricantes y materiales bajo condiciones de carga y fricción. Su configuración incluye tres bolas fijas en una copa, formando un triángulo, y una cuarta bola que gira sobre ellas mediante un motor a velocidad controlada. Durante la prueba, se aplica una carga específica sobre la bola giratoria, mientras un lubricante (o ninguna sustancia en pruebas en seco) es utilizado para observar cómo se comportan los materiales en contacto.

El sistema mide el desgaste y el coeficiente de fricción al analizar los puntos de contacto entre las bolas, lo que permite obtener datos sobre la resistencia al desgaste, el coeficiente de fricción y la eficacia del lubricante bajo condiciones de esfuerzo. Los sensores registran variables de fricción, temperatura y carga, generando resultados que ayudan a predecir el rendimiento de materiales o lubricantes en condiciones reales [11].

4.4.2 Tribómetro bola sobre disco

Funciona mediante el contacto entre una bola (generalmente de acero o material duro) y un disco (que puede ser de metal, cerámica u otro material) el cual rota bajo una carga específica.

- **Configuración inicial:** La bola se coloca sobre el disco, y se aplica una carga normal (fuerza vertical) sobre la bola, lo que genera presión en el punto de contacto.
- **Movimiento relativo:** El disco comienza a girar a una velocidad constante, creando un movimiento relativo entre la bola y el disco. La bola puede permanecer fija o también girar dependiendo del diseño del tribómetro.

- **Generación de fricción:** A medida que el disco rota, la bola experimenta fricción en la zona de contacto. Esta fricción genera calor y desgaste en ambas superficies.
- **Medición de parámetros:** El tribómetro mide la fuerza de fricción entre la bola y el disco, generalmente mediante celdas de carga. También se puede medir la temperatura y la pérdida de masa o volumen de las superficies en contacto para cuantificar el desgaste.
- **Análisis:** Los datos obtenidos se utilizan para calcular el coeficiente de fricción (que es la relación entre la fuerza de fricción y la carga normal) y analizar el desgaste de la bola y el disco, lo que ayuda a evaluar las propiedades tribológicas del material bajo diferentes condiciones de operación, como velocidad, carga y lubricación.

Este tipo de prueba es común para evaluar materiales en condiciones de deslizamiento, fricción y desgaste, permitiendo comparar diferentes materiales o lubricantes [1].

4.4.3 Tribómetro bloque sobre disco

El tribómetro bloque sobre disco funciona mediante el contacto entre un bloque fijo y un disco rotatorio. El bloque se coloca sobre el disco, y se aplica una carga normal constante sobre el bloque para presionarlo contra el disco. A medida que el disco gira, se genera fricción en la zona de contacto. La máquina mide la fuerza de fricción y el desgaste en ambas superficies, permitiendo analizar el comportamiento tribológico bajo diferentes condiciones de carga, velocidad y lubricación. Los resultados obtenidos ayudan a evaluar la resistencia al desgaste y el coeficiente de fricción entre los materiales probados [11].

4.4.4 Tribómetro placa sobre placa o lineal recíprocante

Un tribómetro placa sobre placa o recíproco funciona realizando movimientos de deslizamiento entre dos superficies planas (placas), una de las cuales generalmente está fija mientras que la otra se mueve de manera recíproca (hacia adelante y hacia atrás).

Durante la prueba, se aplica una carga normal sobre las placas, lo que genera fricción entre ellas. El movimiento recíproco permite simular condiciones de deslizamiento repetitivo, replicando situaciones de contacto en componentes que experimentan movimientos oscilantes o lineales.

El tribómetro mide parámetros como el coeficiente de fricción y el desgaste superficial al observar cómo cambia la superficie de las placas durante las pruebas, pudiendo realizarse tanto en condiciones secas como lubricadas. Las mediciones se realizan mediante sensores de fuerza y temperatura, lo que permite analizar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de carga, velocidad y temperatura. Este tipo de tribómetro es común en estudios de materiales que experimentan deslizamientos repetitivos, como en componentes de maquinaria industrial [1].

4.4.5 Pin sobre disco

La máquina pin sobre disco es un dispositivo utilizado para realizar pruebas de desgaste en materiales. Su diseño permite simular el contacto y el deslizamiento entre dos superficies, lo que ayuda a evaluar cómo se desgastan los materiales bajo diferentes condiciones. A continuación, se describen sus partes y su funcionamiento:

- **Disco:** Es una superficie circular que gira a alta velocidad. Este disco puede estar hecho de diferentes materiales, dependiendo de la prueba que se desee realizar.
- **Pin:** Es un cilindro o varilla que se mantiene fijo y se presiona contra el disco giratorio. El pin puede tener diferentes formas y materiales, y su elección es crucial para obtener resultados precisos en las pruebas de desgaste.
- **Sistema de carga:** Este mecanismo aplica una carga normal sobre el pin, lo que simula las condiciones de contacto que se encontrarían en aplicaciones reales. La carga puede ser ajustable para estudiar su efecto en el desgaste.
- **Motor:** Proporciona la energía necesaria para hacer girar el disco a la velocidad deseada.
- **Sistema de medición:** Puede incluir sensores y dispositivos para medir el desgaste del pin y del disco, así como la distancia recorrida y la velocidad de deslizamiento.

- **Controlador:** Permite ajustar y controlar las condiciones de la prueba, como la velocidad del disco, la carga aplicada y el tiempo de prueba.

El funcionamiento de la máquina se explica a continuación:

- **Preparación:** Se coloca el pin en su posición fija y se ajusta la carga que se aplicará sobre él. El disco se coloca en su lugar y se asegura que esté alineado correctamente.
- **Inicio de la prueba:** Se enciende el motor, lo que hace que el disco comience a girar. El pin, que permanece fijo, entra en contacto con la superficie del disco.
- **Desgaste:** A medida que el disco gira, el pin se desgasta debido al contacto y la fricción entre ambos. La máquina puede registrar datos sobre la cantidad de material que se pierde, la temperatura generada y otros factores relevantes.
- **Finalización:** Una vez que se ha completado el tiempo de prueba o se ha alcanzado la distancia deseada, se detiene el motor. Se mide el desgaste del pin y del disco para analizar los resultados.
- **Análisis:** Los datos recopilados se utilizan para evaluar el comportamiento de los materiales bajo condiciones específicas, lo que es fundamental para mejorar la durabilidad y el rendimiento de componentes mecánicos en diversas aplicaciones.

Este tipo de pruebas es esencial en la ingeniería mecánica, ya que el desgaste es una de las principales causas de falla en las máquinas y de gasto económico en las empresas [12].

4.5 Fundamentos del diseño

En el diseño de una máquina para medir el desgaste adhesivo en superficies, es fundamental considerar una serie de normas y estándares que aseguren la precisión, seguridad y fiabilidad del equipo. Estas normas abarcan desde especificaciones técnicas y materiales hasta procedimientos de calibración y métodos de ensayo. Entre las principales normativas aplicables se encuentran las normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*), que proporcionan directrices detalladas para la construcción y operación de equipos de medición de desgaste. Acogerse a estas normativas no solo garantiza la calidad

del diseño, sino que también facilita la comparabilidad de los resultados obtenidos con otros estudios y aplicaciones industriales.

4.5.1 Norma ASTM G99

La máquina de pruebas de desgaste, conocida como "pin sobre disco", es un equipo diseñado para evaluar el comportamiento de los materiales cuando están en contacto y se deslizan uno sobre el otro. El funcionamiento se basa en colocar un pin (o cilindro) en contacto con un disco giratorio. A medida que el disco rota, el pin desliza sobre su superficie, permitiendo medir el desgaste sufrido por ambos componentes. Algunos aspectos clave a considerar son:

- 1) **Equipos necesarios:** Es fundamental contar con una máquina que registre las revoluciones del disco y que se apague automáticamente después de alcanzar un número predeterminado de giros.
- 2) **Parámetros de prueba:** Las condiciones estándar incluyen una fuerza normal de 10 N, una velocidad de deslizamiento de 0.1 m/s, y una distancia de deslizamiento de 1000 m. Los pines deben tener un diámetro de 10 mm, y las pruebas se realizan en aire, a 23°C, con una humedad relativa que oscile entre el 12% y el 78%.
- 3) **Preparación de las muestras:** Los pines pueden ser cilíndricos o esféricos, mientras que los discos deben tener un diámetro de entre 30 y 100 mm, con una superficie suficientemente lisa para obtener resultados precisos.
- 4) **Procedimiento de prueba:** Antes de comenzar la prueba, se deben limpiar y secar cuidadosamente las muestras, medirlas con precisión, y configurar la máquina para iniciar el proceso.
- 5) **Medición del desgaste:** El desgaste se mide en términos de pérdida de volumen en milímetros cúbicos tanto para el pin como para el disco, empleando fórmulas específicas para cada uno.
- 6) **Precisión y sesgo:** La precisión de los resultados depende de la homogeneidad del material y del estricto cumplimiento de los procedimientos. No se puede establecer un sesgo debido a la ausencia de valores absolutos de referencia aceptados para el desgaste.

Para más información consultar referencia [13].

4.5.2 Norma ASTM G133

La norma ASTM G133 proporciona directrices para realizar pruebas de desgaste por deslizamiento lineal en materiales. Algunos aspectos claves para considerar son:

- **Equipos necesarios:** Especifica el uso de un equipo que permita el movimiento de deslizamiento lineal entre dos superficies en contacto, se debe aplicar una carga constante en la muestra durante la prueba, debe medir con precisión la distancia de desplazamiento y la velocidad de deslizamiento, sistema de lubricación opcional
- **Parámetros de prueba:** Fuerza de contacto de entre 10 N y 200 N, velocidad de deslizamiento de entre 10 mm/s y 100 mm/s, la distancia de deslizamiento de entre 500 mm y 2000 mm, para evaluar el material bajo condiciones de desgaste extremo se especifica números de ciclos de entre 50000 y 500000, temperaturas de entre 0°C y 100°C.
- **Preparación de la muestra:**
 - Para la muestra que se moverá linealmente (pieza móvil), se recomienda una superficie de contacto rectangular de 6 mm a 10 mm de ancho y 20 mm a 30 mm de largo.
 - La otra muestra (pieza estacionaria) suele tener un área de contacto compatible, y puede ser un bloque con una superficie plana de mínimo 10 mm x 10 mm.
 - El espesor mínimo de las muestras debe ser de 3 mm para asegurar rigidez y evitar deformaciones.
 - El acabado superficial de ambas muestras debe ser uniforme y consistente. Generalmente, se recomienda un valor de rugosidad de $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ para la pieza móvil y $Ra \leq 0.8 \mu\text{m}$ para la pieza estacionaria, aunque esto puede variar según el material y los requisitos del ensayo.
- **Medición de desgaste:** Se mide el volumen o la masa de material perdido durante el ensayo como indicativo de desgaste.

Para más información consultar la referencia [14].

4.5.3 Norma ASTM D4172

La norma ASTM D4171 describe un método de prueba para evaluar en condiciones de deslizamiento mediante el uso del equipo de prueba máquina de cuatro bolas el cual está compuesto por una bola móvil y tres bolas estacionarias colocadas en una copa. Algunos de los aspectos claves a considerar son:

- **Equipos necesarios:** Sistema de carga el cual aplica una fuerza sobre la bola giratoria y un sistema de lubricación.
- **Parámetros de prueba:** La norma especifica una carga estándar de 392N (40 kgf), aunque se puede ajustar según las necesidades del ensayo, se recomienda una velocidad rotacional de la bola dinámica 1200 rpm y se suele hacer a 75°C.
- **Preparación de la prueba:** Las bolas deben ser de acero de alta calidad y con una dureza específica de 65 HR, con un diámetro de 12.7 mm (0.5 in), además deben tener una superficie pulida y limpia sin defectos visibles.
- **Medición de prueba:** Se mide el diámetro de la huella de desgaste en las tres bolas estacionarias. Esto se hace utilizando un microscopio óptico con precisión, y el promedio de las tres mediciones se toma como la medida de desgaste.

Para más información acerca de la norma, revisar la referencia [15].

4.5.4 Norma ISO 17025

Esta normativa establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Es un estándar internacional que asegura que los laboratorios que realizan pruebas y calibraciones puedan producir resultados precisos, confiables y trazables. Algunos de los aspectos claves son:

- **Requisitos de gestión:** Abarcan los aspectos de gestión de calidad que un laboratorio debe implementar, como el control de documentos, la revisión de contratos, la mejora continua y la atención al cliente. Aunque la ISO 17025 no es

una norma de gestión de calidad completa como la ISO 9001, incluye muchos principios de calidad.

- **Requisitos técnicos:** Son los requisitos específicos que un laboratorio debe cumplir para demostrar su competencia técnica, que incluyen la competencia del personal, la adecuación de los métodos de prueba y calibración, la trazabilidad de las mediciones, la validez de los resultados y el uso de equipos adecuados.
- **Sistema de gestión:** La norma permite que el laboratorio implemente un sistema de gestión basado en la norma ISO 9001 o uno específico de ISO 17025. Esto permite que el laboratorio mantenga control sobre sus operaciones y garantice la precisión y consistencia en sus resultados.
- **Trazabilidad y exactitud:** La norma exige que todos los resultados de ensayo y calibración sean trazables a estándares reconocidos, como los de los organismos nacionales de normalización. La trazabilidad es esencial para garantizar que las mediciones y calibraciones puedan ser replicables y confiables.
- **Aseguramiento de la calidad de los resultados:** La ISO 17025 requiere que los laboratorios implementen procesos de control de calidad internos y externos para garantizar la validez de sus resultados. Esto incluye participar en ensayos de aptitud y en actividades de comparación entre laboratorios cuando sea posible.

Para más información acerca de la norma, revisar la referencia [16].

4.6 Elementos finitos

El análisis de elementos finitos es un método computacional utilizado para predecir el comportamiento de estructuras y componentes mecánicos cuando están sujetos a condiciones del mundo real, como cargas, vibraciones, transferencia de calor y flujo de fluidos. Este tipo de simulación permite evaluar la resistencia, durabilidad y desempeño de un diseño antes de su fabricación, identificando posibles fallas o áreas críticas donde podrían producirse fracturas, desgastes o deformaciones.

El método consiste en dividir un objeto complejo en un gran número de elementos finitos, que son pequeñas figuras geométricas, como tetraedros o cubos. A cada uno de estos elementos se le aplican ecuaciones matemáticas que modelan su respuesta física bajo ciertas condiciones. Posteriormente, el programa computacional integra los resultados individuales para predecir el comportamiento global del objeto analizado.

A través del análisis de elementos finitos, es posible evaluar diversos fenómenos físicos, como:

- **Esfuerzo mecánico y deformaciones** en materiales sometidos a cargas externas.
- **Vibraciones mecánicas**, para evitar resonancias peligrosas en máquinas y estructuras.
- **Fatiga de materiales**, estimando la vida útil de un componente bajo cargas cíclicas.
- **Movimiento y dinámica estructural**, considerando impactos y desplazamientos.
- **Transferencia de calor**, para analizar disipación térmica y gradientes de temperatura.
- **Interacción fluido-estructura**, en aplicaciones donde líquidos o gases influyen en la estabilidad del objeto.

Para llevar a cabo estos análisis, existen diversos software especializados en análisis de elementos finitos, entre los cuales destacan ANSYS, Abaqus, SolidWorks Simulation, COMSOL Multiphysics, Siemens NX Nastran, Autodesk Inventor Nastran.

El uso de software no solo mejora la precisión del diseño, sino que también reduce costos y tiempos de desarrollo, al minimizar la necesidad de prototipos físicos y pruebas experimentales. Para más información al respecto consultar la referencia [17].

4.7 Estado del arte

El estado del arte en el diseño de máquinas para medir el desgaste adhesivo en superficies abarca una amplia gama de investigaciones y desarrollos tecnológicos recientes. Este

apartado se centra en revisar y analizar los avances más significativos en la metodología de medición de desgaste, los materiales utilizados, y las innovaciones en el diseño de equipos. A continuación, se examinan estudios previos, así como las tendencias actuales en la industria y la academia.

4.7.1 Tribómetro lineal reciprocante

Ortiz Amenta, Vera Cardenas, Abundis Fong y Martínez Pérez [18] diseñaron un tribómetro lineal reciprocante siguiendo la metodología de Nigel Cross y la norma ASTM G133, priorizando la simplicidad y la economía en su construcción. Este equipo cuenta con componentes como un motor eléctrico de CA y un mecanismo de Yugo Escocés, el cual convierte el movimiento rotacional del motor en un movimiento lineal reciprocante. El diseño permite realizar pruebas tanto en seco como lubricadas, abarcando un rango de temperaturas entre 25°C y 200°C. Además, es capaz de realizar ensayos de fricción y desgaste, operando en frecuencias de 5 Hz a 30 Hz y con una carrera ajustable de entre 2 mm y 20 mm. El tribómetro incorpora sensores como termopares y celdas de carga para medir la temperatura y la fuerza, lo que permite calcular el coeficiente de fricción con precisión. La adquisición de datos se realiza mediante una tarjeta NI USB6008, mientras que la interfaz gráfica es gestionada a través del software LabVIEW, facilitando el acceso, control y visualización en tiempo real de los resultados. El bastidor del equipo está fabricado en aluminio extruido, lo que ayuda a evitar resonancias, garantizando un funcionamiento estable y confiable. Sin embargo, este trabajo fue únicamente un diseño conceptual y no se llevó a cabo la construcción física del tribómetro, el diseño se ilustra en la Figura 1.

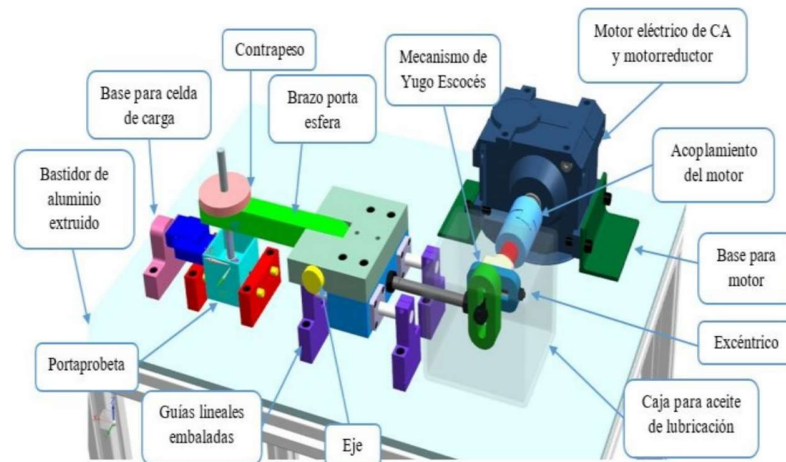


Figura 1. Diseño conceptual de tribómetro lineal recíprocante [18].

4.7.2 Tribómetro esfera sobre disco

Zuleta [1] diseñó y fabricó un tribómetro tipo esfera sobre disco para evaluar las propiedades de fricción y desgaste de materiales. A continuación, se describen sus componentes y su función.

- **Mesa soporte:** La cual se compone de una estructura metálica, soportes de caucho y el bloque de grano natural. Esta funciona como soporte del tribómetro. La Figura 2 ilustra el ensamble de la mesa.

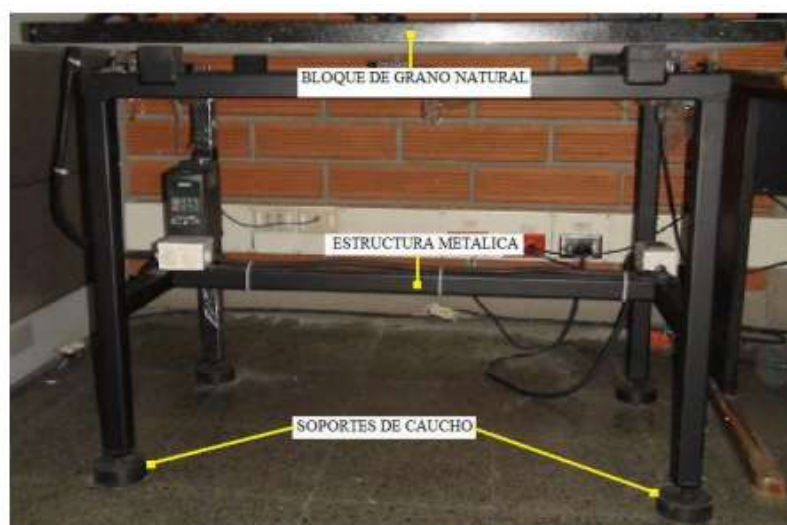


Figura 2. Mesa de soporte [1].

- **Celdas de carga:** Estas son utilizadas para medir la fuerza aplicada durante los ensayos. El sistema de desplazamiento de las celdas de carga está fabricado en acero inoxidable.
- **Microcontrolador JM60:** Su función es adquirir las variables análogas, como humedad, temperatura y fuerza, y transmitir las a un computador a través de un puerto USB y a una pantalla LCD.
- **Acondicionador PGA309:** Este componente amplifica la señal de las celdas de carga para asegurar que sean adquiridas con bajo ruido.
- **Sistema de control electrónico:** Incluye una caja de control donde se conectan todos los cables que transportan las señales a una tarjeta principal, facilitando la comunicación con el computador.
- **Sensores:** Se utilizaron sensores de humedad y temperatura para monitorear las condiciones durante los ensayos.
- **Prensa porta muestras:** Este elemento permite realizar ensayos en seco y lubricados, asegurando que las muestras estén correctamente posicionadas durante las pruebas.

Por otro lado, se encuentra el sistema motor-disco, el cual es el encargado de la parte principal del ensayo que es movilizar el disco donde se soportará la muestra para que esta pueda ser desgastado mediante la esfera.

- **Motor:** Tipo espiro plano marca SEW-EURODRIVE que se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Motor reductor SEW-EURODRIVE [1].

- **Disco:** Hecho de acero inoxidable 304, el cual sirve para soportar la muestra y se ilustra en la Figura 4.



Figura 4. Sistema motor-disco [1].

- **Sistema de posicionamiento vertical:** Este soporta las tres celdas de carga que tiene el equipo. Su diseño se ilustra en la Figura 5.

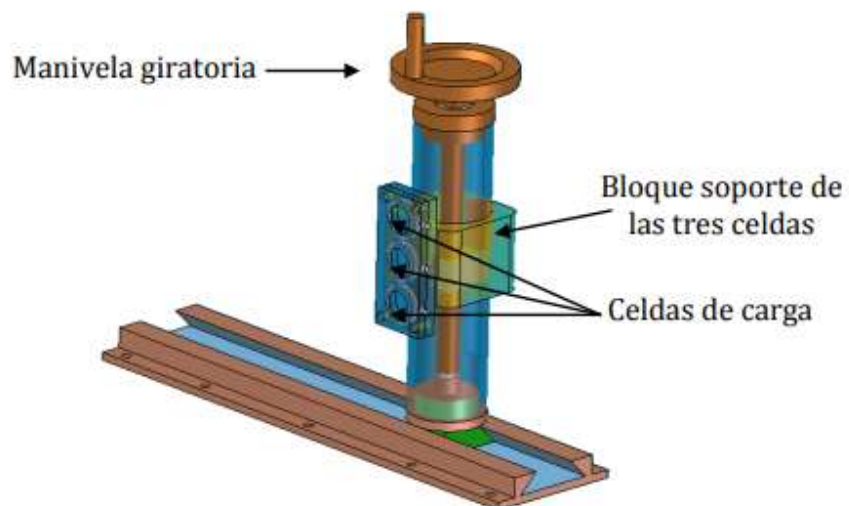


Figura 5. Sistema de posicionamiento vertical [1].

- **Sistema de posicionamiento horizontal:** Facilita el ajuste de la posición del disco y la esfera, permitiendo configuraciones específicas para los ensayos, se ilustra en la Figura 6.

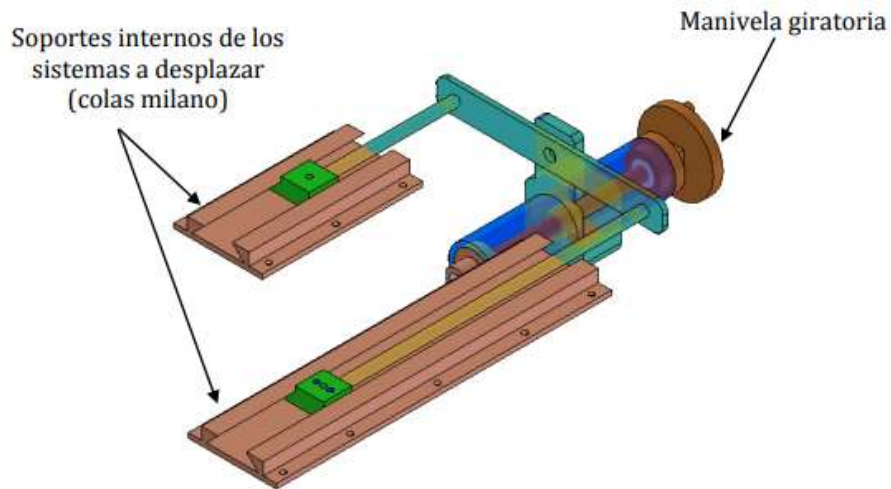


Figura 6. Sistema de posicionamiento vertical [1].

- **Brazo de soporte:** Soporta el contra cuerpo, el cual es usado para garantizar la perpendicularidad del transductor de fricción respecto a la celda de carga usada durante el ensayo y permite aplicar la carga normal necesaria durante las pruebas se ilustra en la Figura 7.

