



# **Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales**

Maestría en Ingeniería Mecánica – Producción Industrial

Fausto Abel Tapia Moreno

Leiria, septiembre de 2025



# **Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales**

Maestría en Ingeniería Mecánica – Producción Industrial

Fausto Abel Tapia Moreno

Tesis realizada bajo la dirección del profesor doctor Mário António Simões Correia y del profesor doctor Paulo Jorge Simões Coelho.

Leiria, septiembre de 2025

## **Originalidad y Derechos de Autor**

El presente informe de la Tesis es original, elaborado exclusivamente para este fin, y se ha citado debidamente a todos los autores cuyos estudios y publicaciones han contribuido a su elaboración.

Se autorizará la reproducción parcial de este documento siempre que se mencione al autor y se haga referencia al ciclo de estudios en el que se ha realizado, a saber, el Máster en Ingeniería Mecánica - Producción Industrial, en el año académico 2024/2025, de la Escuela Superior de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, así como a la fecha de los exámenes públicos destinados a la evaluación de estos trabajos.

## **Dedicatória**

A Dios, fuente de vida y sabiduría, por guiar mis pasos, fortalecer mi espíritu en los momentos de incertidumbre y concederme la perseverancia necesaria para alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y enseñanzas, que me han inspirado a nunca rendirme y a luchar siempre con dignidad y esfuerzo.

A mi familia, por su apoyo constante, comprensión y confianza, que fueron el sostén indispensable a lo largo de este camino.

A mis profesores, por compartir su conocimiento con dedicación y por ser ejemplo de vocación y compromiso en la formación académica y profesional.

A mis amigos, por su compañía sincera, su aliento en los momentos difíciles y su alegría en las pequeñas victorias que hicieron este trayecto más llevadero.

A todos ellos, con gratitud y afecto, dedico este logro que representa no solo un esfuerzo personal, sino también el reflejo de su apoyo y cariño.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, expreso mi más sincera gratitud a mis tutores, quienes con su guía, paciencia y dedicación hicieron posible el desarrollo de esta investigación. Sus orientaciones y aportes académicos no solo enriquecieron este trabajo, sino que también contribuyeron a mi formación personal y profesional.

Agradezco igualmente al Instituto Politécnico de Leiria (IPL) y a la Escola Superior de Tecnología e Gestão (ESTG), por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en un entorno académico de excelencia, dotado de los recursos, el acompañamiento y la infraestructura necesarios para alcanzar este objetivo.

A mis padres y a toda mi familia, por su apoyo incondicional, por alentarme en cada etapa de este proceso y por ser el motor que me impulsó a perseverar aun en los momentos más desafiantes.

Finalmente, a Portugal, mi segundo hogar, por acogerme con calidez y brindarme un espacio donde pude crecer tanto en lo académico como en lo personal. Este país y su gente han dejado una huella imborrable en mi vida, siendo parte fundamental de la concreción de este sueño.

## Resumen

Esta tesis presenta el diseño, construcción y validación experimental de un tribómetro modular y asequible, que tiene como objetivo la comparación de la fricción y el desgaste entre materiales. Esto se realiza bajo criterios de precisión y reproducibilidad que cumplen con la norma internacional ASTM G99. El equipo fue diseñado teniendo en cuenta las restricciones presupuestarias que caracterizan a los laboratorios universitarios. Se incluyó un sistema de peso muerto ajustable, sensores de carga (verticales y horizontales) y una estructura de aluminio que es sencilla para montar y adecuada para diferentes condiciones experimentales.

El estudio se centró en describir el comportamiento tribológico de muestras cilíndricas de nylon y acero de construcción que fueron expuestas a cargas normales de 9,77 N, 15,51 N y 33,52 N y recorridos de hasta 2.000 m sobre superficies abrasivas normalizadas. La medición de las fuerzas tangencial y normal en tiempo real, además del cálculo del coeficiente de fricción promedio e instantáneo, fueron parte del protocolo experimental. Igualmente, se llevaron a cabo cálculos de la potencia y energía vinculadas con el proceso de fricción, así como del desgaste por medio de la disminución de volumen y masa. Se verificó el control metrológico de los instrumentos empleados para asegurar la confiabilidad de los resultados y se llevaron a cabo las estimaciones pertinentes.

Los hallazgos experimentales mostraron que el tribómetro puede obtener coeficientes de fricción estables y constantes para los dos materiales (nylon: 0,28-0,60; acero: 0,20-0,75), así como tasas de desgaste y energía disipada compatibles con la bibliografía y los valores estándar para mecanismos abrasivos equivalentes. Se encontraron beneficios tecnológicos en el modularidad, la facilidad para recalibrar el peso aplicado y la fortaleza de la estructura; sin embargo, también se detectaron desafíos relacionados con tener que volver a calcular el peso muerto si se altera la distancia o el radio efectivo del porta-probeta.

Este avance constituye una aportación significativa tanto a nivel académico como tecnológico, ya que permite la extensión de ensayos tribológicos normalizados a situaciones con recursos escasos y da pie a nuevas líneas de indagación en la optimización de materiales y métodos experimentales en el campo de la tribología.

**Palabras clave:** “tribómetro modular”, “fricción”, “desgaste”, “acero de construcción”, “nylon”, “ASTM G99”.

## Abstract

This thesis presents the design, construction, and experimental validation of a modular and affordable tribometer, aimed at comparing friction and wear between materials. This is carried out under precision and reproducibility criteria that comply with the international ASTM G99 standard. The equipment was designed considering the budgetary constraints common to university laboratories. An adjustable dead weight system, load sensors (vertical and horizontal), and an aluminum structure that is simple to assemble and suitable for different experimental conditions were included.

The research focused on describing the tribological behavior of cylindrical test specimens made of nylon and structural steel under normal loads of 9.77 N, 15.51 N, and 33.52 N, as well as sliding distances of up to 2,000 meters; standardized abrasive surfaces were used for this purpose. The experimental protocol included the measurement of forces, friction coefficients, friction energy and power, and wear by loss of volume and mass, with corresponding calculations and metrological control.

The experimental findings showed that the tribometer can obtain stable and consistent friction coefficients for both materials (nylon: 0.28–0.60; steel: 0.20–0.75), as well as wear rates and dissipated energy in line with the literature and standard values for comparable abrasive mechanisms. Technological benefits were identified in the modularity, ease of recalibrating the applied weight, and structural strength; however, challenges were also detected related to having to recalculate the dead weight if the distance or effective radius of the sample holder is altered.

This development constitutes a significant contribution at both the academic and technological levels, as it allows the extension of standardized tribological tests to scenarios with scarce resources and paves the way for new lines of research in the optimization of materials and experimental methods in the field of tribology. The work establishes the foundation for future improvements in automation, extension of test variants, and adaptation to new applications in industrial and educational contexts.

**Keywords:** “modular tribometer”, “friction”, “wear”, “structural steel”, “nylon”, “ASTM G99”.

# Índice

Originalidad y Derechos de Autor.....	iii
Dedicatória.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	viii
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tablas.....	xiv
Introducción.....	1
1.    Revisión bibliográfica.....	4
2.    Introducción a la tribología.....	4
2.1.    Introducción a la tribología.....	4
2.2.    Principios de fricción entre materiales.....	6
2.2.1.    Tipos de fricción: fricción estática, cinética y de rodamiento.....	6
2.2.2.    Leyes de fricción.....	8
2.2.3.    Factores que intervienen en la fricción.....	9
2.3.    Propiedades mecánicas y tribológicas del acero.....	11
2.3.1.    Composición química y estructura del acero.....	11
2.3.2.    Tipos de acero.....	13
2.3.3.    Influencia de los elementos de aleación en las propiedades tribológicas...	15
2.3.4.    Tratamientos térmicos y sus efectos sobre la fricción.....	16
2.4.    Métodos de medición de la fricción.....	18
2.4.1.    Técnicas experimentales tradicionales.....	18
2.4.2.    Evolución reciente de la medicina de fricción.....	21
2.4.3.    Normas y estándares pertinentes.....	22
2.5.    Aplicaciones industriales del estudio de la fricción en los aceros.....	24
2.6.    Diseño y construcción de equipos de análisis de la fricción.....	25

2.6.1.	Evolución de los equipos de ensayo de fricción.....	25
2.6.2.	Principios de diseño de las máquinas de ensayos tribológicos.....	25
2.6.3.	Principales componentes del equipo de análisis de fricción.....	27
2.6.4.	Sistemas de adquisición de datos y control en equipos modernos .....	28
2.6.5.	Retos y consideraciones en la construcción de equipos de precisión.....	29
2.7.	Calibración y validación de los equipos de medición de la fricción .....	30
2.7.1.	Métodos de calibración estándar .....	30
2.7.2.	Técnicas de validación experimental.....	31
2.7.3.	Análisis de errores e incertidumbre en mediciones tribológicas .....	32
2.8.	Tendencias actuales y futuras en el estudio y equipamiento de la fricción.....	32
2.8.1.	Avances en sensores y tecnología de medición.....	32
2.8.2.	Integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en análisis tribológico.....	33
2.8.3.	Desarrollo de equipos para condiciones extremas o especializadas.....	35
2.9.	Fundamentos de diseño mecánico y electrónico relacionados .....	36
3.	Diseño conceptual del tribómetro.....	38
3.1.	Desarrollo de la metodología de diseño .....	38
3.2.	Desarrollo y progreso del diseño conceptual.....	53
3.3.	Diseño de detalle del banco de pruebas.....	61
3.4.	Costos y tiempos de fabricación de componentes. ....	64
4.	Diseño final de la máquina tribológica.....	66
4.1.	Diseño final .....	67
4.1.1.	Bastidor estructural y base motriz .....	68
4.1.2.	Sistema de desplazamiento .....	68
4.1.3.	Separación mecánica de fuerzas: fundamentos, montaje y comprobación metrológica .....	69
4.1.4.	Sistema de adquisición de datos y control.....	73
4.1.5.	Superficie abrasiva para el contacto con la probeta .....	76

4.1.6. Elementos de sujeción y soporte de la probeta.....	77
4.1.7. Integración de componentes comerciales .....	78
4.1.8. Sistema de peso muerto .....	80
4.2. Determinación de la tasa de desgaste .....	81
5. Resultados.....	83
5.1. Presentación de datos .....	85
5.2. Resultados y análisis para probetas metálicas (acero de construcción).....	86
5.3. Resultados y análisis para probetas de poliamina (Nylon).....	100
5.4. Evaluación de conformidad del prototipo y metodología .....	109
6. Conclusiones.....	110
6.1. Limitaciones e implicaciones para futuros ensayos .....	110
6.2. Recomendaciones para trabajos futuros .....	110
6.3. Relevancia tecnológica y académica .....	111
7. Referencias .....	112
Glosario .....	127
Anexos 1 .....	129

## Índice de Figuras

Figura 1 Deformación en la fricción por rodadura .....	8
Figura 2 Esquema de un cilindro indeformable en rodadura.....	8
Figura 3 Proceso de tratamiento térmico .....	17
Figura 4 Mapa de mecanismos de desgaste .....	20
Figura 5 Diseño de implantes de articulación de cadera .....	22
Figura 6 Representación gráfica del concepto de repetibilidad.....	31
Figura 7 Esquema general de funcionamiento de un sistema de inferencia difusa .....	34
Figura 8 Caja Negra.....	42
Figura 9 Caja transparente.....	43
Figura 10 Árbol de objetivo .....	47
Figura 11 Árbol de objetivo ponderado.....	48
Figura 12 Acciones concretas en la mejora de detalles .....	49
Figura 13 Muestras de nylon .....	50
Figura 14 Muestras de acero.....	50
Figura 15 Primera propuesta de diseño conceptual .....	54
Figura 16. Modificación estructural: Integración de peso muerto y porta probeta en brazo pendular .....	57
Figura 17 Celdas de carga y modulo HX711 .....	58
Figura 18 Arduino Mega .....	58
Figura 19 Esquema del puente de Wheatstone (Isaac, 2025) .....	58

Figura 20 Sensor horizontal.....	60
Figura 21 Sensor Vertical.....	60
Figura 22 Máquina completa.....	68
Figura 23 Sistema de aplicación de contrapesos .....	69
Figura 24 Porta probeta .....	77
Figura 25 Brazo en equilibrio.....	80
Figura 26 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical (33,52N (3421gr) – 2000m).....	90
Figura 27 Coeficiente de fricción vs. Tiempo (33,52N (3421gr) – 2000m).....	92
Figura 28 Histograma de coeficiente de fricción vs. Tiempo (33,52N (3421gr) – 2000m .....	92
Figura 29 Fuerza horizontal vs Fuerza Vertical 15,51N (1583gr) – 2000m .....	95
Figura 30 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m .....	96
Figura 31 Histograma coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m ..	97
Figura 32 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 9,77N (997gr) – 1000m .....	100
Figura 33 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 9,77N (997gr) – 1000m .....	100
Figura 34 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 33,52N (3421gr) – 2000m .....	103
Figura 35 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 33,52N (3421gr) – 2000m .....	105
Figura 36 Histograma de coeficiente de fricción vs. Tiempo 33,52N (3421gr) – 2000m .....	105
Figura 37 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 15.51N (1583gr) – 2000m .....	108
Figura 38 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 15.51N (1583gr) – 2000m .....	109

## Índice de Tablas

Tabla 1 Composición química de los distintos aceros dada en % .....	12
Tabla 2 Composición química típica .....	13
Tabla 3 Designación numérica AISI-SAE de aceros al carbono y aleados.....	14
Tabla 4 Mediciones de coeficientes de fricción para diferentes materiales .....	20
Tabla 5 Pilares metodológicos de la construcción y uso del tribómetro .....	39
Tabla 6. Parámetros y criterios en el diseño y operación del tribómetro pin sobre disco .....	40
Tabla 7 Comparación de alternativas para el mecanismo de movimiento oscilante pendular .....	44
Tabla 8 Correlación entre objetivos.....	45
Tabla 9 Objetivos listados en orden de importancia.....	45
Tabla 10 Características de los materiales elegidos para el ensayo .....	50
Tabla 11 Tabla comparativa de parámetros para la preparación y limpieza .....	52
Tabla 12 Criterios generales de eficiencia en maquina pulidora metalográfica.....	55
Tabla 13 Resumen de materiales y tolerancias asignadas .....	63
Tabla 14 Tabla comparativa: Costos y tiempos de fabricación de componentes.....	64
Tabla 15 Tabla comparativa de los principales componentes comerciales .....	79
Tabla 16 Parámetros de ensayo .....	83
Tabla 17 Conversión y cálculos para resultados .....	85
Tabla 18 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la primera probeta de acero .....	87

Tabla 19 Datos obtenidos para acero 33,52N (3421gr) – 2000m.....	87
Tabla 20 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la segunda probeta de acero .....	93
Tabla 21 Datos obtenidos para acero 15,51N (1583gr) – 2000m.....	93
Tabla 22 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la tercera probeta de acero .....	97
Tabla 23 Datos obtenidos para 3ra probeta acero 9,77N (997gr) – 1000m.....	98
Tabla 24 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la primera probeta de Nylon .....	101
Tabla 25 Datos obtenidos para Nylon 33,52N (3421gr) – 2000m .....	102
Tabla 26 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la segunda probeta de Nylon .....	106
Tabla 27 Datos obtenidos para Nylon 15.51N (1583gr) – 2000m .....	107

## Índice de Ecuaciones

(1) Ecuación fundamental de la fricción (Ley de Amontons) .....	10
(2) Fricción estática máxima (Ley de Coulomb).....	10
(3) Ecuación de Reynolds.....	11
(4) Pitting Resistance Equivalent .....	12
(5) Ecuación de salida del puente de Wheatstone .....	58
(6) Momento flector máximo .....	61
(7) Momento de inercia .....	61
(8) Esfuerzo máximo .....	61
(9) Tensión de corte.....	61
(10) Perímetro lineal.....	62
(11) Velocidad tangencial.....	62
(12) Fuerza de fricción inducida.....	70
(13) Flecha máxima .....	70
(14) Ángulo giro .....	71
(15) Frecuencia natural.....	71
(16) Fuerza normal debida al peso .....	72
(17) Fuerza horizontal debida al peso .....	72
(18) Modelos lineales independientes .....	73
(19) Masa total aplicada al sistema de peso muerto .....	81
(20) Tasa de desgaste.....	82
(21) Distancia recorrida .....	85
(22) Análisis de toleración.....	85
(23) Potencia media .....	86
(24) Energía .....	86
(25) Desgaste gravimétrico.....	86
(26) Densidad experimental.....	86

(27) Área de desgaste .....	86
(28) Volumen geométrico.....	86

## Lista de siglas y acrónimos

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CAD</b>	Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)
<b>CNC</b>	Control Numérico Computarizado (Computerized Numerical Control)
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización)
<b>ESTG</b>	Escuela Superior de Tecnología y Gestión
<b>FEA</b>	Análisis de Elementos Finitos (Finite Element Analysis).
<b>IPL</b>	Instituto Politécnico de Leiria
<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
<b>LVDT</b>	Transformador Diferencial Variable Lineal (Linear Variable Differential Transformer).
<b>NDT</b>	Ensayo No Destructivo (Non-Destructive Testing) [08].
<b>SEM</b>	Microscopio Electrónico de Barrido (Scanning Electron Microscope) [08].
<b>SI</b>	Sistema Internacional de Unidades (International System of Units).
<b>FN</b>	Fuerza Normal
<b>FT</b>	Fuerza Tangencial
<b><math>\mu</math></b>	Coefficiente Fricción
<b>V</b>	Volumen Desgastado
<b><math>\Delta m</math></b>	Pérdida Masa
<b><math>\rho</math></b>	Densidad
<b>L</b>	Distancia de recorrido
<b>s</b>	Distancia Deslizamiento

<b>k</b>	Coeficiente Archard
<b>E</b>	Energía Fricción
<b><math>\delta</math></b>	Flecha Brazo
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo Giro
<b><math>\sigma</math></b>	Esfuerzo
<b>I</b>	Momento Inercia
<b>E</b>	Módulo Young



## Introducción

En el campo de la ingeniería mecánica y la producción industrial, el análisis de la fricción **1.** entre materiales constituye un elemento crucial para la mejora de sistemas mecánicos y la creación de soluciones novedosas que aumenten la eficiencia y la durabilidad de los equipos. La fricción, que se refiere a la resistencia relativa al deslizamiento entre superficies en contacto, no solo provoca la pérdida de energía en forma de calor, sino también el deterioro gradual de componentes, lo que puede llevar a fallos anticipados y a un incremento considerable de los gastos de conservación. De acuerdo con (Bhushan, 2013), las pérdidas energéticas relacionadas con la fricción pueden llegar hasta el 20% en dispositivos industriales, lo que resalta la relevancia de realizar estudios enfocados en su disminución. Además, (Holmberg & Erdemir, 2017) indican que avances en el control tribológico podrían generar una considerable repercusión económica a nivel mundial, potenciando la sostenibilidad y la productividad en la industria.

Por otro lado, el acero y los polímeros son de los materiales más empleados en la ingeniería, jugando un papel crucial en industrias tan variadas como la automotriz, la edificación, la energía y la producción avanzada. No obstante, a pesar de su utilización constante, aún existe una brecha en la comprensión respecto al efecto que las variaciones en su composición química ejercen sobre sus características tribológicas particulares, tales como el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste (Stachowiak & Batchelor, 2014). Aunque numerosas investigaciones han tratado el comportamiento mecánico global de los aceros y polímeros, se nota una falta de datos experimentales exactos que faciliten entender de forma precisa cómo la existencia de ciertos elementos de aleación, o el nivel de pureza, influyen en el comportamiento bajo condiciones de contacto y deslizamiento. Esta carencia de datos restringe el desarrollo y la elección de nuevas aleaciones diseñadas para aplicaciones que demandan altos niveles de rendimiento, ya sea en sistemas sometidos a cargas intensas, velocidades de funcionamiento elevadas o en entornos con alta corrosión.

Además, el progreso en esta área se ve limitado por la escasa disponibilidad de equipos de ensayo tribológico de alta precisión, dado que la mayoría de los instrumentos existentes en el mercado tienen un costo alto, lo que complica la ejecución de

investigaciones experimentales en contextos académicos con escasez de recursos. Además, gran cantidad de la literatura se enfoca en el estudio de aceros sometidos a tratamientos térmicos particulares, ignorando el análisis de aleaciones base. En este escenario, se presenta la necesidad de dar respuesta a dos interrogantes fundamentales:

Para tratar estas problemáticas, esta investigación sugiere la creación y validación de un tribómetro modular asequible (por debajo de los 1.000 euros), que se fundamenta en el principio de "pin sobre anillo", siguiendo la norma ASTM G77 como referencia. Esta solución es perfecta para las necesidades de los laboratorios universitarios y los centros que cuentan con recursos escasos, asegurando la flexibilidad y exactitud en la adquisición de datos comparativos sobre fricción y desgaste. En la nueva fase de experimentación, el análisis se enfoca en dos materiales que despiertan interés tanto industrial como académico: un acero de construcción (una aleación de hierro utilizada ampliamente en estructuras debido a su resistencia mecánica y ductilidad) y un polímero del tipo nylon, escogido por sus características tribológicas y por estar disponible en el laboratorio. El estudio se centra en la caracterización del comportamiento de fricción (dinámica y estática) de muestras cilíndricas hechas de acero de construcción y nylon, bajo condiciones controladas de carga normal, velocidad y superficie abrasiva estándar. Para este estudio en específico, se emplea papel de lija como elemento desgastante y fuerzas aplicadas entre 9,77 N, 15,51 N y 33,52 N. A pesar de que el tribómetro desarrollado en esta investigación está concebido para admitir una diversidad extensa de materiales y configuraciones, el propósito principal y el ámbito primordial del proyecto se enfocan en la etapa de diseño, integración y validación técnica del sistema experimental. Es importante realizar un estudio comparativo entre las probetas de acero y nylon de construcción, ya que este permite verificar la confiabilidad y la funcionalidad operativa del tribómetro creado. Este estudio se lleva a cabo bajo condiciones controladas de desgaste y fricción. Por lo tanto, los ensayos no son el núcleo principal de la investigación, sino una fase crucial destinada a verificar que el equipo cumple con los estándares de versatilidad, precisión y reproducibilidad requeridos para análisis tribológicos futuros y para su uso en laboratorios universitarios. Así, los datos experimentales recogidos no solo corroboran que la máquina funciona de manera apropiada en situaciones reales y bajo estándares industriales, sino que además establecen bases firmes para el desarrollo de métodos de ensayo futuros y la optimización de materiales para aplicaciones estructurales y de ingeniería avanzada.

## Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

Aunque el equipo diseñado tiene potencial para analizar una amplia gama de materiales, el alcance de esta investigación se limita al acero seleccionado y a un polímero para demostrar su funcionalidad y precisión.

Los principales objetivos son:

- Diseñar y construir un tribómetro experimental modular, económico y que posibilite el análisis exacto de la fricción entre diferentes materiales.
- Validar el funcionamiento y precisión del tribómetro mediante pruebas y mediciones experimentales rigurosas.
- Demostrar la operatividad y confiabilidad del equipo a través de ensayos de fricción comparativos entre probetas de acero de construcción y nylon bajo condiciones controladas.
- Ofrecer datos experimentales ilustrativos que respalden la funcionalidad del aparato, sentando las bases para futuros estudios aplicados y el desarrollo de metodologías en la comunidad científica e industrial.

## Revisión bibliográfica

### 2.1.Introducción a la tribología

2. La tribología, desde una perspectiva tradicional, ha estado presente desde los inicios de la humanidad, aunque no se puede determinar una fecha exacta, sus antecedentes se encuentran en la invención del fuego, las ruedas para carruajes y los cojines de deslizamiento, así como el uso de líquidos naturales para reducir la fricción y el desgaste. Estas invenciones tribológicas fueron descubiertas antes de la era común (a.C) (Popov, 2020).

Catalogada como una disciplina científica y técnica que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación de los cuerpos en contacto; sus principios han estado presentes a lo largo de la historia, el término tribología fue utilizado por primera vez en el año 1966, proviene del griego tribos (fricción) y logos (estudio), y su aplicación ha sido clave en el desarrollo de sistemas mecánicos para volverlos más eficientes (Herrera & Cunalata, 2019).

En otras palabras, esta área permite determinar en base a una observación previa en la que se reconoce que se está observando y dónde ocurren las interacciones friccionales, que en teoría como primer paso se debe tener en cuenta el funcionamiento de un equipo, y después se presta atención en aquellos puntos donde existan contactos de materiales, cuyo movimiento se debe estudiar, para la evitar el desgaste de elementos. Dicho esto, la fricción se produce cuando dos superficies entran en contacto, mismo que se mueve bajo la influencia de una carga, que puede ser axial o longitudinal; este desgaste influye en la vida útil de los componentes mecánicos, por tal razón su estudio es clave en el mantenimiento y la mejora de los sistemas (Sanmarco, 2020).

En tribología, la fricción es el término usado para describir la resistencia al movimiento relativo entre sólidos, partículas, entre partícula y paredes, líquidos pasando entre superficies sólidas y para las combinaciones de estos fenómenos. Es también necesario distinguir entre fricción estática, la cual se relaciona con la resistencia al movimiento producida por una fuerza tangencialmente aplicada y la fricción cinética o dinámica, relacionada con la resistencia a un movimiento relativo después del movimiento haber iniciado. En tribología, la fricción es cuantificada por medio de parámetros adimensionales (Grajales, Cobos, & Echeverri, 2017).

Dentro de los materiales utilizados en sistemas tribológicos, se encuentran los aceros austeníticos que se caracterizan por su estructura cristalina que permite su resistencia a altas y bajas temperaturas, entre ellos se ubica la clasificación serie de 300, existentes series 304 entre los más comunes por su buena resistencia a la corrosión, 316 mayor resistencia a la corrosión por su contenido de molibdeno ideal para ambientes marinos, 310 alta resistencia a temperaturas elevadas. Otra característica importante es la resistencia a la corrosión de los aceros austeníticos que se debe por su alto contenido en cromo (entre 16% y 25%) que forma una capa pasivadora de óxido de cromo, extremadamente delgada que funciona como una película de protección, impidiendo el contacto de agentes corrosivos del ambiente, impidiendo la oxidación (García, Varela, Mier, Camba, & Barbadillo, 2010).

Los aceros con bajo contenido de carbono (menor al 0,3%) son más dúctiles, lo que significa que tiene una probabilidad alta de soldabilidad y maquinabilidad, mientras que los de medio carbono (0,3%-0,6%) y alto carbono (superior al 0,6%) presentan una mayor resistencia mecánica debido a su alto contenido de carbono, siendo este referencia a que se clasifica como acero cuando este tiene un menor porcentaje de carbono, y un mayor porcentaje de carbono por ejemplo de un 6,67% representa a un acero de fundición, es decir que entre más carbono este se iguala a una cementita. Esta mayor resistencia se traduce en una capacidad de soportar del metal para deformarse con el calor o darle forma al metal (Cruz E. U., 2023).

En el contexto tribológico, el desgaste de los aceros depende de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, tecnológicas, ecológicas y ópticas. Entre existen diversos mecanismos de desgaste que son, la oxidación siendo una reacción producida por la acción del oxígeno sobre cualquier sustancia que lo pueda operar; la corrosión, se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno; la reducción, es la pérdida de oxígeno en el material, por último la fatiga superficial, derivado de cargas cíclicas que generan microfisuras (Cheretti, 2023); (Aiertza, Amilibia, Arana, Landaluce, & Ulacia, 2023).

Según (Sardiñas, 2023), la tribología tiene tres objetivos técnico-económicos principales que giran en torno al ahorro tanto de energía como de materias primas, de igual forma enfatiza minimizar la pérdida de material en superficies en contacto, empleando lubricantes adecuados para cada sistema con la finalidad de reducir la fricción y evitar el

sobrecalentamiento de elementos, al mismo tiempo se logra evitar la contaminación ambiental, por medio de la gestión en procesos de mantenimiento detectando fallas tempranas en los elementos intercambiables, evitando contratiempos en la producción o funcionamiento de la máquina, aplicando soluciones tribológicas que minimicen la huella ambiental y el consumo de materiales en exceso sin justificación.

## **2.2.Principios de fricción entre materiales**

### **2.2.1. Tipos de fricción: fricción estática, cinética y de rodamiento**

La fuerza de fricción es una de las fuerzas fundamentales, que se produce cuando dos superficies en contacto ejercen una fuerza de resistencia al movimiento relativo entre ellas. Esto se representa cuando dos cuerpos sólidos están en contacto, la fuerza de fricción se genera debido a las irregularidades microscópicas en las superficies y a las interacciones moleculares entre ellas. La fuerza total de contacto entre los cuerpos tiene dos componentes principales, la fuerza normal (FN) que es la componente que es perpendicular a la superficie de contacto, cuya superficie se ejerce sobre un objeto para soportar su peso, y la fuerza de fricción (FT) que es paralela a la superficie de contacto y se opone al movimiento relativo entre cuerpos (Manzur, 2008).

El cómo actúa esta fuerza de fricción sobre un cuerpo depende en primera instancia de si existe movimiento relativo entre las dos superficies en contacto; si hay movimiento relativo se habla de fricción cinética o dinámica ( $\mu_k$ ), en caso contrario, se habla de fricción estática ( $\mu_s$ ). La fuerza de fricción cinética se define, en su forma más sencilla, como una fuerza uniforme dirigida a lo largo de la dirección de movimiento relativo entre las superficies y, en sentido contrario al movimiento relativo del cuerpo sobre el que actúa. Aun cuando esta fuerza es uniforme, sigue viéndose influenciada por la presión entre las superficies en contacto, de esta forma, la magnitud de esta fuerza va a estar dada por el producto entre la magnitud de la fuerza normal (debida a la otra superficie en contacto) y un factor denominado coeficiente de fricción cinética (dinámica), que engloba todos estos elementos de interacción microscópica entre las superficies (Corpuz & Rebello, 2011); (Manzur, 2008)

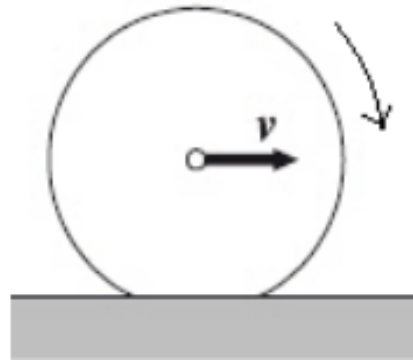
La fuerza de fricción estática no es una fuerza uniforme; si una segunda fuerza actúa sobre el cuerpo y tiene una componente paralela a la superficie de contacto de éste, esta fuerza

tiene que ser lo suficientemente grande como para lograr vencer las interacciones microscópicas entre las superficies, es decir, tiene que ser suficientemente fuerte para vencer las fuerzas Van Der Waals o para lograr destrabar las superficies, mientras no lo sea, no será capaz de hacer que el cuerpo comience a moverse. Desde el punto de vista macroscópico la fuerza de fricción estática se entiende como capaz de aumentar linealmente en magnitud, para oponerse a una fuerza antiparalela, hasta un punto máximo donde “se ve superada” y el cuerpo comienza a moverse (Laprea & Álvaro, 2021).

La fricción por rodamiento implica a las superficies no concordantes, mientras que las superficies correspondientes al deslizamiento son concordantes. La razón entre la fuerza tangencial,  $F_T$ , y la carga normal aplicada,  $F_N$ , se conoce como el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) y es,  $\mu = F_T/F_N$ . Es decir, ocurre cuando un objeto rueda sobre una superficie sin deslizar. En este caso, las superficies son no concordantes, ya que el área de contacto real es mucho menor que el área nominal (generalmente una línea o un punto en ruedas y rodamientos). Esta geometría genera elevadas presiones de Hertz localizadas que favorecen la formación de películas lubricantes elastohidrodinámicas (EHL), reduciendo el coeficiente de fricción en comparación con el deslizamiento de superficies conformes (Romero & Rondón, 2019).

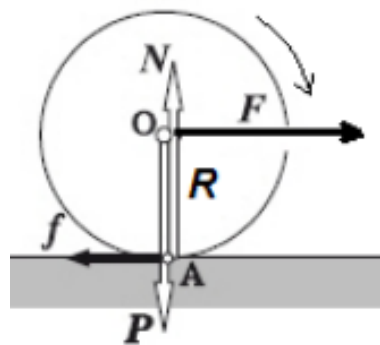
El concepto de resistencia a la rodadura es similar al de resistencia por fricción, con la diferencia de que este último hace alusión a dos superficies que deslizan o resbalan una sobre otra, mientras que en la resistencia a la rodadura no existe tal resbalamiento entre el cuerpo y la superficie sobre la que rueda, disminuyendo por regla general la resistencia al movimiento. En el caso de fricción, el cuerpo debe ser actuado por una fuerza externa que iguale o supere la fuerza de roce desarrollada entre las superficies en contacto y que actúa sobre el cuerpo oponiéndose a su movimiento. En el caso de rodadura, el cuerpo debe ser actuado por un torque externo que iguale o supere el torque resistente producido por la reacción del piso sobre el cuerpo rodante (Piro, 2012).

En otras palabras, como se muestra en la Figura 1, al rodar un cuerpo real sobre una superficie real se produce una deformación (se ha supuesto que sólo el cilindro se deforma), de modo que el cuerpo tiene que "vencer" continuamente un pequeño obstáculo que se le presenta por delante y que se opone a su rodadura, de allí la necesidad de un torque externo para mantener el movimiento. (Piro, 2012).



**Figura 1 Deformación en la fricción por rodadura**

Por comparación. En la Figura 2 se muestra el caso ideal de un cilindro indeformable que puede rodar sobre una superficie plana horizontal también indeformable. Las fuerzas que actúan sobre el cilindro son: su peso  $P$  y la reacción normal del plano  $N$  ( $F_N$ ). Si ahora aplicamos una fuerza horizontal  $F$  ( $F_T$ ) sobre el eje del cilindro y perpendicularmente a éste, aparecerá en el punto  $A$  una fuerza de rozamiento ( $f$ ), en dirección opuesta a la fuerza aplicada  $F_T$ . (Piro, 2012).



**Figura 2 Esquema de un cilindro indeformable en rodadura**

### 2.2.2. Leyes de fricción

Las primeras ecuaciones que modelan la fricción en los cuerpos son atribuidas a Amontons y a Coulomb. Se plantea que, en condiciones de deslizamiento o deslizamiento inminente, la fuerza de fricción,  $F_T$ , es proporcional a la fuerza normal,  $F_N$ , lo que define el coeficiente de fricción,  $\mu$ . (Useche, Londoño, & Wahab, 2011)

La ley de Amontons sobre la fricción (Calvente, 2021) enlista que: 1) la fricción es directamente proporcional a la fuerza normal aplicada entre dos superficies en contacto, lo que significa que a mayor presión, mayor será la resistencia al deslizamiento; 2) la

fricción es independiente del área de contacto aparente, ya que la resistencia depende de las interacciones microscópicas que se pueden observar ciertas características de rugosidad siendo estas lisas, medias finas y gruesas y no del tamaño visible del área en contacto; y 3) la fricción cinética es aproximadamente constante y no varía con la velocidad del deslizamiento una vez que el objeto está en movimiento.

La Ley de Coulomb sobre la fricción establece que la fricción entre dos superficies secas es independiente del área de contacto aparente y de la velocidad de deslizamiento, siempre que el movimiento ya haya comenzado. Además, distingue entre fricción estática y cinética, señalando que la fricción estática, que impide el inicio del movimiento, es generalmente mayor que la fricción cinética, que actúa cuando el cuerpo ya se está desplazando. Esta ley es clave en la mecánica y la ingeniería, ya que permite predecir el comportamiento de materiales y superficies en contacto bajo diversas condiciones de carga y movimiento (Gómez, 2024).

### **2.2.3. Factores que intervienen en la fricción**

La fricción es un fenómeno físico que depende de múltiples factores, los cuales determinan su magnitud e influencia en distintos sistemas mecánicos y naturales. En términos generales, la fricción surge debido a las interacciones microscópicas entre dos superficies en contacto y la fuerza normal que las mantiene unidas. Su estudio es clave en disciplinas como la ingeniería, la física y la tribología, ya que afecta el rendimiento y la eficiencia de máquinas, herramientas y procesos industriales.

(Uría & Vargas, 2019) añaden que uno de los factores más influyentes en la fricción es la rugosidad y composición de las superficies en contacto. Las superficies perfectamente lisas en la escala macroscópica presentan irregularidades microscópicas que afectan la interacción entre ellas. Cuanto más áspera es la superficie, mayor es la fricción debido al aumento de la resistencia al movimiento; el tipo de material influye significativamente: los metales tienden a generar mayor fricción debido a la adherencia de átomos en contacto, mientras que materiales poliméricos o lubricados pueden reducirla drásticamente.

La fricción es proporcional a la fuerza normal (FN) que actúa perpendicularmente a las superficies en contacto. Esta relación se expresa a través de la ecuación fundamental de la fricción (1) (Pérez F. M., 2002).

$$FT = \mu FN \quad (1)$$

donde  $FT$  es la fuerza de fricción (fuerza de rozamiento tangencial),  $\mu$  es el coeficiente de fricción y  $FN$  es la fuerza normal. En términos prácticos, si se aumenta la presión entre las superficies (es decir,  $FN$ ), también aumentará la fricción ( $FT$ ), como ocurre en sistemas de frenado o en neumáticos de vehículos sobre la carretera (Pérez F. M., 2002).

La fricción es un fenómeno que puede clasificarse en distintos tipos según la existencia o ausencia de movimiento relativo entre las superficies en contacto, destacándose principalmente la fricción estática y la fricción cinética, las cuales son importantes para el comportamiento de los cuerpos cuando se aplica una fuerza externa que intenta modificar su estado de reposo o movimiento, siendo la fricción estática aquella que impide el inicio del deslizamiento de un objeto sobre una superficie y que se manifiesta como una fuerza de resistencia que debe ser superada para que el cuerpo en cuestión comience a moverse, lo que implica que la magnitud de la fuerza de fricción estática puede variar dentro de un rango determinado, alcanzando un valor máximo )justo antes de que ocurra el deslizamiento, el cual está determinado por la expresión matemática: (Ávila, Cancio, & Mejía, 2019).

$$FT_{L,max} = \mu_L FN \quad (2)$$

donde  $FT_{L,max}$  representa la fuerza de fricción estática máxima,  $\mu_L$  es el coeficiente de fricción estática y  $FN$  es la fuerza normal que actúa perpendicularmente a la superficie de contacto, lo que implica que, mientras la fuerza aplicada al cuerpo no supere esta magnitud máxima, el objeto permanecerá en reposo debido a la acción de las fuerzas de adhesión intermoleculares y a las irregularidades microscópicas presentes en ambas superficies que tienden a interbloquearse, requiriéndose una fuerza adicional para vencer dicha resistencia inicial, lo que explica por qué, en términos generales, la fricción estática es mayor que la fricción cinética (Ávila, Cancio, & Mejía, 2019).

El desplazamiento tridimensional de un fluido newtoniano en régimen laminar está gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, en situaciones donde existe una dirección preferencial de desplazamiento, es decir, cuando una dimensión, como el espesor de la película fluida, es mucho más pequeña que las otras dos, las ecuaciones de Navier-Stokes se simplifican considerablemente, dando lugar a la ecuación de Reynolds bidimensional. Esta ecuación describe el comportamiento de la presión  $p$  del lubricante

en función del espesor  $h$  de la película fluida, el campo de velocidades  $u = (u, 0)$  la viscosidad  $\eta$  y la densidad  $\rho$ . En este contexto, se considera que la densidad varía muy poco con la presión, lo que permite suponer que el fluido es incompresible  $\rho = \text{constante}$ . La viscosidad del lubricante puede ser constante en el caso isoviscoso, pero en muchos aceites, se emplea la ley de Barus para describir la relación entre la viscosidad y la presión, donde  $\eta_0$  es la viscosidad a presión atmosférica y  $\alpha$  es el coeficiente de piezoviscosidad, característico de cada lubricante. Esta dependencia piezoviscosa introduce una no linealidad en la parte de difusión de la ecuación de Reynolds (3), que se escribe en la forma: (Calvo, Durany, & Vázquez, 1996)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho}{\mu} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho}{\nu} h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6u \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) \quad (3)$$

donde: (Calvo, Durany, & Vázquez, 1996)

- $\rho$  es la densidad del fluido (puede considerarse constante en un fluido incompresible).
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, que puede depender de la presión.
- $h$  es el espesor de la película lubricante, que varía a lo largo de la superficie.
- $p$  es la presión dentro del fluido.
- $u$  es la velocidad de arrastre de la superficie móvil en dirección  $x$
- $x$  y  $y$  son las coordenadas espaciales.

La presencia de lubricantes es otro de los factores esenciales que reduce la fricción y el desgaste, dependiendo del régimen de lubricación, puede haber fricción seca (sin lubricante), lubricación límite (mínima capa de lubricante), lubricación hidrodinámica (capa gruesa de fluido separando las superficies) o lubricación elastohidrodinámica (cuando hay deformaciones elásticas en la superficie) (Rodríguez & Amaris, 1999).

## **2.3. Propiedades mecánicas y tribológicas del acero**

### **2.3.1. Composición química y estructura del acero**

La composición química del acero inoxidable de acuerdo con Di Schino (2000) es un factor clave en su comportamiento frente a la corrosión, especialmente en entornos agresivos con presencia de cloruros. Elementos como el cromo (Cr), molibdeno (Mo) y

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

nitrógeno (N) desempeñan un papel fundamental en la formación y estabilidad de la capa pasiva protectora del material. Para evaluar la resistencia del acero a la corrosión localizada, en particular a la corrosión por picaduras, se emplea el Pitting Resistance Equivalent (4), un índice que se calcula mediante la fórmula:

$$PRE = \%Cr + 3.3 \times \% Mo + 16 \times \%N \quad (4)$$

donde:

- $\%Cr$ : Porcentaje en peso de cromo, que forma una capa pasiva protectora en la superficie del acero inoxidable.
- $\% Mo$  : Porcentaje en peso de molibdeno, que mejora la resistencia a la corrosión en ambientes con cloruros.
- $\%N$ : Porcentaje en peso de nitrógeno, que refuerza la capa pasiva y ayuda a prevenir la propagación de la corrosión por picaduras.

Un mayor valor de PRE (4) indica una mayor capacidad del acero inoxidable para resistir la formación de picaduras, lo que resulta esencial en aplicaciones industriales como plantas químicas, estructuras marinas y sistemas de procesamiento de alimentos. Por ello, la selección de un acero con una composición química adecuada es crucial para garantizar su durabilidad y desempeño en condiciones extremas.

A partir de un nuevo acero 304 ligeramente modificado(304 m) con relación al AISI 304 (con un bajo nivel de S y Mn para evitar en lo posible la formación de MnS), como se muestra en la Tabla 1, con un PRE (4) más elevado, se evalúa y se compara su comportamiento frente a la corrosión por picadura en un medio clorurado frente a aceros convencionales AISI 304 y AISI 316, (con Mo en su composición y, por tanto, con un mejor comportamiento a la corrosión por picaduras) y otros aceros de estas familias en los que se ha disminuido el contenido en Ni (304 LNi y 316 LNi), pero que presentan un PRE (4) superior (Otero, Utrilla, Ureña, & Múñez, 2004).

**Tabla 1 Composición química de los distintos aceros dada en %**

Material	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Mn	S
304 m	0,022	18,24	8,03	0,34	0,07	0,129	0,18	0,001
304	0,049	18,38	8,31	0,22	0,32	0,048	1,97	0,005

Material	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Mn	S
304 LNi	0,081	17,11	2,62	0,02	1,99	0,170	10,59	0,002
316	0,021	17,10	11,25	2,16	0,40	0,042	1,28	0,002
316 LNi	0,024	17,66	6,04	1,92	2,08	0,260	8,02	0,003

Fuente: (Otero, Utrilla, Ureña, & Múñez, 2004)

### 2.3.2. Tipos de acero

#### Aceros al carbono

Los aceros al carbono, ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales debido a su equilibrio entre costo, resistencia mecánica y facilidad de fabricación, como se muestra en la Tabla 2, están compuestos mayoritariamente por hierro (Fe), con una proporción variable de carbono (C), el cual es el principal elemento de aleación que determina en gran medida las propiedades mecánicas del material, dado que influye en su dureza, resistencia, ductilidad y soldabilidad, permitiendo una amplia gama de aplicaciones dependiendo de la cantidad presente en la composición. (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013) describen que contienen otros elementos en proporciones controladas, como el manganeso (Mn), que contribuye a mejorar la resistencia y la dureza del acero al formar carburos con el carbono, reduciendo la fragilidad y aumentando su capacidad de endurecimiento; el fósforo (P), que, si bien en pequeñas cantidades incrementa la resistencia y la dureza del material, en concentraciones elevadas puede provocar fragilidad y disminuir la ductilidad, afectando el desempeño estructural en determinadas aplicaciones; el azufre (S), que facilita el mecanizado al promover la formación de inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso, aunque en exceso puede disminuir la resistencia a la fatiga y la tenacidad del material, comprometiendo su desempeño en condiciones de carga dinámica; y el silicio (Si), que desempeña un papel fundamental en la desoxidación del acero durante el proceso de fabricación, además de contribuir a mejorar su resistencia a la corrosión y su estabilidad a altas temperaturas, lo que lo hace un elemento clave en ciertas aplicaciones especializadas.

**Tabla 2 Composición química típica**

Nombre común	% C	Usos	Soldabilidad
<b>Acero de bajo carbono</b>	0,15% máximo	Electrodos para soldadura, láminas y chapas	Excelente
<b>Acero suave (mild steel)</b>	0,15% - 0,30%	Perfiles y barras estructurales laminados	Buena
<b>Acero de medio carbono</b>	0,30% - 0,50%	Partes de maquinarias	Poca (precalentar y postcalentar)
<b>Acero de alto carbono</b>	0,50% - 1,00%	Resortes, toques, rieles de ferrocarril	Poca (difícil de soldar sino se precalienta y postcalienta adecuadamente)

**Fuente:** (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013)

### **Aceros de baja aleación**

Como se muestra en la Tabla 3 según (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013), son aquellos que contienen pequeñas cantidades de elementos de aleación como níquel (Ni), cromo (Cr), manganeso (Mn), silicio (Si), vanadio (V), columbio (Nb), aluminio (Al), molibdeno (Mo) y boro (B), los cuales, aunque en proporciones reducidas, generan mejoras significativas en las propiedades mecánicas y térmicas del material, permitiendo su uso en aplicaciones más exigentes en comparación con los aceros al carbono convencionales. La incorporación de estos elementos de aleación modifica la microestructura del acero, lo que influye en su resistencia a la tracción, su dureza, su tenacidad, su resistencia al desgaste y su comportamiento frente a la corrosión, factores determinantes para su desempeño en distintos entornos industriales.

**Tabla 3 Designación numérica AISI-SAE de aceros al carbono y aleados**

Serie o designación	Tipo y clases
<b>10XX</b>	Aceros al carbón no resulturizados
<b>11XX</b>	Aceros al carbón resulturizados
<b>13XX</b>	Aceros al manganeso 1,75%
<b>23XX</b>	Aceros al níquel 3,5%
<b>33XX</b>	Níquel 3,5% cromo 1,55%

Serie o designación	Tipo y clases
46XX	Níquel 1,55% a 1,8% Molibdeno 0,20% a 0,25%
50XX	Cromo de 0,28% a 0,40%
87XX	Níquel 0,55%, cromo 0,50%, molibdeno 0,25%
98XX	Níquel 1,00%, cromo 0,80%, molibdeno 0,25%

Fuente: (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013)

### Aceros de Alta Aleación

Los aceros de alta aleación se caracterizan por contener un porcentaje significativo de elementos de aleación, generalmente superior al 5% en peso, lo que les confiere propiedades mecánicas y químicas excepcionales, como una mayor resistencia a la corrosión, mayor dureza, tenacidad y estabilidad térmica en comparación con los aceros al carbono o de baja aleación. Estos aceros están diseñados para aplicaciones exigentes en las que se requiere un alto rendimiento en condiciones extremas de temperatura, presión o ambientes corrosivos (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013).

#### 2.3.3. Influencia de los elementos de aleación en las propiedades tribológicas

Los aceros inoxidable son simplemente aleaciones compuestas por hierro (Fe) y cromo (Cr). El hierro es el elemento fundamental de todos los aceros inoxidable. Sin embargo, para hacer que el hierro sea “inoxidable” el contenido de cromo en solución debe ser por lo menos de un 11,5%. Se adicionan otros elementos de aleación (Ni, Mo, Ti, Nb) con el fin de mejorar ciertas propiedades como son: ductibilidad, resistencia al impacto, resistencia al creep (deslizamiento o escurrimiento), resistencia a la corrosión, al calor, etc (Torres, 2022).