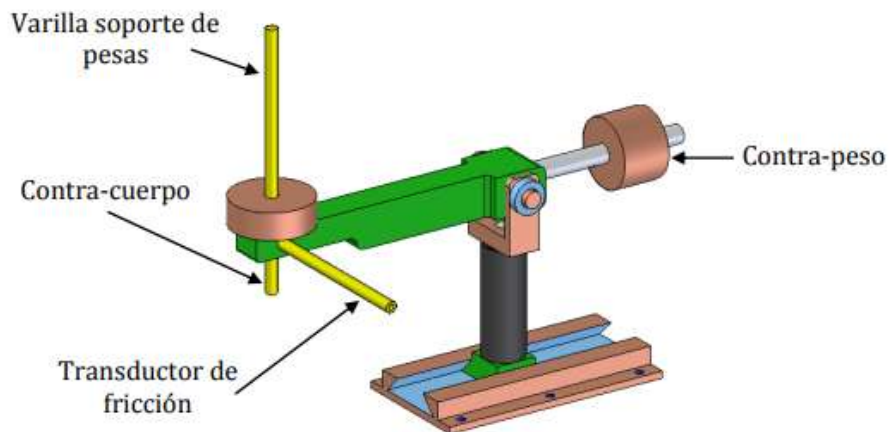


Figura 7. Brazo que sostiene el contra cuerpo y la carga normal [1].

- **Set para soporte de contra cuerpo:** Son una serie de elementos que se acoplan al brazo en la parte inferior y sujetan el porta esferas para acondicionarlo a la altura requerida para el ensayo, estos se ilustran en la Figura 8.



Figura 8. Set para soporte de contra cuerpo [1].

Aunque este modelo no utiliza un pin o perno sobre el disco, su configuración general es muy similar, ya que el único cambio radica en la zona de contacto, donde se emplea una bola o esfera en lugar de un pin. Por lo tanto, sigue siendo un modelo adecuado como guía para el proyecto, manteniendo la misma estructura básica y proporcionando una comprensión clara de las interacciones tribológicas en las superficies de contacto.

4.7.3 Tribómetro tipo perno en disco

La máquina de pruebas de desgaste tipo perno sobre disco desarrollada por M. A. Trejo Estrella [19] funciona mediante la interacción de un perno, que se coloca sobre un disco giratorio, replicando condiciones reales de fricción y desgaste. Este equipo permite controlar diversos parámetros del ensayo, como la velocidad de rotación, la carga aplicada y el tiempo de la prueba, a través de un sistema de control que gestiona y monitorea los diferentes módulos de la máquina. Los siguientes módulos trabajan de manera coordinada para medir con precisión variables clave, como la fuerza de fricción y las condiciones ambientales, proporcionando información detallada sobre el desgaste de los materiales probados.

- **Módulo de control:** Es el núcleo del sistema y coordina la operación de todos los demás módulos. A través de una interfaz gráfica, el usuario puede configurar los parámetros de la prueba, como la velocidad de rotación del disco, la posición del perno, el ángulo de incidencia, y la duración de la prueba. Además, recibe y procesa en tiempo real los datos que provienen de diferentes sensores, como los que miden la carga, la fuerza de fricción, la temperatura y la humedad. Estos datos se muestran al usuario, lo que permite ajustar el experimento en función de los resultados en tiempo real.

- **Servomotor:** Es el encargado de controlar la velocidad de giro del disco durante la prueba. El módulo de control envía al servomotor las instrucciones sobre la velocidad deseada y la señal de arranque. A su vez, el servomotor devuelve información en tiempo real al módulo de control para garantizar que la rotación del disco se mantenga constante y precisa. La precisión de este módulo es crucial para asegurar que los parámetros de la prueba, como la velocidad de deslizamiento, se mantengan dentro de los valores programados.
- **Módulo de posicionamiento:** Este módulo utiliza un motor a pasos para mover el perno a diferentes radios del disco. El movimiento se realiza de manera controlada por el módulo de control, que envía las señales necesarias para definir la cantidad de pasos y la dirección en que debe moverse el perno. Para ejecutar este desplazamiento, el sistema de posicionamiento emplea guías y baleros axiales, junto con un tornillo ACME que mueve una mesa deslizadora. Esto permite colocar el perno en la posición deseada con gran precisión, lo que es esencial para asegurar que las pruebas se realicen en puntos específicos del disco.
- **Módulo de aplicación de carga:** Este módulo genera y aplica la fuerza de fricción entre el perno y el disco. Está fabricado en acero AISI 304 y compuesto por tres piezas ensambladas con tornillos, lo que garantiza su resistencia. El módulo incluye un soporte que permite levantar y retraer el brazo de palanca que aplica la carga. Este mismo soporte sostiene una celda de carga, la cual mide la fuerza de fricción que se genera durante las pruebas. Este módulo asegura que la cantidad de fuerza aplicada durante el experimento se mantenga constante y sea medida con precisión.
- **Módulo de medición de fuerza:** La fuerza de fricción generada durante la prueba se mide mediante una celda de carga, que está conectada a la estructura de la máquina. Esta celda de carga detecta la fuerza aplicada en el contacto entre el perno y el disco, y envía los datos al módulo de control para su procesamiento. La estructura que soporta la celda de carga está compuesta por varias piezas de acero ensambladas con precisión para garantizar que la transferencia de fuerza sea exacta y que las mediciones de fricción sean precisas.

- **Módulo de condiciones ambientales:** Este módulo está equipado con un sensor DHT22, que mide la temperatura y la humedad del ambiente durante la prueba. Estos parámetros son importantes porque las condiciones ambientales pueden influir en los resultados del experimento, como la fricción y el desgaste. El sensor se conecta al puerto GPIO y se controla mediante una biblioteca especializada, que permite al sistema registrar estos datos y tener en cuenta las variaciones de temperatura y humedad en los resultados finales.

En la Figura 9 se ilustra la máquina desarrollada.



Figura 9. Tribómetro tipo perno en disco [19].

4.7.4 UMT Tribolab

El UMT Tribolab [20], ilustrado en la Figura 10, es un tribómetro de alta versatilidad, ampliamente utilizado en la investigación tribológica y mecánica. Este sistema se distingue por su diseño modular, lo que permite realizar configuraciones rápidas y precisas entre pruebas de movimiento rotativo y recíproco. Su capacidad para medir fuerzas en un amplio rango, desde sub-newton hasta kilo-newton, lo convierte en una herramienta esencial para estudios que requieren alta precisión en la caracterización de la fricción, el desgaste y otras propiedades mecánicas de los materiales.

El UMT TriboLab opera en un rango de temperaturas que va desde -25°C hasta 1000°C , permitiendo realizar pruebas bajo condiciones ambientales extremas. Además, su motor de alta velocidad y torque, montado en una columna con amortiguación de vibraciones, asegura una operación estable y precisa incluso a velocidades elevadas. Un aspecto destacado de este sistema es su facilidad de configuración, gracias a un sistema de cambio rápido de "drives" que no requiere herramientas, lo que incrementa la eficiencia y reduce el tiempo de inactividad en los laboratorios.

El software TriboScript, incluido con el sistema, permite la automatización y personalización de los protocolos de prueba, lo que aumenta significativamente la eficiencia y precisión en el procesamiento de datos. Desde su introducción en el año 2000, el UMT TriboLab se ha consolidado como uno de los tribómetros más versátiles y confiables en el campo de la tribología, siendo empleado en múltiples investigaciones de materiales a nivel global.



Figura 10. UMT tribolab [20].

4.7.5 TE 53. Probador de fricción y desgaste multiusos por Phoenix Tribology

El Probador de Fricción y Desgaste Multiusos TE 53 de Phoenix Tribology [21] es un tribómetro altamente versátil, diseñado para realizar diversas configuraciones de prueba, como "pin sobre disco" y "bloque sobre anillo", para evaluar el comportamiento de fricción y desgaste entre distintos materiales. Este equipo controla parámetros críticos como la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento y las condiciones ambientales, y registra de forma continua el coeficiente de fricción durante las pruebas. Al finalizar el ensayo, es posible medir tanto la pérdida de masa como el perfil de desgaste de las muestras, proporcionando un análisis completo del comportamiento tribológico.

En cuanto a la medición del desgaste adhesivo, el TE 53 lo evalúa mediante configuraciones que simulan el contacto entre materiales, como el "pin sobre disco". Durante la prueba, se observa un incremento progresivo del coeficiente de fricción, que es característico del desgaste adhesivo debido a la formación y ruptura de enlaces entre las superficies en contacto. Al concluir la prueba, se analiza la pérdida de masa, las huellas de desgaste y la transferencia de material, lo que brinda una visión precisa de la severidad del desgaste adhesivo. La máquina descrita se puede observar en la Figura 11.

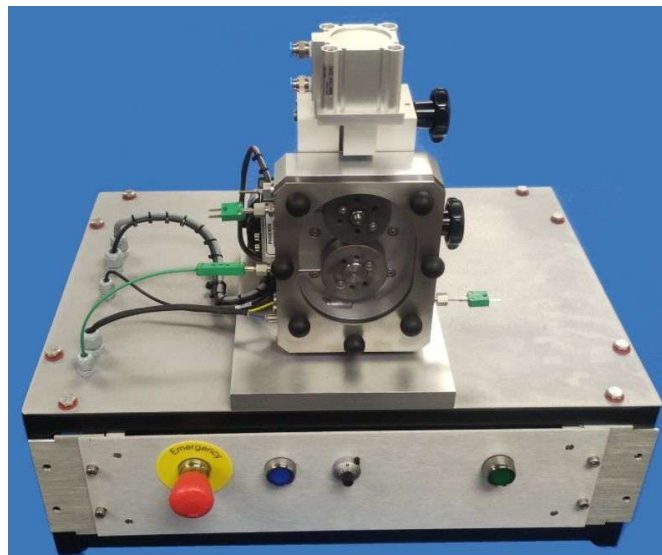


Figura 11. Probador de fricción y desgaste multiusos TE 53 [21].

5. Metodología

En relación con los objetivos previamente establecidos, se llevaron a cabo las siguientes actividades para asegurar el desarrollo óptimo del proyecto.

5.1 Definición de especificaciones de requerimientos

Con el fin de definir especificaciones técnicas que deberá cumplir la máquina para medir desgaste adhesivo bajo condiciones controladas, se realizaron las siguientes actividades. Las actividades son las siguientes:

- Fueron identificadas las necesidades principales del cliente y los requerimientos técnicos necesarios en la máquina, mediante la revisión bibliográfica de patentes existentes, trabajos de grado realizados anteriormente sobre máquinas similares y entrevistas con expertos en el tema como los son profesores y laboratoristas de la Pontificia Universidad Javeriana.
- Para identificar parámetros claves del desgaste adhesivo (fuerzas de contacto, coeficiente de fricción, velocidad relativa entre superficies en contacto, temperatura), se realizó una extensa investigación en artículos científicos y trabajos relacionados con la temática, los resultados obtenidos están expuesto en el marco teórico.

5.2 Diseño conceptual

Para llevar a cabo el diseño conceptual de la máquina, se partió de los requerimientos previamente establecidos, acompañados de una revisión de la literatura con el fin de

identificar soluciones existentes y enfoques relevantes. Posteriormente, se aplicaron herramientas como la Casa de la Calidad (QFD) y se realizaron encuestas a estudiantes (ver Anexo 1) de Ingeniería Mecánica de distintas universidades de Colombia, con el propósito de conocer sus necesidades y expectativas. Adicionalmente, se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para seleccionar la alternativa más adecuada. Finalmente, se desarrolló un análisis funcional de la máquina a diseñar y se elaboró un bosquejo conceptual, con el objetivo de representar gráficamente la idea del diseño propuesto.

5.2.1 Casa de la calidad

Como parte del proceso metodológico de diseño, se aplicó la herramienta de Despliegue de la Función de la Calidad (QFD, por sus siglas en inglés), específicamente la Casa de la Calidad. Esta herramienta permitió traducir de manera estructurada los requerimientos del usuario en especificaciones técnicas de diseño, asegurando que el desarrollo del sistema estuviera alineado con las necesidades reales del proyecto.

Para la construcción de la Casa de la Calidad, se recopilaban inicialmente los requerimientos del cliente, los cuales se detallan en la sección 6.1. Estos requerimientos fueron posteriormente priorizados y organizados a través de una encuesta aplicada mediante Google Forms, dirigida a estudiantes de Ingeniería Mecánica de diversas universidades de Colombia.

Esta herramienta permitió visualizar las relaciones entre cada requerimiento del cliente y las especificaciones técnicas obtenidas otorgándoles un peso relativo a los requerimientos de ingeniería, facilitando la toma de decisiones en las etapas tempranas del diseño.

5.2.2 Selección de la máquina

Se realizó un proceso de selección para identificar la máquina de medición de desgaste que mejor se ajustara a los objetivos funcionales y técnicos del proyecto. Este proceso incluyó una evaluación estructurada de distintas alternativas, considerando configuraciones comúnmente utilizadas en ensayos tribológicos.

Con el fin de determinar la opción más conveniente, se utilizó una metodología basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), la cual permite descomponer un problema complejo de decisión en una jerarquía de criterios, facilitando la comparación entre las distintas opciones mediante juicios de valor ponderados.

En primer lugar, se definieron los criterios de evaluación con base en los requerimientos del cliente. A continuación, se realizó una comparación por pares, asignando valores relativos de importancia de acuerdo con la escala de Saaty. Esta etapa permitió establecer los pesos de cada criterio según su influencia en el diseño. Posteriormente, se evaluaron las alternativas con respecto a cada uno de los criterios definidos.

Finalmente, los resultados fueron procesados mediante una matriz de decisión ponderada, la cual permitió calcular una puntuación global para cada alternativa y, con ello, identificar la opción más adecuada.

5.2.3 Análisis funcional

Como parte del análisis funcional del sistema, se emplearon los modelos de caja negra y caja transparente. Estas herramientas metodológicas permitieron descomponer el sistema en distintos niveles de abstracción, facilitando la comprensión integral de su funcionamiento.

Inicialmente, se aplicó el modelo de caja negra, el cual representa al sistema como una unidad funcional sin considerar su estructura interna. Este enfoque permitió identificar de manera clara las entradas, salidas y la función principal del dispositivo, proporcionando una visión general de su propósito dentro del contexto del proyecto.

A continuación, se utilizó el modelo de caja transparente, el cual permitió descomponer el sistema en sus subsistemas funcionales internos, detallando cómo se transforma cada entrada en una salida a través de procesos internos.

5.2.4 Bosquejo conceptual

Una vez seleccionada la solución conceptual más adecuada, se procedió a la etapa de diseño del bosquejo, cuyo propósito fue materializar de forma preliminar la distribución física y funcional de los principales componentes de la máquina.

5.2.5 Sistemas y subsistemas

Una vez realizado el bosquejo conceptual se procedió a identificar los diferentes sistemas y subsistemas que tendría la máquina esto con el fin de descomponer funcionalmente la máquina facilitando así el análisis, diseño y posterior integración.

5.3 Diseño en detalle

En esta sección se emplearon fases para dividir los cálculos necesarios en la máquina. Para esto se utilizaron conceptos de electricidad, mecánica de sólidos, elementos de máquinas, diseño mecánico y lógica de automatización. Adicionalmente, se seleccionaron los materiales adecuados de acuerdo con la aplicación del proyecto. Finalmente se modeló la máquina mediante el software CAD SolidWorks; se le añadieron complementos de piezas disponibles en librerías del programa como tornillería, roscas, tuercas y la inclusión de piezas disponibles en el mercado.

5.4 Análisis mediante elementos finitos

Se realizó la evaluación del diseño propuesto mediante simulaciones computacionales en el software CAD SolidWorks, las cuales permitieron predecir el comportamiento de piezas críticas de la máquina bajo diferentes condiciones de trabajo, garantizando así la integridad estructural del diseño.

6. Requerimientos de diseño

Los requerimientos para el desarrollo del proyecto de diseño de una máquina de medición de desgaste se presentan a continuación.

6.1 Requerimientos del cliente

- La máquina debe garantizar alta precisión en la medición de fricción, con márgenes de error de entre $\pm 0.5\%$ y $\pm 5\%$ de acuerdo con normativa tal como ISO 17025.
- Fácil uso (la máquina debe tener una interfaz intuitiva y amigable con el usuario, con instrucciones claras, procesos de calibración automáticos y simplificados)
- Precisión en la medición de condiciones ambientales (temperatura y humedad).
- La máquina debe permitir estudiar materiales bajo distintas condiciones de carga por lo que se debe permitir un amplio rango de aplicación de cargas para cada estudio.
- Amplio rango de velocidad que permita estudiar el desgaste en materiales bajo diferentes condiciones.
- La máquina debe tener piezas que sean fáciles de montar y desmontar, así mismo debe contar con el menor número de piezas posibles y que sean de fácil acceso para que sea de fácil mantenimiento.

6.2 Requerimientos técnicos/tecnológicos del dispositivo

- Alta precisión en la medición de coeficiente de fricción.
- Capacidad de medir desgaste en diferentes tipos de metales.
- Flexibilidad para futuras modificaciones o mejoras del diseño.

- Simple mantenimiento y calibración.
- Interfaz gráfica y amigable con el usuario.
- Configuración sencilla e intuitiva de la prueba.
- Versatilidad para diferentes tipos de prueba.

6.3 Requerimientos mecánicos del dispositivo

- Robustez y durabilidad del dispositivo.
- Capacidad de múltiples usos sin tener que hacerle mantenimiento.
- Cumplimiento de estándares de seguridad.
- Sensor o celda de medición de fuerza.
- Plataforma estable que permita disminuir las vibraciones.
- Sistema de aplicación de diferentes cargas.
- Sistema de ajuste de velocidad.
- Monitoreo de temperatura y humedad.

7. Diseño conceptual

En esta fase, se definen las características y funcionalidades clave, considerando los requisitos y restricciones existentes.

En el caso de este proyecto, el diseño conceptual se centra en la creación de una máquina para medir el desgaste adhesivo en superficies. Este proceso incluye la identificación de componentes clave, sus funciones y la integración en un sistema que cumpla con las especificaciones técnicas necesarias.

7.1 Casa de la calidad

La Casa de la Calidad es una herramienta de diseño en forma de matriz que ayuda a traducir los requerimientos del cliente en especificaciones técnicas de ingeniería. Su objetivo es asegurar que el diseño final cumpla con las necesidades y expectativas del cliente de forma estructurada y priorizada. Su estructura es la siguiente:

- **Requerimientos del cliente (filas):** En las primeras columnas de la matriz, se enlistan las necesidades o criterios principales del cliente, a cada uno se le asigna una calificación de importancia (en una escala del 1 al 5), identificada a través de una encuesta, para más información acerca de esta, revisar el Anexo 1. Posteriormente se calcula un porcentaje de importancia para cada uno de los criterios, permitiendo priorizar las necesidades del cliente dentro del diseño.
- **Especificaciones técnicas (columnas):** En la parte superior horizontal de la matriz se colocan los requerimientos de ingeniería que permitirán satisfacer las

necesidades del cliente. Cada especificación técnica tiene una medida o unidad de evaluación y una flecha de tendencia, cuya notación se explica en la Tabla 3.

Tabla 3. Notación para el propósito de los requerimientos de diseño

Simbología	Propósito
▲	El propósito es maximizar
▼	El propósito es minimizar
X	El propósito es alcanzar el objetivo

- **Matriz de relación:** En las intersecciones de las filas y columnas se define la relación entre cada requerimiento del cliente y cada especificación técnica, para ellos se usa una escala ponderada como se puede visualizar en la Tabla 4.

Tabla 4. Ponderación para los requerimientos de diseño

Simbología	Ponderación
⊖	Fuerte relación (9)
○	Media relación (3)
▲	Débil relación (1)
	Relación no asignada (0)

- **Parte superior (techo de la casa):** El techo de la matriz representa las correlaciones entre los requerimientos técnicos. Esto se evalúa para ver cómo cada requerimiento técnico impacta a los otros, lo que ayuda a identificar interacciones o posibles conflictos entre ellos. En la Tabla 5 se pueden visualizar la escala ponderada junto con la simbología.

Tabla 5. Relaciones para los requerimientos de diseño de la matriz

Simbología	Relación de los requerimientos de diseño
++	Fuerte correlación positiva
+	Correlación positiva
-	Correlación negativa
--	Fuerte correlación negativa
	No hay correlación

- **Ponderación de importancia:** Al final del proceso, la matriz arroja una valoración prioritaria de cada especificación técnica en función de su impacto en la satisfacción de los requerimientos del cliente. Esto ayuda a identificar cuáles características son

cruciales para el diseño y cuáles tienen menor impacto, optimizando el esfuerzo de diseño.

Para más información acerca de la casa de la calidad revisar las referencias [22], [23].

A partir de la encuesta realizada a los estudiantes de ingeniería mecánica en las universidades colombianas, se definió el porcentaje de importancia de cada uno de los requerimientos del cliente, lo cual se ilustra en la Tabla 6. Esta encuesta y su análisis se puede encontrar en el Anexo 1 y Anexo 2.

Tabla 6. Porcentajes de importancia de los requerimientos de los clientes de acuerdo con los resultados de la encuesta

Requerimientos del cliente	Porcentaje de importancia (%)
Precisión de medición de fricción	17,8
Facilidad de uso	15,3
Amplio rango de carga aplicada	15,9
Amplio rango de velocidad	16,8
Fácil mantenimiento	17,8
Precisión en la medición de condiciones ambientales (temperatura y humedad)	16,3

Para la realización de la casa de la calidad se utilizó una plantilla en línea [23]. Con el fin de cumplir con las necesidades planteadas en la Tabla 6, se establecen los requerimientos de diseño, los cuales se ponderan de acuerdo con la Tabla 3. Posteriormente se vincularon los requisitos del cliente con las características de diseño, según lo mostrado en la Tabla 4. Lo anterior se ilustra mediante la Figura 12, en la cual las filas son los requerimientos del cliente y las columnas representan los requerimientos de ingeniería.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Column #						
						1	2	3	4	5	6	7
						Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)						
						▼	▼	▲	▲	▲	▼	X
						Error máximo permitido en la medida del coeficiente de fricción (%)	Pasos para el funcionamiento de la máquina (# pasos)	Rangos de velocidades permitidas (# opciones)	Rangos de fuerza permitidos (# opciones)	Piezas desmontables (# piezas)	Error máximo permitido en la medida de las condiciones ambientales (%)	Estructura estable para evitar vibraciones
1	9	17,9	4,5	Precisión de medición de fricción		⊙						⊙
2	9	15,5	3,9	Facilidad de uso			⊙	⊙	⊙			▲
3	9	15,9	4,0	Precisión en la medición de condiciones ambientales						⊙		▲
4	9	16,7	4,2	Amplio rango de parámetros de carga				⊙				⊙
5	9	17,7	4,5	Amplio rango de parámetros de velocidad			⊙					⊙
6	9	16,3	4,1	Fácil mantenimiento			▲			⊙		

Figura 12. Casa de la calidad, requerimientos del cliente, requerimientos de ingeniería y su relación.

En la Figura 13 se muestran las relaciones entre los requerimientos de ingeniería según la ponderación de la Tabla 5.

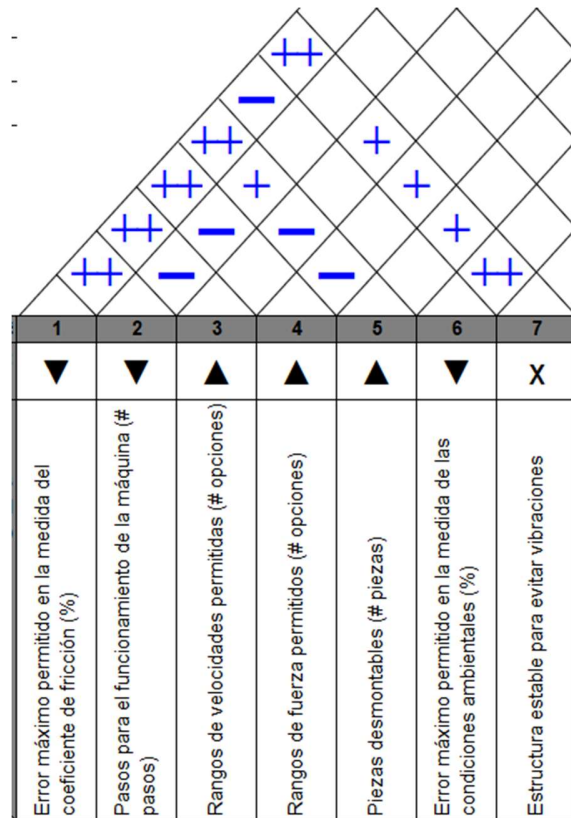


Figura 13. Relación entre requerimientos de ingeniería.

Después de operaciones propias de la casa de la calidad, se pueden obtener los requerimientos de ingeniería con pesos relativos, los cuales representan el grado de importancia en el diseño mecánico.

Según lo observado en la Tabla 7, las prioridades para el diseño son una estructura estable para evitar vibraciones, y los rangos de velocidad permitidas, debido a que son los dos pesos relativos más altos; (para mayor profundidad en los cálculos revisar las referencias [22], [23]).

Tabla 7. Pesos relativos de requerimientos de ingeniería a partir de la casa de la calidad

Requerimiento de ingeniería	Peso relativo
Error máximo permitido en la medida del coeficiente de fricción	11,9
Pasos para el funcionamiento de la máquina	11,5
Rangos de velocidades permitidas	15,2
Rangos de fuerza permitidos	14,6
Piezas desmontables	14,3
Error máximo en la medida de las condiciones ambientales	10,6
Estructura estable para evitar vibraciones	21,9

7.2 Selección de máquina

Para seleccionar el tipo de máquina de medición de desgaste que se diseñó, se consideraron tanto los requerimientos del cliente como los requisitos técnicos de la máquina. A partir de estos requerimientos, se definieron criterios específicos que permitieron comparar las distintas opciones de máquinas y determinar cuál es la más adecuada para el proyecto.

7.2.1 Criterios de selección

- Criterio 1 - Tipo de contacto:** En una máquina de medición de desgaste, los tipos de contacto pueden ser puntuales, lineales o superficiales. Cada tipo de contacto tiene aplicaciones distintas. Por ejemplo, las máquinas de tipo pin sobre disco están diseñadas para medir contactos puntuales o de fricción localizada, lo cual es adecuado para analizar casos de desgaste en áreas pequeñas, pero menos representativo en contactos amplios. En contraste, una máquina de tipo placa sobre placa permite un contacto superficial amplio, ideal para evaluar fricción y desgaste en áreas extensas, aunque es menos precisa para casos puntuales.
- Criterio 2 - Velocidad de deslizamiento:** El rango de velocidad, junto con la capacidad de ajuste, es un parámetro fundamental en el diseño de una máquina de medición de desgaste, ya que influye directamente en la simulación de condiciones reales de funcionamiento. La velocidad de deslizamiento afecta tanto el comportamiento del desgaste como el coeficiente de fricción, variables

clave para replicar situaciones reales en pruebas controladas. Además, al permitir ajustes en la velocidad, la máquina puede adaptarse a diversos materiales y condiciones de prueba, ampliando su versatilidad y precisión en los resultados.

- **Criterio 3 - Geometría de las superficies:** La complejidad o simplicidad de la geometría de las superficies para el ensayo de desgaste afecta directamente la facilidad de uso de la máquina. Dado que cada ensayo requiere fabricar componentes específicos, la simplicidad en el diseño de estas piezas es esencial para simplificar el montaje y reducir costos. Por ello, las máquinas se evaluarán según la sencillez de los componentes necesarios para sus ensayos.

- **Criterio 4 - Facilidad de uso:** Uno de los requisitos clave es que la máquina sea intuitiva, con una interfaz fácil de comprender y utilizar. Esto se relaciona directamente con la facilidad de uso, que incluye aspectos como la simplicidad para montar el ensayo, la facilidad de fabricación de las piezas necesarias y la claridad en la interpretación de los datos generados.

- **Criterio 5 - Costos de fabricación:** Este criterio de selección considera la simplicidad en el diseño de los componentes de ensayo, no solo en la fabricación de la máquina. La geometría de cada probeta y la cantidad de material necesario para su fabricación impactan directamente en la facilidad de uso, así como en los costos y tiempos de preparación de cada ensayo. La elección de una máquina con componentes de ensayo geoméricamente simples y eficientes en el uso de material es fundamental para optimizar tanto los recursos como la operatividad en un entorno académico.

Los criterios para seleccionar la máquina están estrechamente ligados a los requerimientos de ingeniería. Sin embargo, el único criterio de ingeniería que se excluye en la selección es el rango de carga, ya que en este caso se define como una amplia versatilidad en la carga. Todos los tribómetros evaluados cuentan con un rango de carga amplio, por lo que compararlos en función de este criterio no es viable, dado que todos arrojarían el mismo resultado.

La Tabla 8 muestra una recopilación de cada criterio mencionado anteriormente para cada una de las alternativas de selección.

Tabla 8. Comparación de cada tipo de máquina respecto a cada criterio.

Alternativa	Tipo de contacto	Velocidad de deslizamiento	Geometría de las superficies	Facilidad de uso	Costos de fabricación
Cuatro bolas	Múltiples puntos de contacto	Baja	Tres bolas fijas y una bola giratoria	La alineación de las cuatro bolas y el control de carga requieren precisión, lo que dificulta su uso en entornos no especializados.	Alto - Requiere cuatro bolas perfectamente alineadas, sensores adicionales y sistemas de alta precisión, lo que incrementa considerablemente los costos.
Bola sobre disco	Esférico	Baja a media	Bola esférica contra disco plano	Configuración sencilla, aunque requiere alineación cuidadosa de la bola.	Bajo – Configuración sencilla, requiere de pocos materiales, pero con una bola de mayor precisión, aunque el costo sigue siendo bajo.
Bloque sobre disco	Superficial extendido	Baja a media	Bloque plano contra disco plano	Requiere cuidado en el montaje y calibración del bloque, pero es manejable y adecuado para diversos materiales y condiciones de ensayo.	Medio – Involucra más material debido a la mayor superficie de contacto, además de requerir una fabricación más precisa del bloque.
Pin sobre disco	Puntual	Baja a media	Pin cilíndrico contra disco plano	Configuración sencilla, con montaje rápido; intuitiva y común en entornos educativos e investigación.	Bajo – Configuración sencilla, que requiere pocos materiales y componentes básicos.
Placa sobre placa	Superficial extendido	Baja	Dos superficies planas en movimiento lineal	Fácil de montar, aunque requiere ajuste para alineación y contacto; adecuada para ensayos de desgaste en áreas amplias.	Alto - El sistema de movimiento, junto con mecanismos de control precisos, incrementa los costos por su complejidad y componentes adicionales.

7.2.2 Selección mejor alternativa

Para determinar cuál de las opciones presentadas en el marco teórico se ajusta mejor a los requisitos establecidos, se utiliza una matriz de selección basada en el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytical Hierarchy Process*, AHP). Este método permite descomponer y clasificar los elementos de un problema de decisión, priorizando las alternativas con el fin de identificar la "mejor alternativa" o el "curso de acción óptimo" [24].

El método AHP permite la toma de decisiones de forma matemática, sin dejarse influenciar por ideas emociones y sentimientos, además permite la comparación de criterios tanto tangibles como intangibles. La metodología utiliza una escala de 1 a 9 para evaluar los criterios y alternativas, siendo 1 la comparación de igual importancia y 9 la de máxima importancia (ver Tabla 9). En este proceso se realiza primero una matriz comparando criterios con criterios y así mismo comparando alternativas con alternativas, finalmente se realiza una matriz comparando criterios con alternativas para escoger la mejor solución.

Tabla 9. Comparación de importancia o preferencia de cada valor cardinal de acuerdo con la escala de Saaty para la AHP

Importancia o preferencia	Valor cardinal
Igual	1
Moderado	3
Fuerte	5
Muy fuerte	7
Extremadamente fuerte	9

La AHP realizada fue una matriz 6x6 en la cual se evaluaron cinco (5) criterios frente a cinco (5) alternativas, que se ilustra mediante la Figura 14.

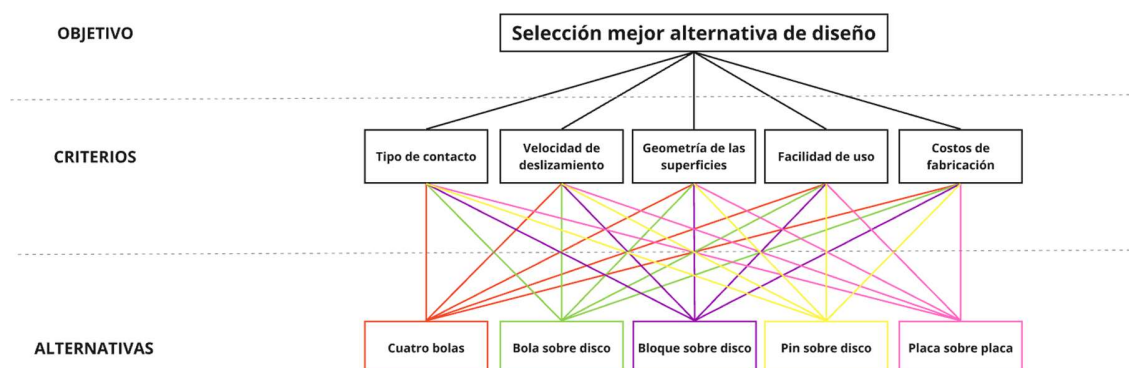


Figura 14. Árbol de decisiones para la selección de la mejor alternativa de diseño

La máquina más viable tras realizar el proceso de elección fue la pin sobre disco. Esta fue más compatible con los criterios en comparación con las alternativas, al obtener un 33,3 %, lo cual se ilustra en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de criterios con alternativas para obtener la mejor alternativa

Criterios	Tipo de contacto	Velocidad de deslizamiento	Geometría de las superficies	Facilidad de uso	Costos de fabricación	Valor global (%)
Cuatro bolas	0,001	0,002	0,007	0,005	0,012	2,8%
Bola sobre disco	0,009	0,026	0,027	0,073	0,109	24,4%
Bloque sobre disco	0,006	0,026	0,053	0,073	0,058	21,6%
Pin sobre disco	0,013	0,026	0,049	0,075	0,171	33,3%
Placa sobre placa	0,002	0,005	0,138	0,022	0,012	17,9%

Para mayor entendimiento de esta sección, revisar el Anexo 3.

7.3 Análisis funcional de la máquina

Con el propósito de entender el funcionamiento conceptual del método de medición de desgaste adhesivo mediante una máquina pin sobre disco, se muestran los esquemas de

la caja negra y transparente, los cuales se pueden observar en la Figura 15 y la Figura 16 respectivamente. El método de caja negra analiza un sistema considerando solo sus entradas, función principal y salidas, sin detallar los procesos internos, permitiendo ver cómo transforma sus entradas en resultados. En contraste, el método de caja transparente descompone el sistema en sus componentes y subfunciones internas, analizando cada paso para optimizar su funcionamiento detallado. Ambos métodos complementan el análisis de sistemas, ofreciendo una visión general en la caja negra y una comprensión detallada en la caja transparente.

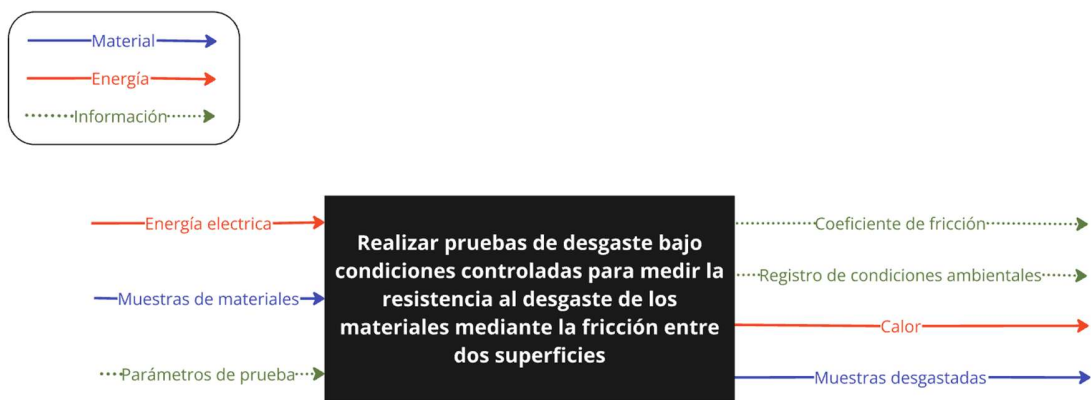


Figura 15. Caja negra de la máquina.

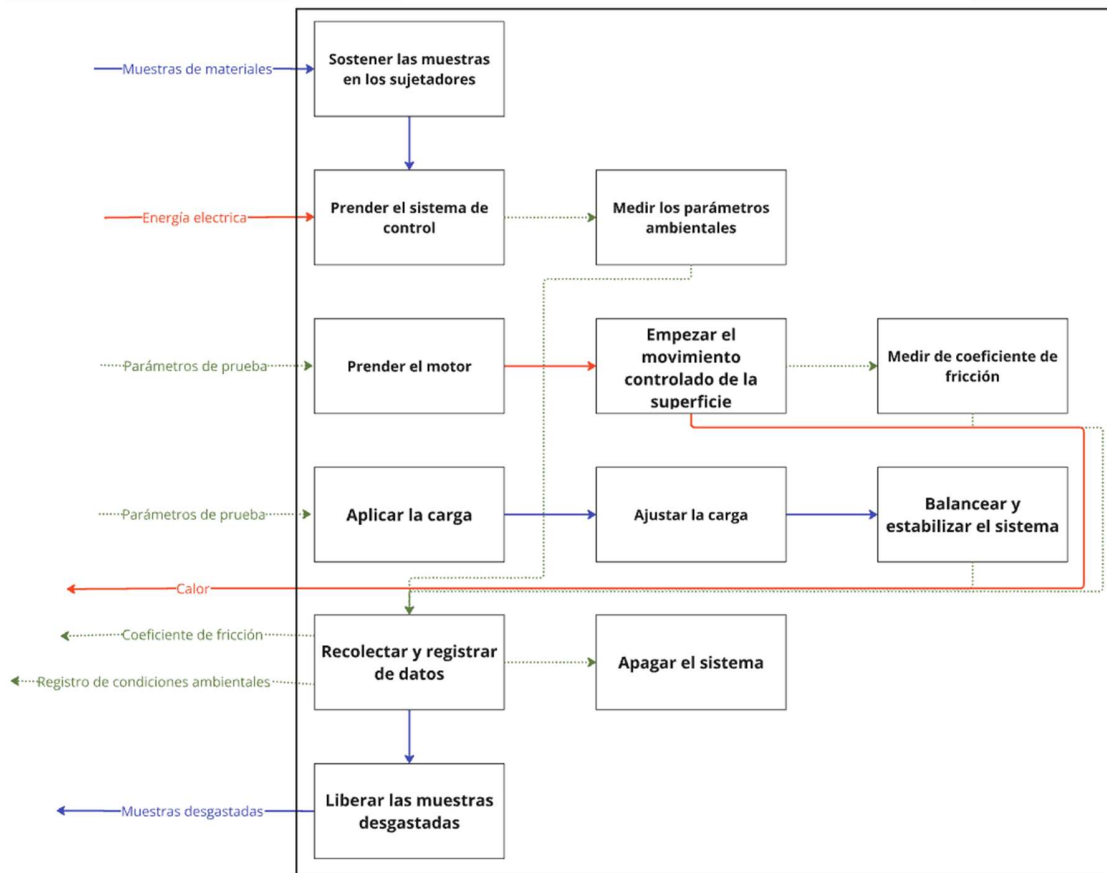


Figura 16. Caja transparente de la máquina

Con el fin de tener un mejor entendimiento de las subfunciones de la máquina, se separa el proceso en fases.

- **Fase I:** Preparación de la prueba; colocar y alinear las muestras de prueba en la máquina.
- **Fase II:** Aplicación de carga; colocar las pesas correspondientes a la carga deseada, se verifica y se ajusta el contrapeso.
- **Fase III:** Movimiento de la muestra; seleccionar la velocidad, inicia la rotación controlada del disco en contacto con la muestra.

- **Fase IV:** Control y automatización; prender el sistema de control, monitorear y controlar parámetros ambientales y de fricción, prender el motor, mantener la velocidad seleccionada, apagar el sistema.

7.4 Bosquejo conceptual de la máquina

La máquina diseñada para medir desgaste adhesivo en superficies aplica una carga controlada sobre una muestra fija mientras un disco en contacto directo rota contra ella, simulando condiciones de desgaste reales. Los sensores monitorean tanto la temperatura como la humedad ambiental para registrar los datos de la prueba. Para mantener la estabilidad del sistema, un contrapeso optimiza el equilibrio de toda la estructura, minimizando las vibraciones que podrían afectar la precisión de los resultados.

El diseño de la máquina integra componentes clave: el porta carga, que aplica y distribuye el peso de manera uniforme sobre la muestra; el sujeta disco, que asegura la posición del disco durante la rotación; y una banda de movimiento que, impulsada por un motor, controla la velocidad de rotación del disco para simular diferentes condiciones de fricción. Todo el sistema es coordinado por un centro de control que permite al operador ajustar el parámetro de velocidad y visualizar las condiciones ambientales, carga; además los datos recopilados acerca del coeficiente de fricción. La máquina no cuenta con un sistema de refrigeración, ya que no se planea realizar ensayos con lubricación. Esto se debe a que el desgaste en seco representa un caso más crítico que el desgaste con lubricación. Además, dado que el objetivo de la máquina es mantener un diseño simple y fácil de usar, la incorporación de un sistema de lubricación, se aumentaría su complejidad.

En conjunto, estos elementos permiten obtener datos precisos y confiables sobre el coeficiente de fricción entre los materiales evaluados, cumpliendo con los requisitos de precisión y control necesarios para estudios de desgaste en entornos educativos y de investigación. A continuación, se ilustra el bosquejo conceptual mediante la Figura 17.

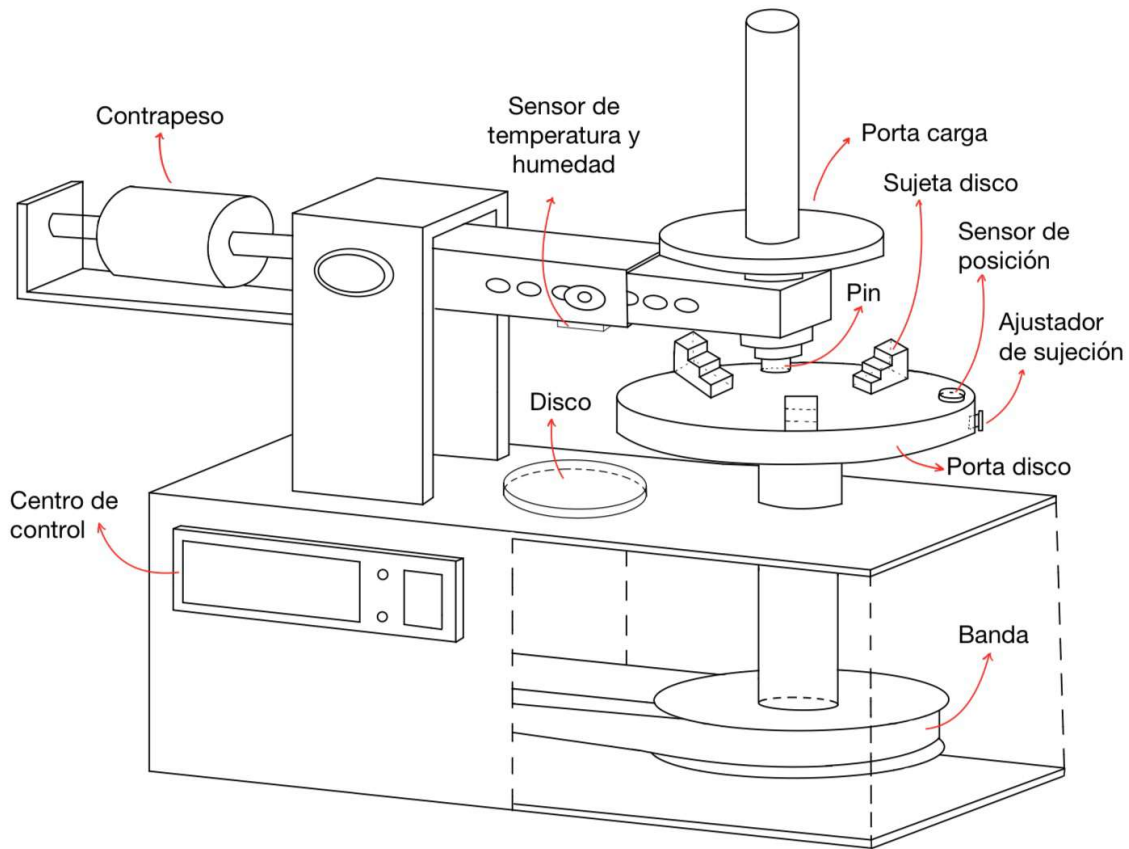


Figura 17. Propuesta diseño conceptual de una máquina pin sobre disco para medir desgaste adhesivo.

Posteriormente, para el diseño del sistema de aplicación de carga, se llevó a cabo un rediseño estructural de la máquina, como se muestra en la Figura 18. En esta nueva configuración, se modificó el funcionamiento del brazo principal, permitiendo un movimiento más libre y preciso durante la aplicación de la prueba, lo que mejora la flexibilidad y control del sistema.

Además, se optimizó el sistema de medición de la fuerza de fricción, reemplazándolo por un mecanismo que permite obtener mediciones directas y precisas, eliminando pérdidas de datos y mejorando la fiabilidad de los resultados. Estas mejoras no solo optimizan la precisión del ensayo tribológico, sino que también facilitan el ajuste y calibración del sistema, asegurando su correcto desempeño en diferentes condiciones de prueba.

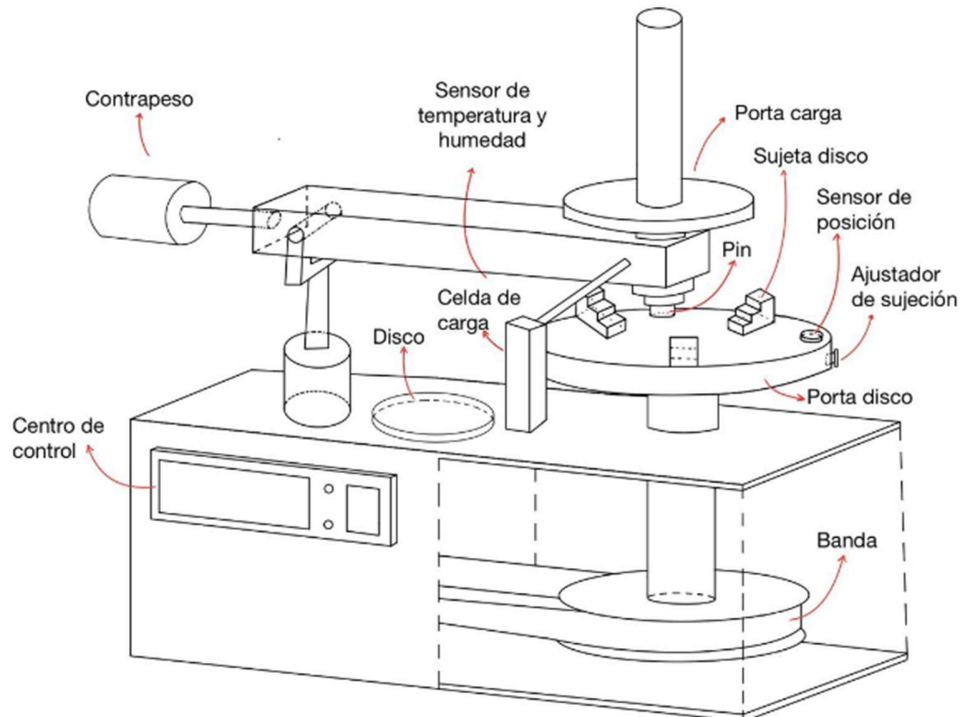


Figura 18. Rediseño conceptual del diseño conceptual de una máquina pin sobre disco para medir desgaste adhesivo.

7.5 Sistemas y subsistemas de la máquina

A continuación, se explican los sistemas y subsistemas que permiten el correcto funcionamiento de la máquina.

7.5.1 Sistema de sujeción de la muestra

Es fundamental para asegurar que las condiciones iniciales de la prueba de desgaste se configuren correctamente y que la máquina esté lista para operar de forma precisa y controlada. Su objetivo es asegurar que la muestra se encuentre fija en su posición para evitar desplazamientos o desalineaciones durante la prueba. Incluye un componente de sujeción ajustable para el disco y para el pin.

7.5.2 Sistema de aplicación de carga

Es esencial en la máquina de medición de desgaste, ya que se encarga de imponer una fuerza controlada y constante sobre la muestra de prueba mientras ésta entra en contacto con el disco o superficie de desgaste. La carga aplicada simula las condiciones de contacto y presión que las superficies experimentarían en un ambiente real, permitiendo evaluar la resistencia al desgaste del material bajo condiciones controladas.

- **Subsistema de soporte de carga:** Se encarga de proveer una base segura para sostener el peso, se conforma por el porta carga y el contrapeso.
- **Subsistema de carga variable:** Este subsistema permite variar la carga de forma segura, consta de un porta carga y una serie de discos que permiten variar la carga.

7.5.3 Sistema de movimiento controlado de la muestra

Es el responsable de generar y controlar el desplazamiento de las superficies en contacto. Este sistema permite reproducir movimientos de deslizamiento o rotación entre las muestras y la superficie de ensayo, simulando condiciones de desgaste realistas.

- **Subsistema de accionamiento:** Posterior a la selección de la velocidad, se acciona el motor que empieza el movimiento de las muestras.
- **Subsistema de transmisión:** So conforma por una banda, encargada de transmitir el movimiento rotacional del motor a la muestra.

7.5.4 Sistema de control y automatización

Este sistema se encarga de toda la parte de monitoreo y recolección de datos, como de las condiciones ambientales y el coeficiente de fricción. Así mismo es el encargado de permitir la visualización de los datos de prueba en la interfaz.

-
- **Subsistema de medición de condiciones ambientales:** Esta función permite monitorear las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad, en las que se está realizando el ensayo, para registrarlas de acuerdo con como establece la norma, lo cual es crucial para poder realizar una comparación de resultados verídica. Se compone de un sensor específico tanto para medir temperatura como para medir la humedad, el cual envía lecturas constantes al sistema de control y permite su visualización.
 - **Subsistema de medición de coeficiente de fricción:** Este se encarga de mediante un sensor registrar la fuerza de fricción, con lo cual, a partir de la fuerza aplicada, se encuentra el coeficiente de fricción.
 - **Subsistema de visualización de parámetros de prueba:** La máquina incluye una HMI (interfaz Hombre-Máquina), en la cual se ingresan los parámetros de prueba inicial como la velocidad y duración de la prueba, así como la lectura de los sensores de temperatura, humedad y los datos de la celda de carga.

8. Restricciones

Con base en lo anterior, se tendrá en cuenta las siguientes restricciones para el diseño de la máquina:

- Uso de materiales y procesos de bajo costo
- Capacidad de estudiar desgaste adhesivo bajo diferentes condiciones
- Capacidad de estudiar desgaste en pares tribológicos comunes
- Implementación de cubierta de protección exigida en la norma UNE-EN ISO 12100:2012
- Diseñar una máquina que cumpla con las diferentes normativas

9. Diseño en detalle

En esta sección se presenta el desarrollo detallado del diseño de la máquina, incluyendo la configuración estructural y la selección de sus principales componentes. El resultado final de este proceso se muestra en la

Figura 19. Además, los Anexos 6, 7, 8 y 9 contienen los planos explosionados correspondientes al plano general de la máquina, la estructura, la cubierta y los elementos del sistema pin sobre disco, respectivamente.