Los aceros inoxidable se dividen en cuatro grupos: Austeníticos, Martensíticos, Ferríticos y los que se endurecen por precipitación. Estas clasificaciones se refieren principalmente a la estructura de los aceros. La estructura martensítica es dura y frágil, la ferrítica es blanda y dúctil, en cambio la austenítica es de alta resistencia a la tensión, al impacto y al mismo tiempo dúctil (Arévalo, Burbano, & Peláez, 2013). La influencia de los elementos de aleación en las propiedades tribológicas de los aceros es crucial para

determinar su rendimiento en condiciones de fricción y desgaste. El cromo, por ejemplo, mejora la resistencia a la corrosión y aumenta la dureza superficial, lo que contribuye a una mayor resistencia al desgaste, el níquel, por su parte, incrementa la tenacidad y la ductilidad, lo que permite una mejor capacidad de absorción de energía sin fracturarse, lo cual es esencial en componentes sujetos a cargas fluctuantes.

El molibdeno y el vanadio son elementos que refuerzan la estructura cristalina del acero, mejorando su resistencia al desgaste por deslizamiento y a la fatiga, especialmente en condiciones de alta temperatura. El tungsteno, que también se emplea en aleaciones de alta temperatura, mejora la resistencia al desgaste y a la abrasión, permitiendo que los componentes mantengan su integridad estructural durante un mayor tiempo en entornos de alta fricción (Pryor, Réquiz, Berrocal, & Miranda, 1986).

Asimismo, la presencia de elementos como el carbono en cantidades controladas contribuye a aumentar la dureza, lo que favorece una mayor resistencia al desgaste, pero en exceso puede hacer que el material se vuelva más susceptible a la fragilidad. En general, los elementos de aleación no solo mejoran las propiedades mecánicas, sino que optimizan las características tribológicas del material, permitiendo su uso en aplicaciones industriales que requieren un alto desempeño en términos de resistencia al desgaste, fricción y duración (Pérez, González, & Alfonso, 2019).

#### **2.3.4. Tratamientos térmicos y sus efectos sobre la fricción**

Los tratamientos térmicos son procesos controlados en los que un material, generalmente acero, es sometido a ciclos de calentamiento y enfriamiento para modificar sus propiedades físicas y mecánicas. Estos procesos afectan profundamente las propiedades tribológicas del material, especialmente la fricción, al alterar su microestructura y su dureza superficial (Rodríguez & Gutierrez, 2022). Los tratamientos térmicos han sido utilizados históricamente para modificar las propiedades mecánicas y estructurales de los aceros y otros metales, lo cual permite mejorar su resistencia, dureza y durabilidad en aplicaciones industriales (Paternina, Villalba, Jorge, & Lópe, 2012) Desde los primeros métodos de forjado y templado, las técnicas se han sofisticado para incluir procesos como el recocido, el temple y el revenido, que maximizan las propiedades deseadas en distintas condiciones de trabajo (Maslanczuk, Brazes, & Tolosa, 2018).

Como se muestra en la Figura 3, el proceso de temple es esencial en la industria para optimizar las propiedades mecánicas del acero, especialmente su dureza y resistencia al desgaste. Esta técnica consiste en calentar el acero a altas temperaturas y luego enfriarlo rápidamente, promoviendo la transformación de la austenita en martensita, una estructura cristalina que proporciona alta dureza. La capacidad de un acero para ser templado depende principalmente de su composición química, siendo el carbono (C) el elemento más influyente en su templabilidad. Este elemento no solo facilita la formación de martensita, sino que también juega un papel crucial en el endurecimiento del acero (Castillo, y otros, 2024 ).



**Figura 3 Proceso de tratamiento térmico**

**Fuente: (García & Escamilla, 2016)**

Actualmente el tratamiento térmico se lleva a cabo mediante el calentamiento del perfil en un horno Siemens a la temperatura y tiempo especificado en las cartas de proceso de tratamiento térmico, posterior se lleva a cabo el enfriamiento con movimiento rotatorio en una tina y una vez cumplido el tiempo requerido pasa a una cama de enfriamiento para posteriormente pasar el producto a horno de revenido y llevar el material hasta  $A_3$  para poder eliminar las tensiones que se formaron durante el temple, y asimismo reducir la fragilidad y finalmente dejar que se enfríe (García & Escamilla, 2016).

El revenido, por otro lado, se realiza después del temple y tiene como objetivo reducir la fragilidad del acero, al tiempo que conserva una buena dureza. Este tratamiento térmico (Figura 3) ayuda a mantener la resistencia al desgaste y mejora la resistencia a la fatiga, disminuyendo la fricción al aumentar la tenacidad del material, lo que permite una mayor durabilidad en condiciones de contacto repetido (Preciado, 2017).

La normalización es otro tratamiento térmico que consiste en calentar el material a una temperatura específica y luego dejarlo enfriar al aire. Este proceso mejora la uniformidad de la microestructura del material, lo que resulta en una mayor consistencia en su comportamiento tribológico. La fricción se ve afectada positivamente, ya que las propiedades mecánicas se equilibran, reduciendo el desgaste en los componentes que están sometidos a condiciones de fricción (Ortiz, 2019). El nitrurado es un tratamiento térmico en el que se introduce nitrógeno en la superficie del acero a temperaturas relativamente bajas. Este proceso crea una capa superficial de nitruros que mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste. En términos tribológicos, el nitrurado disminuye la fricción al mejorar la dureza superficial, lo que permite que los componentes tengan una vida útil más prolongada en entornos de fricción constante (Preciado, 2017). En general, los tratamientos térmicos desempeñan un papel esencial en el comportamiento tribológico de los materiales, ya que modifican la estructura cristalina y las propiedades mecánicas, lo que a su vez influye en la fricción. Estos tratamientos permiten adaptar el comportamiento de los aceros a las condiciones específicas de uso, mejorando su rendimiento en una variedad de aplicaciones industriales.

## **2.4. Métodos de medición de la fricción**

### **2.4.1. Técnicas experimentales tradicionales**

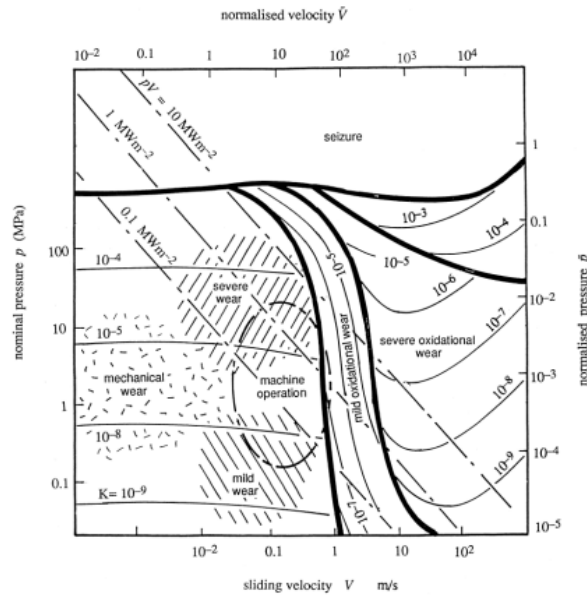
Los métodos de medición de fricción han evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, permitiendo la caracterización precisa de las fuerzas que actúan entre superficies en contacto. Las técnicas experimentales tradicionales según Grajales et al., (2017) incluyen ensayos de fricción en tribómetros, los cuales permiten evaluar la resistencia al deslizamiento en diversas condiciones de carga, velocidad y temperatura, proporcionando datos fundamentales para la comprensión de los mecanismos de desgaste y lubricación en distintos materiales.

El ensayo de pin-on-disk es una técnica ampliamente utilizada en tribología para medir el coeficiente de fricción y evaluar el desgaste de materiales. Consiste en aplicar una carga normal sobre un pin que desliza contra un disco en rotación bajo condiciones controladas de velocidad y temperatura. Este método permite estudiar la influencia de la lubricación, la microestructura de los materiales y los mecanismos de transferencia de material en la interfaz (Giraldo D. L., 2019). El ensayo de bloque sobre anillo es una técnica

experimental utilizada en tribología para evaluar la fricción y el desgaste en materiales sometidos a contacto deslizante. Consiste en presionar un bloque estacionario contra un anillo giratorio bajo una carga específica, registrando la fuerza de fricción y la pérdida de material. Este método permite simular condiciones reales de operación en sistemas mecánicos donde el contacto entre superficies es constante, como en cojinetes, engranajes y componentes de transmisión (González & Caldera, 2010).

Durante el ensayo, el anillo gira a una velocidad controlada mientras el bloque se mantiene en contacto con su superficie, la fricción generada produce desgaste en ambas piezas, lo que permite estudiar la resistencia de los materiales a la degradación, la influencia de la lubricación y la formación de películas tribológicas, a esto se suma el control de las variables de temperatura, presión de contacto y entorno químico para analizar el impacto en el rendimiento de los materiales.

El mapa de mecanismos de desgaste (Figura 4) clasifica los principales tipos de desgaste en función de dos parámetros clave: la carga normal específica (eje vertical, en MPa) y la velocidad de deslizamiento (eje horizontal, en m/s). Esta representación gráfica permite predecir el mecanismo dominante en un sistema tribológico dado condiciones operativas específicas, facilitando la selección de materiales y lubricantes óptimos.



**Figura 4 Mapa de mecanismos de desgaste**

**Fuente:** Tomado de Wear modeling: analytical, computational and mapping

Es importante tener en cuenta para ello, el mapa general de mecanismos de desgaste para aceros en contacto relativo sin lubricación desarrollado por (Ortiz, 2019), integra los cuatro elementos fundamentales de un tribosistema - cuerpo/contracuerpo (metales/polímeros), medio interfacial (contacto seco), entorno operativo (laboratorio controlado) y entradas operativas (carga normal variable, velocidad de deslizamiento) - para predecir salidas funcionales (coeficiente de fricción estable) vs pérdidas (desgaste volumétrico/masa). Este enfoque sistemático permite clasificar cualquier ensayo tribológico según su régimen dominante (abrasivo, adhesivo, fatiga), independientemente de los materiales específicos evaluados.

Como se muestra en la Tabla 4, los valores típicos de  $\mu$  varían significativamente según la pareja de materiales, condiciones de lubricación y régimen de movimiento (estático vs dinámico).

**Tabla 4 Mediciones de coeficientes de fricción para diferentes materiales**

Medición	Materiales	Referencia
Determinación del coeficiente de fricción	Madera-madera Aluminio. Madera	(Delgado, 2013)

Medición	Materiales	Referencia
Determinación del coeficiente de fricción empleando sensores de movimiento	Suelo- metal	(Castro, Londoño, & Acevedo, 2010)
Determinación de coeficiente de fricción dinámico suelo-metal	Suelo- metal	(Leyva, Carbajal, Costales, Sigler, & Díaz, 2016 )
Determinación de coeficiente de fricción	Acero-aluminio-bronce	(Ordoñez, 2015)

Fuente: (Delgado, 2013); (Castro, Londoño, & Acevedo, 2010); (Leyva, Carbajal, Costales, Sigler, & Díaz, 2016 ); (Ordoñez, 2015)

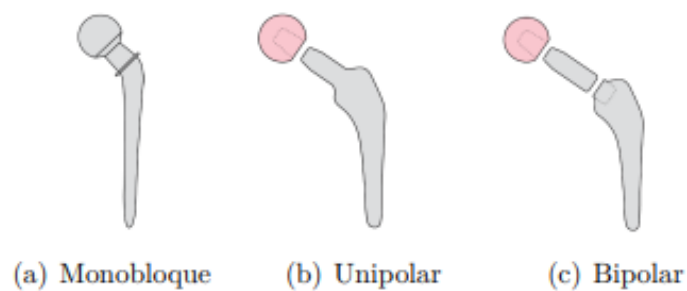
#### 2.4.2. Evolución reciente de la medicina de fricción

Los avances recientes en la medicina de fricción han revolucionado la biotribología, permitiendo el desarrollo de materiales y tecnologías que mejoran la funcionalidad de prótesis articulares, dispositivos médicos implantables y superficies en contacto con tejidos biológicos. El titanio y sus aleaciones han forjado el camino en aplicaciones biomédicas debido a sus propiedades físico- químicas únicas, que lo convierten en un material ideal para implantes y prótesis, debido a su alta resistencia a la corrosión que se debe a la formación espontánea de una capa de óxido de titanio  $TiO_2$ , la cual protege el metal del entorno biológico, evitando la liberación de iones metálicos que podrían causar reacciones adversas en el cuerpo humano (Damon, y otros, 2022).

La aleación  $Ti6Al4V$  es ampliamente utilizada en prótesis de cadera debido a su alta resistencia mecánica y biocompatibilidad; sin embargo, su comportamiento biotribológico es crucial para evaluar el desgaste generado en el implante. Los residuos de desgaste, producto de la fricción entre las superficies articulares, pueden inducir respuestas inflamatorias y osteólisis, causando pérdida ósea y aflojamiento del implante, lo que requiere cirugía de revisión (McGee, y otros, 2000).

Por otro lado, menciona que la aleación  $CoCrMo$  es altamente valorada para ser utilizada en implantes ortopédicos (Figura 5) y dentales debido a su dureza y resistencia a la corrosión, derivada de la formación de la capa pasiva de óxido de cromo ( $Cr_2O_3$ ); esta

capa reduce significativamente la liberación de iones metálicos al medio biológico, minimizando reacciones adversas. La formación de la capa de óxido de Cr en lugar de Co, que es el elemento principal en la aleación, se debe a una mayor reactividad de Cr, que tiene un potencial de reducción estándar más bajo de  $-0.74 \text{ V vs } (Cr^{+3} + 3e = Cr)$  en comparación con Co  $0.28 \text{ V vs SHE } (Co^{+2} + 2e = Co)$  que hace que la formación de una capa de óxido de Cr sea más favorable (Ahmad, 2006 ).



**Figura 5 Diseño de implantes de articulación de cadera**

**Fuente:** (Taborda, 2020)

El uso de modelos computacionales y simulaciones tribológicas ha permitido predecir el comportamiento de los materiales en contacto con tejidos biológicos, facilitando el diseño de prótesis más eficientes. Mediante métodos como la dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis de elementos finitos (FEA), es posible optimizar la geometría y los materiales de implantes para reducir la fricción y mejorar su funcionalidad (Taborda, 2020).

### 2.4.3. Normas y estándares pertinentes

Las normas y estándares aplicables a biomateriales y aleaciones metálicas utilizadas en implantes garantizan su seguridad, funcionalidad y compatibilidad biológica. Organizaciones como la ASTM (American Society for Testing and Materials) y la ISO (International Organization for Standardization) establecen especificaciones rigurosas sobre composición química, propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad, asegurando que los materiales empleados en prótesis cumplan con requisitos técnicos y regulatorios. La norma ASTM F136 regula la aleación de titanio Ti6Al4V para implantes quirúrgicos, estableciendo parámetros de pureza, estructura

microcristalina y tratamientos térmicos que optimizan su desempeño (Monsalve, 2020). De igual manera, la norma ISO 5832-3 especifica requisitos similares a nivel internacional, garantizando la resistencia mecánica, la durabilidad y la reducción del riesgo de reacciones adversas en pacientes implantados (Loyola, Gaete, Cares, & Álvarez, 2024).

Para aleaciones de cobalto-cromo, normas como la ASTM F75 e ISO 5832-4 establecen criterios sobre su procesamiento, dureza y resistencia a la corrosión, asegurando que el material forme una capa pasiva estable de óxido de cromo. Estos estándares previenen la liberación excesiva de iones metálicos, lo que podría inducir citotoxicidad o respuestas inflamatorias en los tejidos circundantes (Cubillos, Santos, Novy, & Roesier, 2019 ); (Fleming, Kavanagh, & Duggan, 2020). Según (Ruggiero, Silicia, & Affatato, 2020), la norma ISO 14242 regula los ensayos de simulación de fricción en prótesis de cadera mediante pruebas que replican las condiciones biomecánicas reales dentro del cuerpo humano. Estas pruebas evalúan el comportamiento tribológico de los materiales sometidos a cargas cíclicas y movimientos repetitivos, simulando la marcha y otras actividades diarias. Se mide la cantidad de residuos generados por el desgaste, su morfología y composición química, ya que estos pueden inducir reacciones inflamatorias o la osteólisis periprotésica, un proceso que compromete la estabilidad del implante.

Por otro lado, la norma ASTM F732 establece métodos específicos para evaluar el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste en articulaciones artificiales bajo diferentes condiciones de carga y lubricación. A través de ensayos de deslizamiento y desgaste rotacional, esta normativa permite analizar el desempeño de los materiales en términos de fatiga superficial, degradación por contacto repetitivo y formación de partículas de desgaste. Además, se estudia el efecto de la rugosidad, los recubrimientos superficiales y las modificaciones estructurales en la reducción de la fricción y el desgaste (Labau, Nortje, Merwe, & Becher, 2023). La ASTM F732 es crucial para garantizar que los materiales empleados en prótesis tengan una resistencia óptima frente a las fuerzas biomecánicas y minimicen la generación de residuos metálicos y poliméricos que puedan afectar los tejidos circundantes, prolongando así la vida útil del implante y reduciendo la necesidad de cirugías de revisión. Los implantes deben cumplir con requisitos de biocompatibilidad según la norma ISO 10993, la cual evalúa citotoxicidad, genotoxicidad, reacciones inmunológicas y posibles efectos adversos a largo plazo. Esta norma es fundamental para evitar complicaciones postquirúrgicas y asegurar que los

materiales no desencadenen reacciones alérgicas ni procesos inflamatorios que comprometan la estabilidad del implante en el cuerpo humano (Pérez, y otros, 2023 ).

## **2.5. Aplicaciones industriales del estudio de la fricción en los aceros**

El estudio de fricción en aceros es fundamental en la industria para optimizar el rendimiento de componentes sometidos a desgaste, como engranajes, cojinetes y herramientas de corte. Según (Casillas, 2021) evaluar la fricción permite desarrollar aleaciones y tratamientos térmicos que mejoren la resistencia al desgaste, prolongando la vida útil de piezas mecánicas utilizadas en sectores como la automoción, la manufactura y la ingeniería pesada. La manufactura de herramientas de corte también se beneficia del análisis de fricción en aceros, ya que permite desarrollar recubrimientos que minimizan la adhesión de material durante el mecanizado. Aleaciones con tratamientos superficiales como la cementación o el recubrimiento con TiN (nitruro de titanio) logran mayor dureza y menor coeficiente de fricción, aumentando la precisión y la durabilidad de brocas, fresas y cuchillas industriales (Morato, 2024).

En la industria ferroviaria, el estudio de fricción en aceros es crucial para mejorar la resistencia al desgaste en rieles y ruedas de tren, donde la interacción continua entre estas superficies genera fatiga y deformaciones. A través de la optimización de la composición del acero y el uso de tratamientos térmicos, se logra reducir la fricción, prolongando la vida útil de infraestructuras ferroviarias y minimizando costos de mantenimiento (Sandoval, 2023). El sector de la energía, especialmente en turbinas eólicas y térmicas, depende del estudio de fricción en aceros para garantizar la eficiencia de componentes sometidos a altas cargas y temperaturas. El uso de aceros de alta resistencia con recubrimientos cerámicos o polímeros autolubricantes reduce la fricción, evitando fallos mecánicos y asegurando un funcionamiento confiable y prolongado en entornos extremos (Rojas & Mora, 2020). En la minería y construcción, la fricción en aceros impacta directamente la durabilidad de maquinarias pesadas expuestas a condiciones abrasivas. El análisis tribológico permite seleccionar aceros endurecidos por temple o aleaciones con alto contenido de carbono y cromo, optimizando la resistencia al desgaste en palas excavadoras, cintas transportadoras y perforadoras, reduciendo tiempos de inactividad y mejorando la productividad industrial (Ismar, Pupo, & Palma, 2019).

## **2.6. Diseño y construcción de equipos de análisis de la fricción**

### **2.6.1. Evolución de los equipos de ensayo de fricción**

Durante el siglo XIX, con la revolución industrial y el auge de la ingeniería mecánica, se desarrollaron dispositivos más avanzados para analizar la fricción en materiales metálicos y no metálicos. Las primeras máquinas tribológicas consistían en simples configuraciones de bloques deslizantes sobre superficies inclinadas, que permitían determinar coeficientes de fricción estática y dinámica, sentando las bases para estudios más precisos en el diseño de maquinaria y estructuras mecánicas (Pérez F. M., 2002). A principios del siglo XX, el crecimiento de la industria automotriz y aeronáutica impulsó la necesidad de evaluar la fricción y el desgaste en sistemas de alta velocidad y carga. Se diseñaron tribómetros más sofisticados, como los de disco sobre disco y anillo sobre bloque, que reproducían condiciones reales de contacto y permitían medir la resistencia al desgaste en cojinetes, engranajes y frenos, mejorando la eficiencia mecánica de estos componentes (Enkovaara, 2023).

Con la llegada de la electrónica y la computación en la segunda mitad del siglo XX, los equipos para análisis de fricción evolucionaron hacia sistemas automatizados con sensores de alta precisión. Los tribómetros modernos incorporaron celdas de carga, controladores de temperatura y microscopía de superficie, permitiendo analizar la influencia de factores como la lubricación, la rugosidad y la composición química de los materiales en su comportamiento tribológico bajo diferentes condiciones operativas (Iribecampos, Arana, Larrañaga, & Ulacia, 2020). En las últimas décadas, el avance en nanotecnología y materiales inteligentes ha llevado al desarrollo de tribómetros de escala microscópica y nanométrica, utilizados en la caracterización de películas delgadas, recubrimientos cerámicos y biomateriales. Estos equipos, como los tribómetros de fuerza atómica, permiten medir interacciones tribológicas a nivel molecular, optimizando el diseño de superficies con menor desgaste y mejor resistencia al contacto mecánico en aplicaciones biomédicas e industriales (Trinchet, 2019).

### **2.6.2. Principios de diseño de las máquinas de ensayos tribológicos**

En la actualidad, la tribología ha adquirido una relevancia significativa a su impacto en la eficiencia y durabilidad de sistemas mecánicos en diversas industrias, a partir de su

estudio de la fricción que permite comprender y minimizar las pérdidas de energía derivadas del contacto entre superficies, lo cual es esencial en el diseño y mantenimiento de equipos industriales. De igual manera, el análisis del desgaste contribuye a optimizar la selección de materiales y recubrimientos, prolongando la vida útil de componentes sometidos a condiciones extremas (Aguillon, 2015). El consumo de energía en sistemas mecánicos está directamente relacionado con la fricción y la eficiencia de los mecanismos de transmisión de movimiento. La tribología permite desarrollar soluciones como lubricantes avanzados y tratamientos superficiales que reducen la resistencia al deslizamiento, disminuyendo el consumo energético y mejorando el rendimiento global de los equipos. Esto se traduce en una mayor sostenibilidad operativa y una reducción en costos de mantenimiento y producción. Para llevar a cabo dichos estudios, la tribología se apoya de tribómetros, que son equipos de laboratorio con capacidad de realizar ensayos o simulaciones de fricción, desgaste y lubricación en condiciones determinadas de forma acelerada y precisa (Granizo, 2010).

Debido a los beneficios obtenidos de los resultados de estos equipos, múltiples empresas han desarrollado diferentes diseños y los han comercializado, sin embargo, cada diseño es para una prueba o probeta en específico y su alto costo de venta, dificulta su adquisición (Velázquez, Urbina, Franco, & Sánchez, 2020). El diseño de los sistemas de aplicación de carga y movimiento debe considerar la precisión y estabilidad operativa, minimizando errores de histéresis o fluctuaciones dinámicas. Se recomienda el uso de actuadores electromecánicos o hidráulicos con retroalimentación en tiempo real para garantizar una aplicación homogénea de fuerzas. Los mecanismos de control de velocidad y desplazamiento deben integrar algoritmos adaptativos que compensen variaciones en las condiciones operativas (Vigo & Carranza, 2024).

En tribómetros pin-on-disk, se utiliza comúnmente perfil de aluminio anodizado tipo I 40x40 mm para el bastidor (módulo elástico ~69 GPa), con refuerzos triangulares en las esquinas. Así, bajo cargas de hasta 100 N, la deformación se mantiene por debajo de 0.01 mm (verificado por análisis FEA), garantizando que la fuerza tangencial  $F_T$  llegue íntegra a la celda horizontal sin pérdidas por flexión del soporte. Esto mantiene precisa la fórmula fundamental:  $\mu = F_T / F_N(1)$ . La alineación precisa de los componentes en contacto es fundamental para evitar errores en la distribución de carga y garantizar condiciones de prueba homogéneas (Barragan, 2024). Otro principio esencial según (Madiouni, 2024) es el control preciso de los parámetros de ensayo, que incluye la regulación exacta de

variables como carga normal, velocidad relativa, temperatura y condiciones de lubricación. Para cumplir este principio, se implementan sistemas de actuadores y sensores de alta resolución que permiten una retroalimentación en tiempo real, asegurando una aplicación de esfuerzos uniforme y ajustable según el tipo de prueba. El diseño debe considerar mecanismos de compensación para minimizar errores sistemáticos y asegurar que las condiciones de ensayo reflejen fielmente el comportamiento tribológico de los materiales en aplicaciones reales.