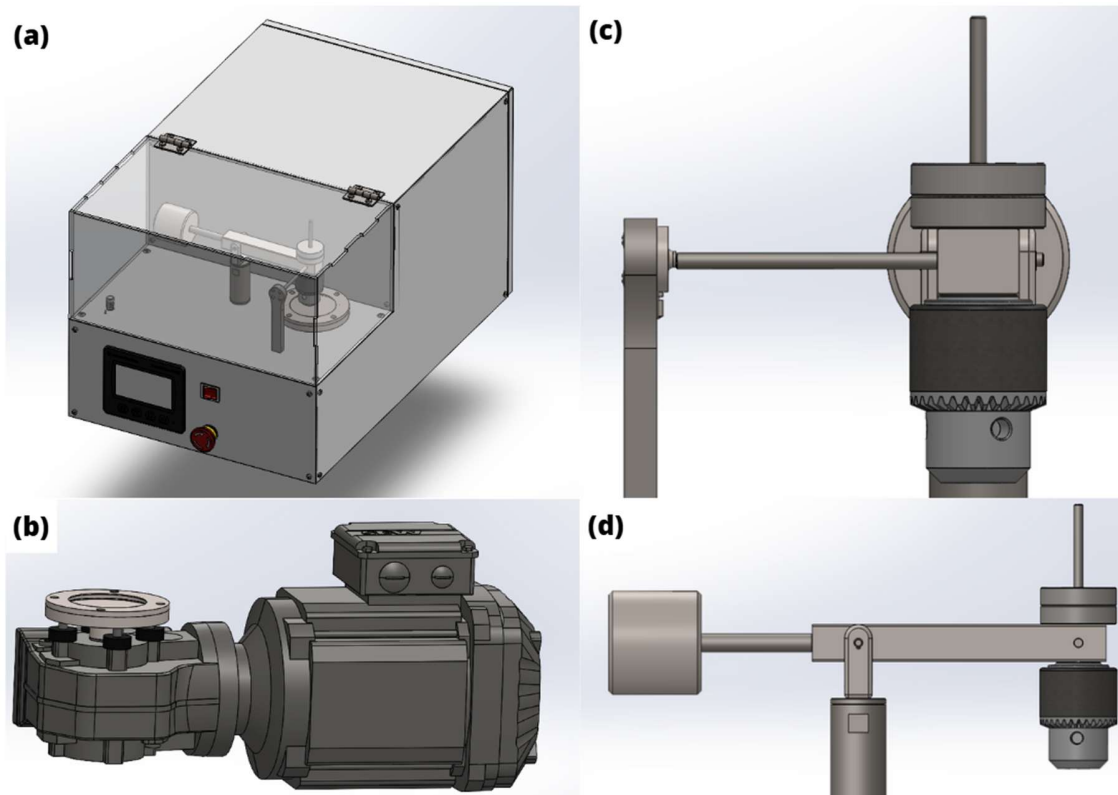


Figura 19. Modelo 3D de una máquina para medir desgaste tipo pin sobre disco, a) Vista isométrica modelo 3D, b) Modelo 3D del subsistema de transmisión de potencia, c) Vista 3D del subsistema de medición del coeficiente de fricción, d) Modelo 3D subsistemas de aplicación de carga, sujeción del pin y contrapeso

9.1 Definición de especificaciones técnicas

En esta sección se definen las especificaciones técnicas fundamentales para el diseño de la máquina, enfocándose en la selección del espacio disponible, las velocidades de operación y las cargas involucradas.

9.1.1 Elección y especificación del espacio

El laboratorio de materiales fue escogido para la disposición de la máquina debido a que provee los recursos necesarios para el funcionamiento de la máquina, tales como:

- **Tomas eléctricas:** Facilitan la conexión del motor y el sistema eléctrico de la máquina.

- **Aislamiento de vibraciones:** El laboratorio no cuenta con otras maquinarias que generen vibraciones, lo que garantiza un entorno estable para el equipo.
- **Superficie de soporte fija:** La presencia de una base de concreto proporciona estabilidad, evitando vibraciones que puedan afectar el funcionamiento de la máquina.

9.1.2 Selección del material a evaluar

Para la selección de los materiales a evaluar, se tomó en cuenta la naturaleza del trabajo a realizar, considerando que la máquina tiene un propósito educativo. Por ello, se seleccionaron materiales de uso común en la industria, es decir pares tribológicos, con el fin de analizar y comparar distintos mecanismos de desgaste adhesivo. La elección de estos materiales se fundamentó en información obtenida de la norma ASTM G99 [13]. La Tabla 11 presenta cada uno de los pares tribológicos escogidos si como sus características.

Tabla 11. Materiales de prueba y características

Material del pin	Material del disco	Coefficiente de fricción (+-0.1)	Característica del par
Acero	Acero	0,6	Se usa en aplicaciones industriales donde se requiere alta resistencia al desgaste y cargas elevadas, como en engranajes, rodamientos y rieles de ferrocarril.
Acero	Alumina	0,6	Permite evaluar el desgaste adhesivo y la diferencia en dureza entre ambos materiales, siendo útil en aplicaciones como componentes estructurales y conexiones mecánicas en la industria aeroespacial y automotriz.
Alumina	Acero	0,76	Permite evaluar el desgaste adhesivo y la diferencia en dureza entre ambos materiales, siendo útil en aplicaciones como componentes estructurales y conexiones mecánicas en la industria aeroespacial y automotriz.
Alumina	Alumina	0,41	Permite realizar un ensayo donde existe un alto desgaste adhesivo debido a la naturaleza blanda del aluminio

Los materiales definidos para los los ensayos están definidos por la norma ASTM G99, la cual especifica el uso de acero aleado al cromo (AISI 52100) y alúmina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) como materiales estándar para las probetas y los elementos de desgaste, respectivamente.

9.1.3 Selección de rango de velocidad y carga

Para la selección del rango de velocidad y carga en este estudio, se tomó como referencia la norma ASTM G99 [13], así como estudios previos reportados en [1], [25]. En cuanto a la carga aplicada, se ha determinado que el valor máximo empleado para evaluar el desgaste adhesivo puro es de 30 N, lo cual se fundamenta en estudios previos que han identificado este límite como representativo de condiciones donde predomina este mecanismo de desgaste. Respecto a la velocidad de deslizamiento, las características de cada rango de velocidad se encuentran detallados en la **Tabla 12**.

Es importante señalar que un incremento excesivo en la carga o en la velocidad puede generar condiciones que alteren significativamente el mecanismo de desgaste. En el caso de cargas elevadas, se favorece la deformación plástica y el desgaste severo, lo que puede derivar en una transición hacia otros mecanismos como el desgaste por fatiga o la formación de zonas fundidas debido al calor generado. Por otro lado, un aumento excesivo en la velocidad puede incrementar la temperatura en la interfaz de contacto, promoviendo la oxidación, la degradación térmica del material y la aparición de un desgaste triboquímico, lo que podría afectar la reproducibilidad y validez de los resultados.

Tabla 12. Caracterización del desgaste según las velocidades

Velocidad (rpm)	Características del desgaste
50-100 (Baja velocidad)	Predomina el desgaste adhesivo. Baja generación de calor favorece la transferencia de material y formación de partículas de desgaste.
100-200 (Media velocidad)	Transición entre desgaste adhesivo y abrasivo. Aumento de temperatura, posible formación de óxidos, menor transferencia de material.
200-600 (Alta velocidad)	Predomina el desgaste triboquímico y abrasivo. Alta generación de calor, riesgo de oxidación, fusión localizada y fallo catastrófico.

De acuerdo con el análisis previo, se estableció una velocidad máxima de trabajo de 200 rpm para la prueba. Este límite se elige con el propósito de evitar efectos térmicos significativos que podrían alterar el mecanismo de desgaste predominante.

9.2 Diseño del sistema de movimiento controlado del disco

9.2.1 Diseño del subsistema de accionamiento

Para determinar el tipo de motor adecuado, es fundamental definir sus características, siendo la potencia uno de los parámetros principales a considerar. A continuación, se detallan los cálculos realizados:

a) Cálculo de la velocidad angular del disco

Se considera una velocidad máxima $N = 200$ rpm. Para obtener la velocidad angular, se emplea la ecuación (4).

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (4)$$

b) Cálculo de la fuerza de fricción

La fuerza de fricción se determina a partir de la fuerza normal máxima y el coeficiente de fricción estático máximo, cuyos valores son $F_n = 30$ N y $\mu = 0.9$, respectivamente. Para su cálculo, se utiliza la ecuación (5).

$$F_f = \mu \cdot F_n \quad (5)$$

c) Cálculo del torque debido a la fricción entre el pin y el disco

El torque se calcula mediante la ecuación (6), considerando el radio máximo de trabajo, el cual es de $r = 40$ mm.

$$\tau_f = F_f \cdot r \quad (6)$$

d) Cálculo momento de inercia del disco

El momento de inercia del sistema (eje, disco de sujeción, porta muestras y muestra), se calcula mediante la ecuación (7). Tomando en cuenta los pesos de cada uno de los componentes y los radios.

$$I = \frac{1}{2}(MejeReje^2 + MdiscoRdisco^2 + MTapa(R1Tapa^2 - R2Tapa^2) + MmuestraRmuestra)(7)$$

e) Cálculo aceleración angular

La aceleración angular del sistema se calcula mediante la ecuación (8), tomando en cuenta la velocidad angular previamente calculada, y un tiempo de 2 segundos definidos para tomar en cuenta el tiempo en el que el sistema deberá alcanzar un punto de equilibrio estático para que el sistema alcance el punto estático.

$$\alpha = \frac{\omega}{t} \quad (8)$$

f) Cálculo del torque debido a la aceleración angular

Debido al peso del disco y del sistema de sujeción del disco, antes de que el sistema llegue a un punto de equilibrio, este tendrá una aceleración angular y un momento de inercia, el cual el motor deberá ser capaz de superar para funcionar correctamente. La ecuación (9) se utiliza para el cálculo.

$$\tau_a = I \cdot \alpha \quad (9)$$

g) Cálculo de la potencia

Una vez determinados los valores anteriores, la potencia requerida se obtiene aplicando la ecuación (10). En donde τ_t es la suma del torque causado por la aceleración angular y el torque causado por la fuerza de fricción entre el pin y el disco.

$$P = \tau_t \cdot \omega \quad (10)$$

h) Factor de seguridad y eficiencia

Dado que en el proceso de transmisión de potencia existen inevitables pérdidas, se adopta un factor de seguridad de 1.5.

Estos cálculos permiten estimar con precisión la potencia requerida para seleccionar el motor más adecuado para el sistema en estudio, arrojando un resultado de 40 W. Para mayor detalle sobre los procedimientos y cálculos realizados, se remite al Anexo 4. Asimismo, en la **Tabla 13** se presentan todas las variables y resultados definidos previamente, destacando los valores más relevantes para el diseño y la selección de los componentes.

Tabla 13. Variables utilizadas en los cálculos, valores, unidades y resultados

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Velocidad	N	200,000	rpm
Velocidad angular	w	20,944	rad/s
Fuerza normal	F_n	30,000	N
Coeficiente de fricción estático máximo	m	0,900	
Fuerza de fricción	F_f	27,000	N
Radio máximo	r	40,000	mm
		0,040	m
Torque por fuerza de fricción	T_f	1,080	Nm
Masa del disco de sujeción	M_{disco}	0,720	kg
Masa del eje de trasmision de potencia	M_{eje}	306,000	kg
Radio del disco de sujeción	R_{disco}	0,055	m
Radio del eje de transmisión de potencia	R_{eje}	0,015	m
Masa del disco de prueba	$M_{muestra}$	1,202	kg
Radio del disco de prueba	$R_{muestra}$	0,040	m
Masa de la tapa	M_{tapa}	0,952	kg
Radio exterior de la tapa	$R1Tapa$	0,055	m
Radio interior de la tapa	$R2Tapa$	0,035	m
Momento de inercia del eje	I_e	0,034	kg m ²
Momento de inercia del disco	I_d	0,0011	kg m ²
Momento de inercia de la tapa	I_t	0,0009	kg m ²
Momento de inercia de la muestra	I_m	0,0010	kg m ²
Momento de inercia total	I	0,037	kg m ²
Tiempo de arranque	t	2,000	s
Aceleración angular		10,472	rad/s ²
Torque por aceleración angular	T_a	0,391	Nm
Torque total	T	1,471	Nm
Potencia	P	30,807	W
Potencia con factor de seguridad	P	46,211	W
		50,000	W

		0,050	kW
--	--	-------	----

9.2.2 Diseño del subsistema de transmisión

a) Selección del motor reductor

Se seleccionó un motor trifásico de corriente alterna (AC) de la marca SEW EURODRIVE, referencia IE3, con una potencia nominal de 0.37 kW. Esta elección se fundamentó en su alta eficiencia, fiabilidad y capacidad para proporcionar un par adecuado a la aplicación, además de su bajo requerimiento de mantenimiento. La potencia calculada para el sistema fue de 50 W (0.05 kW), por lo que el motor seleccionado garantiza un margen de seguridad operativa.

Se seleccionó un motor de 0,37 kW, aunque la potencia requerida es de 0,05 kW, para asegurar un margen de seguridad adecuado y hacer el dispositivo más versátil frente a futuras aplicaciones. Además, se consideró la disponibilidad comercial, ya que motores con potencias estándar facilitan la adquisición y el mantenimiento, garantizando así una solución práctica y confiable.

Así mismo el motor seleccionado se encarga de realizar la transmisión, ya que, por cuestiones de optimización de espacio, y evitar pérdidas de potencia se seleccionó un motor reductor, el cual tiene una velocidad de salida máxima de 205 rpm y un par de 16 Nm. La Figura 20 muestra el motor reductor seleccionado y la información acerca de este se puede encontrar en [26] y en el Anexo 10 se muestra el plano del motor reductor, definido por el fabricante.

Adicional con el fin de poder variar la velocidad del motor se usó un variador de velocidad MC07B0030-5A3-4-S0 de la marca EURODRIVE [27] para asegurar la compatibilidad entre los dos elementos, el cual es un dispositivo electrónico que varía la velocidad del motor modificando la frecuencia y la tensión de la energía suministrada al mismo.



Figura 20. Motor reductor SEW EURODRIVE [26]

b) Unión motor a la máquina

La unión del motor al sistema se realizó aprovechando las perforaciones roscadas M8 que este ya incorpora, facilitando su fijación directa a la lámina de soporte. Para mejorar el aislamiento vibracional y proteger tanto el motor como el resto de la estructura, se utilizaron soportes de goma entre el motor y la lámina. Esta configuración permite una sujeción firme, a la vez que reduce la transmisión de vibraciones al sistema. La instalación se muestra en la Figura 21.

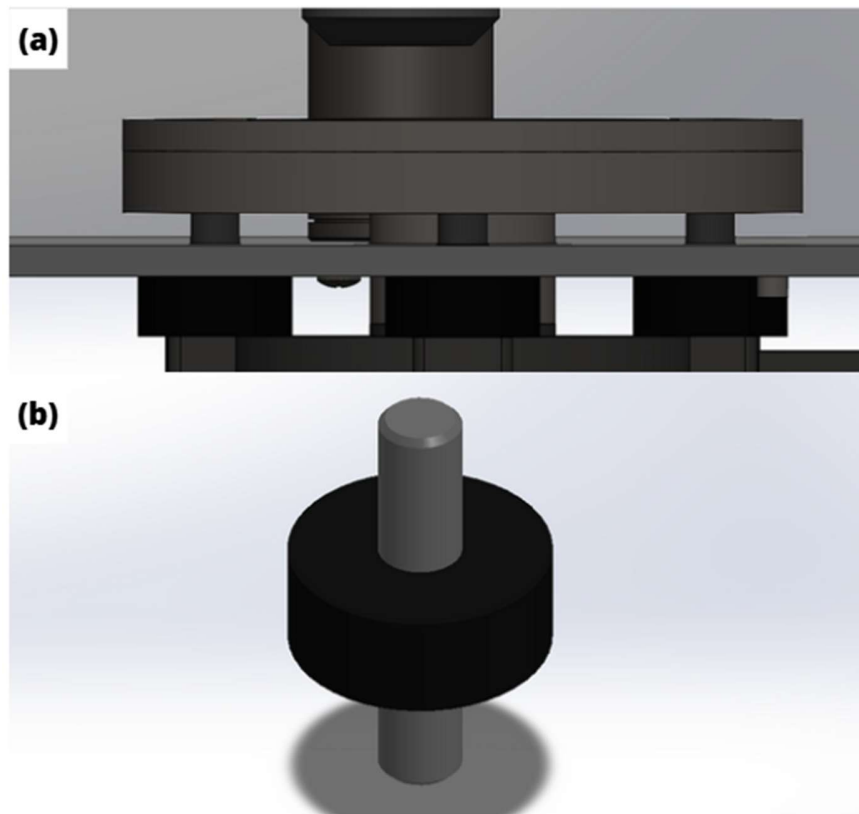


Figura 21. Unión del motor a la máquina a) Motor unido a la lámina mediante soportes de goma con rosca M8 b) soporte de goma con rosca M8 para unión del motor con la lámina.

c) Diseño y cálculo de factor de seguridad eje de transmisión

Además del motor reductor, es necesario diseñar un eje de transmisión encargado de transferir la potencia del motor al disco de ensayo. Este eje debe garantizar una conexión eficiente, alineada y resistente, minimizando pérdidas mecánicas y asegurando la estabilidad del sistema durante la prueba.

La Figura 22 muestra el modelo 3D del eje, cuyas dimensiones fueron determinadas en función del eje hueco del motor, el cual presenta un diámetro de 20 mm (para más información acerca de las dimensiones del eje de transmisión de potencia, ver Anexo 11). Para su fabricación se seleccionó acero inoxidable AISI 316, con base en el análisis de los esfuerzos mecánicos a los que estará sometida la pieza durante el ensayo. El eje debe transmitir torque de manera continua y soportar cargas torsionales sin comprometer su

integridad estructural. Adicionalmente, se consideraron las condiciones del entorno, que pueden incluir exposición a humedad o agentes corrosivos.

El eje también fue diseñado con un chavetero que permite una transmisión mecánica efectiva del torque hacia el disco de prueba, evitando deslizamientos relativos entre las piezas acopladas. Esta solución asegura una conexión firme y alineada, adecuada para mantener la precisión del ensayo tribológico.

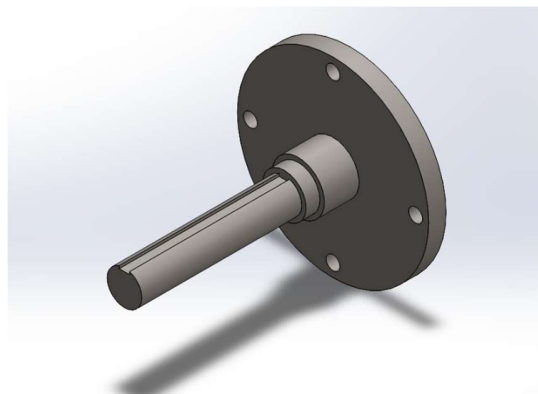


Figura 22. Eje de transmisión de potencia del motor a el disco

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del eje y evaluar su capacidad estructural frente a las cargas aplicadas, se efectuaron cálculos del factor de seguridad en condiciones estáticas y de fatiga. En la Figura 23 y la Figura 24 se ilustra el comportamiento de las principales fuerzas actuantes durante el ensayo, destacándose la fuerza de fricción y la fuerza normal.

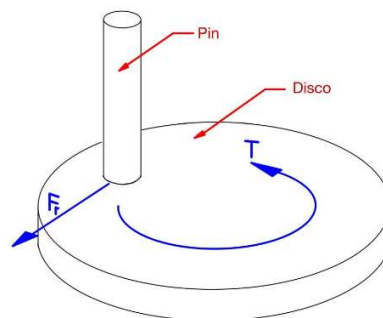


Figura 23. Fuerza de fricción sobre el disco

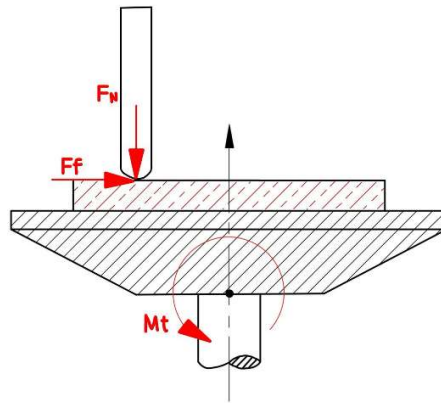


Figura 24. Fuerza de fricción y fuerza normal sobre el disco

Una vez identificadas las fuerzas y los movimientos que intervienen en el funcionamiento del disco se procedieron a elaborar un diagrama de cuerpo libre de la pieza que conforma el eje y su base de sujeción, el cual se presenta en la Figura 25.

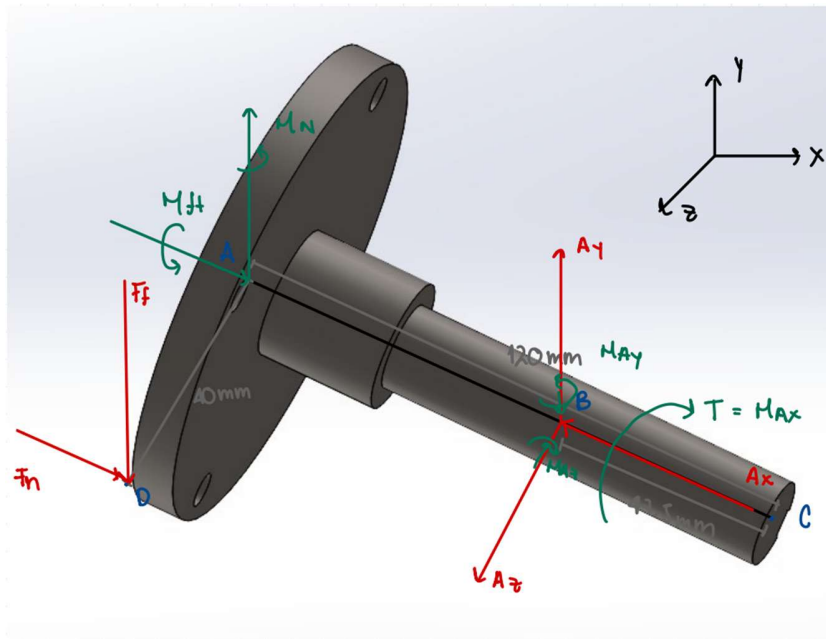


Figura 25. Diagrama de cuerpo libre sobre el eje de transmisión de potencia

A partir de este diagrama, se aplicaron las ecuaciones de equilibrio (sumatoria de fuerzas y sumatoria de momentos) con el objetivo de calcular las fuerzas internas y las reacciones en los puntos de apoyo. Los resultados de este análisis se encuentran resumidos en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen de los resultados de análisis de equilibrio fuerzas sobre el eje de transmisión de potencia

Variable	Símbolo	Valor	Unidades
Momento fuerza de fricción	Mff	1,08	Nm
Momento fuerza normal	MN	1,2	Nm
Reacción Ax	Ax	30	N
Reacción Ay	Ay	27	N
Reacción Az	Az	0	N
Torque (MAx)	MAx/T	1,08	Nm
Reacción momento MAy	MAy	1,2	Nm
Reacción momento MAz	MAz	1,9575	Nm

Con los resultados obtenidos se elaboraron los diagramas de fuerza cortante y momento flector, con el fin de identificar el punto más crítico del eje. Dichos diagramas se presentan en la Figura 26.

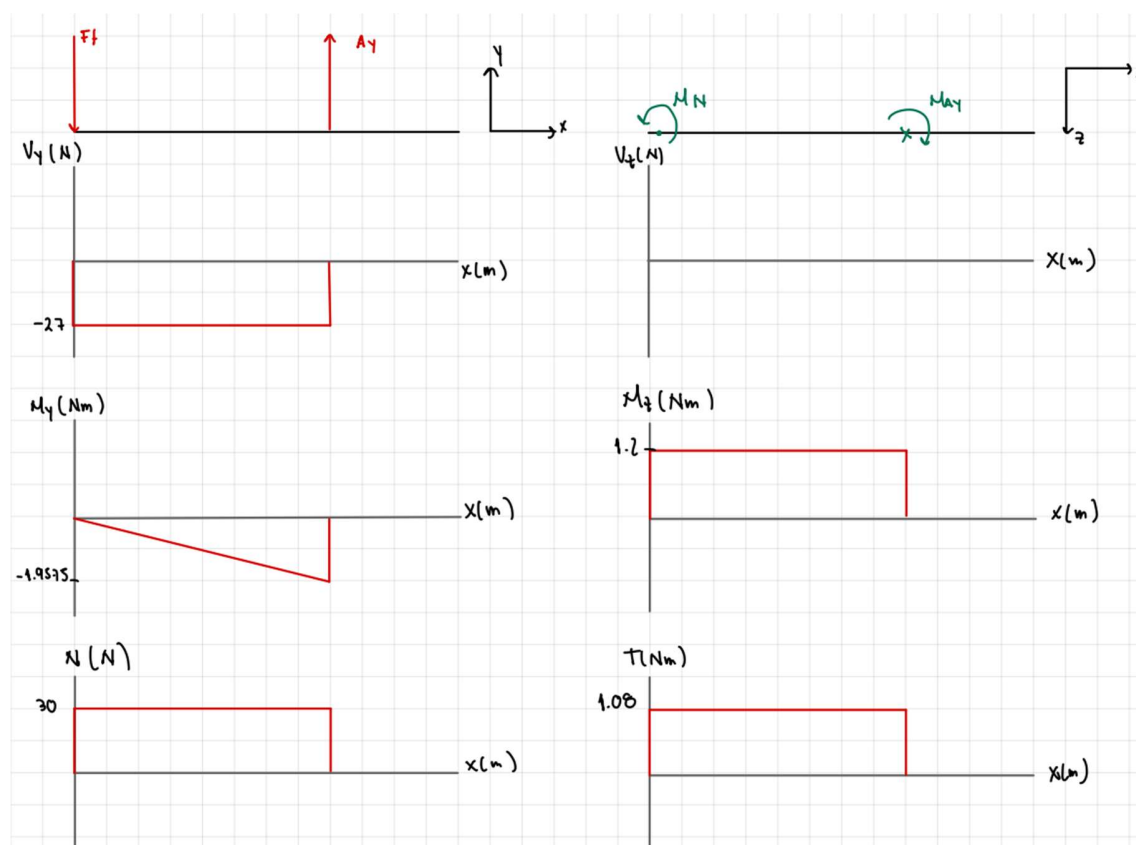


Figura 26. Diagramas de esfuerzo cortante, flector, a torsión y normal sobre el eje de transmisión de potencia del motor al disco

A partir del área transversal en la sección crítica, la cual corresponde al punto de apoyo B, en donde se encuentran los rodamientos, y utilizando los valores de momento y cortante en dicho punto, se calcularon los esfuerzos principales. Con base en estos esfuerzos, se determinaron los factores de seguridad tanto a fatiga como a carga estática.

Cabe resaltar que para el cálculo del factor de seguridad a fatiga se consideró que el eje está sometido a una carga de tipo cíclico. Los resultados de estos análisis se presentan en la Tabla 15. Para mayor detalle sobre los procedimientos de cálculo, consultar el Anexo 4 (sección cálculo factores de seguridad) y Anexo 5.

Tabla 15. Resultados de factor de seguridad

Factor de seguridad	Símbolo	Valor
Factor de seguridad estático	ny	97,96
Factor de seguridad a Fatiga	nf	59,57

2) Recomendaciones de manufactura

Para la fabricación de esta pieza, se recomienda manufacturar por separado la base del disco y el eje, con el fin de minimizar el desperdicio de material.

El eje se sugiere producirlo mediante un proceso de torneado, mientras que la ranura para la chaveta puede ser mecanizada utilizando maquinaria CNC. Por su parte, el disco también se recomienda fabricar mediante torneado, y las perforaciones requeridas pueden realizarse con precisión empleando tecnología CNC.

Una vez fabricadas ambas piezas, se recomienda unir las mediante un proceso de soldadura, asegurando una conexión firme y resistente que garantice la integridad estructural del conjunto.

9.3 Diseño del sistema de sujeción del pin y del disco

El sistema de sujeción del pin y del disco representa una parte fundamental en el diseño general del equipo, ya que garantiza la correcta alineación, estabilidad y repetibilidad durante la realización de los ensayos tribológicos. Una sujeción inadecuada puede generar errores en la medición, desgaste irregular de las superficies de contacto e incluso daños en los componentes del sistema.

Por este motivo, el diseño de estos mecanismos debe considerar criterios como precisión en el centrado, facilidad de montaje y desmontaje, resistencia mecánica, y compatibilidad con diferentes geometrías y tamaños de muestras. En esta sección se detallan las decisiones de diseño adoptadas para ambos sistemas de sujeción, justificando la elección de los mecanismos empleados, los materiales seleccionados y las configuraciones geométricas, con el objetivo de asegurar un funcionamiento confiable y eficiente del equipo de prueba.

9.3.1 Selección sujeción del disco

De acuerdo con la norma ASTM G99 [13], los discos de prueba deben cumplir con las siguientes dimensiones: un diámetro comprendido entre 30 mm y 100 mm, y un espesor en el rango de 2 mm a 10 mm.

Considerando estas especificaciones, la Tabla 16 presenta las opciones evaluadas para el mecanismo de sujeción del disco. Este mecanismo debe ser auto centrante, ligero y adaptable a distintos tamaños de disco.

Tabla 16. Opciones de selección para la sujeción del disco de prueba de la máquina de desgaste abrasivo

Tipo de sujeción	Ilustración gráfica	Descripción
------------------	---------------------	-------------

<p>Mordazas tipo torno</p>	 <p>Figura 27. Mordazas tipo torno</p>	<p>Dispositivo de sujeción utilizado en máquinas como el torno para fijar piezas cilíndricas de manera rápida y precisa. Su diseño permite que las tres mordazas se muevan al tiempo hacia el centro o hacia afuera, asegurando una sujeción uniforme y alineada sin necesidad de ajustes individuales.</p>
<p>Mordazas con prisionero</p>	 <p>Figura 28. Mordazas con prisionero [1]</p>	<p>Este sistema de sujeción consta de una base circular con cuatro prisioneros ubicados en la periferia de forma uniforme. Estos prisioneros los cuales se aprietan mediante el uso de una llave Allen actúan como mordazas ajustables para fijar el disco de ensayo aplicando presión sobre este para sujetarlo firmemente [1].</p>
<p>Mordazas tipo prensa</p>	 <p>Figura 29. Mordazas tipo prensa [1], [28].</p>	<p>Este sistema es una adaptación de las prensas tradicionales diseñado de tal forma que al apretar o aflojar el tornillo, las mordazas se abren o cierran hacia el centro de tal forma que se garantiza que la muestra quede posicionada respecto al eje de acople.</p>



Considerando estas especificaciones, se optó por un mecanismo de sujeción mediante tapa y contratapa, ambos fabricados en acero AISI 316. Este material fue seleccionado para el eje debido a las fuerzas mecánicas a las que está sometido, y se emplea también en la tapa con el fin de evitar problemas de corrosión derivados del contacto constante entre ambas superficies. Esta elección asegura una fijación precisa, uniforme y repetible del disco de prueba, lo cual es fundamental para garantizar la validez y la reproducibilidad de los ensayos tribológicos.

Además, este sistema presenta varias ventajas clave:

- **Peso ligero**, lo que minimiza los esfuerzos sobre el eje del motor y mejora la eficiencia del sistema.
- **Facilidad de montaje y desmontaje**, permitiendo un mantenimiento ágil y eficiente.
- **Fiabilidad en la sujeción**, asegurando la estabilidad del disco durante las pruebas.

Estas características hacen que el mecanismo sea ideal para el diseño de la máquina, cumpliendo con los requisitos funcionales y operativos del sistema. El modelo 3D del sistema se muestra en la Figura 31 y los planos se pueden observar en los anexos 11 y 12.

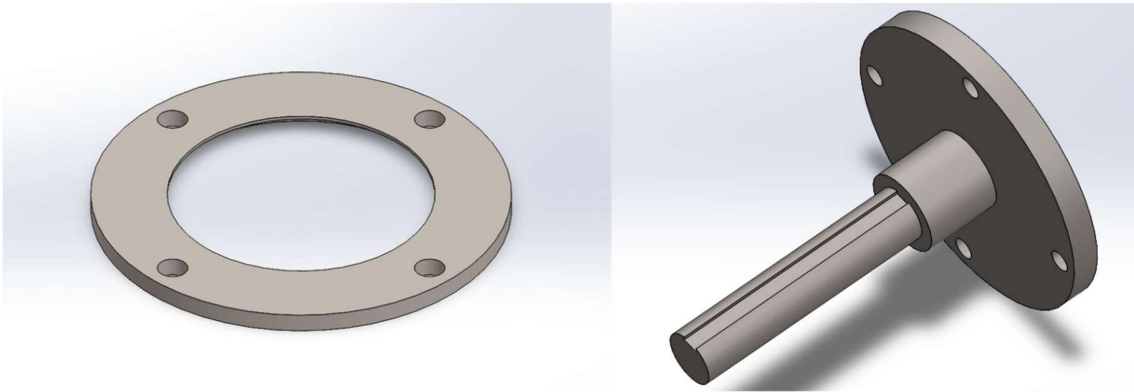


Figura 31. Sistema diseñado para la sujeción del disco mediante tapa y contratapa

Para la manufactura de la base se recomienda revisar la sección 9.2.2, para la manufactura de la tapa, se recomienda el uso de torneado y posteriormente el uso de CNC para detalles como los agujeros.

9.3.2 Selección sujeción del pin

Según lo establecido en la norma ASTM G99 [13], el diámetro del pin empleado en los ensayos debe encontrarse dentro de un intervalo que va de 2 mm a 10 mm, asegurando así compatibilidad con distintos materiales y condiciones experimentales. Considerando estas especificaciones, la Tabla 17 muestra las opciones evaluadas para el mecanismo de sujeción del pin.

Tabla 17. Opciones de selección para la sujeción del pin de prueba de la máquina de desgaste abrasivo

Tipo de sujeción	Ilustración gráfica	Descripción
<p>Tipo broquero</p>	 <p>Figura 32. Sujeción tipo broquero</p>	<p>Este sistema emplea un broquero, que, al girar el collarín, ajusta sus mordazas internas sobre el pin, asegurándolo con una sujeción concéntrica y uniforme.</p>

<p>Mediante prisionero</p>	 <p>Figura 33. Sujeción mediante prisionero</p>	<p>Este sistema consiste en una boquilla que guía y sostiene el pin, mientras un tornillo de fijación (prisionero) lo presiona lateralmente para asegurar su posición.</p>
-----------------------------------	--	--

Para garantizar una sujeción precisa y segura del pin, se seleccionó un mecanismo basado en un broquero de ½ pulgada, similar a los utilizados en taladros para fijar brocas. Esta elección responde a diversos criterios técnicos:

- **Fijación estable y segura:** El broquero ofrece una retención firme del pin, evitando desplazamientos no deseados durante el ensayo.
- **Facilidad de ajuste y liberación:** Su mecanismo permite la instalación y extracción del pin sin necesidad de herramientas adicionales, optimizando los tiempos de preparación.
- **Auto centrado del pin:** El diseño del mandril distribuye la fuerza de apriete de manera uniforme, lo que minimiza riesgos de deslizamiento, desalineación o vibraciones, requisito que no garantizaba el sistema de boquilla y prisionero, contribuyendo a la precisión de los resultados experimentales.

Dado que el ensayo pin sobre disco requiere condiciones controladas para evaluar el comportamiento tribológico de los materiales, la implementación de un sistema de sujeción confiable y de fácil manipulación es crucial para la reproducibilidad de los experimentos. La Figura 34 presenta el esquema del sistema de sujeción seleccionado, el cual es un broquero de la marca Bosch con referencia 2608571091 1/2 BOSCH 20 UNF 2A. Para más información acerca del broquero, revisar la referencia [29].



Figura 34. Broquero 1/2" BOSCH 20 UNF 2 A seleccionado para realizar la sujeción del pin [29]

9.4 Diseño del sistema de aplicación de carga

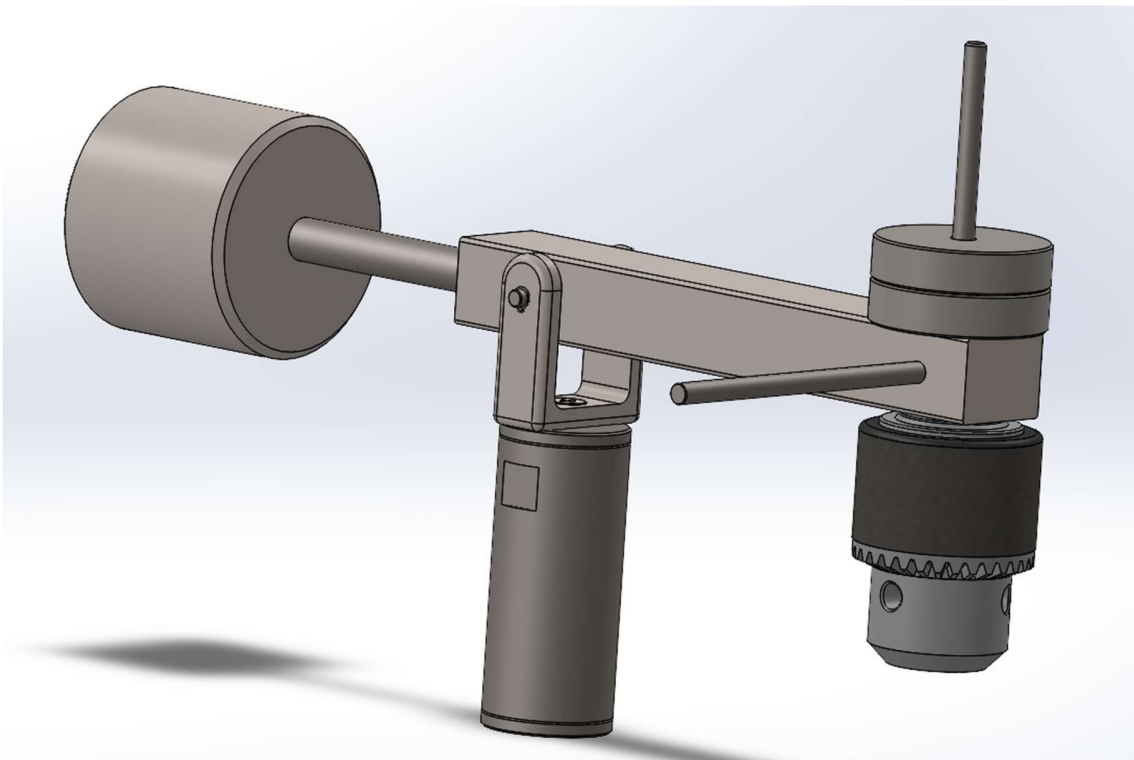


Figura 35. Modelo 3D del sistema de aplicación de carga

9.4.1 Diseño del subsistema de carga variable

Para el diseño del subsistema de carga variable, es fundamental tomar en cuenta las dimensiones de las pesas utilizadas para aplicar la carga, las cuales están definidas por la norma ASTM E617 [30]. Esta norma establece que las pesas de ensayo deben tener un diámetro exterior entre 20 mm y 90 mm, un diámetro interior entre 5 y 12 mm, y una altura entre 20 y 30 mm.

Con base en estas especificaciones, se diseñó un sistema de soporte para las pesas conformado por un eje vertical, sobre el cual se colocan de forma alineada. Este eje se acopla al brazo principal mediante un sistema roscado, lo que permite un montaje seguro, sencillo y ajustable, facilitando tanto la instalación como la variación del peso aplicado durante los ensayos. El modelo 3D del soporte puede verse en la Figura 36, el plano del modelo con medidas se encuentra en el Anexo 13.

Para la fabricación del soporte se seleccionó acero AISI 1045. Aunque las cargas que debe soportar este eje no son elevadas, se optó por un material con mayor resistencia mecánica para garantizar rigidez estructural, minimizar el riesgo de deformaciones con el uso repetido y mantener la integridad del sistema bajo posibles condiciones de impacto o cargas accidentales. Además, el AISI 1045, al ser un acero al carbono de media resistencia, ofrece buena maquinabilidad, resistencia mecánica y amplia disponibilidad en el mercado, lo que lo convierte en una opción eficiente y adecuada para esta aplicación. Este sistema, fabricado con dicho material, es responsable de soportar el broquero a través de la zona roscada del eje, garantizando una conexión robusta y confiable durante el funcionamiento del equipo.

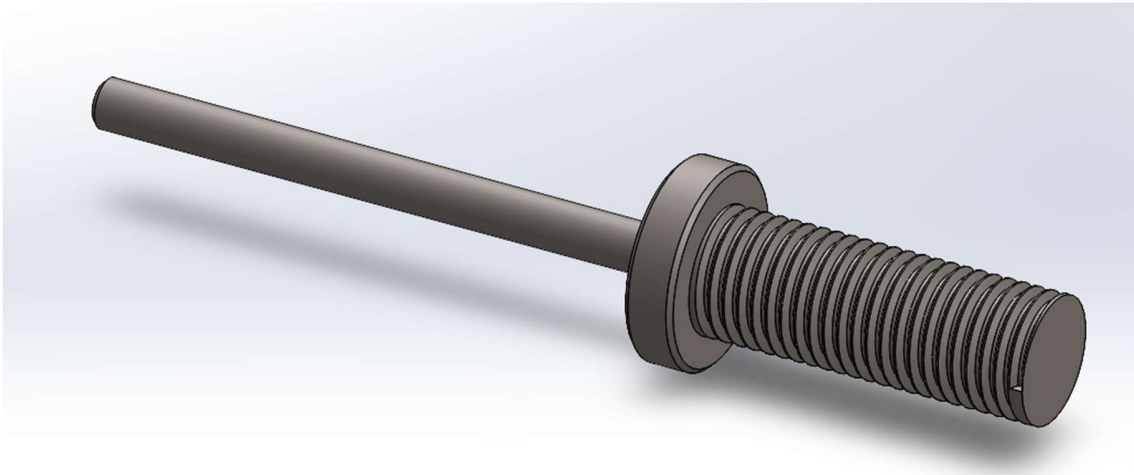


Figura 36. Soporte para pesas diseñado

Para la manufactura del soporte para pesas, se recomienda realizar mediante el uso del proceso de torneado.

9.4.2 Diseño del subsistema de soporte de carga

El subsistema de soporte de carga se conforma principalmente del brazo principal, el cual se encarga de soportar y unir la sujeción del pin, el subsistema de carga variable, el contrapeso y el eje para el contacto con la celda de carga. El cual se puede visualizar en la Figura 37.

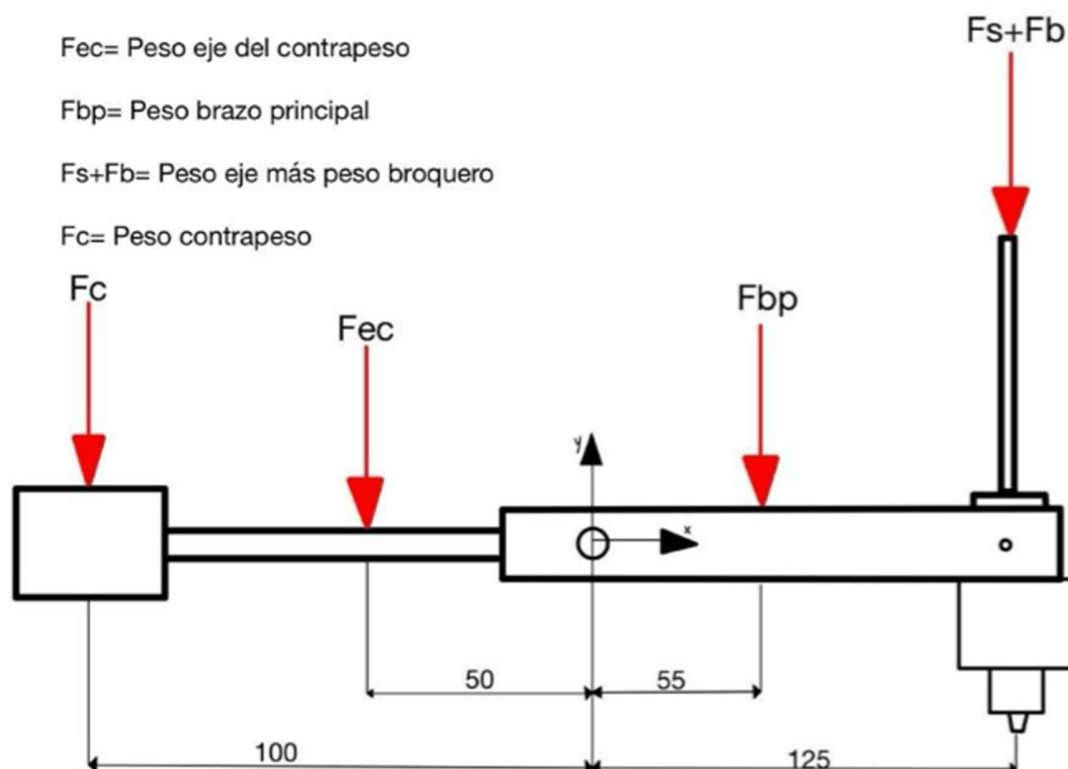


Figura 37. Sistema completo de soporte de carga

Dado que este sistema incorpora un contrapeso, es fundamental determinar su masa óptima para garantizar el equilibrio del sistema cuando no se aplica ninguna fuerza externa. Este equilibrio es crucial para minimizar esfuerzos no deseados en los componentes y asegurar la precisión de los ensayos.

A partir de los cálculos detallados en el Anexo 4, se determinó que la masa del contrapeso debía ser de 800 g. Para su fabricación, se seleccionó acero inoxidable AISI 316 recocido debido a su alta resistencia a la corrosión y su capacidad para mantener la integridad estructural en condiciones exigentes. Aunque el contrapeso no está sujeto a cargas extremas, el entorno de operación puede involucrar exposición a humedad o agentes corrosivos. El AISI 316 asegura que el contrapeso se mantenga funcional y duradero, incluso en condiciones adversas. Además, el sistema de unión con rosca permite realizar ajustes precisos en la posición del contrapeso. De este modo, al colocar el pin en el broquero para iniciar el ensayo, el usuario puede desenroscar o ajustar el contrapeso hasta lograr un balance adecuado del equipo, compensando los momentos generados y optimizando la estabilidad del mecanismo.

Este diseño garantiza un funcionamiento preciso, reduciendo el impacto de vibraciones o desalineaciones, lo que a su vez contribuye a la fiabilidad y repetibilidad de los ensayos tribológicos. El material utilizado para el eje del contrapeso y el eje de la celda de carga es acero AISI 1045, seleccionado después de calcular las fuerzas que actúan sobre estos elementos, ya que este material es capaz de soportar las cargas mecánicas sin comprometer su integridad. Asimismo, el brazo principal fue fabricado en acero AISI 316 recocido, debido a su resistencia mecánica y su capacidad para resistir la corrosión, garantizando su durabilidad frente a posibles agentes corrosivos a los que podría estar expuesto durante el uso. Las Figuras 38 y 39 muestran el modelo 3D de cada uno de los componentes del subsistema, mientras que en los Anexos 14, 15, 16, 17, 18, 19 y 20 se encuentran los planos con las medidas detalladas de cada uno de estos componentes.

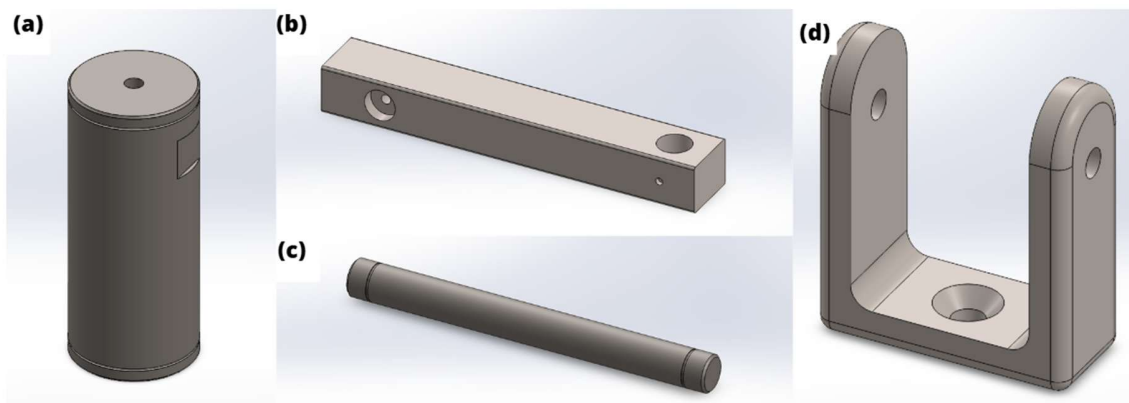


Figura 38. Modelo 3D subsistema de soporte de carga a) base para el brazo principal, b) brazo principal, c) eje brazo principal d) U del brazo principal.

Para el soporte de esta estructura se diseñó un eje, el cual se sujeta a la lámina principal de la máquina diseñado de acero AISI 1045, además se añadió una pieza tipo U, en la cual se atraviesa el eje que conecta el brazo principal a este soporte. Estas piezas son de acero inoxidable 316, AISI 1045.

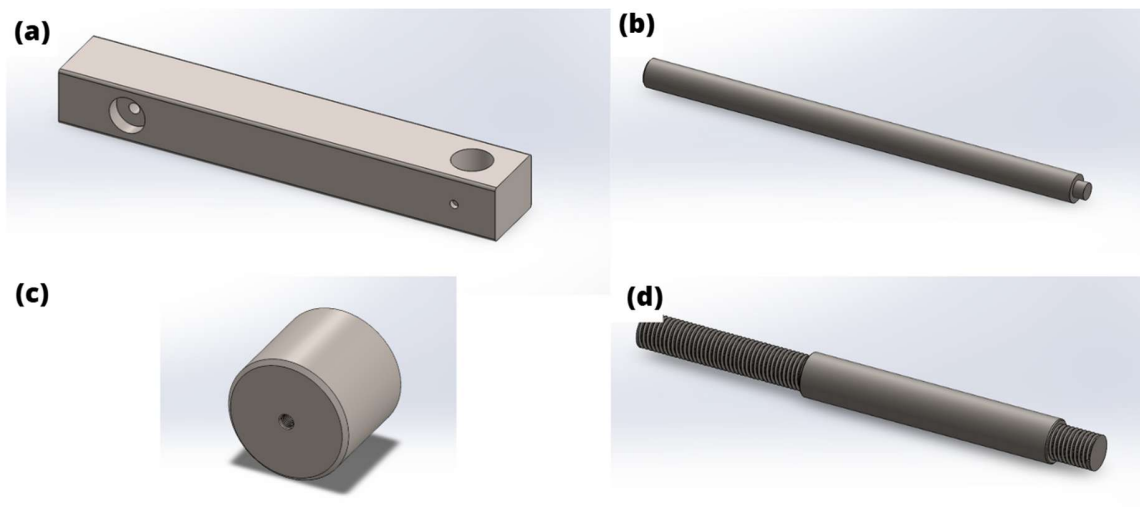


Figura 39. Modelo 3D subsistema de soporte de carga a) base para el brazo principal, b) eje celda de carga c) contrapeso d) eje contrapeso

El diseño del brazo principal cuenta con dos “perforaciones” para poner dos rodamientos, uno a cada lado, permitiendo el movimiento del sistema principal de forma libre. Los rodamientos son de la marca SKF 624 2Z, se muestran en la Figura 40.



Figura 40. Rodamiento SKF 624 2Z

Para la manufactura de el contrapeso y los ejes, se recomienda el proceso de torneado, debido a la geometría cilíndrica de las piezas y a la buena maquinabilidad del material.