El tercer principio fundamental es la adquisición y procesamiento de datos de alta fidelidad, lo que implica la integración de sistemas de medición avanzados capaces de registrar y analizar variaciones mínimas en fricción, desgaste y temperatura durante la prueba. Sensores de fuerza, micrómetros ópticos y cámaras de alta velocidad son algunas de las tecnologías utilizadas para capturar datos detallados (Barragan, 2024).

### **2.6.3. Principales componentes del equipo de análisis de fricción**

Uno de los componentes clave es el sistema de aplicación de carga, que puede ser neumático, hidráulico o electromecánico, permitiendo la regulación exacta de la fuerza aplicada entre las superficies en contacto. Este sistema debe garantizar una distribución homogénea de la carga y minimizar efectos indeseados como histéresis mecánica o fluctuaciones dinámicas (Quispe, 2019). Otro elemento fundamental es el mecanismo de movimiento relativo, encargado de simular las condiciones reales de fricción entre materiales. Dependiendo del tipo de ensayo, estos mecanismos pueden incluir configuraciones lineales, rotativas o recíprocas, accionadas mediante motores DC con encoder óptico y control PID. Para evitar que las vibraciones "ensucien" las mediciones, se usan acoplamientos flexibles (que aíslan el motor del eje), soportes de caucho/neopreno bajo el bastidor, control de velocidad constante ( $\pm 0,01$  rpm con lazo cerrado) y análisis FFT de la fuerza tangencial FT para descartar ruido por encima de 50 Hz. Así se garantiza que irregularidades dinámicas no alteren el cálculo preciso de  $\mu = FT/FN$  (1). El sistema de medición de fricción y desgaste es otro componente esencial, compuesto por sensores y transductores de alta precisión capaces de registrar fuerzas tangenciales y coeficientes de fricción en tiempo real. Estos sensores pueden basarse en tecnología piezoeléctrica, extensométrica o capacitiva, dependiendo de la resolución y el rango de medición requerido (Viejo, Jama, & Piguave, 2023).

Finalmente, el sistema de adquisición y procesamiento de datos es crucial para la interpretación de los resultados, este sistema incluye software especializado que integra las señales de los sensores, filtra ruidos experimentales y permite visualizar tendencias en tiempo real. Los algoritmos de análisis pueden correlacionar variables como temperatura, coeficiente de fricción y tasa de desgaste, facilitando la identificación de patrones de comportamiento tribológico. La capacidad de registrar datos a altas frecuencias y exportarlos para análisis detallado garantiza que los equipos de análisis de fricción proporcionen información confiable para la optimización de materiales y lubricantes en aplicaciones industriales (Viejo, Jama, & Piguave, 2023).

#### **2.6.4. Sistemas de adquisición de datos y control en equipos modernos**

En un ensayo tribológico, el sistema de adquisición de datos y control es el “traductor” entre lo que pasa físicamente en el contacto y los números que se analizan después. En este contexto, hablar de alta precisión significa que los sensores son capaces de detectar cambios muy pequeños en las magnitudes medidas (por ejemplo, variaciones de fuerza de fricción de pocas décimas de newton, de velocidad de unas centésimas de vuelta por segundo o de temperatura de fracciones de grado), manteniendo errores de linealidad y repetibilidad dentro de unos pocos por ciento. Para que esas lecturas sean fiables, no basta con tener buenos sensores: también es necesario integrarlos bien, evitando errores sistemáticos típicos como descalibraciones (factores de conversión mal ajustados), derivas con la temperatura, offsets de cero que no se corrigen antes de iniciar el ensayo o montajes mecánicos desalineados que mezclan parte de la fuerza normal en el canal de fuerza tangencial. (Paste, 2024). El procesamiento de las señales suele incluir filtrado del ruido de alta frecuencia, corrección de offsets y derivas, y la generación de curvas y estadísticas que permitan ver tendencias en el coeficiente de fricción y en el desgaste. De esta forma, el sistema no solo “graba datos”, sino que ayuda a distinguir si un cambio en la curva de fricción corresponde a un fenómeno real (por ejemplo, transición a un régimen de desgaste más severo) o a un artefacto de medición introducido por el propio equipo. (Aldas & Moya, 2019).

El sistema de control de equipos desempeña un papel clave en la regulación precisa de las condiciones experimentales, asegurando que los ensayos se realicen bajo parámetros controlados y reproducibles. Este sistema está compuesto por controladores electrónicos que gestionan la aplicación de carga, la velocidad relativa entre las superficies de contacto

y las condiciones térmicas del ensayo. Tecnologías como los controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) permiten ajustar dinámicamente las variables del experimento, corrigiendo desviaciones en tiempo real para mantener la estabilidad del sistema (Armenta, Cárdenas, Fong, & Pérez, 2022). Por último, la interfaz de usuario y monitoreo remoto es un elemento esencial en los sistemas modernos de adquisición de datos y control de equipos. A través de plataformas gráficas interactivas, los operadores pueden supervisar en tiempo real las mediciones, modificar parámetros de ensayo y analizar tendencias sin necesidad de detener la prueba. La integración de conectividad mediante protocolos de comunicación industrial permite el monitoreo remoto, facilitando la supervisión de ensayos prolongados o en entornos de difícil acceso (Armenta, Cárdenas, Fong, & Pérez, 2022).

#### **2.6.5. Retos y consideraciones en la construcción de equipos de precisión**

Uno de los principales retos radica en la minimización de errores experimentales derivados de vibraciones, deformaciones mecánicas y fluctuaciones térmicas. Una vez garantizada la rigidez estructural (ver 2.6.2), el siguiente desafío es controlar las vibraciones dinámicas mediante amortiguadores viscoelásticos (caucho/neopreno) y balanceo dinámico del eje rotativo, que evitan resonancias que "ensucien" la señal de fuerza tangencial FT con frecuencias parásitas  $>50$  Hz. Las fluctuaciones térmicas se mitigan con blindaje térmico alrededor del contacto y sensores de temperatura ambiente para corrección en tiempo real de las lecturas de las celdas de carga. La correcta alineación de los componentes y la aplicación de técnicas avanzadas de calibración también resultan esenciales para asegurar la reproducibilidad de los ensayos (Vigo & Carranza, 2024). La implementación de controladores electrónicos de alta precisión permite regular variables como carga, velocidad y temperatura con un margen mínimo de error. La utilización de algoritmos avanzados en los sistemas de control garantiza una respuesta rápida ante variaciones en las condiciones de ensayo, lo que contribuye a la estabilidad y confiabilidad de los datos obtenidos. En el caso de ensayos de larga duración, es imprescindible contar con mecanismos de compensación que mantengan la precisión a lo largo del tiempo, evitando desviaciones que puedan comprometer la validez de los resultados (Iribecampos, Arana, Larrañaga, & Ulacia, 2020).

La correcta calibración y compensación de estos sensores reduce la influencia del ruido en las mediciones y mejora la fiabilidad del sistema, es decir el diseño optimizado del

sistema de adquisición de datos permite procesar grandes volúmenes de información sin comprometer la calidad del análisis (Iribecampos, Arana, Larrañaga, & Ulacia, 2020). La combinación de estos enfoques garantiza que los sistemas de ensayo tribológico mantengan su precisión y confiabilidad a lo largo del tiempo, proporcionando información valiosa para el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías en diversas aplicaciones industriales.

## **2.7. Calibración y validación de los equipos de medición de la fricción**

### **2.7.1. Métodos de calibración estándar**

La calibración por comparación con un patrón de referencia, donde se emplean instrumentos certificados con mayor precisión que el equipo en evaluación. Este procedimiento permite identificar desviaciones en los valores medidos y aplicar correcciones necesarias. En la medición de fricción, por ejemplo, se pueden utilizar celdas de carga calibradas que comparan la fuerza registrada con un valor estándar, asegurando la precisión del sistema (Pérez, Ruiz, & Martínez, 2012). Otro enfoque ampliamente aplicado es la calibración mediante métodos estáticos y dinámicos, que permite evaluar la respuesta del equipo en distintas condiciones operativas. En ensayos tribológicos, la calibración estática se emplea para verificar la correcta aplicación de cargas y alineación de los componentes, mientras que la dinámica se centra en evaluar el comportamiento del sistema en movimiento, considerando factores como velocidad y aceleración. La combinación de ambos métodos garantiza que las mediciones reflejen con fidelidad las condiciones reales de funcionamiento (Saiz, 2020).

El método de calibración por interferometría láser es utilizado para garantizar la precisión en la medición de desplazamientos y desgastes en superficies sometidas a fricción. Esta técnica se basa en la interferencia de ondas de luz para detectar variaciones dimensionales con una resolución nanométrica, permitiendo una caracterización detallada de los efectos tribológicos en los materiales ensayados. Su aplicación es esencial en estudios de desgaste a nivel microscópico, donde se requiere una precisión extrema (Calva, 2012 ). La calibración basada en modelos matemáticos y compensación de errores permite optimizar la precisión de los equipos mediante el análisis de las desviaciones detectadas en las mediciones. Este método implica el desarrollo de algoritmos de corrección que ajustan los datos obtenidos en función de factores como temperatura, humedad o variaciones

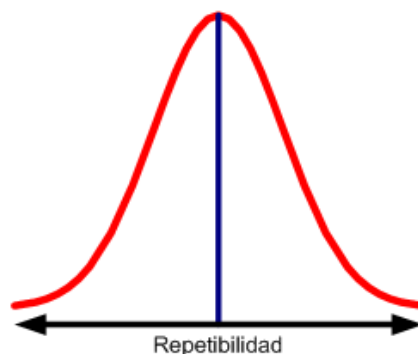
mecánicas. La implementación de estos modelos mejora la fiabilidad de los ensayos y garantiza la validez de los resultados en aplicaciones industriales y científicas (González & Caldera, 2010).

### 2.7.2. Técnicas de validación experimental

La repetibilidad se refiere a la capacidad de obtener los mismos resultados cuando un ensayo se repite bajo las mismas condiciones, con el mismo operador y equipo. La repetibilidad puede ser expresada cuantitativamente en términos de la dispersión característica de los resultados como se aprecia en la Figura 6. La misma se define, de acuerdo con el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología. Como la proximidad de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mensurado bajo las mismas condiciones de medición, donde: (Paisan & Moret, 2010)

1. Estas condiciones son llamadas condiciones de repetibilidad
2. Las condiciones de repetibilidad incluyen: el mismo proceso de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición, utilizado bajo las mismas condiciones, el mismo lugar, repetición en un periodo corto de tiempo.

La Figura 6 retrata de manera simple el concepto de repetibilidad: en un mismo ensayo repetido múltiples veces, los resultados se distribuyen en torno a un valor central, generando una curva parecida a la campana de Gauss; mientras más angosta sea la curva, menos dispersión hay y mayor es la capacidad de repetir las mediciones bajo las mismas condiciones. (Paisan & Moret, 2010)



**Figura 6 Representación gráfica del concepto de repetibilidad**

**Fuente:** (Paisan & Moret, 2010)

La comparación con estándares de referencia, que consiste en verificar la validez de los resultados experimentales mediante la comparación con valores obtenidos de patrones de referencia certificados. Se utilizan materiales o dispositivos con propiedades tribológicas conocidas, cuya respuesta ha sido previamente caracterizada por laboratorios metrológicos acreditados. Esta técnica es particularmente útil en la calibración de sensores y sistemas de medición, permitiendo identificar desviaciones y aplicar correcciones cuando sea necesario (Cruz, Pérez, Sánchez, Rivero, & Santana, 2024).

### **2.7.3. Análisis de errores e incertidumbre en mediciones tribológicas**

La incertidumbre de medición da una idea de la longitud de la cadena de trazabilidad y de la exactitud de los métodos usados para calibrar los patrones de medición. Las seis magnitudes cinemáticas son magnitudes derivadas del Sistema Internacional de Unidades, SI, por tanto, sus mediciones son trazables a magnitudes de base. Los principios de medición usados en la cadena de trazabilidad definen las magnitudes de base que actuarán como referencias fundamentales (Pineda & Argote, 2000)

El análisis de incertidumbre permite cuantificar la confianza en los resultados experimentales mediante la identificación y evaluación de fuentes de error en la medición. Este método se basa en normativas como la ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), que establece procedimientos para calcular la incertidumbre combinada de una medición. Se consideran factores como errores sistemáticos, variabilidad en las condiciones de ensayo y resolución de los instrumentos. La correcta estimación de la incertidumbre es crucial para interpretar adecuadamente los datos y establecer intervalos de confianza que indiquen la fiabilidad de los resultados obtenidos (Contreras & Pacheco, 2024).

## **2.8. Tendencias actuales y futuras en el estudio y equipamiento de la fricción**

### **2.8.1. Avances en sensores y tecnología de medición**

Uno de los desarrollos más significativos es la evolución de los sensores piezoeléctricos, los cuales han mejorado la detección de fuerzas de contacto en ensayos tribológicos. Estos dispositivos convierten la presión mecánica en señales eléctricas, proporcionando mediciones con alta sensibilidad y respuesta dinámica. Su integración con amplificadores de señal ha permitido una mayor estabilidad y reducción del ruido en los datos, lo que

resulta esencial en estudios de fricción y desgaste donde se requieren mediciones precisas en el rango de micronewtons a kilonewtons (Trinchet, 2019). Otro avance clave ha sido la incorporación de sensores ópticos de alta resolución, como los interferómetros láser y los microscopios de fuerza atómica (AFM), que permiten evaluar el desgaste superficial con una precisión nanométrica. Estas tecnologías han posibilitado la detección de microdesgaste en materiales sometidos a contacto deslizante o rodante, proporcionando información detallada sobre la evolución de la topografía de las superficies en condiciones de ensayo prolongadas. La integración de estos sensores con sistemas de adquisición de datos en tiempo real ha mejorado significativamente el monitoreo de procesos tribológicos complejos (Moreno & Campos, 2007).

Las tecnologías MEMS (Microelectromechanical Systems) han permitido el desarrollo de sensores miniaturizados capaces de medir parámetros tribológicos en aplicaciones donde el espacio es limitado, como dispositivos biomédicos y sistemas microelectromecánicos. Estos sensores han facilitado la detección de variaciones en la fricción y el desgaste con resoluciones extremadamente altas, lo que ha sido fundamental en la caracterización de materiales avanzados. Su capacidad para operar en entornos hostiles, como altas temperaturas y atmósferas corrosivas, los ha convertido en herramientas valiosas para ensayos en la industria aeroespacial y automotriz (Grajales, Cobos, & Echeverri, 2017).

### **2.8.2. Integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático en análisis tribológico**

El avance de la IA basada en el aprendizaje automático se vio ralentizada principalmente por dos circunstancias de carácter técnico. Las limitaciones de la potencia computacional de los ordenadores y la falta de disponibilidad de cantidades masivas de datos. Estas dificultades se fueron apilando progresivamente a lo largo de los 2000. El inicio de la década pasada supuso en comienzo del llamado boom de la IA. Y comenzó a extenderse el uso de técnicas de inteligencia artificial, para la resolución de problemas tales como el reconocimiento visual y de lenguaje oral, entre otros (Moltó, 2021). En tribología, los datos experimentales que provienen de sensores, como los relacionados con la fricción y el desgaste, suelen ser imprecisos o estar sujetos a fluctuaciones. La lógica difusa proporciona una forma de manejar esta incertidumbre mediante la utilización de variables lingüísticas (como "bajo", "moderado" o "alto") en lugar de valores numéricos exactos.

Esto es especialmente útil cuando se trata de variables difusas, como la fricción o el desgaste, que pueden ser difíciles de medir con exactitud, pero aún es importante capturar la tendencia general o el comportamiento de los materiales en diferentes condiciones operativas (Ocampo, 2022).

La inteligencia artificial en tribología, específicamente los sistemas de inferencia difusa, permite clasificar regímenes de desgaste o estimar coeficientes de fricción a partir de señales ambiguas (fuerza FT/FN, velocidad, temperatura). Como se muestra en la Figura 7 (esquema general de funcionamiento de un sistema de inferencia difusa), este enfoque supervisado procesa datos etiquetados donde cada entrada está asociada a una salida conocida. En su configuración básica, el algoritmo aprende de pares entrada-salida para mapear condiciones tribológicas reales a predicciones precisas.

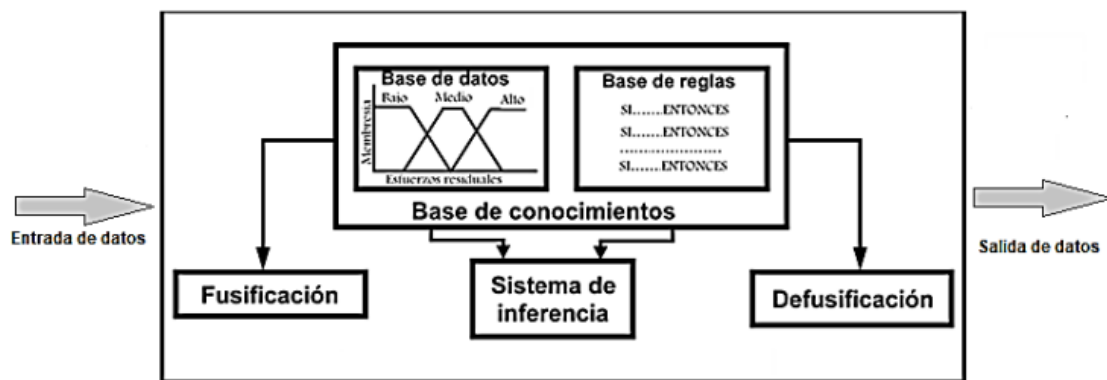


Figura 7 Esquema general de funcionamiento de un sistema de inferencia difusa

Fuente: (Ocampo, 2022)

En el aprendizaje supervisado, el modelo se entrena con un conjunto de datos etiquetados definido como:

$$D = \{(x_i, y_i)\}_{N^{i=1}}$$

donde D es el conjunto de entrenamiento, N el número de ejemplos, cada  $x_i$  un vector de características (fuerza FT/FN, velocidad, temperatura) y  $y_i$  la variable objetivo (régimen abrasivo/adhesivo). Cuando  $y_i$  es categórica se denomina clasificación; cuando es continua, regresión. (Murphy, 2012 )

En el aprendizaje no supervisado, solo se usan datos de entrada:

$$D = \{(x_i)\}_{N^{i=1}}$$

sin variables objetivo, buscando patrones intrínsecos en los datos (descubrimiento de conocimiento) sin métrica de error definida (Murphy, 2012 ).

El aprendizaje semi-supervisado combina ambos: datos no etiquetados descubren estructuras subyacentes, mientras datos etiquetados guían el entrenamiento para mayor precisión (Chapelle, Schölkopf, & Zien, 2009).

### **2.8.3. Desarrollo de equipos para condiciones extremas o especializadas**

Los principios de diseño modular en tribómetros convencionales (sensores intercambiables, bastidores rígidos, sistemas de adquisición robustos) son la base escalable para desarrollar equipos especializados que operen en condiciones extremas. Esta evolución conceptual desde diseños de laboratorio hacia sistemas para aplicaciones críticas —aeroespaciales, nucleares, submarinas— justifica el estudio de tecnologías avanzadas que amplían los límites de la caracterización tribológica

Las condiciones extremas bajo las cuales estos equipos deben operar incluyen, entre otras: (Romeva, 2008)

1. Temperaturas extremas: Equipos diseñados para funcionar en rangos de temperatura extremadamente bajos, como en el espacio exterior o en ambientes árticos, o en temperaturas muy altas, como en procesos industriales de fundición o en reactores nucleares.
2. Presiones elevadas o bajas: Equipos utilizados en condiciones de alta presión, como en sistemas submarinos o en exploraciones profundas, o en ambientes de vacío donde las presiones son extremadamente bajas, como en la industria aeroespacial.
3. Atmósferas corrosivas: Condiciones donde los equipos deben resistir la exposición a sustancias químicas agresivas, como ácidos, bases, gases corrosivos o ambientes salinos, que pueden corroer los materiales comunes.
4. Radiación: Equipos que deben operar en entornos con altos niveles de radiación, como en centrales nucleares o en el espacio exterior, donde los materiales y componentes deben ser resistentes a los efectos de la radiación ionizante.

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

5. Vibraciones y cargas dinámicas: En aplicaciones como la aviación, la automoción de alta velocidad o la exploración espacial, los equipos deben soportar vibraciones extremas y fuerzas dinámicas que pueden ser perjudiciales para los componentes mecánicos.

## **2.9. Fundamentos de diseño mecánico y electrónico relacionados**

El diseño mecánico se enfoca en la creación de sistemas físicos y componentes que deben soportar cargas, vibraciones, temperaturas extremas y otros factores ambientales. Algunos de los fundamentos clave del diseño mecánico incluyen: (Romeva, 2008)

1. Resistencia de materiales: Es esencial comprender las propiedades mecánicas de los materiales (como la elasticidad, la dureza, la fatiga y la fractura) para seleccionar el material adecuado que soporte las tensiones a las que estará sometido el componente o sistema. Esto garantiza que las estructuras sean duraderas y funcionales.
2. Cinemática y dinámica: El diseño mecánico involucra el análisis de los movimientos y las fuerzas que actúan sobre los componentes. La cinemática permite comprender cómo se moverán las partes móviles del sistema, mientras que la dinámica evalúa el comportamiento de los componentes en movimiento bajo fuerzas externas.
3. Termodinámica: Los principios de la termodinámica son fundamentales para el diseño de sistemas que implican transferencias de calor, como en motores, intercambiadores de calor o sistemas de refrigeración. El control eficiente de la temperatura asegura la fiabilidad de los componentes mecánicos y evita fallos debido al sobrecalentamiento.
4. Fabricación y ensamblaje: El diseño debe ser práctico desde el punto de vista de la manufactura. Los componentes deben ser fabricados de manera eficiente utilizando tecnologías adecuadas, y el proceso de ensamblaje debe ser considerado para facilitar su producción y reducir costos.

El diseño electrónico, por su parte, se centra en la creación de circuitos y dispositivos que gestionan el flujo de corriente eléctrica para controlar las funciones del sistema. Los principales fundamentos del diseño electrónico incluyen: (Romeva, 2008)

## Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

- A. Circuitos y señales eléctricas: El diseño de circuitos electrónicos involucra la correcta selección y disposición de resistores, condensadores, inductores, transistores y otros componentes para garantizar que las señales eléctricas se transmitan y procesen adecuadamente. Esto incluye tanto circuitos digitales como analógicos.
- B. Control y automatización: Los sistemas electrónicos permiten el control preciso de los dispositivos mecánicos mediante sensores y actuadores. El uso de microcontroladores y sistemas embebidos facilita la integración de funciones complejas, como la automatización de procesos y la retroalimentación en tiempo real.
- C. Interfaz hombre-máquina (HMI): El diseño electrónico también incluye la creación de interfaces que permiten la interacción entre el usuario y el sistema. Esto involucra la selección de dispositivos de entrada y salida (como pantallas, botones y sensores) que sean intuitivos y eficientes.
- D. Gestión de energía: Los sistemas electrónicos deben ser diseñados para optimizar el consumo de energía, lo que puede involucrar la implementación de fuentes de alimentación eficientes, sistemas de gestión de batería y el control del consumo de energía de los componentes.

## Diseño conceptual del tribómetro

### 3.1. Desarrollo de la metodología de diseño

3.

En esta etapa se desarrolla la metodología de diseño propuesta por Fausto Moreno.

**Objetivo del banco de pruebas:** La poliamida Nylon y el acero de construcción son materiales que han cobrado importancia en la ingeniería contemporánea, gracias a sus sobresalientes propiedades frente a diversos estados de deslizamiento y carga (ASTM International, 2017). No obstante, para afinar su selección y empleo en aplicaciones industriales, es fundamental disponer de instrumentos que posibiliten caracterizar con exactitud su comportamiento tribológico en condiciones reproducibles y controladas (Campuzano García J. Á., Sánchez, González Durán, Díaz Medina, & Durán Reséndiz, 2023).

En este marco, el diseño y la fabricación de un tribómetro se vuelve un elemento clave porque este banco de pruebas posibilita la simulación, medición y análisis de fenómenos de fricción, desgaste y lubricación de manera cuantitativa e imparcial. La habilidad de simular condiciones reales de contacto, regular variables importantes (como carga, velocidad y entorno), y conseguir información fiable sobre el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste, proporciona datos esenciales para crear nuevos materiales, procedimientos de ingeniería y tácticas preventivas de mantenimiento. Asimismo, un tribómetro propio, creado de acuerdo con normas internacionales como ASTM G99, no solo asegura la conveniencia física y matemática de las pruebas, sino que también se convierte en una alternativa económica y adaptable ante el elevado precio de los equipos comerciales (Ortiz Armenta, Vera Cárdenas, Abundis Fong, & Martínez Pérez, 2021).

Por tanto, la presente metodología de diseño se fundamenta en la necesidad de disponer de un banco de ensayos tribológicos preciso, versátil y conforme a estándares internacionales. Esto permitirá analizar materiales representativos de la ingeniería industrial bajo diferentes regímenes de carga y deslizamiento, brindando soporte objetivo tanto a la investigación aplicada como a la selección y validación de nuevos materiales.

**Pilares fundamentales en la estructura de la metodología:** Se resume en la Tabla 5, los tres elementos clave de la metodología utilizada en este estudio. Este proceso

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

comprende desde el diseño y producción de un tribómetro modificado (Krauss & Awtar, 2010) a través de la validación estricta según las normas internacionales (ASTM International, 2017) (Holmberg & Erdemir, 2017), hasta la experimentación controlada, siguiendo protocolos parecidos a los documentados por (Romero & Rondón, 2019) y varios autores destacados en tribología experimental. Esta estructura se complementa con la documentación visual y los protocolos minuciosos de las etapas fundamentales (Tabla 6).

**Tabla 5 Pilares metodológicos de la construcción y uso del tribómetro**

<b>Pilar fundamental</b>	<b>Descripción</b>	<b>Destacado metodológico</b>
<b>Diseño y construcción del equipo de análisis de fricción.</b>	En el Instituto Superior Politécnico de Leiria se desarrolló un tribómetro modificado, adaptado específicamente para este estudio. El equipo permite la medición precisa de la fricción y el desgaste, integrando sensores y un sistema de control automatizado para garantizar la consistencia y repetibilidad en las condiciones de los ensayos. El desgaste se cuantifica mediante la medición de la pérdida de masa de las probetas con balanza analítica de alta precisión y mediante la evaluación del volumen removido a través de técnicas ópticas de micrometría y análisis de huella sobre la superficie de contacto.	Innovación en el diseño experimental; integración de instrumentación y automatización para la adquisición y aseguramiento de datos confiables (Krauss & Awtar, 2010).
<b>Validación del equipo.</b>	Se implementaron rigurosos protocolos de calibración y validación para asegurar la precisión de las mediciones. Esto incluye comparación con normas internacionales como la (ASTM International, 2017), pruebas de repetibilidad y validación cruzada mediante comparación con equipos comerciales de referencia, asegurando así la fiabilidad de los resultados obtenidos.	Protocolos normalizados; repetibilidad y validación cruzada; comparación con estándares y equipos comerciales (ASTM International, 2017) (Stachowiak & Batchelor, 2014).

<b>Pilar fundamental</b>	<b>Descripción</b>	<b>Destacado metodológico</b>
<b>Experimentación controlada</b>	Se realizarán pruebas sistemáticas variando parámetros clave, como la carga aplicada (9,77 N – 15,51 N – 33,52 N) y la distancia de deslizamiento (500 m, 1000 m, 2000 m), velocidad de constante. Esta estrategia experimental permite obtener una matriz de resultados para analizar el comportamiento tribológico bajo condiciones controladas y repetibles.	Diseño experimental factorial; control preciso de variables; obtención de datos comparativos y análisis robusto del desempeño del material bajo estudio (ASTM International, 2017) (Romero & Rondón, 2019).

**Fuente:** (Krauss & Awtar, 2010) (Romero & Rondón, 2019) (ASTM International, 2017)

**Tabla 6. Parámetros y criterios en el diseño y operación del tribómetro pin sobre disco**

<b>Característica</b>	<b>Tribómetro Pin sobre disco</b>	<b>Norma ASTM G99-17</b>	<b>Procedimiento implementado en este estudio</b>
<b>Geometría de contacto</b>	Acero y Nylon.	Pin sobre disco.	Probeta montada fija en brazo, contacto puntual controlado.
<b>Material de probeta</b>	Acero de construcción / Poliamida Nylon.	Variados según objetivos.	Selección por dureza y disponibilidad local.
<b>Material del disco</b>	Superficie de acero con recubrimiento abrasivo tipo papel de lija grano 120.	Variado	Superficie preparada según protocolo.
<b>Carga aplicada</b>	9,77 N - 15,51 N - 33,52N (contrapesos calibrados).	1-100N	Sistema de palancas, ajuste y verificación previa.
<b>Frecuencia de rotación</b>	1.667 rps ( $\pm 0,01$ ), constante.	0,1-10 rps	Motor DC + encoder óptico, control y monitoreo continuo.

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

<b>Característica</b>	<b>Tribómetro Pin sobre disco</b>	<b>Norma ASTM G99-17</b>	<b>Procedimiento implementado en este estudio</b>
<b>Distancia de deslizamiento</b>	500m, 1000m, 2000m.	$\geq 100m$	Determinada mediante conteo de revoluciones/encoder.
<b>Condiciones ambientales</b>	23 $\pm$ 2 °C, 50 $\pm$ 5% HR	Reporte recomendado	Registro digital continuo durante el ensayo.
<b>Preparación de muestra</b>	Pulido Ra<0,1 $\mu$ m, limpieza, medición rugosidad.	Acabado fino	Proceso detallado, verificado con rugosímetro portátil.
<b>Medición de desgaste</b>	Pérdida de masa ( $\pm$ 0,01 mg) huella óptica, micrometría.	Volumen perdido.	Balanza analítica, microscopía óptica, medición de huella.
<b>Adquisición de datos</b>	Fuerza vía célula carga + HX711/Arduino, freq. 50Hz.	Digital/analógica	Datos en tiempo real, exportación CSV, respaldado en doble soporte.
<b>Repetibilidad</b>	3 repeticiones por condición experimental.	Repeticiones sugeridas	Desviación estándar < 3%, descarte de datos atípicos
<b>Norma de referencia</b>	ASTM G99-17, protocolos internos IPL	ASTM G99-17	Adaptación fiel del método, validación cruzada con literatura
<b>Validación</b>	Calibración previa, comparación con estándares y equipos comerciales	Validación cruzada	Reporte de incertidumbre y errores, ajustes iterativos

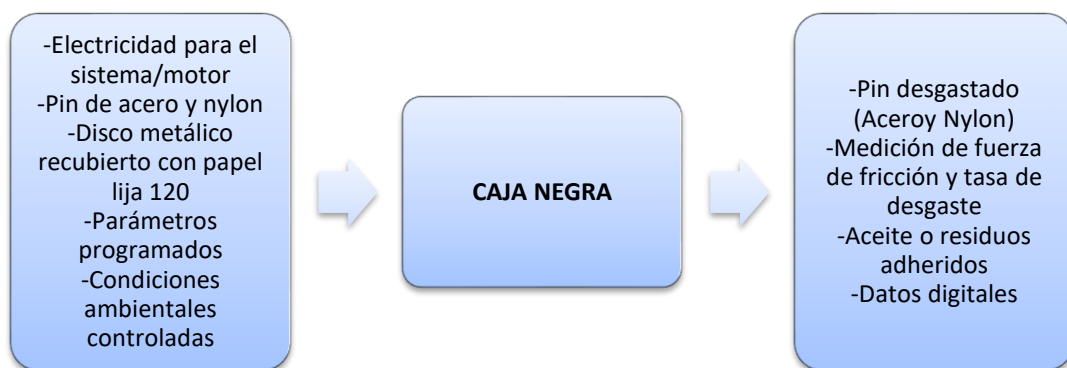
La Tabla 6 sintetiza los criterios y parámetros técnicos clave que se tomaron en cuenta en el diseño, construcción y validación experimental del tribómetro pin sobre disco creado en este estudio, en contraste directo con las sugerencias de la norma ASTM G99-17 y procedimientos documentados en la bibliografía. Esta estructura comparativa garantiza

la claridad metodológica y facilita la base para las decisiones adoptadas durante la formación del equipo y la organización experimental (Ortiz, 2019) (ASTM International, 2017).

**Establecimiento de funciones del banco de pruebas:** En esta etapa se establecen las funciones requeridas y las limitaciones del sistema de un diseño reciente. Para alcanzar este objetivo, inicialmente se ilustra una caja negra (ver Figura 8) que tiene una entrada y una salida. En esta caja negra no es esencial tener claridad acerca de los procesos y funciones que suceden internamente para convertir las entradas en resultados. Posteriormente, se analizan las funciones requeridas para realizar un procedimiento, las mismas funciones que actualmente se establecen en una caja transparente y se establecen los confines. Asimismo, se localizan los ingresos y egresos del sistema (ver Figura 9).

El esquema de la caja negra sintetiza el proceso experimental en el tribómetro pin sobre disco, en el que la muestra (probeta de acero de construcción y poliamida de Nylon) se encuentra bajo condiciones reguladas de carga y velocidad, bajo la supervisión constante de las variables tribológicas fundamentales.

La Figura 8 y Figura 9 muestran el diagrama conceptual y flujo experimental, ajustados al equipo y metodología de pin sobre disco desarrollado en el IPL. Se observa que la automatización, la preparación cuidadosa de muestras y la colección digital de datos son pilares clave en la actual configuración experimental.



**Figura 8 Caja Negra**

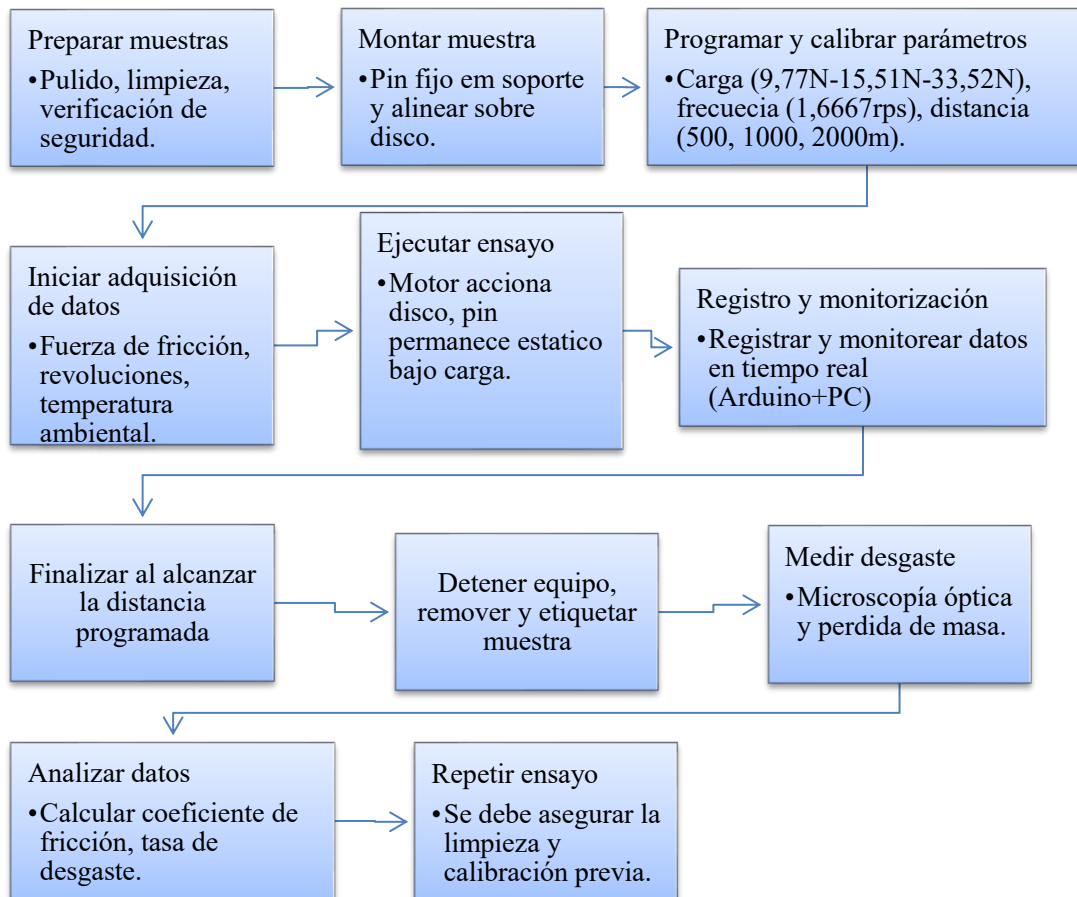


Figura 9 Caja transparente

**Elaboración de características:** En la elaboración del tribómetro pin sobre disco, se examinaron varias alternativas para generar el movimiento oscilante pendular requerido en los ensayos. La Tabla 7 compara tres sistemas fundamentales considerados: el sistema de cuatro barras, el retorno rápido y el brazo perpendicular. La selección se basó en criterios de precisión, robustez, facilidad en la construcción y adaptabilidad a las condiciones experimentales propuestas. Tras la investigación, se optó por el mecanismo de brazo pendular, ya que proporciona un movimiento más estable y simétrico, conforme a lo recomendado por las buenas prácticas y la bibliografía técnica para este tipo de aparatos (Shigley & Uicker Jr, 2011) (ASTM Standard G133-05 , 2016).

**Tabla 7 Comparación de alternativas para el mecanismo de movimiento oscilante pendular**

<b>Alternativa de mecanismo</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>	<b>Ventajas principales</b>	<b>Desventajas o limitaciones</b>	<b>Aplicabilidad de tribómetros académicos</b>
<b>Cuatro Barras</b>	Transmisión por eslabones articulados	Simplicidad mecánica. Facilidad de análisis. Buena robustez.	Movimiento no perfectamente lineal. Amplitud limitada.	Muy usada en prototipos sencillos; adecuada para desplazamientos pequeños.
<b>Retorno rápido</b>	Biela-manivela descentrada	Alta eficiencia. Permite trayectoria de ida y retorno con diferentes velocidades. Ideal para ciclos rápidos.	Movimiento asimétrico. Más desgaste debido a aceleraciones abruptas.	Se usa en máquinas-herramienta y algunos tribómetros industriales.
<b>Brazo pendular</b>	Movimiento circular con eje fijo	Simplicidad Robustez. Requiere pocos componentes, fácil adaptación a equipos existentes.	Pequeña variación de ángulo de contacto durante el ensayo.	Muy usado en prototipos universitarios montados sobre pulidoras.

**Fuente:** Bibliografía de mecanismos (Shigley & Uicker Jr, 2011) (Norton, 2010)

**Alternativas para construcción:** En esta fase se contrastan los valores de utilidad de las alternativas de diseño sugeridas, basándose en la comparación del desempeño frente a los objetivos de peso diferencial. Para seleccionar la alternativa más adecuada que cumpla con alguna de las subfunciones, primero se debe elaborar una tabla para examinar la correlación entre los objetivos, en la que 1 indica una relación intensa, 0.5 una relación

moderada y 0 sin relación (ver Tabla 8). Luego, se añaden los valores por cada fila, permitiendo así ordenar los objetivos de importancia más alta a la más baja.

**Tabla 8 Correlación entre objetivos**

Objetivo	Precisión del movimiento	Facilidad de construcción	Bajo mantenimiento	Costo	Robustez	Repetibilidad del ensayo	Suma fila	Peso relativo (%)
Precisión del movimiento	1	0,5	0,5	0,5	1	1	4,5	19,57
Facilidad de construcción	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	3,5	15,22
Bajo mantenimiento	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,35	15,22
Costo	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	3,5	15,22
Robustez	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4	17,39
Repetibilidad del ensayo	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4	17,39

**Fuente:** (ASTM Standard G133-05 , 2016)

En la Tabla 8 se permite visualizar qué tan relacionados están los objetivos entre sí, según el criterio: 1 = fuerte, 0.5 = medio, 0 = débil o nulo. De esta tabla se obtiene la suma por fila que luego se usa para ponderar la importancia relativa de cada objetivo. Cada objetivo representa un criterio fundamental que orientará la elección y comparación de opciones de diseño, dirigiendo las decisiones hacia un prototipo equilibrado y alineado con las prioridades de rendimiento y viabilidad del tribómetro.

**Tabla 9 Objetivos listados en orden de importancia**

Objetivos	Ponderación %
Precisión de movimiento	19,57
Robustez	17,39
Repetibilidad del ensayo	17,39
Facilidad de construcción	15,22

<b>Objetivos</b>	<b>Ponderación</b> %
Bajo mantenimiento	15,22
Costo	15,22

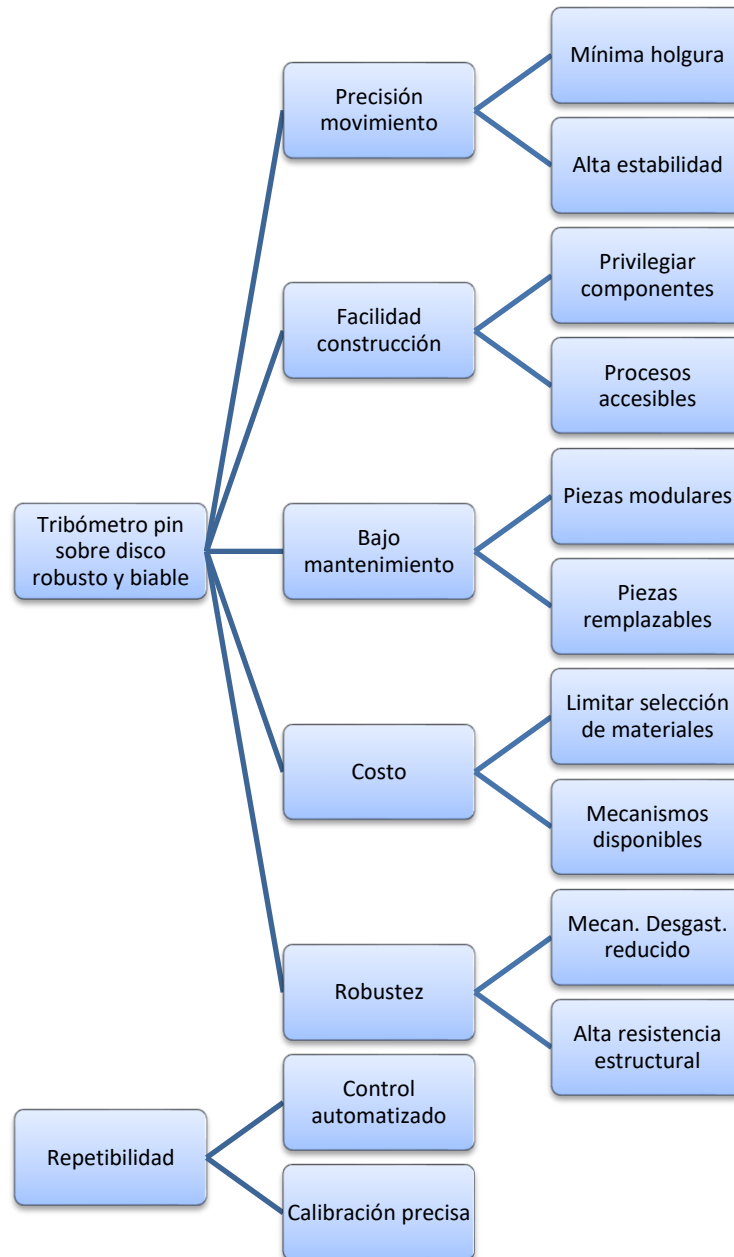
Aplicación e interpretación de los objetivos de la Tabla 9:

**Precisión de movimiento (19,57 %):** Es el objetivo más importante; decisiones de diseño deben priorizar la capacidad del tribómetro para posicionar y mover los componentes con exactitud.

**Robustez (17,39 %) y Repetibilidad del ensayo (17,39 %):** Ambas comparten importancia similar y subrayan la necesidad de un equipo duradero y capaz de ofrecer resultados consistentes entre pruebas.

**Facilidad de construcción, Bajo mantenimiento, Costo (cada uno 15,22 %):** Estos criterios tienen una importancia práctica similar. Favorecen soluciones que sean fáciles de fabricar, económicas de mantener y asequibles, lo cual es crítico para un prototipo académico o de laboratorio.

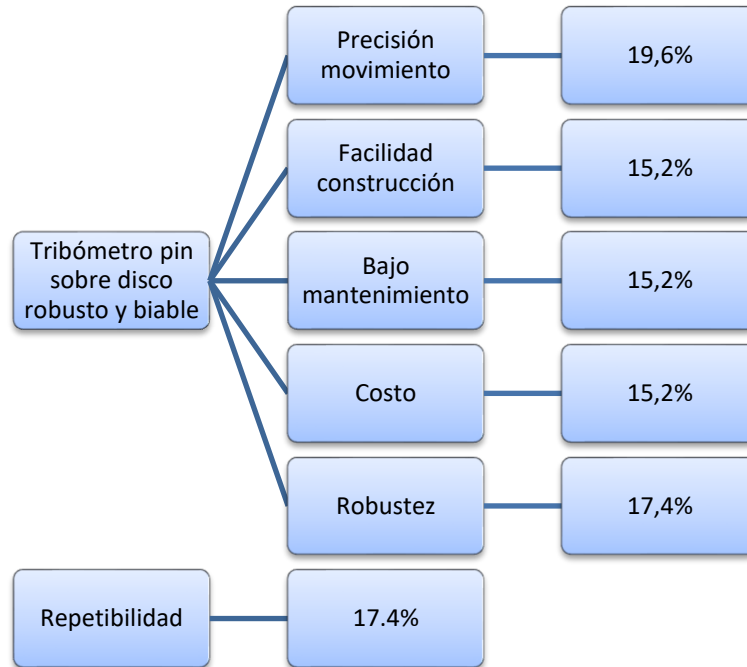
Según la Tabla 8 de correlación, se elaboró el árbol de objetivos mostrado en la Figura 10. El propósito principal es crear un tribómetro pin sobre disco acorde a estándares internacionales; los objetivos concretos, valorados en función de su importancia relativa, establecen los criterios fundamentales del diseño. Este árbol orientó la valoración y elección de opciones morfológicas del mecanismo recíprocante de movimiento.



**Figura 10** Árbol de objetivo

Como se muestra en la Figura 11, este enfoque metodológico facilita la valoración exacta de los coeficientes de fricción y los índices de desgaste para la poliamida nylon y acero, dependiendo de la matriz experimental, ofreciendo información útil para entender sus características tribológicas. Una vez recolectados los datos, no solo aportarán al progreso de los saberes en el área de la tribología, sino que también establecerán los cimientos para futuros estudios en el IPL con el equipo creado. Además, esta investigación posee significativas repercusiones prácticas para el sector industrial, dado que los datos

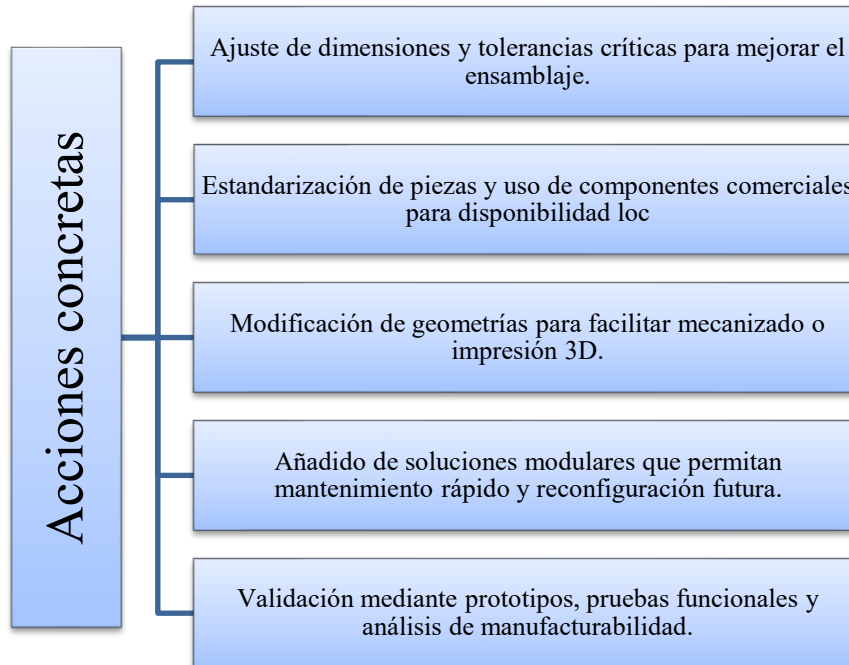
producidos pueden guiar las decisiones de diseño y elección de materiales en usos donde el rendimiento tribológico es esencial, como en las industrias petroquímicas, marinas y de procesamiento de alimentos.