9.5 Diseño estructura estable

Para garantizar la estabilidad del conjunto y el correcto funcionamiento del sistema, se diseñó una estructura estable utilizando tubos estructurales de 20 mm x 20 mm x 2 mm, los cuales fueron unidos mediante soldadura. Esta estructura proporciona el soporte necesario tanto para la máquina como para el motor, asegurando rigidez y resistencia durante su operación. Además, se recubrió la estructura con lámina de acero 1020 laminado en frío, lo que no solo mejora la estética del conjunto, sino que también contribuye a su durabilidad y protección contra posibles agentes externos. El modelo 3D de la estructura se muestra en la Figura 41, la Figura 42 muestra el modelo 3D de cada uno de los componentes de la estructura principal.

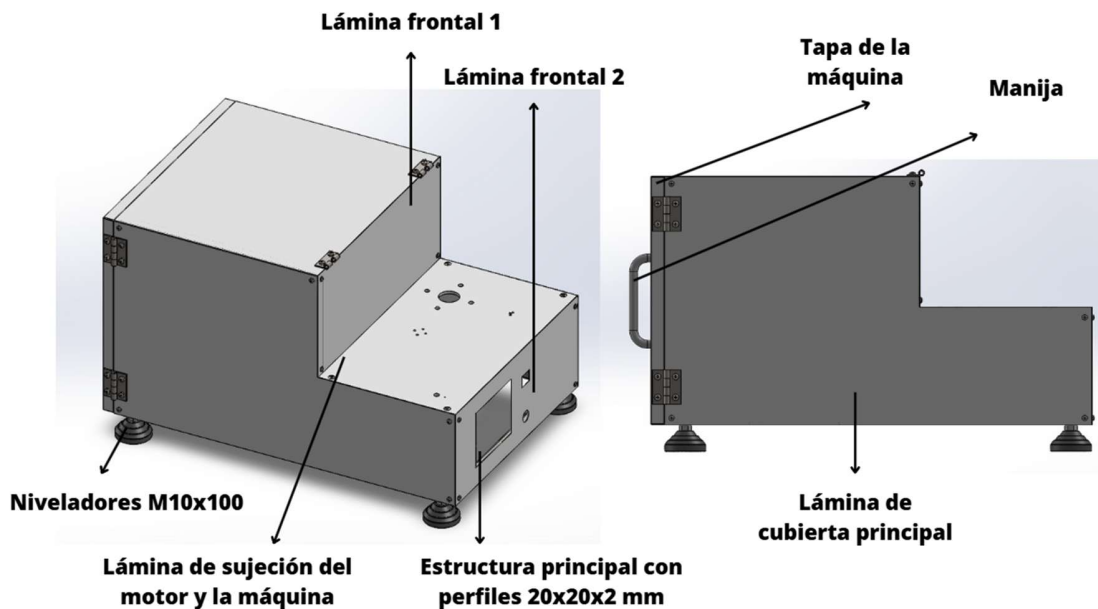


Figura 41. Modelo 3D con nombres de la estructura principal ensamblada

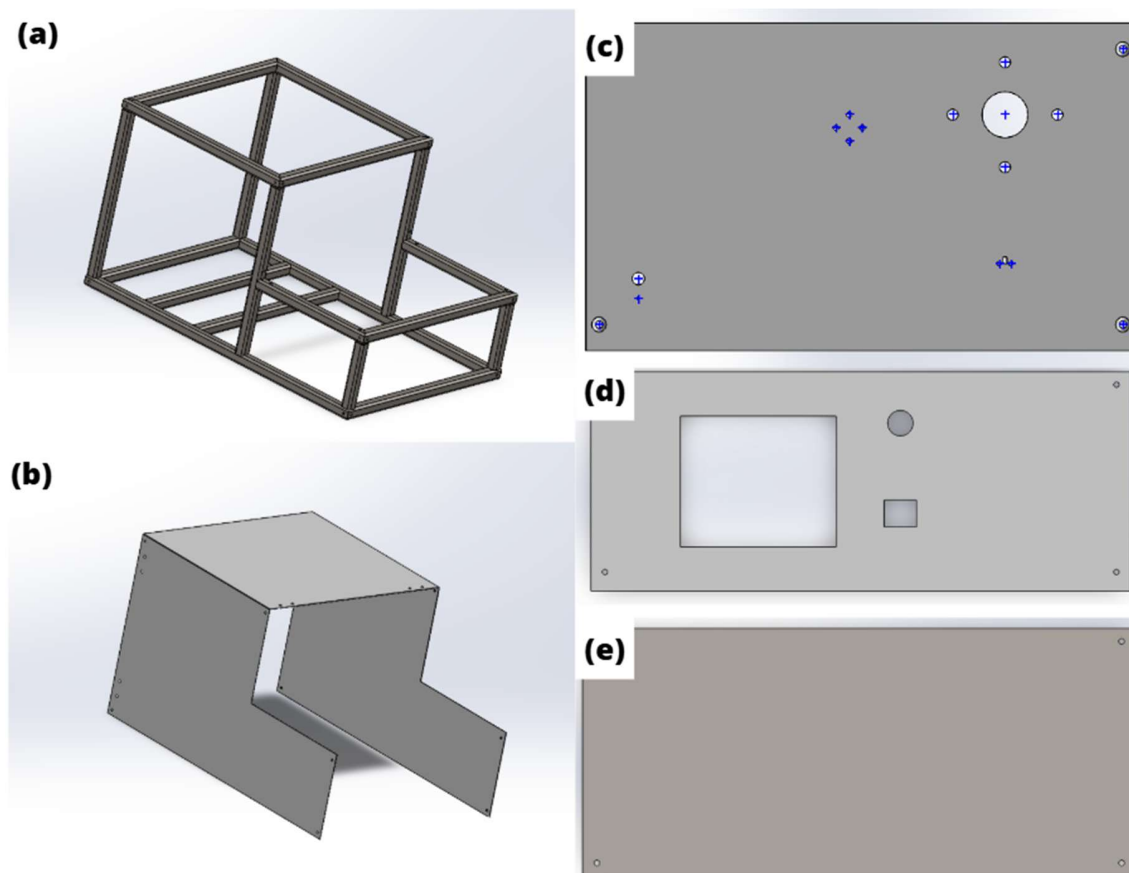


Figura 42. Modelo 3D estructura principal a) estructura base con tubos estructurales 20x20x2mm, b) l'amina principal de recubrimiento, c) lámina base de soporte de la máquina general y el motor, d) lámina frontal 1, e) lámina frontal 2

A la estructura principal incorpora además una puerta trasera que facilita el acceso al sistema de forma rápida y segura, cuyo modelo 3D se muestra en la Figura 43.

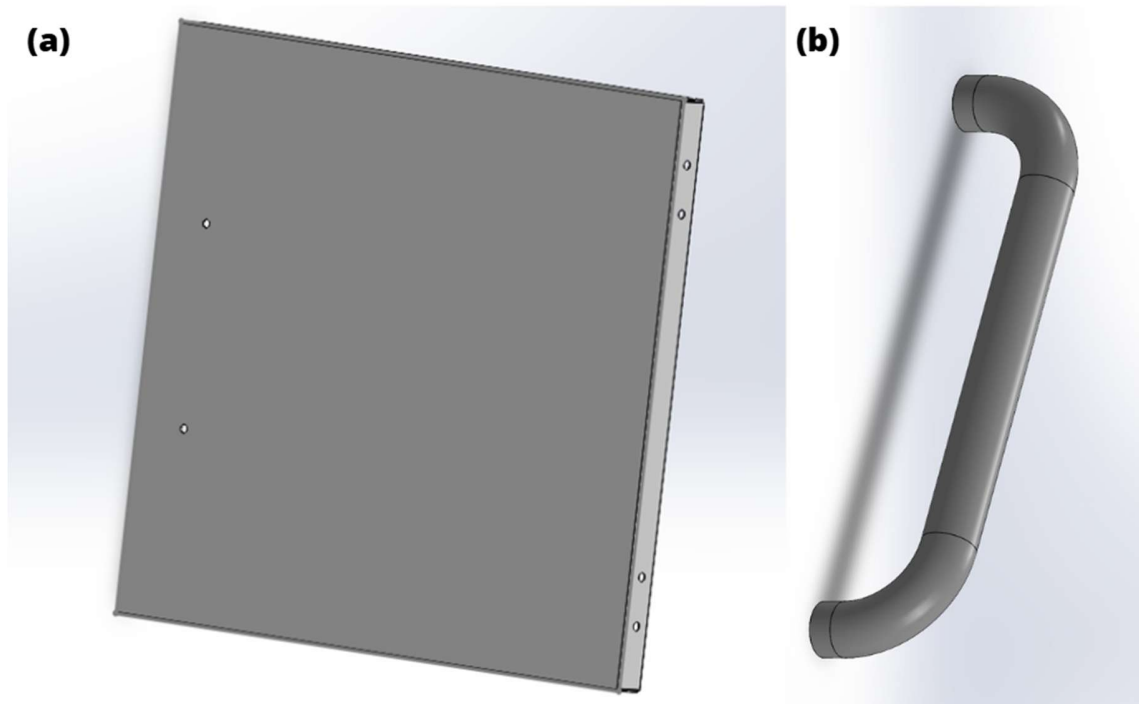


Figura 43. Modelo 3D de puerta trasera de la máquina y la manija.

En los cuatro puntos de apoyo principales se instalaron niveladores roscados M10 de 100 mm de longitud. Estos niveladores permiten ajustar la altura y el nivel de la máquina para compensar irregularidades del suelo, garantizar la estabilidad durante el funcionamiento y reducir vibraciones. Se muestran en la Figura 44.

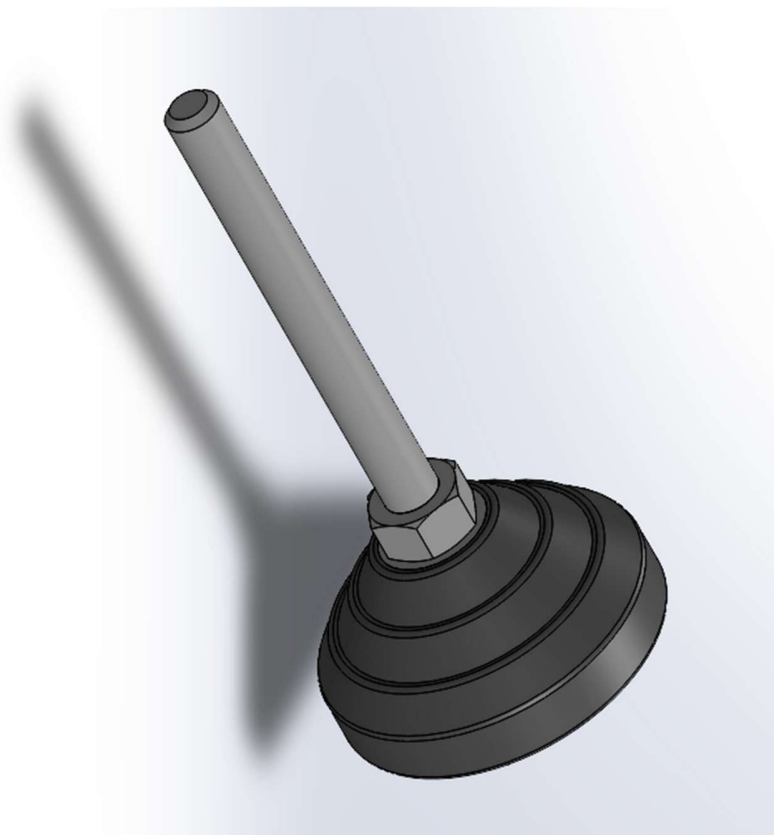


Figura 44. Nivelador de la máquina de tipo M10 x 100 mm de longitud

a) Cubierta

A la estructura previamente mostrada se le añade una cubierta por medio de bisagras, la cual sirve para proteger al operario de contacto accidental con la parte rotativa en funcionamiento, así como de la posibilidad de impacto por partes proyectadas como se estipula en la norma UNE-EN ISO 12100:2012, su esquema general se muestra en la Figura 45, y para más información acerca de las medidas, consultar los anexos 8, 27, 28, 29, esta misma norma no establece un material específico para la realización de estas cubiertas, sin embargo, exige que los resguardos sean robustos, difíciles de desmontar, y resistente al uso previsto. Estos resguardos deben:

- Resistir al impacto de parte proyectadas.
- Impedir el acceso a zonas peligrosas durante el funcionamiento.
- No generar riesgos adicionales (roturas, bordes cortantes, fragmentación, etc).

Para este caso se seleccionó el policarbonato el cual es un polímero termoplástico con un valor típico de resistencia al impacto Charpy de entre 60-100 kJ/m² siendo hasta 250 veces más resistente que el vidrio y 10-20 veces más que acrílico (PMMA).

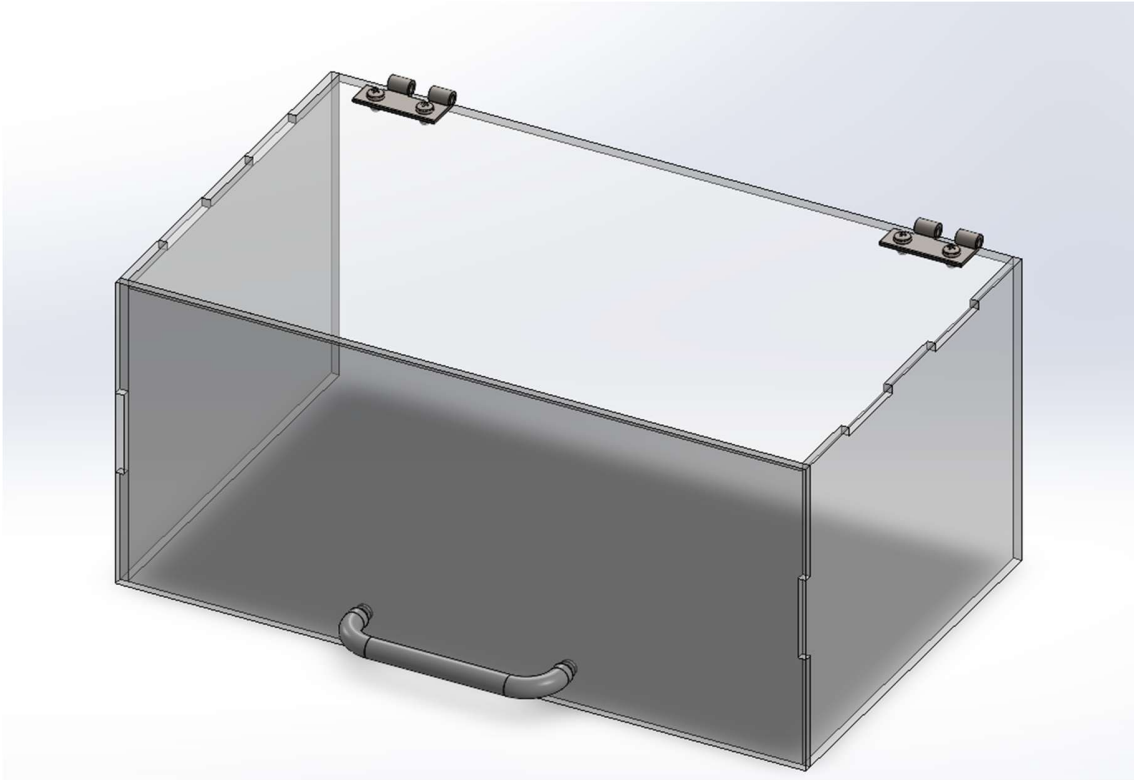


Figura 45. Modelo 3D del esquema general de la cubierta de la máquina

9.6 Diseño del sistema de control y automatización

9.6.1 Diseño del subsistema de medición de condiciones ambientales

En los ensayos de desgaste tipo pin sobre disco, las condiciones ambientales juegan un papel importante en la precisión y repetibilidad de los resultados. Con el fin de registrar las condiciones en las que se lleva a cabo cada ensayo, se incorporaron sensores de temperatura y humedad al sistema. Estos dispositivos permiten monitorear de manera continua el entorno durante el desarrollo de las pruebas, generando datos útiles tanto para la comparación entre ensayos como para la interpretación de posibles variaciones

en los resultados. En la Figura 46 se aprecia la ubicación de los sensores de humedad y de temperatura en la máquina.

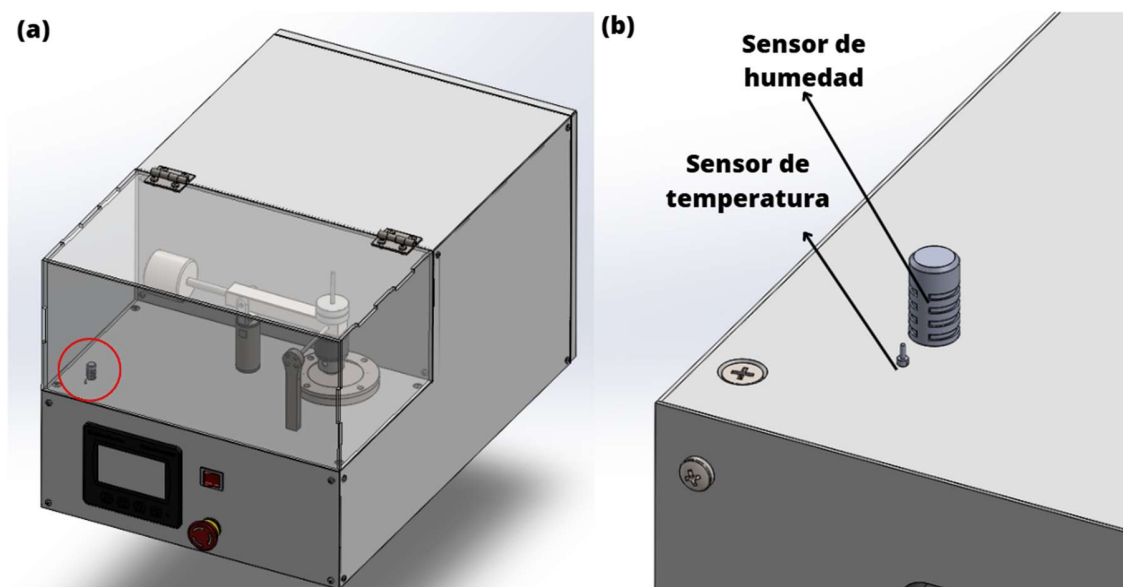


Figura 46. Modelo 3D subsistema de medición de condiciones ambientales a) Ubicación de los sensores en la máquina, b) Sensores de humedad y temperatura.

1. Selección sensor de temperatura

Para el registro de la temperatura ambiental se empleó el sensor digital **DS18B20** [31], una opción precisa, confiable y de fácil integración. Este dispositivo cuenta con una resolución configurable entre 9 y 12 bits, y ofrece una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro del rango de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para el monitoreo de condiciones ambientales en entornos de laboratorio, el sensor se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Sensor de temperatura [31]

2. Selección sensor de humedad

Para el registro de la humedad relativa se seleccionó el sensor HTM2500LF [32] de TE Connectivity, un dispositivo analógico diseñado para aplicaciones de monitoreo ambiental. Este sensor ofrece una precisión típica de $\pm 2\%$ HR en el rango del 20 % al 80 % de humedad relativa, el dispositivo se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Sensor de humedad [32]

9.6.2 Diseño del subsistema de medición de coeficiente de fricción

El acoplamiento general del subsistema de medición de coeficiente de fricción se puede observar en la Figura 49 mediante un modelo 3D.

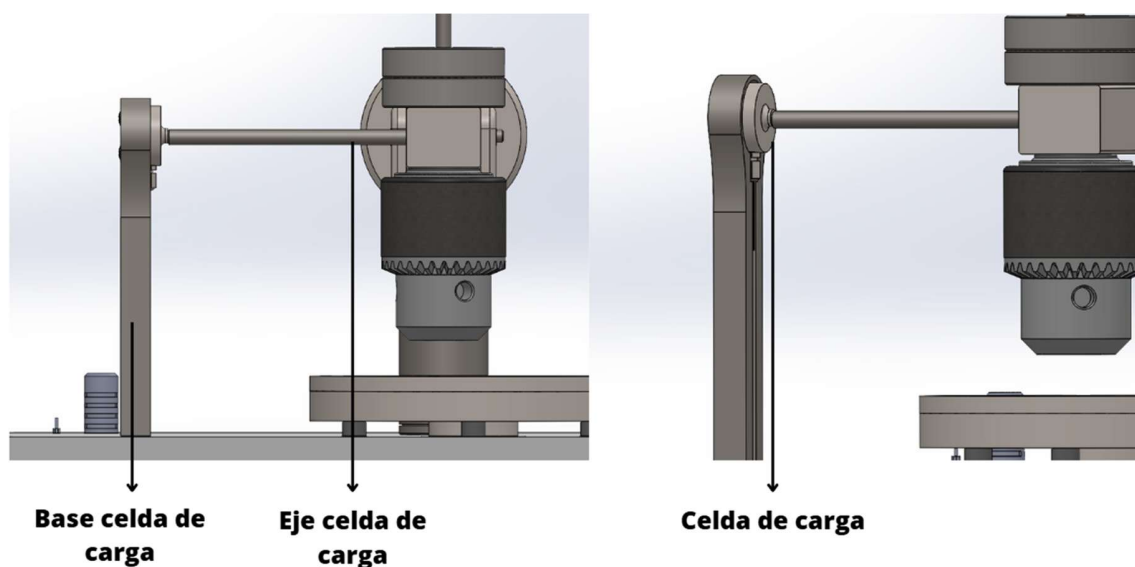


Figura 49. Modelo general de la estructura del subsistema de medición de coeficiente de fricción con sus nombres.

1. Selección celda de carga

En la máquina utilizada para la medición del desgaste adhesivo, la lectura del coeficiente de fricción se realiza mediante una celda de carga por compresión, la cual está conectada al brazo principal a través de un eje dispuesto de forma perpendicular al punto de aplicación de la fuerza en la celda. Durante el ensayo, al comenzar la rotación del disco, se genera una fuerza tangencial como resultado del contacto entre las superficies en fricción. Esta fuerza se transmite a través del brazo principal hasta llegar a la celda de carga, donde es registrada.

Para asegurar que la fuerza medida corresponda exclusivamente a la fricción entre las superficies y no se vea influida por resistencias mecánicas adicionales, el sistema incorpora rodamientos en la unión del brazo principal con la U, lo que le proporciona libertad de movimiento y reduce al mínimo la fricción parásita. De este modo, se garantiza que la señal detectada por la celda de carga represente de manera precisa la fuerza de

fricción efectiva, lo que permite un cálculo confiable del coeficiente de fricción a lo largo del ensayo.

Se seleccionó una celda de carga de la marca **OMEGA**, modelo **LCGD-25**, diseñada específicamente para aplicaciones de compresión. Esta celda cuenta con una capacidad de medición de **100 N (25 lb)**, adecuada para el rango de fuerzas esperado durante los ensayos de desgaste. La elección de este modelo se basó en su alta sensibilidad, robustez estructural y compatibilidad con sistemas de adquisición de datos analógicos, lo que garantiza una lectura estable y confiable durante la prueba, la Figura 50 muestra la celda de carga.



Figura 50 Celda de carga Omega LCGD-25 [32].

2. Diseño eje de contacto con la celda de carga

Dado que se emplea una celda de carga tipo compresión, fue necesario diseñar un eje que se extienda desde el brazo principal hasta la celda, permitiendo así la transmisión efectiva de la fuerza generada durante el ensayo. Este eje tiene la función de transferir la reacción del contacto tribológico, producto de la fricción entre el pin y el disco, directamente a la celda de carga. De esta manera, cuando el sistema está en funcionamiento, la fuerza de fricción generada se transmite a lo largo del eje, activando la celda y permitiendo medir con precisión su magnitud. La Figura 51 muestra el modelo 3D del eje diseñado para esta función, mientras que en el Anexo 18 se presentan sus dimensiones detalladas en el plano técnico correspondiente. Aunque la única carga que debe soportar este eje es una fuerza

normal de bajo valor proveniente del contacto con la celda de carga, se seleccionó acero AISI 1045 para su fabricación. Esta elección se basa en su adecuada resistencia mecánica, buena maquinabilidad y disponibilidad comercial. Se recomienda que el proceso de fabricación del eje se realice mediante torneado para garantizar precisión dimensional y buen acabado superficial.

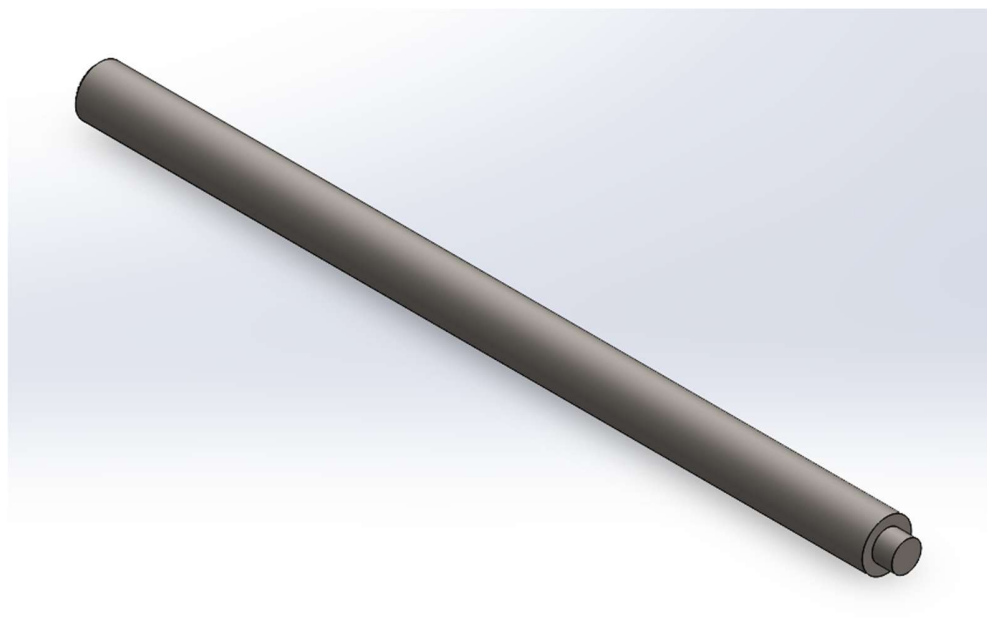


Figura 51. Eje de transmisión de fuerza del brazo principal a la celda de carga

3. Diseño base para la celda de carga

Para asegurar una alineación adecuada entre la celda de carga y el eje de transmisión, se diseñó una base específica que permite fijar la celda a la altura requerida. Esta base cumple la función de soporte estructural, garantizando estabilidad durante la medición y evitando desplazamientos que puedan afectar la precisión de los datos obtenidos. Aunque esta pieza no estará sometida a cargas elevadas, se seleccionó acero AISI 1045 para su fabricación, con el fin de aportar rigidez y resistencia mecánica general al sistema, además de asegurar una buena durabilidad bajo condiciones de uso prolongado. El modelo 3D de la base puede observarse en la Figura 52, mientras que en el Anexo 30 se presenta el plano técnico con las medidas y detalles constructivos correspondientes. Para su fabricación se recomienda el uso de maquinaria CNC, ya que permite obtener una alta precisión dimensional y un acabado superficial adecuado para el correcto montaje de la celda de carga.