**Figura 11** Árbol de objetivo ponderado

**Mejora de detalles:** Este periodo se enfoca en la optimización completa del producto, es decir, ajustar el diseño para que sea más fácil de fabricar y mantener, así como elegir materiales normalizados y afinar tolerancias con el objetivo de disminuir los costos. Para reducir la complejidad, dividir en módulos los subsistemas y utilizar soluciones comerciales cuando estas ofrezcan confiabilidad y disponibilidad, se examinan todos los componentes. Asimismo, se utilizan prototipos o simulaciones para detectar y subsanar eventuales fallos o costos excesivos antes de comenzar la producción. Esta etapa comprende la revisión de los planes detallados, el desarrollo de directrices para el ensamblaje eficaz y la confirmación de que el diseño satisface las regulaciones de seguridad y técnicas. Se alimenta así un proceso iterativo de mejora basado en los comentarios recibidos a lo largo de las pruebas iniciales y la comprobación funcional del sistema.

La Figura 12 tiene como enfoque que la mejora de detalles va mucho más allá del simple ajuste estético: optimiza el valor técnico y económico del producto, maximizando la viabilidad y sostenibilidad del resultado final antes de su fabricación o validación experimental.



**Figura 12 Acciones concretas en la mejora de detalles**

**Preparación de muestras para ensayo:** Este procedimiento, en su totalidad, garantiza la fidelidad y comparabilidad de los resultados tribológicos conseguidos, conservando un control riguroso sobre los factores de preparación, acabado de la superficie y ensamblaje de las muestras de nylon y acero. (Rodríguez Cañizo, García García, Vite Torres, Merchán Cruz, & Sandoval Pineda, 2010)

- A. Preparación de muestras para ensayo: Para asegurar que los resultados tribológicos sean comparables y reproducibles, las muestras se prepararon de acuerdo con protocolos estandarizados, que se fundamentan en la norma ASTM G99-17 (ASTM International, 2017) y en bibliografía especializada. Se utilizaron dos clases de probetas: una de nylon y otra de acero de construcción, lo que permitió el análisis comparativo entre un material polimérico y uno metálico (Gil Gómez, 2012)

En la Figura 13 y Figura 14 se observan las probetas de acero y de nylon utilizadas en los ensayos tribológicos, mostrando su geometría final tras el mecanizado.



**Figura 13 Muestras de nylon**



**Figura 14 Muestras de acero**

La Tabla 10 sintetiza las diferencias más significativas para la investigación de fricción y desgaste, poniendo en evidencia los beneficios y restricciones de cada uno de los materiales en el diseño de prototipos y en la tribología como lo dice en la bibliografía de (Pérez Rodríguez, Ferrás Santiesteban, Pérez Pérez, & Fernández Santín, 2014) y (Pascual Guillamón, Cárcel Carrasco, & Pérez Puig, 2014)

**Tabla 10 Características de los materiales elegidos para el ensayo**

<b>Característica</b>	<b>Nylon (Poliamida)</b>	<b>Acero (Acero de construcción)</b>
<b>Densidad</b>	1,15 g/cm <sup>3</sup> (mucho más ligero)	7,85 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistencia a la tracción</b>	70-90 MPa (PA6 y PA66)	400-550 MPa
<b>Elasticidad</b>	Alta (absorbe impactos, flexible)	Menor, más rígido y duro
<b>Resistencia a la abrasión</b>	Excelente, con auto-lubricación baja fricción	Moderada (puede mejorar con tratamiento superficial o elección de aceros aleados) de fricción sin lubricación

<b>Característica</b>	<b>Nylon (Poliamida)</b>	<b>Acero (Acero de construcción)</b>
<b>Temperatura de operación</b>	Hasta 190-260 °C según grado	Pierde resistencia a >500 °C
<b>Resistencia química</b>	Buena frente a aceites y solventes; sensible a ácidos fuertes	Baja a moderada (puede corroerse con facilidad; requiere protección como pintura, galvanizado, etc.)
<b>Conductividad eléctrica</b>	Aislante eléctrico	Conductor eléctrico
<b>Facilidad de maquinado</b>	Fácil de mecanizar	Buena a moderada (mejora con aceros de bajo carbono; se dificulta con aceros aleados o templados)
<b>Aplicaciones típicas</b>	Piezas ligeras, engranajes, aislantes	Estructuras metálicas, vigas, columnas, puentes, edificios, refuerzos de concreto, torres, etc.
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,15	1,985
<b>Resistencia tracción</b>	70-90	400-550

Fuente: literatura de (Gil Gómez, 2012)

- B. Para analizar el rendimiento comparativo entre materiales metálicos y poliméricos, se usaron dos variedades de probetas: una de nylon técnico y otra de acero de construcción. De acuerdo con los estudios tribológicos recientes y las recomendaciones usuales de ASTM G99 (ASTM International, 2017), ambas probetas fueron creadas con forma cilíndrica, usando medidas de 80 mm de longitud y 12 mm de diámetro para la probeta de acero y para la probeta de nylon las medidas de 80 mm de longitud y 20 mm de diámetro. El acero fue sometido a mecanizado en el torno con refrigeración para reducir tensiones residuales, manteniendo las tolerancias en  $\pm 0,05$  mm; por su parte, el nylon fue recortado y ajustado usando herramientas de baja velocidad adecuadas para polímeros, lo que permitió mantener la equivalencia geométrica y prevenir fallas superficiales (Gil Gómez, 2012) y (ASTM International, 1996)
- C. Acabado superficial: La superficie activa de la probeta pin se acondicionó siguiendo procedimientos similares a lo establecido en la sección 6.3 de la norma ASTM G99-

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

17 (ASTM International, 2017) y literatura relevante (Granizo, 2010). Para el acero, aunque originalmente se contemplaba un pulido con paño y pasta diamantada alcanzando rugosidad  $Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$  según ASTM para ensayos cuantitativos, en este estudio el disco base de acero fue recubierto con una superficie abrasiva confeccionada con papel de lija de grano 120, para replicar condiciones abrasivas aceleradas. La probeta pin de nylon fue preparada con limpieza moderada y lijado manual para evitar degradación del polímero debida a pulidos excesivos.

- D. Limpieza y registro: Antes del ensayo, se limpiaron a fondo las dos probetas con aire comprimido y alcohol isopropílico, de acuerdo con los procedimientos para la preparación de superficies que se encuentran en los manuales de práctica tribológica y en (ASTM International, 1996). Se inspeccionó visualmente para confirmar que no hubiera partículas ni contaminantes, y se tomaron las medidas finales usando un calibre digital. Se registraron con atención todas las condiciones iniciales de rugosidad y geometría para garantizar la trazabilidad y el control en los experimentos.
- E. El montaje de probetas garantiza alineación al disco, conforme lo establecen los apartados 7.2 y 7.3 de la norma ASTM G99-17 (ASTM International, 2017) Las probetas se montaron en el porta-probeta asegurando un ajuste firme y alineación perpendicular al disco, conforme lo establecen los apartados 7.2 y 7.3 de la norma ASTM G99-17 (ASTM International, 2017). El mecanismo de fijación fue calibrado previamente para eliminar posibles desplazamientos relativos durante el ensayo. Se verificó minuciosamente la correcta posición y ausencia de holguras antes de comenzar cada ciclo experimental, asegurando la validez y confiabilidad de los datos obtenidos.

Después de cada etapa, se examinan visualmente las dos clases de probeta como se muestra en la Tabla 11, para asegurarse de que no contengan contaminantes ni presenten deterioros en la superficie antes del ensayo.

**Tabla 11 Tabla comparativa de parámetros para la preparación y limpieza**

Parámetro	Probeta de Acero	Probeta de Nylon	Detalles de limpieza
Material	Acero de construcción	Nylon técnico (Nylamid XL u equivalente)	Alcohol isopropílico/Etanol

Parámetro	Probeta de Acero	Probeta de Nylon	Detalles de limpieza
<b>Diámetro</b>	12 mm ± 0.05 mm	20 mm ± 0.05 mm	Aire comprimido/Paño
<b>Longitud</b>	80 mm ± 0.05 mm	80 mm ± 0.05 mm	Inspección visual
<b>Mecanizado</b>	Torneado con refrigeración	Torneado/lijado para polímeros	Manos con guantes
<b>Acabado superficial</b>	Lijado manual P1200, pulido con paño	Lijado manual P1200	Almacenar en recipiente limpio
<b>Rugosidad final</b>	$Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$ (si posible)	Superficie lisa visible	Evitar fibras/residuos
<b>Limpieza previa al ensayo</b>	Ultrasónico o etanol + aire comprimido	Etanol (sin ultrasonido) + aire	No fibras, no humedad visible
<b>Registro dimensional</b>	Calibre digital, micrómetro	Calibre digital, micrómetro	Registrar en hoja laboratorio
<b>Montaje y alineación</b>	Ajuste seguro, alineado en porta-probeta	Ajuste seguro, alineado en porta-probeta	Verificar ausencia de holgura

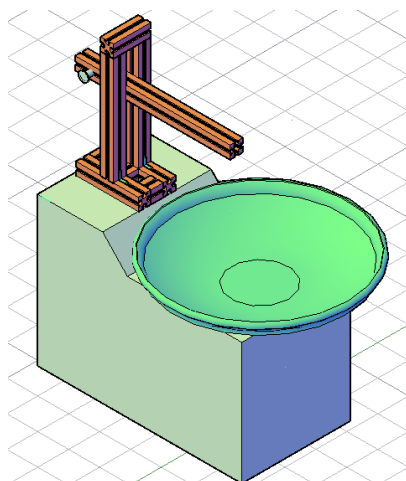
Fuente: literatura (ASTM International, 2017) y (ASTM International, 1996)

### 3.2.Desarrollo y progreso del diseño conceptual.

Siguiendo la metodología sistemática de Nigel Cross para el desarrollo de productos de ingeniería, se seleccionaron las soluciones que mayor utilidad y viabilidad ofrecían para el contexto del laboratorio IPL. La Figura 15 ilustra la evolución del diseño conceptual, donde se integran las geometrías y subcomponentes más favorables identificados durante la etapa de generación de alternativas. Para la subfunción de fijación de la probeta (pin), se optó por el uso de un tornillo prisionero, debido a su simplicidad de operación, facilidad de ajuste y capacidad para asegurar de manera firme la muestra durante los ensayos. Esta solución, respaldada en la bibliografía especializada, simplifica la manipulación y ajuste del pin, minimizando tiempos de preparación entre pruebas y reduciendo la posibilidad de error por movimiento indeseado.

En cuanto a la aplicación de la carga normal, se seleccionó un sistema de contrapesos calibrados y deslizables, lo cual proporciona precisión en la magnitud de la fuerza aplicada y permite cambios rápidos entre distintos niveles de carga, respondiendo a los

requisitos experimentales definidos por la norma (ASTM International, 2017). Este mecanismo es fácilmente replicable y ajustable en el entorno de un laboratorio universitario, aportando versatilidad y exactitud en las condiciones de ensayo. El bastidor principal del tribómetro fue diseñado empleando perfiles comerciales de aluminio extruido en frío, material elegido por su ligereza, rigidez estructural y disponibilidad local. Esta estrategia de diseño no sólo facilita el ensamblaje y futuras modificaciones del equipo sin requerir herramientas o técnicas complejas, sino que también optimiza la relación costo-beneficio y la adaptabilidad del tribómetro a diferentes configuraciones experimentales. Por último, la conversión del movimiento rotacional del disco se transmite al porta-probeta a través de un mecanismo de brazo pendular, el cual oscila sobre un eje fijo describiendo un arco sobre la superficie de contacto. Esta configuración resulta eficiente y fiable, simplificando la construcción y permitiendo el aprovechamiento de la infraestructura disponible en el laboratorio, como la pulidora metalográfica. Requiere un número reducido de componentes móviles, lo cual favorece el mantenimiento del equipo y la estabilidad en la operación continua. Cabe destacar que la decisión por el brazo pendular se fundamenta en su efectividad para garantizar trayectorias oscilante precisas y repetibles, aspecto crítico en la reproducibilidad de los ensayos.



**Figura 15 Primera propuesta de diseño conceptual**

El mecanismo de brazo pendular es seleccionado por la facilidad de integración con la pulidora metalográfica disponible y por la simplicidad constructiva y operativa, sin

sacrificar la precisión y repetibilidad requeridas por los ensayos tribológicos bajo la norma ASTM G99-17 (ASTM International, 2017).

Para el porta-probeta, la clave fue usar materiales que ya teníamos en el laboratorio — nada exótico— pero que funcionaran perfecto. Los tornillos T que se deslizan por el aluminio dan un ajuste súper firme y preciso, sin holguras, para que el brazo se mueva suave durante todo el ensayo. El movimiento del disco lo sacamos de una pulidora metalográfica que ya teníamos: estructura reforzada (verificada midiendo vibraciones  $<0.05$  mm/s) + motor AC potente. La transmisión es por correa dentada (relación 1:10), que convierte las 3000 rpm de la pulidora en las 1,667 rpm constantes del disco. Así sale torque estable sin picos bruscos. Para alineación y vibraciones cero, pusimos amortiguadores de neopreno en los 4 puntos del bastidor + balanceo del eje con masas correctoras. Antes de cada ensayo: nivel láser para alineación + prueba en vacío ( $FT=0\pm 0.02N$ ). Así la probeta toca el disco siempre perpendicular y sin "ruido" mecánico que ensucie las curvas  $\mu(t)$ .

La propuesta preliminar de diseño presentada en la figura 15, muestra la configuración del ensamble completo y la orientación del sistema para soportar adecuadamente el contacto entre la probeta y el disco bajo condiciones controladas. Aunque esta solución representa una aproximación inicial, las características descritas en la tabla 12 se fundamentan en criterios de eficiencia de la maquina pulidora metalográfica, reproducibilidad y adaptabilidad, esenciales para el desarrollo de dispositivos experimentales en el ámbito universitario. Las próximas etapas del diseño consideran ajustes y mejoras en función de los resultados de las pruebas piloto y el análisis detallado de la dinámica de contacto entre los elementos de ensayo.

La Tabla 12 facilita una visión integral y organizada de los parámetros técnicos más importantes para el diseño, operación y análisis del prototipo.

**Tabla 12 Criterios generales de eficiencia en maquina pulidora metalográfica**

Característica	Valor	Unidad	Observaciones
Número de placa motor	162	—	Identificación interna motor
Tensión nominal motor	220	Voltios (V)	Monofásico
Potencia motor	1/3 (260)	CV (W)	Potencia nominal

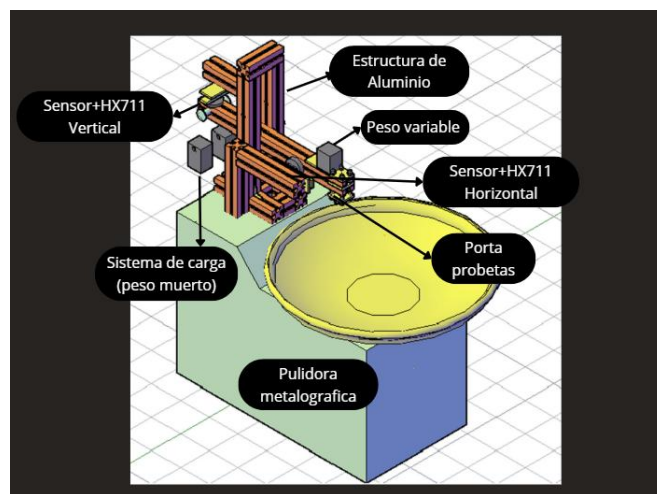
Característica	Valor	Unidad	Observaciones
Corriente nominal motor	2	Amperios (A)	Corriente operativa
Velocidad nominal motor	1400	revoluciones/min (rpm)	Velocidad máxima de giro
Número de revoluciones por segundo (disco)	1,6667	rps	Para análisis de velocidades
Velocidad máxima periférica disco	4,9	m/s	Velocidad lineal borde disco
Número de vueltas (lazos)	6	—	Vueltas en ensayo
Tipo de ensayo	Pin sobre disco	—	Descripción del método
Material del pin	Nylon/Acero	—	Contacto para ensayo de fricción
Material del disco	Acero acero con recubrimiento abrasivo tipo papel de lija grano 120.	—	Contacto para ensayo de fricción

Continuando con el proceso de diseño, se elaboró una segunda propuesta estructural, que se expone en la Figura 16. La principal innovación es un sistema de peso muerto para aplicar de manera controlada la carga normal sobre la probeta, reemplazando así a mecanismos más complejos y menos accesibles en el entorno universitario. Además, se diseñó un porta-probeta seguro y resistente que puede mantener la muestra a la altura y distancia apropiadas en relación con el disco, asegurando un contacto constante durante el ensayo y favoreciendo la reproducibilidad de los resultados.

Eligiendo un sistema pendular, en el que el porta-probeta se une a un brazo oscilante que traza un arco perpendicular sobre la superficie del disco rotatorio. Esta arquitectura ofrece una solución eficaz, sencilla de construir y ajustar, que está alineada con las capacidades del laboratorio y con las prácticas comunes en dispositivos de ensayo tipo pin sobre disco presentes en la bibliografía técnica contemporánea. Para lograr un control directo y fácil de la carga aplicada, se utiliza el peso muerto calibrado que debe estar en el extremo apropiado del brazo; esto es lo que sugieren (Miranda Monge, Porrás Salas, & Vergara Pacheco, 2023) para los tribómetros académicos. Por su parte, el porta-probeta garantiza

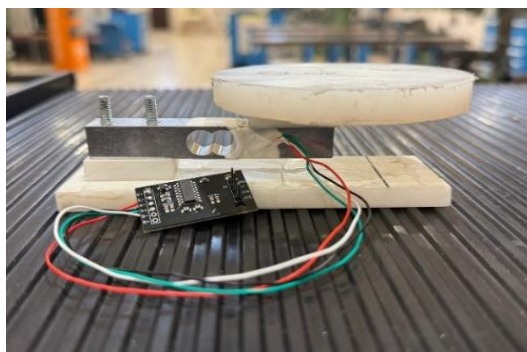
la alineación correcta y la rigidez de la probeta, dos elementos esenciales para conseguir datos fiables desde el punto de vista tribológico.

Además de disminuir notablemente la complejidad del sistema y los requerimientos de mantenimiento (por ejemplo, lubricar mecanismos internos), esta solución optimiza la ergonomía para el operador y simplifica el acceso al preparar y extraer las muestras. El diseño modular posibilita que, en el futuro, se puedan incluir variaciones experimentales o modificaciones basadas en nuevas necesidades de investigación, manteniendo la adaptabilidad y la eficacia en la utilización de los recursos existentes.

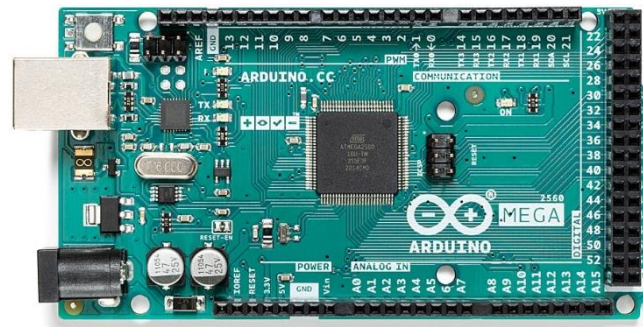


**Figura 16. Modificación estructural: Integración de peso muerto y porta probeta en brazo pendular**

En la etapa siguiente del desarrollo, se añadieron dos celdas de carga de 10 kg (Figura 17), junto a los módulos HX711 y la placa Arduino Mega (Figura 18), posibilitan que se adquieran datos experimentales con exactitud durante las pruebas de desgaste y fricción.



**Figura 17 Celdas de carga y modulo HX711**

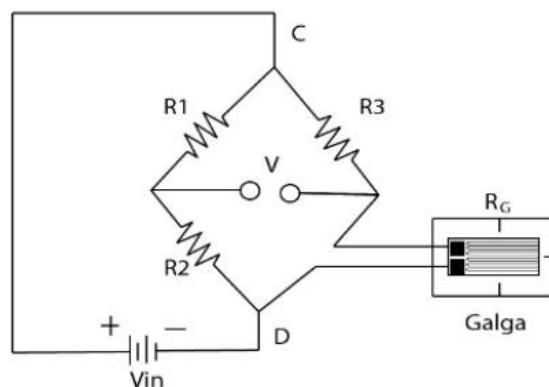


**Figura 18 Arduino Mega**

**Fuente: Arduino Documentation (<https://docs.arduino.cc>)**

La función de las celdas se basa en galgas extensiométricas configuradas en un puente de Wheatstone (Figura 19), cuya señal de salida –del orden de milivoltios– responde proporcionalmente a la deformación causada por la carga aplicada: (Isaac, 2025)

$$V_0 = V_{ex} \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (5)$$



**Figura 19 Esquema del puente de Wheatstone (Isaac, 2025)**

Las especificaciones de las celdas de carga que se utilizan incluyen una capacidad para medir entre 1 N y 50 N, dependiendo del modelo, temperaturas operativas que oscilan entre -10 °C y +40 °C, sensibilidad estándar de 2.0 mV/V y una repetibilidad menor al 0,5% del rango de carga. Se colocaron estos sensores de forma que la celda vertical mide solamente la fuerza normal que se aplica al pin y la horizontal, en cambio, mide la tangencial o fricción. Ambas celdas están aisladas mecánicamente para prevenir interferencias. Se adquirió el dato en tiempo real y con tasas de muestreo adecuadas para registrar las fluctuaciones de fuerza a lo largo de los ensayos, garantizando así la exactitud

y la repetibilidad según los criterios experimentales requeridos (Campuzano García J. Á., Sánchez, González Durán, Díaz Medina, & Durán Reséndiz, 2023).

El módulo HX711 permite una lectura exacta y estable de la fuerza aplicada en cada fase del ensayo, debido a que la señal es de bajo nivel. Este módulo ofrece amplificación (con una ganancia habitual de 128x) y digitalización a 24 bits, frecuencias operativas de muestreo de 10 Hz y 80 Hz, Alimentación entre 2.7V y 5.5V, rango estándar de medición para celdas de 5 kg o superiores y temperatura de trabajo de -40 °C a +85 °C. El módulo se conecta directamente al Arduino mediante un bus serie sencillo (pines CLK y DAT), lo que permite una integración eficaz en sistemas embebidos y simplifica el procesamiento de datos en tiempo real (Lozano, 2019). Los sensores están colocados de manera estratégica: uno dispuesto verticalmente para medir la fuerza normal aplicada por el peso muerto sobre la probeta, y otro colocado horizontalmente para registrar la fuerza de fricción generada en el punto de contacto entre el disco y el pin (Quiroga et al., 2023). Las celdas de carga fueron calibradas previamente mediante un procedimiento estandarizado que incluye la aplicación de cargas conocidas y la corrección de desviaciones lineales y no lineales, asegurando su precisión y fiabilidad. Este proceso se documenta detalladamente en el Manual de Calibración incluido como Anexo 1. (Quiroga, Molina , Urbano Pintos, Martinenko, & Zanin, 2023).

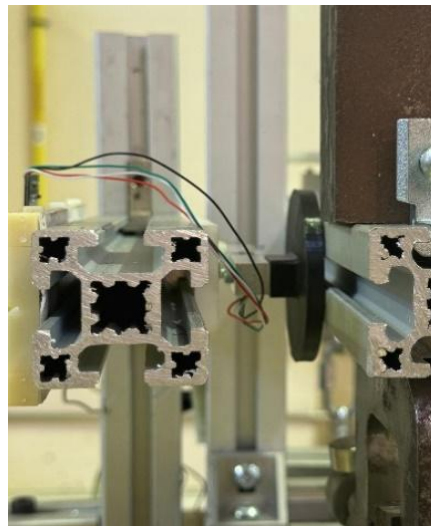
La conceptualización reúne todos estos módulos en una estructura adaptable y ampliable, que es perfecta para obtener de manera exacta variables mecánicas a lo largo de las pruebas tribológicas. Se eligió el diseño tomando en cuenta su robustez frente al ruido, la facilidad para calibrarlo y su compatibilidad, satisfaciendo así los requerimientos establecidos en el árbol de objetivos y el análisis funcional del sistema. La estructura incorpora soportes que se pueden ajustar, lo que simplifica el montaje y la calibración individual de cada celda de carga. Esto posibilita su movimiento y alineamiento adecuado, conforme a las necesidades del experimento. Este sistema modular optimiza la reproducibilidad de los resultados y disminuye el margen de error cuando se mide indirectamente la fuerza, conforme a las prácticas instrumentales más recomendadas para tribómetros universitarios.

Los módulos HX711, que son reconocidos por su gran exactitud y resolución al medir las fuerzas aplicadas, procesan la señal analógica de cada celda. La información se digitaliza y se maneja en tiempo real mediante una placa Arduino Mega, la cual guarda y trata los

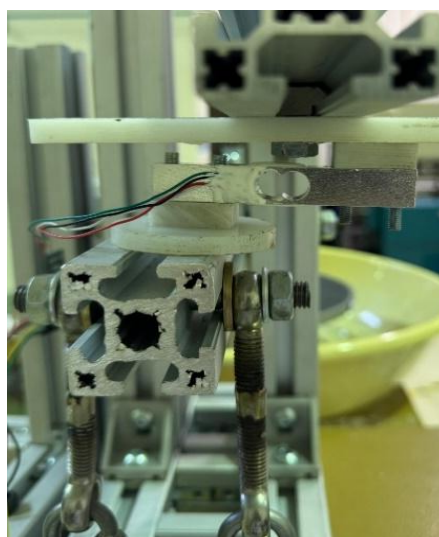
## Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

datos de los experimentos para que luego se pueda examinar la tasa de desgaste y el desarrollo del coeficiente de fricción. Esta integración asegura un control estricto sobre los parámetros fundamentales del ensayo y posibilita la comparación directa con sistemas de medición profesionales que se encuentran en la literatura especializada.

La Figura 20 y Figura 21 muestra que la ubicación de los sensores HX711, las dos celdas de carga y la plataforma electrónica principal permite un fácil acceso en las calibraciones y garantiza una operación eficaz y segura en cada ciclo de experimentación.



**Figura 20 Sensor horizontal**



**Figura 21 Sensor Vertical**

### 3.3. Diseño de detalle del banco de pruebas.

El diseño de detalle parte del diseño conceptual aprobado, definiendo dimensiones exactas mediante cálculos estructurales para el bastidor de aluminio anodizado tipo I 40×40 mm y brazo porta-probeta (misma sección, L=500 mm), considerando restricciones geométricas, funcionalidad y compatibilidad entre elementos circulares (disco ensayo, eje soporte).

Cálculos estructurales realizados:

A. Brazo porta-probeta (40×40 mm, L=500 mm, Fmax=33,52 N):

El Momento flector máximo (6) ocurre en el centro del brazo:

$$M_{m\acute{a}x} = F \times \frac{L}{2} = 33,52N \times 0,25m = 8,38Nm \quad (6)$$

Momento de inercia (7) sección 40×40 mm:

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,04 \times 0,04^3}{12} = 10,67 \times 10^{-8} m^4 \quad (7)$$

Esfuerzo máximo (8):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \times c}{I} = \frac{8,38 \times 0,02}{10,67 \times 10^{-8}} = 15,7 MPa \quad (8)$$

Aluminio anodizado soporta 70 MPa → Factor Seguridad = 4.46 (excelente margen).

B. Tornillos M8 (2 unidades):

Tensión de corte (9) por tornillo:

$$\tau_{corte} = \frac{F}{A} = \frac{16,76}{\pi \times (0,004)^2} = 1,67 MPa \quad (9)$$

Acero 8.8 soporta 400 MPa → Factor Seguridad = 239 (sobredimensionado, seguro)

Se asignaron tolerancias ISO 286 H7/g6 ( $\pm 0.012$  mm) para acoplamientos críticos (porta-probeta, guías lineales, celdas HX711) y ISO 2768 clase media para geometrías generales.

**Medición de la distancia recorrida (L):** La elección de las distancias de 500, 1000 y 2000 metros se basa en la literatura especializada y en las normas (ASTM International, 2017) a nivel internacional, las cuales proponen observar el comportamiento tribológico en puntos sucesivos durante el ensayo. Estas longitudes posibilitan la identificación de cambios relevantes en el coeficiente de fricción y desgaste, desde la fase inicial hasta llegar a condiciones estacionarias y más allá. Asimismo, alientan la comparación y la posibilidad de replicar los ensayos, convirtiéndose en una práctica estándar para el análisis estadístico que representa el desarrollo tribológico de los materiales analizados. El cálculo de la velocidad lineal tangencial del contacto pin-disco es el fundamento para determinar el tiempo requerido para recorrer una distancia específica en un ensayo tribológico. La fórmula del perímetro lineal (10) se emplea para calcular esta velocidad. Dado que:

$$P = 2\pi r \quad (10)$$

Donde  $r$  es el radio efectivo de contacto.

Al multiplicar este perímetro por la frecuencia angular de rotación en revoluciones por segundo (1,666 rps), se consigue una velocidad tangencial(11).

$$v = P \times f \quad (11)$$

Además, se incluyen elementos comerciales elegidos y piezas a medida detallados de cada parte estructural. Se mantienen varios elementos esenciales establecidos durante las fases conceptuales: los soportes y guías lineales, el motor eléctrico de corriente alterna (220 V, 2 A, 260 W) y la base original de la pulidora metalográfica, que ahora está reforzada y ajustada para el montaje ideal del conjunto. Se basó en la morfología, las especificaciones técnicas y la disponibilidad local para elegir los componentes comerciales, con el objetivo de dar prioridad a la funcionalidad y al mantenimiento sencillo durante el funcionamiento del banco. Este diseño modular y optimizado favorece la posibilidad de reproducir los experimentos y de adaptarse a futuras mejoras o cambios. En la Tabla 13 se explica porque se escogieron cada uno de los componentes basándose en criterios de compatibilidad con la mecánica y la electricidad, funcionalidad y accesibilidad, lo cual garantiza un diseño sólido y fácil de mantener. El empleo de materiales estándar en laboratorio, como el acero AISI 1045 y el aluminio extruido, hace más fácil la fabricación local, así como la reposición o sustitución cuando ocurren fallas, lo cual previene demoras en el funcionamiento del banco de pruebas. Las tolerancias ISO (International Organization for Standardization, 1989) implementadas aseguran un

balance apropiado entre los costos de fabricación y la precisión, priorizando la reproducibilidad en términos experimentales y el alineamiento adecuado entre las partes móviles. Las partes que son críticas y que necesitan ajustes cerrados, como las guías lineales o el porta-probeta, se les asignaron tolerancias estrictas de acuerdo con establecer la norma ISO 286 (Organización Internacional de Normalización ISO 286-1, 2010), a fin de garantizar la estabilidad y rigidez en el ensayo. En cambio, para aquellas piezas que no tienen exigencias tan altas a nivel dimensional, se utilizaron tolerancias generales siguiendo la norma ISO 2768 (Organización Internacional de Normalización 2768-1, 1989); así los procesos de montaje y mecanizado fueron más sencillos. La estructura general mantiene la sólida base de la pulidora metalográfica existente, que funciona como el principal soporte y el sistema motriz del disco de ensayo; de esta manera se asegura una operación estable y condiciones inalterables durante los ensayos tribológicos.

**Tabla 13 Resumen de materiales y tolerancias asignadas**

<b>Componente</b>	<b>Material</b>	<b>Función principal</b>	<b>Tolerancia asignada</b>	<b>Justificación</b>
<b>Bastidor estructural</b>	Aluminio extruido frio	Soporte general, ligereza y rigidez.	ISO 2768-m (general)	Material liviano, fácil mecanizado
<b>Porta-probeta</b>	Acero al carbono AISI 1045	Fijación segura y soporte de muestra	ISO 286 H7 (ajuste)	Ajuste preciso para sujeción rígida
<b>Guías lineales</b>	Acero inoxidable	Desplazamiento suave y preciso	ISO 2768-f (medio)	Controla la fricción y desplazamiento
<b>Celdas de carga</b>	Acero inoxidable + electrónica	Sensores de fuerza	Tolerancia según fabricante	Alta precisión electrónica requerida
<b>Contrapesos calibrados</b>	Acero fundido o similar	Aplicación controlada de carga	ISO 2768-m (general)	Pesos normalizados para reproducibilidad

Componente	Material	Función principal	Tolerancia asignada	Justificación
<b>Motor eléctrico</b>	-	Fuente motriz para rotación de disco	-	Especificación según fabricante
<b>Eje y soporte del brazo</b>	Acero inoxidable	Transmisión de movimiento oscilante	ISO 286 f7 (ajuste)	Minimiza holguras para movimiento estable

**Fuente:** Literatura de (International Organization for Standardization, 1989)

### 3.4. Costos y tiempos de fabricación de componentes.

La Tabla 14 sintetiza los materiales elegidos para los componentes clave del banco de pruebas, además de las tolerancias otorgadas según la criticidad del ajuste y el rol estructural de cada elemento. Para los elementos que requieren más exigencia dimensional, como las guías lineales y el porta-probeta, se emplearon tolerancias rigurosas de acuerdo con la norma ISO 286 (Organización Internacional de Normalización ISO 286-1, 2010). Esto asegura la rigidez y la exactitud en el posicionamiento a lo largo de las pruebas. Por otro lado, piezas que cumplen funciones estructurales o secundarias emplean tolerancias generales según ISO 2768 (Organización Internacional de Normalización 2768-1, 1989), equilibrando así la exactitud con la disminución del tiempo y el costo de fabricación.

**Tabla 14 Tabla comparativa: Costos y tiempos de fabricación de componentes**

Componente	Material	Especificación crítica	Costo estimado (EUR)	Tiempo fabricación/montaje	Fuente/ proveedor
<b>Bastidor estructural</b>	Aluminio extruido perfil 2020/3030	Rigidez, dimensiones exactas	60–100	1–2 días	Proveedor local/modal

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

Componente	Material	Especificación crítica	Costo estimado (EUR)	Tiempo fabricación/montaje	Fuente/ proveedor
Porta-probeta	Acero AISI 1045	Ajuste H7, acabado superficial	20–25	4 h mecanizado	Taller de mecanizado
Guías lineales	Tornillos de Acero inoxidable T	Baja fricción, alineación	1-5	2 h montaje	THK/IGUS/ alternativo
Celdas de carga (10 kg)	Inox + electrónica	Precisión $\pm 0,1\%$ , calibración	5–8	1 h instalación	Aliexpress/Amazon
Contrapesos calibrados	Acero fundido	Peso exacto, orificio central	1–2	1h mecanizado/ajuste	Taller local
Motor eléctrico CA 220V	—	Potencia 260W, par estable	50–90	1 h integración	Reutilizado/laboratorio
Disco de ensayo	Acero inoxidable/acero dúplex	Planitud, dureza superficial	35–60	2 h corte/pulido	Taller de mecanizado
Electrónica (Arduino, HX711)	—	Compatibilidad y precisión	10–20 (kit completo)	2h conexión /cableado	Tienda electrónica

**Fuente:** Base en cotizaciones y experiencia de taller

Los materiales y componentes primordiales elegidos para la construcción del banco de pruebas, las tolerancias dimensionales asignadas y una estimación de los costos y plazos de fabricación o ensamblaje se resumen en la Tabla 14 que se muestra. Es evidente que los materiales seleccionados, en particular el aluminio extruido para el marco y el acero AISI 1045 para los componentes estructurales y porta-probeta, presentan un equilibrio apropiado entre la resistencia mecánica, la facilidad de mecanizado y la disponibilidad local. Además, estos materiales son relativamente económicos, lo que beneficia la viabilidad financiera del proyecto.

El estudio de los tiempos de producción y ensamblaje indica que la integración modular del banco de pruebas posibilita conservar una logística eficaz, facilitando intervenciones rápidas para mantenimiento o actualizaciones. La combinación de criterios técnicos, como la selección de materiales con propiedades mecánicas adecuadas (acero AISI 1045 para resistencia y aluminio extruido para ligereza y fácil mecanizado), junto con análisis económicos basados en costos locales de fabricación y disponibilidad de insumos, garantiza un diseño sólido. Esta garantía se fundamenta en la capacidad del equipo para ser construido y reparado con recursos accesibles, minimizando gastos sin sacrificar la calidad ni la robustez estructural, como se evidencia en las pruebas de validación y la documentación técnica acompañante. De este modo, el proyecto logra un equilibrio entre rendimiento, sostenibilidad y eficacia, lo cual es fundamental para un laboratorio universitario que requiere fiabilidad y facilidad de mantenimiento a largo plazo.

## **4. Diseño final de la maquina tribológica**

En este capítulo se muestra el diseño final del banco de pruebas creado en el contexto de esta investigación, además de los resultados más relevantes que se lograron a lo largo de su validación experimental. Siguiendo las pautas y criterios establecidos durante las fases de diseño conceptual y detallado, se explican las soluciones puestas en práctica para cubrir los requerimientos técnicos, funcionales y estructurales que fueron propuestos al comienzo del proyecto. Se exponen las características constructivas y técnicas del banco de pruebas, enfatizando las modificaciones y mejoras realizadas respecto a las propuestas preliminares. Asimismo, se detallan los métodos de fabricación, los materiales seleccionados y la integración de elementos comerciales y de instrumentación, asegurando la funcionalidad, robustez y eficiencia del sistema.

Los resultados experimentales adquiridos se presentan y analizan a continuación, exhibiendo el funcionamiento operativo del banco de pruebas en circunstancias que son representativas del uso real. Los datos producidos posibilitan la evaluación de la exactitud, la confiabilidad y la repetitividad del sistema; además, proporcionan elementos para validar el diseño y proyectar posibles mejoras o aplicaciones futuras. Los resultados experimentales adquiridos se presentan y analizan a continuación, exhibiendo el funcionamiento operativo del banco de pruebas en circunstancias que son representativas del uso real. Los datos producidos posibilitan la evaluación de la exactitud, la

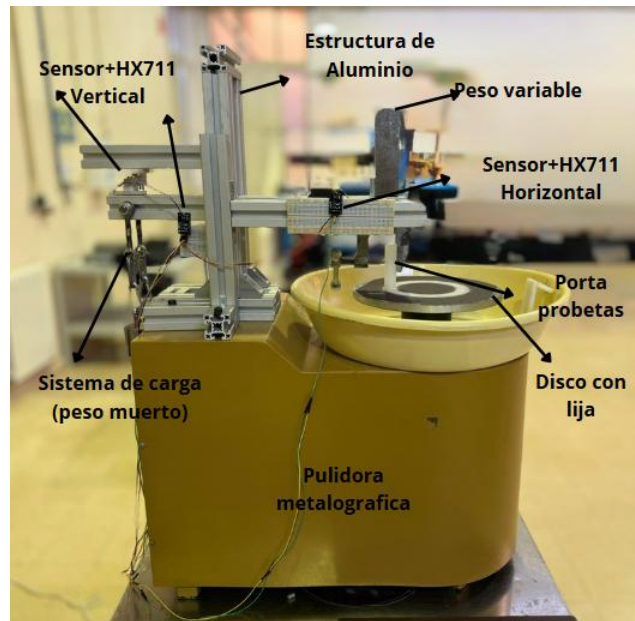
confiabilidad y la repetitividad del sistema; además, proporcionan elementos para validar el diseño y proyectar posibles mejoras o aplicaciones futuras.

#### **4.1. Diseño final**

El diseño final del banco de pruebas tribológicas fue un verdadero trabajo de mejora continua. A partir de las pruebas iniciales y análisis funcionales, reforzamos la estructura con perfiles de aluminio extruido de alta rigidez, comprobando mediante cálculos y simulaciones que las deformaciones bajo carga son prácticamente imperceptibles ( $<0.01$  mm). Para que el porta-probeta se mueva suave y sin vibraciones, añadimos soportes de refuerzo para las guías lineales que mantienen todo estable durante cada ensayo. Además, optamos por un mecanismo simple y confiable de peso muerto, calibrado cuidadosamente, que facilitó drásticamente el mantenimiento y la calibración del equipo.

La base sólida del tribómetro viene de la lijadora metalográfica que usamos como plataforma. Esta máquina, construida con fundición robusta y con un centro de gravedad bajo, se mostró muy estable en pruebas de vibración que realizamos (menos de  $0.05$  mm/s de amplitud), lo que es fundamental para asegurar que el equipo funcione sin ruido mecánico que pueda afectar los resultados. Esta base, combinada con refuerzos modulares, permitió que todo el sistema sea fácil de montar, adaptar o mejorar en el futuro sin comprometer la estabilidad.

En resumen, el diseño final (Figura 22) aprobado incorpora materiales accesibles y resistentes, soluciones constructivas sencillas pero eficaces, y una integración eficiente de componentes electrónicos y comerciales, alineando la funcionalidad del banco de pruebas con los objetivos científicos y las limitaciones de recursos del proyecto.



**Figura 22 Máquina completa**

#### **4.1.1. Bastidor estructural y base motriz**

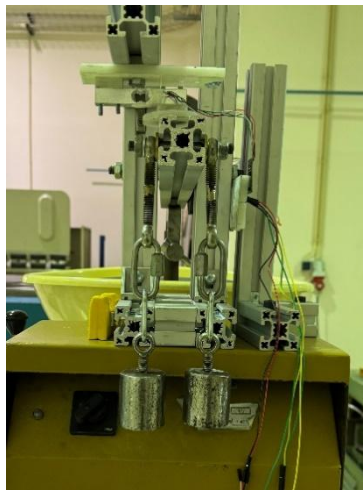
El marco del banco de pruebas se hizo usando perfiles de aluminio extruido de tipo industrial, elegidos por su alta relación entre rigidez y peso y su facilidad para ser mecanizados. No solo fue más sencillo ensamblar modularmente los diferentes subsistemas con esta decisión, sino que también se hicieron factibles adaptaciones o expansiones futuras. Para crear una plataforma estable para los componentes móviles y de medición, la base motriz utiliza la estructura original de la pulidora metalográfica, que se ha reforzado para soportar el peso adicional.

#### **4.1.2. Sistema de desplazamiento**

El sistema de desplazamiento del porta-probeta se instaló con tornillos de cabeza en T para perfiles de aluminio ranurados, instaladas sobre soportes de aluminio ajustados a tolerancias ISO 286. Estos tornillos de cabeza en T aseguran un movimiento rectilíneo, minimizando desviaciones y fricción indeseada. El diseño tiene una condición fundamental para la confiabilidad de los ensayos tribológicos.

#### 4.1.3. Separación mecánica de fuerzas: fundamentos, montaje y comprobación metrológica

Como se observa en la Figura 23 (sistema de contrapesos) la aplicación de carga normal en el tribómetro se fundamenta en la utilización de contrapesos calibrados que cuelgan de la parte posterior del porta-probeta y están unidos a través de un mecanismo rígido, lo cual garantiza una transferencia directa y constante de la fuerza sobre la muestra. Esta configuración se utiliza para asegurar que la carga normal sea estable, fácilmente reproducible y ajustable con exactitud dentro del rango necesario para las pruebas tribológicas.



**Figura 23 Sistema de aplicación de contrapesos**

También, se explica de manera metrológica y mecánica cómo el tribómetro lleva a cabo la separación física entre la fuerza normal (vertical,  $F_N$ ) y la fuerza tangencial o de fricción (horizontal,  $F_T$ ), garantizando que las medidas sean independientes, que los acoplamientos se reduzcan al mínimo y que sea posible calcular el coeficiente de fricción  $\mu$  con incertidumbres cuantificadas.

El sistema se organiza en dos rutas de transmisión de fuerza diferenciadas: La primera ruta es la Fuerza Vertical (carga normal), donde la masa calibrada (peso muerto)  $m$  cuelga y transmite la fuerza vertical  $F_N = mg$  directamente al soporte del porta-probeta; dicha carga atraviesa una celda de carga orientada verticalmente, anclada rígidamente entre el elemento de transferencia y el porta-probeta como se ve en la Figura 21.

La segunda ruta es la Fuerza Horizontal (fuerza de fricción), se da cuando la probeta se desliza sobre el disco giratorio y aparece una fuerza tangencial  $F_T$  que se transmite a través del porta-probeta hacia una celda de carga orientada horizontalmente como se ve

en la Figura 20. Esta celda está situada en la dirección paralela al movimiento del disco y acoplada al bastidor mediante adaptadores mecanizados.

Se eligieron las celdas de tal manera que la ruta horizontal y la vertical estén casi perpendiculares, utilizando elementos de conexión rígidos que disminuyan los desplazamientos parasitarios (por ejemplo, tornillos T con gran rigidez y adaptadores mecanizados en acero). La instrumentación (módulos Arduino Mega y HX711) convierte ambas señales a formato digital en tiempo real. Para que el sistema sea ideal, la celda de carga horizontal debería solamente medir la fuerza tangencial de fricción  $F_T$ . No obstante, si el porta-probeta presenta cualquier desalineación angular con respecto al plano horizontal, se añade una componente espuria de la fuerza normal  $F_N$  a la lectura tangencial. Se puede modelar de manera simplificada este fenómeno, llamado cross-talk(12), como:

$$F_{T,inducida} = F_N \cdot \tan(\theta) \quad (12)$$

Si se define un límite superior de error relativo  $\epsilon$  (por ejemplo,  $\epsilon = 0,01$  para restringir el acoplamiento a menos del 1 %, la condición de alineación mecánica es:

$$\theta \leq \arctan(\epsilon)$$

En el caso de  $\epsilon=0,01$ , el límite es  $\theta \leq 0,573^\circ$ . Para verificar esta condición bajo carga máxima, se analizó la deformación del brazo porta-probeta (dimensionado en 3.3):

**Flecha máxima (13) (viga voladizo,  $F=33.52$  N):**

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{33,52 \times 0,5^3}{3 \times 70 \times 10^9 \times 10,67 \times 10^{-8}} = 0,18mm \quad (13)$$

Donde:

F= Darga máxima experimental

L= Longitud brazo porta-probeta

E= Módulo Young aluminio anodizado  $\rightarrow$  “70GPa”

I= Momento inercia 40×40 mm  $\rightarrow$  “10.67  $\times 10^{-8}m^4$ ”

**Ángulo giro (14):**

$$\theta \approx \frac{\delta}{L} = \frac{0,18}{500} = 0,02^\circ \ll 0,6^\circ \quad (14)$$

### **Análisis dinámico (frecuencia natural y vibraciones):**

La primera frecuencia natural (15) del brazo+porta-probeta se estima con modelo masa-resorte

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{mL^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 \times 70 \times 10^9 \times 10,67 \times 10^{-8}}{0,05 \times 0,5^3}} = 28,4 \text{ Hz} \quad (15)$$

donde:

m = Masa concentrada al extremo → “0.05kg”

### **Frecuencia excitación:**

Disco = 1,667 rps = 1,67 Hz

### **Relación:**

$$\frac{f_n}{f_{ex}} = \frac{28,4}{1,67} = 17 \rightarrow \text{no resonancia}$$

### **Conclusión:**

$$\theta_{total} = 0,02^\circ + \beta < 0,6^\circ \rightarrow \text{FN no contamina FT } (< 0,6\% \text{ error})$$

Para verificar que la condición de inclinación angular  $\theta \leq 0,6^\circ$  se cumple en el rango de cargas empleado en este estudio, se estimó la deformación del brazo porta-probeta mediante un modelo de viga en voladizo sometida a una carga puntual en el extremo. Para el perfil de aluminio anodizado 40×40 mm y una longitud de 0.5 m, la flecha calculada bajo la fuerza máxima utilizada de 33.52 N es del orden de 0.18mm, lo que corresponde a un ángulo de giro aproximado de  $\theta \approx 0,02^\circ$ , claramente inferior al límite de  $0,6^\circ$ . De este modo, la componente de FN proyectada en la dirección horizontal se mantiene despreciable frente a la fuerza de fricción medida, dentro de las condiciones de operación consideradas. Para cargas superiores a este valor, sería necesario repetir el análisis de deformación y vibraciones para comprobar que la hipótesis  $\theta \leq 0,6^\circ$  sigue siendo válida.

### Modelo estático de equilibrio y determinación del coeficiente de fricción

El sistema de medición se fundamenta en el equilibrio de fuerzas en el punto de contacto. Las lecturas crudas de las celdas de carga se transforman en fuerzas por medio de la calibración que se ha detallado antes. Simplificando, se obtiene lo siguiente en términos de las masas equivalentes  $m_{vertical}$  para ello se usa la ecuación (16) y  $m_{horizontal}$  para ello se usa la ecuación (17) que registran las celdas:

$$F_N(t) = m_{vertical}(t) \cdot g \quad (16)$$

$$F_T(t) = m_{horizontal}(t) \cdot g \quad (17)$$

Donde  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad. En la práctica, las lecturas se obtienen en gramos y se convierten a Newtons mediante:

$$F[N] = \frac{\text{lecturas}(g)}{1000} * 9,81$$

La disposición ortogonal de los sensores y la estructura rígida de los adaptadores aseguran que ambos componentes se separen mecánicamente, lo que posibilita que cada celda registre fundamentalmente la magnitud para la cual fue diseñada. El coeficiente de fricción se determina con estas lecturas:

El coeficiente de fricción instantáneo (1) se calcula como:

$$\mu(t) = \frac{F_T(t)}{F_N(t)}$$

Esta fórmula permite evaluar la fricción en función del tiempo y analizar la estabilidad del contacto bajo diferentes cargas normales y condiciones de ensayo.