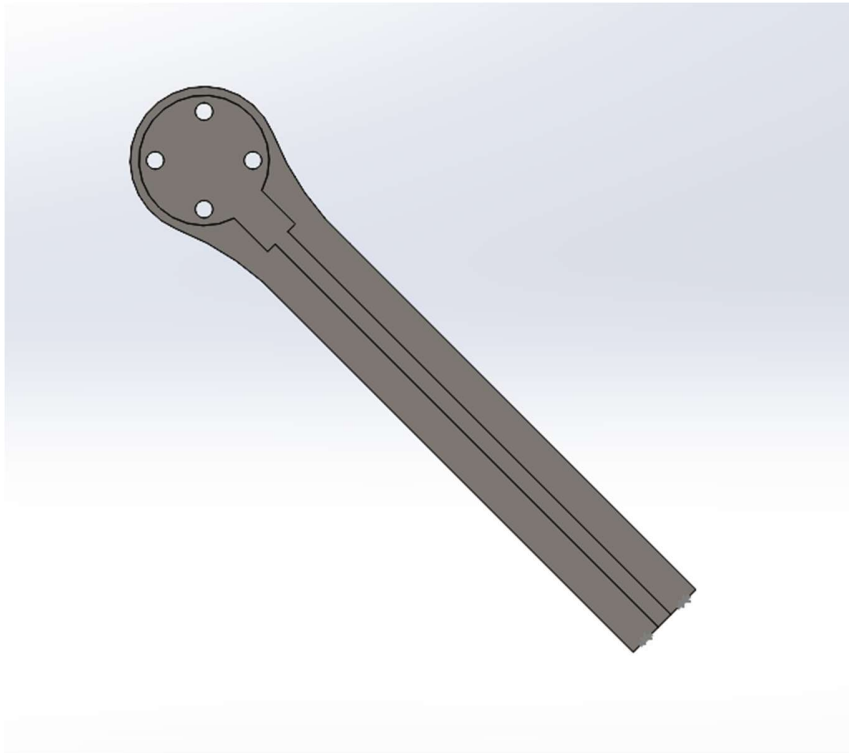


Figura 52. Modelo 3D base para sujeción de la celda de carga

9.6.3 Diseño del subsistema de visualización de parámetros de prueba

Para la visualización de resultados se decidió seleccionar una pantalla industrial HMI Allen Bradley PanelView C400, considerando criterios de compatibilidad, robustez y facilidad a la hora de la integración con el sistema de control. Esta interfaz permite al operador observar variables del proceso en tiempo real como podrían ser velocidad de rotación, tiempo de ensayo, humedad y temperatura.

El modelo al ser de tipo industrial ofrece una estructura resistente y una interfaz táctil sencilla de operar. Además, permite la comunicación con controladores mediante un protocolo estándar como podría ser Ethernet/IP.

El uso de la pantalla permite representar los datos mediante gráfico lo cual es útil para el monitoreo continuo de proceso y la interpretación de los resultados finales, adicional

permite el ajuste de ciertos parámetros desde la misma interfaz tales como la velocidad a la cual se realizará la prueba y el tiempo de duración de la misma, esta pantalla va conectada al PLC el cual es el encargado de realizar todo el proceso de forma automatizada, lo que contribuye a una operación más sencilla, la Figura 53 muestra la pantalla seleccionada. Así mismo se acopló al subsistema un botón de emergencia y un botón de encendido y apagado, los cuales se visualizan también en la figura previamente mencionada.

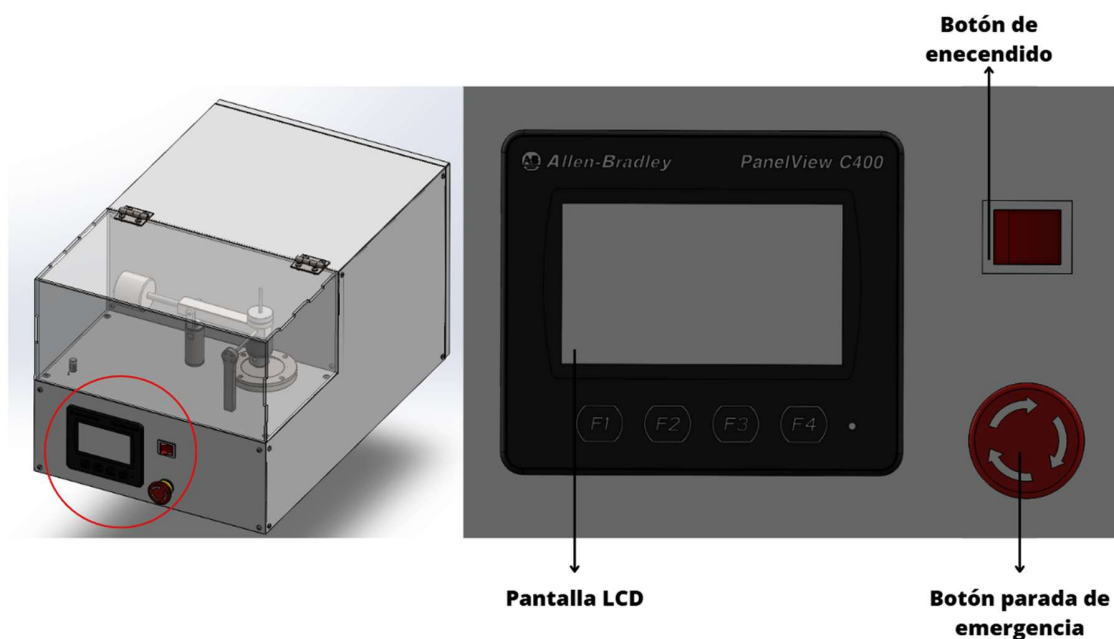


Figura 53. Pantalla HMI C400 Allen Bradley [33] su ubicación en la máquina y la ubicación de los botones de emergencia y de encendido y apagado.

9.6.4 Diseño del sistema lógico

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento y control de la máquina de medición de desgaste, es fundamental definir una secuencia de operaciones la cual permita coordinar correctamente todos los componentes involucrados. Esta secuencia, conocida como prosa lógica, describe de manera estructurada el comportamiento esperado del sistema desde su encendido hasta su apagado.

A continuación, se presenta la prosa lógica correspondiente al sistema de medición de desgaste, la cual contempla las etapas de inicialización, configuración de parámetros, ejecución controlada y finalización segura del proceso.

A. Encendido inicial

El operador enciende el switch principal de encendido de la máquina lo que energiza:

- El PLC
- El variador de velocidad
- La HMI
- Los sensores (celda de carga, sensor de temperatura y sensor de humedad)
- Motor

B. Inicialización del sistema

PLC realiza rutina de verificación:

- Comprueba que el variador esté en estado "listo para arrancar"
- Realiza una tara (cero) de la celda de carga
- Toma lectura inicial del subsistema de condiciones ambientales
- Muestra un mensaje "Sistema Listo" en la HMI

C. Configuración de la prueba

Mediante la HMI, el operador selecciona:

- Duración de la prueba
- Velocidad deseada (en rpm o Hz para el variador)
- Carga aplicada

D. Inicio de la prueba

Al presionar "Iniciar" en la HMI:

El PLC envía:

- Señal de arranque al variador de velocidad
- Frecuencia objetivo para ajustar la velocidad del motor

El sistema empieza a medir y registrar:

- Fuerza fricción
- Temperatura y humedad ambiental
- Velocidad real del motor

E. Monitoreo activo

Durante la prueba se tiene un monitoreo tanto de la carga como de las condiciones ambientales, si se presiona el botón de parada de emergencia el PLC corta la señal de marcha al variador y se detiene el sistema.

F. Finalización de la prueba

Al completar el tiempo de la prueba:

- El PLC envía al variador la orden de parada
- Se guardan los datos finales en memoria interna
- La HMI muestra los datos finales

G. Apagado de la máquina

El operador apaga manualmente mediante switch principal.

a) Entradas y salidas

Teniendo en cuenta la prosa lógica, se determinó el número de entradas y salidas del sistema con su respectiva simbología (**Tabla 18**)

Tabla 18. Simbología, y tipo de I/O para desarrollo de GRAFCET

Traducción de la prosa lógica para GRAFCET		
Símbolo	Descripción	Entradas/Salidas

SOn-SOff	Switch ON/OFF	5 entradas
BE	Botón de emergencia	
CC	Celda de carga	
ST	Sensor de temperatura	
SH	Sensor de humedad	
VFD	Variador de velocidad	2 salidas
PHMI	Pantalla HMI	

b) Selección de PLC

La elección de la marca del PLC se realizó considerando diversos factores: el número tanto de entradas como de salidas y los costos. Se decidió usar un PLC de la marca Allen Brandley [33], debido a que la universidad cuenta con software compatible con esta marca de electrónica, tales como Codesys y Connected Components Workbench, además de tratar de hacer lo más compatible posible el PLC con la pantalla (de la marca Allen Bradley), por lo que se decidió seleccionar el modelo Micro 850 2080-L50E-24AWB, al cual hay que realizarle las siguientes adaptaciones:

- Módulo de entradas analógicas Allen Bradley 2085-IF4 [34] usado para leer las señales analógicas tanto del sensor HTM2500LF como la celda de carga.
- Convertidor para sensor DS18B20 1-Wire a RS485 [35].
- Amplificador para celda de carga XK3190-A12 debido a que la celda de carga por si sola entrega una señal en milivoltios lo cual es muy baja para ser percibida por el PLC.

c) Desarrollo del Grafcet

El GRAFCET (Grphe Fonctional de Commande Étape/Transition) [36], también conocido como diagrama de etapas y transiciones, es una herramienta gráfica utilizada en el ámbito de la automatización industrial para describir el comportamiento secuencial de un sistema. Existen diversas maneras de elaborar un GRAFCET, debido que dependiendo del sistema que se está automatizando, los requerimientos y la lógica cambia y en muchos casos es necesario realizar varios trabajos de manera simultánea como se observa en la Figura 54 la cual es una representación genérica de un GRAFCET en paralelo.

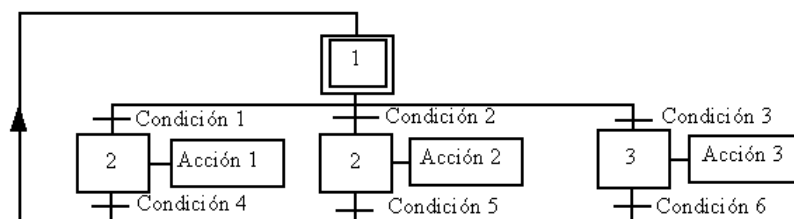


Figura 54. Orden lógico de activaciones y desactivaciones en paralelo

En la Figura 55 se puede observar el subproceso 2 mientras que en la Figura 56 se observa todo el proceso lógico de la máquina.

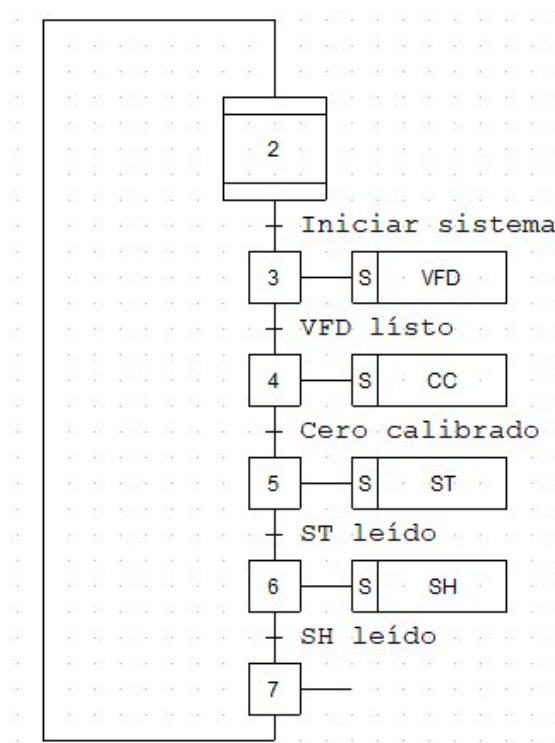


Figura 55. Subproceso de inicialización y diagnóstico de la máquina

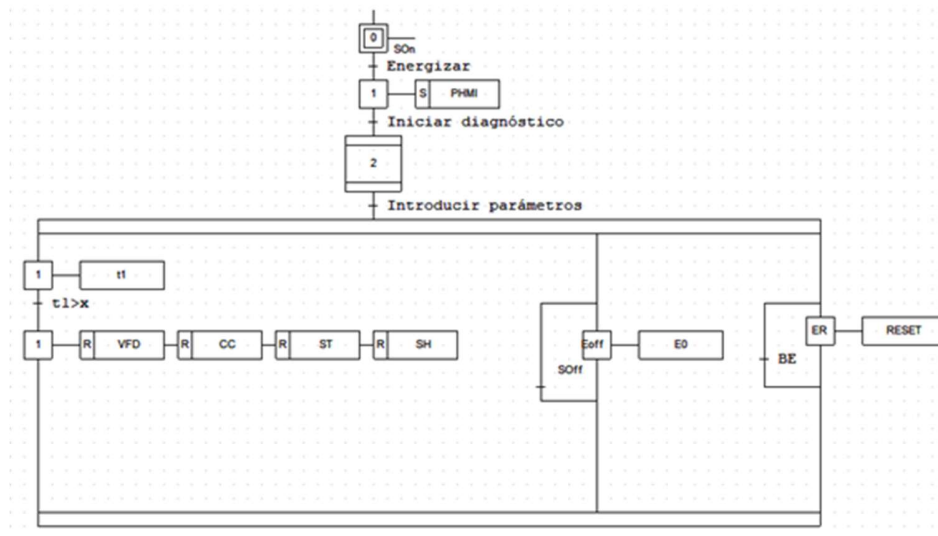


Figura 56. Grafcet del proceso de la máquina.

a. Caja

Se recomienda para toda la parte electrónica utilizar una caja, la cual va en la parte interior de la maquina y se encargara de guardar todos los componentes, como la visualizada en el ensamble del Anexo 6.

10. Análisis mediante elementos finitos

Con el fin de validar el comportamiento estructural de los componentes críticos del sistema antes de su fabricación, se realizaron simulaciones utilizando el método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés). A través de estas simulaciones, se busca optimizar el diseño, asegurando que cada componente cumpla con los requisitos mecánicos establecidos y se desempeñe de manera confiable bajo las condiciones reales de operación del ensayo tribológico. Las simulaciones se realizaron aplicando las cargas obtenidas a partir de los cálculos teóricos desarrollados previamente, considerando las condiciones de frontera y restricciones propias del montaje final del sistema.

10.1 Análisis eje de transmisión de potencia

10.1.1 Caso 1 – Bajo condiciones de funcionamiento normal

Para el primer caso de simulación, se evaluó el comportamiento estructural del eje de transmisión bajo las condiciones de funcionamiento normal del sistema. Se consideró una fuerza normal máxima de 30 N, aplicada en la zona de contacto con el pin, y una fuerza de fricción máxima de 27 N, actuando tangencialmente en la misma área. Estas cargas representan los valores límite esperados durante un ensayo tribológico. Además, se definieron las condiciones de frontera correspondientes, restringiendo completamente el movimiento en la base del disco y aplicando fijaciones adicionales alrededor del eje central, simulando las sujeciones reales presentes en el montaje físico. Esta configuración permitió

analizar de forma precisa la distribución de esfuerzos y deformaciones en el componente, validando su resistencia bajo las condiciones más críticas de operación.

Teniendo en cuenta que el eje fue fabricado en acero inoxidable AISI 316, los resultados obtenidos en la simulación arrojaron un esfuerzo de Von Mises dentro de los límites permisibles para este material con un valor de $5,35 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (véase Figura 57), así como un factor de seguridad de 32 (véase Figura 58). De acuerdo con estos resultados, se concluye que el eje no presenta riesgo de falla por fluencia, ya que las cargas aplicadas durante el funcionamiento son considerablemente inferiores a la resistencia del material, e incluso menores que las típicamente soportadas por este tipo de componente en aplicaciones similares.

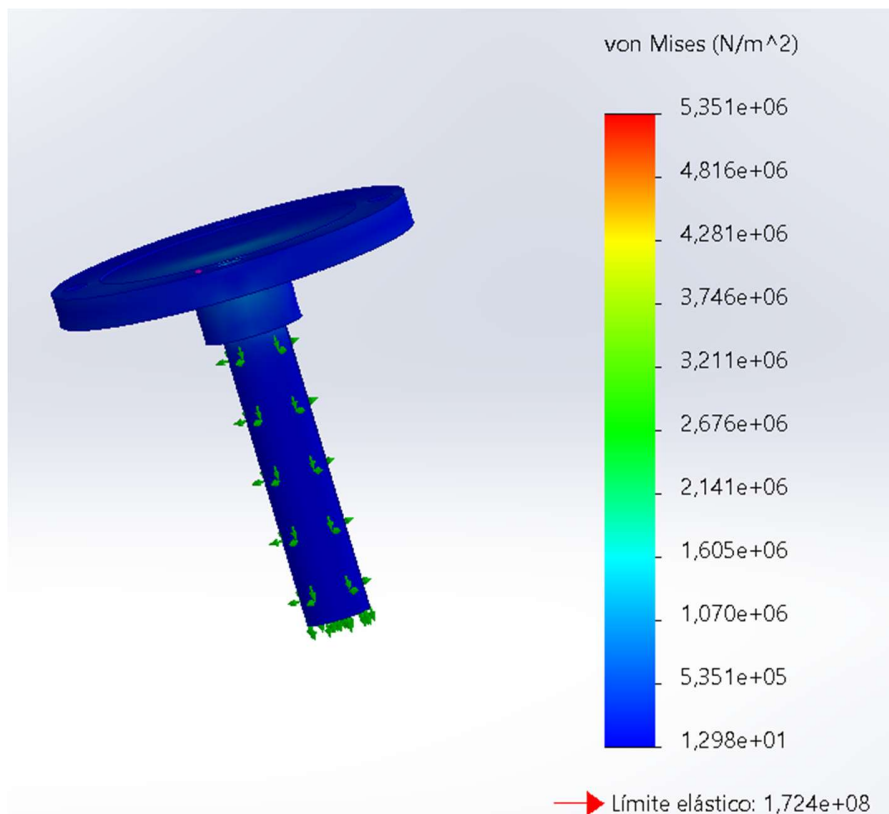


Figura 57. Simulación 1 esfuerzo de Von Mises en eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido)

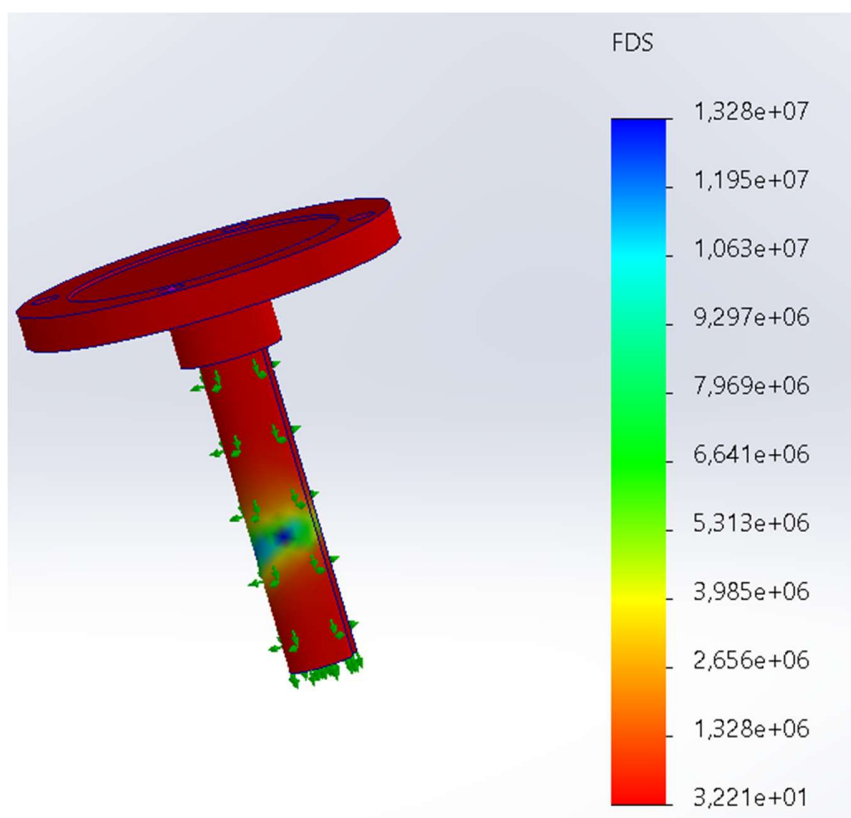


Figura 58. Simulación 1 a eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido) para hallar factor de seguridad.

10.1.2 Caso 2 – Bajo condiciones ante situación de bloqueo

Se realizó un análisis adicional considerando una condición hipotética de bloqueo del sistema, en la cual el eje estaría sometido al 100 % del torque máximo entregado por el motor, equivalente a 16 Nm. Este escenario representa una situación crítica en la que el movimiento del disco se ve completamente restringido, generando una transmisión total del par motor hacia el eje. El objetivo de esta simulación fue evaluar si el componente es capaz de resistir dicha condición extrema sin comprometer su integridad estructural. Para ello, se aplicó el torque directamente sobre la superficie del eje y se fijaron los extremos de acuerdo con las restricciones presentes en el montaje real. Los resultados permitieron verificar que, incluso bajo este estado de carga máxima, los esfuerzos generados se mantienen por debajo del límite de fluencia del acero inoxidable AISI 316, los resultados obtenidos en la simulación arrojaron un esfuerzo de Von Mises dentro de los límites

permisibles para este material con un valor de $8,45 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (véase Figura 59), así como un factor de seguridad adecuado con un valor de 20,38 (véase Figura 60).

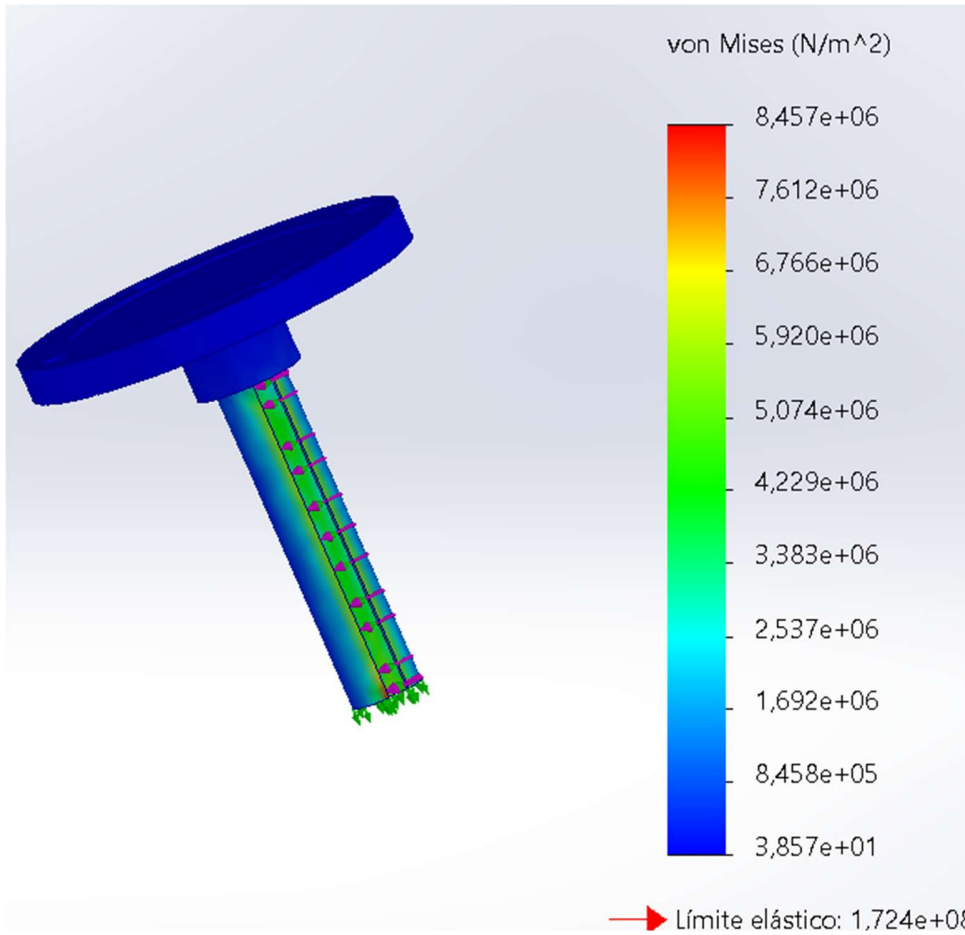


Figura 59. Simulación 2 esfuerzo de Von Mises en eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido)

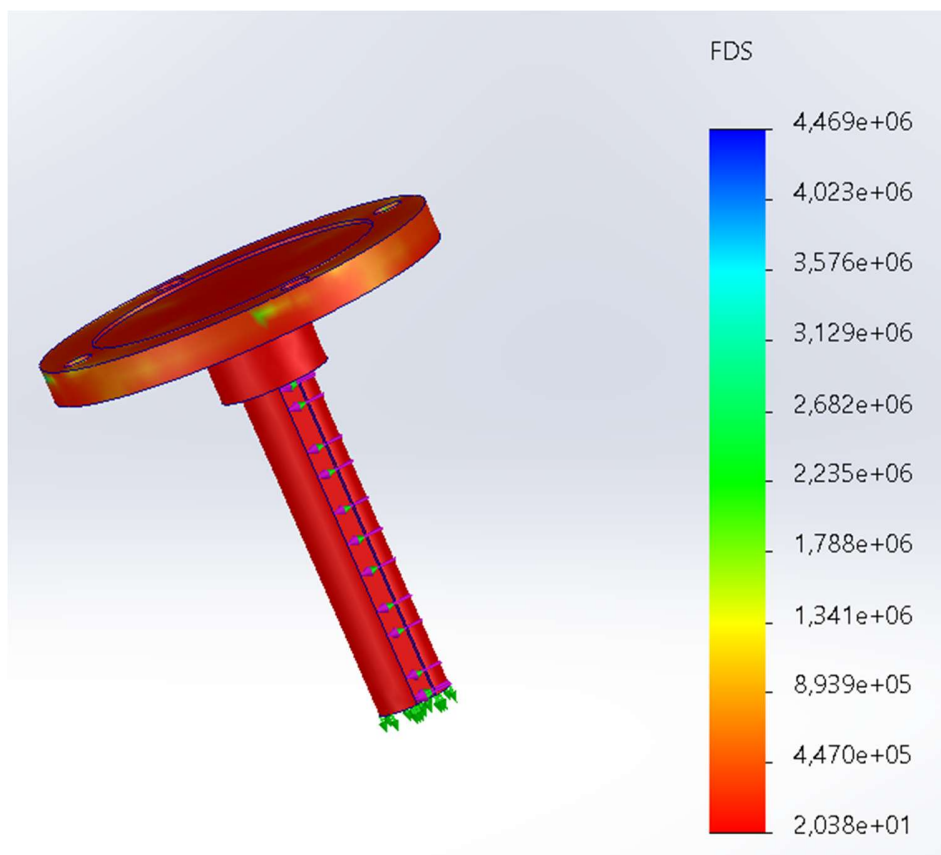


Figura 60. Simulación 2 a eje de transmisión de potencia de la máquina (eje de acero inoxidable recocido) para hallar factor de seguridad.

10.2 Análisis placa base

Se realizó un análisis estructural de la placa base, ya que esta debe soportar el peso del motorreductor durante el funcionamiento del sistema. Dado que el motorreductor tiene un peso aproximado de 8 kg, esta carga fue considerada en la simulación como una carga remota aplicada sobre la superficie superior de la placa, además se aplicaron momentos torsor de 16Nm en los puntos de unión del motor con la placa y se aplicó el peso general de la máquina que es de 2 kg en el punto de unión de la base del brazo principal. Para representar adecuadamente las condiciones de fijación, se restringieron los desplazamientos en los laterales de la pieza, simulando su sujeción al bastidor. La placa está fabricada en acero AISI 1020 laminado en frío, un material que ofrece buena resistencia mecánica y rigidez, lo cual es adecuado para este tipo de aplicación. El análisis

permitió verificar que, bajo esta carga estática, la placa se comporta de forma segura sin presentar deformaciones significativas ni esfuerzos que comprometan su integridad estructural. La Figura 61 presenta la simulación de la placa a fluencia y la Figura 62 presenta la simulación de la placa con el factor de seguridad.

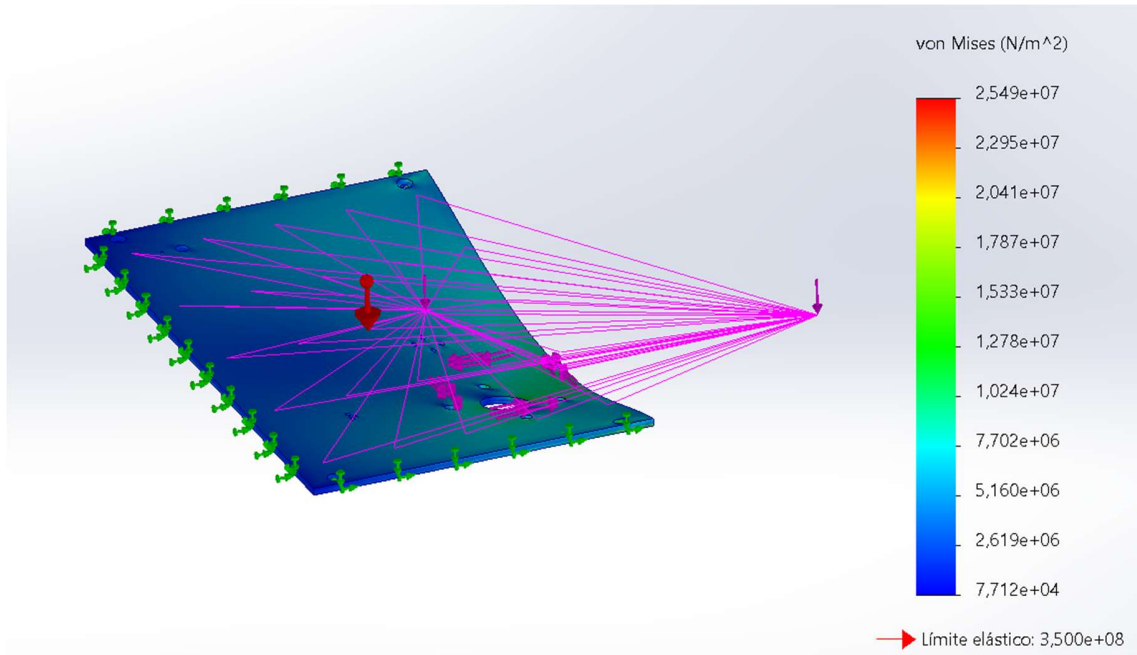


Figura 61. Simulación esfuerzo de Von Mises en placa base de la máquina (lámina de acero 1020 laminado en frío)

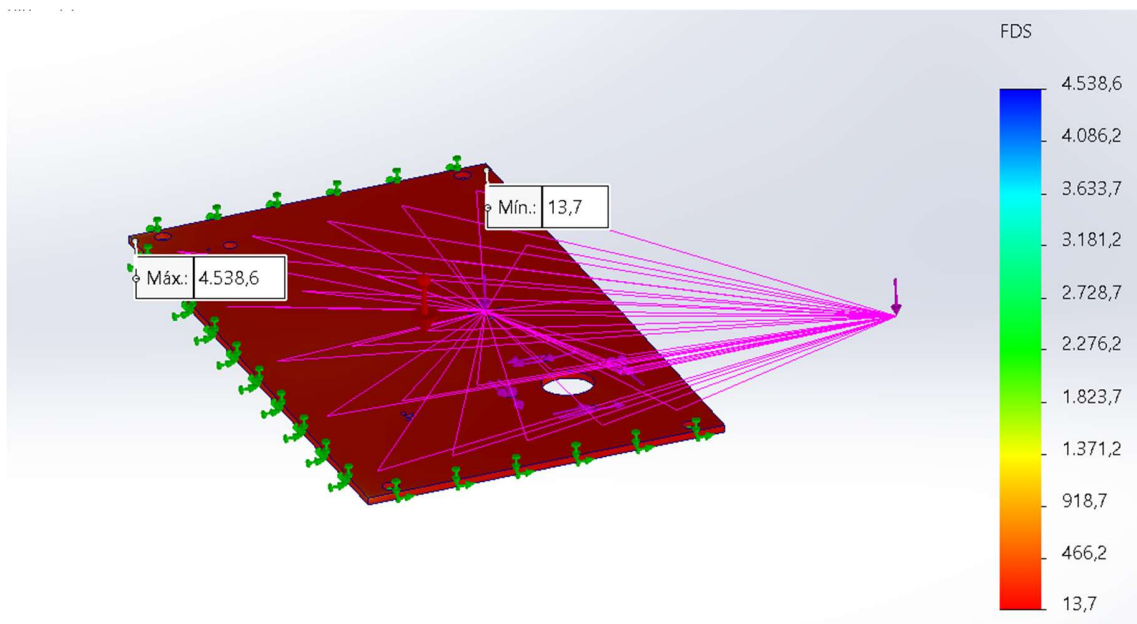


Figura 62. Simulación a placa base de la máquina (placa de acero 1020 laminado en frío) para hallar factor de seguridad.

11. Resultados

En el proceso de diseño de productos, es fundamental tomar decisiones que no solo aseguren el correcto funcionamiento técnico de la máquina, sino que además optimicen los aspectos económicos y el valor entregado al usuario. Ullman con su libro "The Mechanical Design Process" [37], propone dos enfoques complementarios dentro de la metodología del diseño Design for Cost (DFC) y Design for Value (DFV).

11.1 Diseño por costo (Design for Cost)

Se enfoca en controlar y reducir los costos asociados al producto desde una etapa temprana del diseño. Este enfoque reconoce que la mayor parte del costo total de un producto queda determinada durante el diseño. Por lo que este promueve la selección de materiales, procesos de manufactura, componentes y diseños minimicen los costos sin comprometer la funcionalidad.

A continuación, se presentan los costos estimados de los componentes que conforman la máquina de medición de desgaste, con el propósito de compararlos con el precio de una máquina comercial. El análisis considera tanto los precios unitarios como el número de unidades requeridas de cada componente, se han consultado proveedores tanto nacionales como internacionales para obtener precios competitivos y actualizados, sin embargo, los precios están sujetos a cambios, debido a que dependen de contextos macroeconómicos como el precio del dólar. En la Tabla 19 se puede observar los precios de piezas comerciales con su respectiva referencia, mientras que para los elementos no comerciales como lo son la mesa que soporta la máquina, el subsistema de carga variable, el subsistema de soporte de la carga se realizó una estimación del precio del material (Acero AISI 1020, Acero AISI

316, Acero AISI 1045) consultando páginas especializadas en venta de aceros a nivel nacional como lo son Tectul y Aceros Mapa, después, con la ayuda del programa SolidWorks se estimó el gramaje total de material necesario para la construcción de cada elemento en la Tabla 20 se muestran el gramaje de la piezas con su respectivo material, en la Tabla 21 se muestra el precio por kilogramos de cada material y en la Tabla 22 se muestra la estimación del precio de producción por material requerido.

Tabla 19. Análisis costos de productos comerciales para la construcción de máquina de medición de desgaste adhesivo

Elemento	Cantidad	Precio (USD)	Referencia
Motor reductor SEW EURODRIVE	1	1500	[26]
Broquero de 1/2 pulgada	1	7,79	[28]
Sensor digital de temperatura DS18B20	1	2,56	[30]
Sensor de humedad relativa HTM2500LF	1	79	[31]
Celda de carga LCGD-25	1	908,95	[32]
Terminal HMI Allen-Bradley 2711R-T4T SER B	1	265,73	[33]
PLC Allen-Bradley Micro 850 2080-L50E-24AWB	1	447	[34]
Variador de velocidad EURODRIVE MC07B0030-5A-4-S0	1	675	[36]
Botón pulsador paro de emergencia con caja	1	5,53	[37]
SW ON-OFF ROJO	1	0,55	[38]

Módulo de entradas analógicas 2085-IF4	1	460	[39]
Tubo cuadrado 20x20x1.5 mm	1	29,33-9,95	[40]
Láminas de policarbonato	5	2,88	[41]
Rodamientos SKF 624-2Z	2	21,8	
Total (USD)		4486,74	

Tabla 20. Piezas con su respectivo material y gramaje

Pieza	Material	Peso (g)
Eje disco motor	Acero AISI 316	1026,60
Eje de soporte del brazo	Acero AISI 1045	379,86
Base soporte para celda de carga	Acero AISI 1045	128,38
Brazo principal	Acero AISI 316	594,40
Contrapeso	Acero AISI 316	969,38
Eje de acople del brazo	Acero AISI 1045	3,94
Eje del contrapeso	Acero AISI 1045	58,87
Eje de pesas	Acero AISI 1045	51,66
Estructura	Acero AISI 1045	27186,97
Lamina	Acero AISI 1020 laminado en frio	5736,55
Lamina	Acero AISI 1020 laminado en frio	8548,40
Tapa del disco	Acero AISI 316	179,51
U del brazo	Acero AISI 316	57,68
Caja eléctrica	Acero AISI 1020 laminado en frio	2430,74
Eje celda de carga	Acero AISI 1045	12,44

Tabla 21. Precio por kilogramo de cada material y kilogramos totales por material

Material	Coste por kilogramo (USD)	Gramaje total requerido (kg)
Acero AISI 1045	1,25-1,50	28,82212
Acero AISI 316	3,00-3,75	2,82757

Acero AISI 1020 laminado en frío	1,00-1,25	16,71569
----------------------------------	-----------	----------

Tabla 22. Precio total de cada material

Material	Precio (USD)
Acero AISI 1045	43,23
Acero AISI 316	10,60
Acero AISI 1020 laminado en frío	20,9
Total	74,73

Adicional a los costes de los materiales, se deben tener en cuenta otros factores como la fabricación, mano de obra técnica, costos indirectos y gestión, documentación técnica e imprevistos, estos mismo se estimaron realizando una investigación en diversos portales y teniendo en cuenta recomendaciones de ingenieros de diseño, el presupuesto total se puede visualizar en la Tabla 23.

Tabla 23. Presupuesto y factores externos a los materiales y componentes de la máquina

Categoría	Detalle	Porcentaje	Costo estimado (USD)
Componente mecánicos y electrónicos	Materiales, sensores, motores, etc.	26,54%	4486,74
Fabricación	Corte, mecanizado, tratamientos superficiales	15,00%	2574,72
Mano de obra técnica	Diseño, ensamblaje, pruebas, + 2 ingenieros junior	52,81%	9064,96
Costos indirectos	Transporte, herramientas menores, coordinación	5,00%	858,24
Documentación técnica	Planos, manuales, fichas de componentes	2,00%	343,30
Imprevistos	Ajustes de diseño, errores de fabricación	8,00%	1373,19

Total:	17120,07
---------------	----------

11.2 Diseño por valor (Design for Value)

En esta parte se amplía la visión económica al tener en cuenta no solo los costos, sino también los beneficios que el producto aporta al usuario y demás partes interesadas. En esta parte se le otorga una calificación orientada hacia el cliente y sus requerimientos pedidos anteriormente. Se calificó de acuerdo con la Tabla 24, tomando en cuenta si se alcanzó el objetivo o no. Teniendo en cuenta que hay 5 restricciones y 5 requerimientos del cliente el puntaje máximo que puede obtener el diseño es de 7,5 puntos

Tabla 24. Ponderación de demandas y deseos.

Criterio	Estatus	
	Alcanzado	No alcanzado
Demanda	1	0
Deseo	0,5	0

A partir de esto, se elaboró la Tabla 25 una tabla en la cual se exponen los resultados obtenidos en el diseño propuesto y se contrastan los resultados obtenidos con los requerimientos definidos esperados en cada criterio y su puntaje total.

Tabla 25. Evaluación y justificación del diseño

Criterio No	Requerimientos	Resultado alcanzando	Justificación n/ Comentario	Ponderación
1	Uso de materiales de bajo costo < 85976 USD	17120,07 USD	Sección 11.1	1
2	Capacidad de estudiar desgaste adhesivo bajo diferentes condiciones	Velocidades desde 20 rpm hasta 200rpm controlado por medio de VFD	Sección 9.2.2	1
3	Capacidad de estudiar desgaste en pares tribológicos comunes	Capacidad de estudiar 3 pares tribológicos diferentes	Sección 9.1.2	1
4	Alta precisión en la medición de fricción,	Margen de error máximo de ± 2	Sección 9.6	1

	con márgenes de error de entre $\pm 0.5\%$ y $\pm 5\%$ de acuerdo con normativa tal como ISO 17025.			
5	Implementación de una cubierta de protección según norma UNE-EN ISO 12100:2012	Cubierta de policarbonato	Sección 9.5	1
6	Proceso automatizado que reduzca el número de pasos que debe realizar el usuario	Implementación de sistema de automatización	Sección 9.6	0,5
7	Estructura desmontable		No se logró realizar una estructura completamente desmontable	0
8	Sencillo mantenimiento	Implementación de materiales resistentes a la corrosión como aceros inoxidable		0,5
9	Capacidad de medir condiciones ambientales	Implementación de sensores de humedad y temperatura	Sección 9.6	0,5
10	Estructura estable que evite vibraciones		Sección 9.5	0,5

Como resultado de la evaluación, se obtuvo una valoración de 7 puntos, lo que significa un desempeño de 93,33% de los objetivos.

12. Conclusiones

- Se diseñó una máquina para medir desgaste adhesivo, de entre distintos tipos de aceros y alúmina, con fines académicos.
- El diseño realizado cumple con la normativa que rige sobre este tipo de máquinas (ASTM G99).
- El análisis por el método de elementos finitos, realizado para el eje de transmisión de potencia (pieza más crítica), demostró que no habrá fallas por cargas estáticas.
- El diseño realizado fue evaluado mediante el DFC y DFV y se verificó un cumplimiento de los requerimientos, establecidos mediante encuestas y matrices, en un 93,33%.
- La máquina diseñada tendría un costo total de fabricación de \$17120,07 USD, lo que representa apenas un 19,24 % del costo de la máquina más económica medición de desgaste disponible en el mercado, que ronda un valor aproximado de \$85976 USD.

13. Recomendaciones

- De acuerdo con el desarrollo de este trabajo y con la intención de que en un futuro se continúe con la investigación de temas relacionados con desgaste adhesivo para la formación de ingenieros más íntegros, se aconseja:
 - Elaborar un prototipo funcional para viabilidad diseño.
 - Mejorar el diseño del sistema de automatización, añadiendo los algoritmos de control y los circuitos electrónicos.
 - Mejorar el sistema de medición de temperatura y humedad para mostrar los resultados en tiempo real durante se realiza la prueba.
 - Poner la máquina sobre superficies rígidas de concreto o granito para minimizar al máximo las vibraciones.
 - Realizar análisis de vibraciones a través de ANSYS para verificar la cantidad de ruido generada por el motor.
 - Mejorar el diseño de la placa base para reducir el factor de seguridad.

Bibliografía

- [1] A. Z. Durango, “DESARROLLO DE UN TRIBÓMETRO DE TIPO ESFERA SOBRE DISCO Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE AUTOPARTES EXPUESTAS A GASOLINA (E00) Y A MEZCLAS DE 20% ETANOL-80% GASOLINA (E20).”
- [2] K. Holmberg and A. Erdemir, “Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions,” Sep. 01, 2017, *Tsinghua University Press*. doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- [3] Pontificia Universidad Javeriana Cali, “Laboratorios Javeriana Cali.”
- [4] Vortex, “Cotización No. MC-0289V04,” *Bogotá*.
- [5] NANOVEA, “Cotización No. Q49-03112024-3,” *Bogotá*.
- [6] TRACTIAN, “¿Cómo se manifiesta el desgaste de una máquina?”
- [7] T.A. Stolarski, *Tribology in Machine Design*. Reed, 1990.
- [8] A. E. Anderson *et al.*, “Volume Chair.”
- [9] “Testing for Adhesive Wear.” [Online]. Available: www.astm.org
- [10] J.F. Archard, “Journal of Applied Physics,” vol. 24, pp. 981–988, 1953.
- [11] I. Hutchings and P. Shipway, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. EBSCO, 2017.
- [12] J. Kaushik, H. Ahmad Khan, A. Tiwari, K. Nafees, S. Varshney, and S. P. Singh, “A review on application and optimization processes used for wear testing machine (pin on disc apparatus),” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 1440–1444. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.735.
- [13] “Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus 1”, doi: 10.1520/G0099-23.
- [14] “Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear,” Nov. 01, 2022, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/G0133-22.
- [15] “Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Fluid (Four-Ball Method),” Nov. 01, 2021, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/D4172-21.
- [16] International Organization for Standardization, “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories ISO 17025,” 2017, *Geneva, Switzerland*.
- [17] AUTODESK, “ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.” Accessed: Jan. 29, 2025. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/mx/solutions/finite-element-analysis>
- [18] X. X. Marco, A. Ortiz Armenta, E. E. Vera Cárdenas, H. F. A. Fong, and A. I. Martínez Pérez, “Diseño conceptual de un tribómetro lineal recíprocante,” 2021.

-
- [19] M. A. Trejo, E. Directores, J. César, S. Savedra, A. Luis, and G. García, "Instituto Politécnico Nacional MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA AVANZADA PRESENTA."
- [20] B. Nano Surfaces, "UMT TriboLab Mechanical Tester and Tribometer Innovation with Integrity."
- [21] Phoenix Tribology Ltd, "TE 53 MULTI-PURPOSE FRICTION AND WEAR TESTER."
- [22] Lucidchart, "Como crear el despliegue de la función de calidad (QDF)," <https://www.lucidchart.com/blog/es/proceso-qfd-casa-de-la-calidad>.
- [23] QFD ONLINE, "QFD ONLINE," <https://www.qfdonline.com/>.
- [24] E. T. Merino Benitez and L. A. Tapia Bojórquez, "Proceso Analítico Jerárquico (AHP)," http://www.apc.lancis.ecologia.unam.mx/modulos/ordenamiento/docs/build/html/_downloads/73b3745ed92d4949588f7d085d575059/ahp_manual_rua.pdf.
- [25] R. A. Al-Samarai, H. --, K. Rafezi Ahmad, and Y. Al-Douri, "Tribological Data · October 2015 CITATIONS 0 READS 607." [Online]. Available: <http://www.researchgate.net/publication/277814643>
- [26] SEW EURODRIVE, "Motorreductores de ángulo recto SPIROPLAN," https://www.sew-eurodrive.es/productos/motorreductores/motorreductores_estandar/motorreductores_de_ejes_perpendiculares_wdr_spiroplan/motorreductores_de_ejes_perpendiculares_wdr_spiroplan.html.
- [27] SEW - EURODRIVE, "Standard-Umrichter MOVITRAC® B." Accessed: Mar. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.sew-eurodrive.de/produkte/umrichter/schaltschrankumrichter/movitrac-b/movitrac-b.html>
- [28] Q. Apaza, A. Zapata Márquez, O. Eduardo, I. Alcázar Rojas, and H. Enrique, "DISEÑO Y FABRICACION DE UNA MAQUINA PARA ENSAYOS DE DESGASTE DEL TIPO PIN ON DISK Tesis presentada por los Bachilleres," 2022.
- [29] FERREPAT, "Broquero con Llave DE 1/2 BOSCH 20 UNF 2A," <https://www.ferrepat.com/taladros-y-rotomartillos/broquero-con-llave-1146>.
- [30] "Specification for Laboratory Weights and Precision Mass Standards," Aug. 15, 2023, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0617-23.
- [31] Ferretrónica, "Sensor Temperatura - Termocupla Sumergible DS18B20," <https://n9.cl/mjrs4b>.
- [32] TE connectivity, "Transductor de humedad y de temperatura," <https://www.te.com/es/product-CAT-HSA0001.html>.
- [33] Allen - Bradley, "Allen-Bradley 2080-LC50-48QBB Micro850 48I/O EtherNet/IP Controller New Original."
- [34] Allen - Bradley, "Allen-Bradley 2085-IF4 Micro800 4 Point Analog Input Module 2085IF4 AB," https://www.ebay.com/itm/285128376303?chn=ps&mkevt=1&mkcid=28&google_free_listing_action=view_item.
- [35] BOJACK - AMAZON, "BOJACK DS18B20 Kit de módulo de sensor de temperatura con sonda de acero inoxidable impermeable para Raspberry Pi."
- [36] La Ingeniería y la Arquitectura, "El grafcet y su importancia para la industria," <https://postgradoingenieria.com/grafcet-ventajas-para-industria/>.
- [37] "The Mechanical Design Process," 2008.

Anexos

- Anexo 1.** Resumen preguntas encuesta
- Anexo 2.** Resumen respuestas encuesta y análisis de datos
- Anexo 3.** Matriz del proceso analítico jerárquico
- Anexo 4.** Cálculos mecánicos pin sobre disco
- Anexo 5.** Análisis mecánico sobre el eje
- Anexo 6.** Plano Plano general
- Anexo 7.** Plato estructura
- Anexo 8.** Plano cubierta
- Anexo 9.** Plano máquina
- Anexo 10.** Plano motor reductor
- Anexo 11.** Plano eje de transmisión
- Anexo 12.** Plano tapa del disco
- Anexo 13.** Plano soporte de pesas
- Anexo 14.** Plano base del brazo
- Anexo 15.** Plano brazo principal
- Anexo 16.** Plano eje brazo principal
- Anexo 17.** Plano U del brazo principal
- Anexo 18.** Plano eje celda de carga
- Anexo 19.** Plano contrapeso
- Anexo 20.** Plano eje contrapeso
- Anexo 21.** Plano estructura base
- Anexo 22.** Plano lámina general
- Anexo 23.** Plano lámina base
- Anexo 24.** Plano lámina frontal 1

Anexo 25. Plano lámina frontal 2

Anexo 26. Plano tapa máquina

Anexo 27. Plano lámina 1 cubierta

Anexo 28. Plano lámina 2 cubierta

Anexo 29. Plano lámina 3 cubierta

Anexo 30. Plano base celda de carga

Anexo 31. Plano eje de la U