La relación entre  $F_N$  y  $F_T$  no son únicamente una división matemática porque representan el procedimiento de fricción en el sistema de contacto. La variación en  $F_N$  se garantiza mediante el control de contrapesos. La respuesta del material, y no las alteraciones en la carga aplicada, es lo que fundamentalmente determina  $\mu$ . Así, la determinación del coeficiente de fricción a través de la experimentación combina la precisión en la separación de fuerzas con la solidez en la captura de señales. (Aguilar, et al., 2015)

### Calibración y validación metrológica

Se utilizó un método de validación y calibración para asegurar que las medidas sean trazables (consultar el Anexo 1: Manual de calibración). Este procedimiento incluye.

Fuerza normal ( $F_N$ ): aplicación de masas patrón de 0,5–5 kg directamente sobre el portaprobeta, registrando la respuesta de la celda vertical.

Fuerza tangencial ( $F_T$ ): aplicación de cargas tangenciales mediante masas suspendidas con cordel y polea de baja fricción, o alternativamente mediante dinamómetro.

La relación entre las lecturas crudas y las fuerzas se ajusta a modelos lineales (18) independientes:

$$F_N = a_V \cdot (V - V_0) + b_V, \quad F_T = a_H \cdot (H - H_0) + b_H \quad (18)$$

donde V, H son las lecturas de cada sensor,  $V_0, H_0$  los valores de tara y  $a_V, b_V, a_H, b_H$  los coeficientes de calibración obtenidos por regresión.

La confiabilidad y la exactitud del sistema de medición están garantizadas gracias a los criterios de aceptación establecidos. Cuando el coeficiente de determinación es mayor que 0,999, la histéresis es menor o igual al  $\pm 1\%$  de la escala total, la repetibilidad está por debajo del  $\pm 0,3\%$  y después de diez minutos de estabilización la deriva es inferior al 1%, se garantiza que el sistema tiene una respuesta estable y lineal. Por lo tanto, estos resultados demuestran que las lecturas obtenidas son fiables para el análisis de los datos experimentales y para determinar el coeficiente de fricción (Ahmad, 2006).

#### 4.1.4. Sistema de adquisición de datos y control

El prototipo diseñado incluye un sistema de adquisición de datos que se basa en sensores de fuerza, acondicionadores electrónicos y una unidad programable para la adquisición. Este sistema tiene como meta registrar en tiempo real la fuerza de fricción (FT) y la magnitud de carga normal (FN) que se producen durante el contacto entre el disco y la probeta, asegurando así que los datos sean trazables para calcular el coeficiente de fricción. Debido a que estas celdas operan en el rango de mV/V, necesitan ser acondicionadas antes de digitalizarlas (Hrisko, 2019).

Se llevó a cabo el acondicionamiento utilizando módulos HX711, que han sido creados específicamente para aplicaciones con celdas de carga e incluyen un ADC (convertidor

analógico-digital) de 24 bits cuya función es aumentar las señales pequeñas generadas por las galgas extensiométricas de las celdas de carga y un amplificador de instrumentación. Se configuró cada HX711 en modo de alta velocidad, lo que posibilita una tasa de adquisición de 100 muestras por segundo. Esto es suficiente para registrar cambios veloces del contacto tribológico sin que se pierda información importante y así adquiriendo datos a través de los sensores en posición Vertical y Horizontal con rapidez, exactitud y confiabilidad (Hrisko, 2019)

Una placa Arduino Mega 2560, programada en un software específico (Arduino IDE), es la encargada de leer las señales digitalizadas (Se puede ver la configuración empleada en el Arduino Mega en el Anexo 2), este sistema posibilita la obtención de mediciones ininterrumpidas y concurrentes durante todo el proceso del ensayo, lo que resulta fundamental para identificar coeficientes de fricción instantáneos, detectar picos en la carga y estudiar transitorios dinámicos. El Arduino desempeña los roles de:

- A. Obtención simultánea de la información generada por las dos celdas de carga.
- B. Compensación de tara, que fija el valor cero antes de cada experimento como referencia.
- C. Envío y registro de pares de datos ( $FN$ ,  $FT$ ) a un ordenador en tiempo real por medio de un puerto serie.

Las señales dadas por la FN y FT generan datos, estos datos se almacenan en archivos de texto o planillas electrónicas en la computadora y luego se analizan en tiempo real por medio de Python, lo que posibilita su procesamiento posterior para ser graficados y examinados con Power BI.

El coeficiente de fricción (1) se obtiene a partir de la relación en un momento dado:

$$\mu(t) = \frac{FT(t)}{FN(t)}$$

La detección de variaciones de fuerza del orden de milésimas de Newton es posible gracias a la resolución efectiva del sistema, proporcionada por el conversor de 24 bits. Sin embargo, en la práctica esto depende del nivel de ruido eléctrico y las vibraciones mecánicas del sistema (Hrisko, 2019). Para atenuar estos efectos, se estableció un protocolo de calibración y ensayos de repetibilidad, el cual se detalla en el capítulo V.

En resumen, el sistema de adquisición está compuesto por sensores mecánicos (celdas de carga), electrónica de acondicionamiento (HX711) y procesamiento digital (Arduino Mega). Esto hace posible la captura sincronizada y fiable de las señales relevantes para validar experimentalmente el equipo.

### **Tratamiento del ruido en la adquisición de datos**

Es común, identificar ruido eléctrico (característico de los módulos HX711 y del entorno de medición) y ruido mecánico (vibraciones del sistema y pequeñas holguras en el ensamblaje). Estos sensores poseen una sensibilidad elevada, que suele ser de 2.0 mV/V, y pueden medir fuerzas que oscilan entre 1 N y 50 N, con una exactitud y repetibilidad por debajo del 0,5% del rango superior. El módulo HX711, que se asocia con las celdas, actúa como un convertidor analógico-digital de 24 bits y amplificador. Tiene tasas de muestreo ajustables a 10 o 80 Hz, lo cual posibilita registrar señales de fuerza con una resolución elevada y disminuir el ruido propio del sistema. (Moreno & Campos, 2007). Con el fin de asegurar señales estables y fiables, se emplearon métodos para el tratamiento del ruido, entre los que se encuentran: la puesta a tierra apropiada de los cables, la calibración estática con cargas conocidas para comprobar la linealidad y suprimir lecturas espurias y un promediado digital por medio de filtrado por ventana móvil en Arduino. Para el análisis minucioso de los coeficientes de fricción y desgaste en los materiales probados, es esencial contar con una adquisición precisa y en tiempo real de las fuerzas ejercidas en el tribómetro, lo cual se logra gracias a estas propiedades técnicas y al uso del módulo HX711 (Rodríguez & Gutierrez, 2022).

El filtrado por ventana móvil es una técnica de procesamiento de señales que permite suavizar datos ruidosos mediante el cálculo del promedio de un número fijo de muestras consecutivas, avanzando esta ventana a lo largo del conjunto de datos. Este método es efectivo para atenuar las fluctuaciones de alta frecuencia sin distorsionar significativamente la forma o tendencia general de la señal. La elección de los parámetros de la ventana móvil, principalmente su tamaño, se basa en un compromiso entre la reducción del ruido y la preservación de las características dinámicas importantes de la señal. Una ventana demasiado pequeña puede no reducir efectivamente el ruido, mientras que una ventana excesivamente grande puede suavizar en exceso y perder detalles relevantes o retardar la respuesta del sistema (Gil Gómez, 2012).

Se eligió el tamaño de la ventana equilibrando dos factores: la necesidad de reducir con eficacia el ruido de alta frecuencia y conservar la sensibilidad para identificar cambios verdaderos en la fuerza durante las pruebas. Por esta razón, se seleccionó un tamaño de ventana que contenga entre 5 y 10 muestras, tomando en cuenta que la frecuencia de muestreo del HX711 es de 100 Hz; esto significa que la ventana abarca entre 60 y 125 milisegundos. Esta duración es lo suficientemente corta para no afectar la dinámica del proceso, pero permite suavizar las oscilaciones no deseadas. Así, el algoritmo implementado hace uso de un buffer circular para guardar de manera efectiva estos datos temporales, sumando y restando valores de la ventana a medida que progresa, lo que permite calcular el valor medio con rapidez y bajo consumo de recursos computacionales. Esta es una herramienta perfecta para microcontroladores como Arduino. Por lo tanto, el resultado es una señal digitalmente filtrada que muestra con fidelidad el comportamiento tribológico real, lo cual optimiza la exactitud al medir el coeficiente de fricción y desgaste.

#### **4.1.5. Superficie abrasiva para el contacto con la probeta**

El contracuerpo que se empleó en los ensayos tribológicos fue una superficie abrasiva compuesta por papel de lija, el cual estaba fijado al disco rotatorio del equipo. Se eligió un abrasivo de óxido de aluminio con una granulometría de grano 120 (ANSI/FEPA P120), que tiene un diámetro 260 mm, cortado y pegado a la superficie del disco con un adhesivo de contacto que es uniforme. Esta configuración garantiza la planicidad a lo largo de la rotación y previene que el recubrimiento se desplace de manera relativa durante el ensayo (Enkovaara, 2023). La selección de este tipo de abrasivo obedece a pautas de control y reproducibilidad de las condiciones de fricción. El grano 120 ofrece una rugosidad media, apropiada para producir un desgaste que puede ser medido bajo condiciones controladas, sin causar cortes excesivos ni fallos prematuros en las probetas. Además, se eligió una lija con un tamaño de grano de 120, ya que representa un equilibrio apropiado entre la agresividad del corte y la estabilidad en los ensayos. Este tamaño de grano, además de asegurar una rugosidad controlada y reproducible en la superficie de contacto, hace posible que se produzca el desgaste necesario para su cuantificación sin que ocurran fallas prematuras en la probeta. La elección del grano 120 se debe, a su empleo habitual en investigaciones tribológicas normalizadas, que posibilita la comparación de los resultados con la bibliografía, a su disponibilidad comercial, que hace posible reemplazar periódicamente la superficie abrasiva en condiciones similares.

#### 4.1.6. Elementos de sujeción y soporte de la probeta

El porta-probeta, el cual se utilizó en el tribómetro, fue hecho de acero AISI 1045. Se eligió este material por su equilibrada combinación de tenacidad, maquinabilidad adecuada y resistencia mecánica. Esto le otorga estabilidad estructural y durabilidad ante cargas repetidas en los experimentos tribológicos. Esta clase de acero es apta para elementos que necesitan sostener alineamientos críticos y resistir tensiones mecánicas de intensidad media, ya que presenta una dureza Brinell en el rango de 170 a 210 HB y una resistencia a la tracción habitual entre 570 y 700 MPa (Garzón Torres, Bohórquez Avila, Enrique Hernandez, & Rojas Molano, 2016).

El porta-probeta (Figura 24), fabricado en acero AISI 1045 con sistema de fijación rápida por tornillo, asegura la muestra con precisión facilitando su montaje y desmontaje en ensayos tribológicos tipo pin-on-disk. El diseño incorpora un sistema que fija la probeta firmemente en su alojamiento sin impedir su libre rotación alrededor del eje, evitando fricciones adicionales que afectarían la medición genuina de desgaste y fricción. La imagen muestra los elementos de sujeción que garantizan alineación vertical y estabilidad mecánica, a la vez que permiten el giro libre de la probeta bajo la acción del disco rotatorio.



**Figura 24 Porta probeta**

La fijación del brazo al bastidor de la pulidora se definió considerando carga máxima (33.52 N), estabilidad vibracional y facilidad de montaje: se calcularon momentos en unión para seleccionar 4 tornillos M8 clase 8.8 (FS corte=15), se verificó nivelación con nivel de burbuja magnético ( $\pm 0.05^\circ$ ), se probó equilibrio con carga incremental hasta 50

N (desviación  $<0.1$  mm), y se instalaron 4 amortiguadores neopreno que atenúan  $>80\%$  las vibraciones (10-50 Hz). Esta solución asegura que el brazo mantenga  $\theta < 0.6^\circ$  bajo carga dinámica.

El porta-probeta tiene un diseño mecánico que se muestra claramente en la imagen. Este incluye un sistema de sujeción que emplea un tornillo de fijación con cabeza cilíndrica y un pequeño perno para mantener el pin o probeta en su lugar, lo que permite una adaptación rápida, fuerte y ergonómica. La tolerancia utilizada en la manufactura es H7, que asegura un alojamiento exacto y sellado para la probeta, disminuyendo las holguras y las desviaciones angulares que podrían comprometer la reproducibilidad de la medición dinámica de fuerzas. El sistema de fijación posibilita una rápida instalación y extracción de distintas probetas, sin requerir herramientas específicas. Esto facilita el cambio y la preparación entre ensayos, lo cual mejora la eficiencia operativa y reduce los errores asociados al montaje manual frecuente. Asimismo, el diseño garantiza que el porta-probeta sea accesible para limpiarlo entre ensayos, lo cual asegura la calidad y la seguridad del proceso experimental. El porta-probeta, en conjunto, es un elemento esencial del banco de pruebas que ayuda significativamente a la exactitud, funcionalidad y resistencia del sistema tribológico diseñado.

#### **4.1.7. Integración de componentes comerciales**

Al diseñar y construir el tribómetro, se decidió optar por elegir, cuando fuera posible, principalmente componentes estándar de comercio. Con el objetivo de acelerar la compra de piezas de repuesto, simplificar el mantenimiento y garantizar que el equipo sea reproducible y confiable, se incorporaron celdas de carga, componentes auxiliares, motores, módulos electrónicos y sistemas de guías lineales. Esta estrategia posibilita que se cuente con soluciones técnicas optimizadas y verificadas, lo cual disminuye los tiempos y costos de desarrollo (Ortiz Armenta, Vera Cárdenas, Abundis Fong, & Martínez Pérez, 2021).

La elección de estos componentes comerciales se fundamentó, sobre todo, en la relación costo-beneficio (que optimiza la rentabilidad económica del proyecto), en la posibilidad de conseguirlos localmente para evitar tiempos prolongados de importación y en su compatibilidad funcional con los requerimientos de diseño. Como ejemplo, los módulos HX711 y las celdas de carga que se emplean pertenecen a marcas y modelos que cuentan con una extensa documentación técnica accesible, lo cual simplifica la integración

electrónica y la calibración exacta dentro del sistema de adquisición de datos. (Ortiz Armenta, Vera Cárdenas, Abundis Fong, & Martínez Pérez, 2021)

Esta perspectiva híbrida de diseño, que mezcla elementos creados específicamente para el prototipo con componentes comerciales elegidos estratégicamente, permite optimizar el sistema en su totalidad al reducir riesgos técnicos y financieros y propiciar un desarrollo rápido, adaptable y fiable del tribómetro.

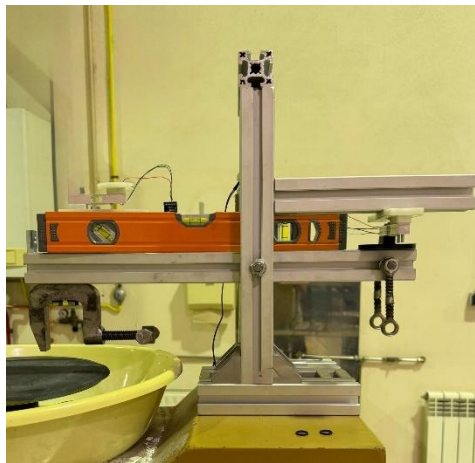
Cada elemento de la Tabla 15 fue elegido en función de su funcionalidad, su compatibilidad con el resto del sistema, su disponibilidad en distribuidores locales y la optimización de la relación costo-beneficio, asegurando así un mantenimiento sencillo y accesible para usuarios del laboratorio.

**Tabla 15 Tabla comparativa de los principales componentes comerciales**

<b>Componente</b>	<b>Función principal</b>	<b>Modelo/Tipo</b>	<b>Justificación de selección</b>	<b>Ventajas técnicas y operativas</b>
Celda de carga	Medición de fuerzas normal y tangencial	10 kg, galga extensiométrica	Compatible con módulos HX711, amplia disponibilidad, bajo costo	Precisión, facilidad de calibración, repuestos locales
Módulo HX711	Convertor analógico-digital	HX711 estándar	Integración directa con Arduino, bajo ruido, soporte comunitario	Alta resolución, bajo costo
Motor eléctrico	Movimiento del disco	Motor DC/AC comercial	Disponibilidad local, soporte técnico, fácil reemplazo	Ajuste de velocidad, mantenimiento sencillo
Tornillos de cabeza en T	Movimiento y soporte del sistema móvil		Certificación industrial, 79acilidad accesibles	Deslizamiento suave, menor desgaste
Perfil estructural de aluminio	Bastidor y soporte	Perfil Bosch 45 × 45 mm or 45 × 90 mm	Ensamble sencillo, modularidad, sin necesidad de soldadura	Rigidez, 79acilidad, ajuste flexible
Componentes electrónicos	Control y adquisición de datos	Arduino Mega, cables, conectores	Plataforma abierta, bajo costo, amplia documentación	Modularidad, 79acilidade de integración

#### 4.1.8. Sistema de peso muerto

Se calculó el peso muerto aplicado en el tribómetro usando un método de equilibrio estático del brazo porta-probeta, que se mueve como un péndulo rígido en torno a su punto de apoyo (Figura 25). Primero se instaló el porta-probeta en su lugar final con el brazo tribológico. Con el fin de asegurar la adecuada alineación geométrica, se empleó un inclinómetro digital; el brazo se ajustó hasta conseguir una orientación vertical dentro de tolerancias mínimas ( $\theta$  es aproximadamente igual a cero). Para disminuir el error angular y garantizar que la fuerza transmitida solo correspondiera a la componente normal, este paso resultó ser fundamental.



**Figura 25 Brazo en equilibrio**

Después, se utilizaron masas calibradas como peso muerto en el extremo del brazo. La celda de carga vertical, que registraba la carga normal aplicada en tiempo real, fue utilizada para comprobar la magnitud de la fuerza transmitida al contacto. La condición de referencia fue el balance estático del sistema, o sea, el momento en que el brazo se mantenía estable y alineado con la lectura de cero grados en el inclinómetro.

En términos mecánicos, el procedimiento se basa en la condición:

$$M_{\text{peso}} = M_{\text{brazo}} + M_{\text{porta-probeta}}$$

donde el momento generado por el peso muerto  $M_{\text{peso}} = W.L$  (fuerza peso  $W=mg$  multiplicada por el brazo de palanca  $L$ ) compensa los momentos gravitatorios propios del

brazo tribológico y del porta-probeta. El equilibrio se alcanza cuando la suma de momentos (19) alrededor del punto de apoyo es nula:

$$\sum M = 0 \rightarrow W * L = (m_{brazo}g * L_{eg}) + (m_{porta}g * L_{porta}) \quad (19)$$

Donde  $L_{eg}$  y  $L_{porta}$  son las distancias al centro de gravedad del brazo y del porta-probeta, respectivamente.

Así, el peso muerto requerido para llegar al equilibrio se estableció de forma práctica con la celda de carga vertical, que ofrece la medida directa de  $F_N$ . De esta manera, no fue imprescindible calcular analíticamente las masas y los momentos de cada elemento, porque el proceso experimental con la celda de carga e inclinómetro posibilitó una regulación exacta de la carga normal que se aplica al contacto. Este método fue dimensionado específicamente para garantizar que el brazo de sujeción (porta-probeta) mantuviera una inclinación de cero grados, asegurando la alineación horizontal del contacto y la máxima fidelidad en la aplicación de la carga normal. Para garantizar que el porta-probeta se mantuviera completamente horizontal durante todo el ensayo, la geometría del brazo de aplicación fue considerada para dimensionar el sistema. El extremo de trabajo del brazo (en el que se instala el porta-probeta) fue calibrado hasta que llegó a un ángulo de inclinación de  $0^\circ$ , con lo cual se previnieron desviaciones que podrían provocar errores en la distribución de carga o en la alineación del contacto tribológico. La utilización de un sensor de carga vertical y la verificación con inclinómetros digitales hicieron posible este ajuste, el cual logró establecer el valor óptimo del contrapeso para alcanzar la horizontalidad necesaria.

## 4.2. Determinación de la tasa de desgaste

La tasa de desgaste fue determinada al comparar el estado de las muestras antes y después de realizar los ensayos. Para determinar su masa inicial, cada muestra fue limpiada y pesada con una balanza analítica al principio. Después del ensayo, se volvió a realizar el procedimiento de limpieza y pesaje, lo que posibilitó la determinación de la pérdida de masa ( $\Delta m$ ). Utilizando este valor y la densidad del material, obtenida de valores estándar para acero inoxidable AISI 304 ( $\rho=8.00\text{g/cm}^3$ ) y nylon 6 ( $\rho=1.14\text{g/cm}^3$ ) reportados en literatura técnica (Ortiz Armenta, Vera Cárdenas, Abundis Fong, & Martínez Pérez, 2021), se calculó el volumen desgastado. Por último, la tasa de desgaste específica se calculó, tomando en cuenta la carga normal aplicada y la distancia total de deslizamiento,

## Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

utilizando la relación clásica de Archard expresada como  $k=V/(FN \cdot s)$ . Gracias a este método, se logró medir de manera reproducible el grado de desgaste en base a las condiciones operativas y de carga del prototipo.

La tasa de desgaste(20) se la calcula de la siguiente manera:

$$k = \frac{V}{(F_N L)} \quad [m^3/(N \cdot m)] \quad (20)$$

Esta expresión aparece en la literatura como coeficiente o constante de desgaste en la ley de Archard (20)

$$V = k F_N L$$

donde:

V es el volumen perdido y se obtiene a partir de la variación de la masa y la densidad.

L es la distancia de deslizamiento, para los ensayos pin-on-disk es igual a  $s=2\pi r \cdot N_{rev}$ .

Con el fin de medir el desgaste en los experimentos tribológicos, se utilizó balanza analítica ( $\pm 0.1$  mg) para determinar la pérdida de masa ( $\Delta m$ ) de las probetas antes/después de cada ensayo. La densidad se obtuvo de fichas técnicas certificadas (AISI 304 = 8.00 g/cm<sup>3</sup>, nylon 6 = 1.14 g/cm<sup>3</sup>) (ASM International Handbook Committee, 1990), validada pesando 3 probetas/material (desviación <0.3%), transformando  $\Delta m$  en volumen desgastado con precisión metrológica. La celda de carga se calibró según Manual de Calibración (Anexo 1), asegurando análisis integral y reproducible de desgaste y fricción. (ASM International Handbook Committee, 1990)

## 5. Resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales hechos con el tribómetro diseñado para analizar las propiedades tribológicas de dos materiales, acero de construcción y un polímero tipo nylon, se muestran en este segmento. Los ensayos se realizaron con cargas de 9,77 N – 15,51 N – 33,52 N bajo condiciones controladas. Se empleó una velocidad de rotación constante del disco de 1.667rps, perímetro lineal del disco depende del radio de contacto de la pieza hasta el punto central (tabla 16). Los parámetros utilizados fueron acordados y sugeridos en la literatura y en normas internacionales como ASTM G99 (ASTM International, 2017) y ASTM G132-96 (ASTM International, 1996).

Se cambió el disco abrasivo cada vez que se finalizaba un conjunto de ensayos con una probeta idéntica, con la intención de que la superficie de contacto permaneciera en condiciones equivalentes a las iniciales. Esta práctica asegura que los resultados conseguidos sean la respuesta tribológica de los materiales en análisis, y no modificaciones en el estado de la lija.

Conforme a la metodología establecida, se vuelven a calcular los parámetros cinemáticos (el perímetro de contacto y la velocidad lineal) para cada ensayo, tomando en cuenta el radio adaptado para cada situación como se aprecia en la Tabla 16. De esta manera, aseguramos que haya coherencia experimental y control sobre las variables críticas del comportamiento tribológico de nylon y acero.

**Tabla 16 Parámetros de ensayo**

<b>Material</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Radio (mm)</b>	<b>Velocidad por vuelta (mm/s)</b>	<b>Perímetro lineal de la circunferencia (mm)</b>
<b>Acero</b>	12	49	516,3	307,8
		65	684,9	408,4
<b>Nylon</b>	20	45	471,3	282,7
		63	659,8	395,8

La diferencia de diámetros entre las muestras de nylon (20 mm) y acero (12 mm) se debe a principios de diseño experimental basados en la optimización de recursos y en la

flexibilidad estructural del tribómetro. El sistema es capaz de ajustar el punto de contacto entre la probeta y el disco, alterando el radio y, por ende, el diámetro efectivo del recorrido de desgaste, según lo que se requiera para el ensayo y el material que se esté analizando. La elección de un diámetro de 20 mm para el nylon y 12 mm para el acero se debe a la disponibilidad de materiales en el laboratorio y a la rigidez y estabilidad requeridas por cada muestra para resistir las cargas y reducir al mínimo las deformaciones. Al diferenciar geométricamente, es posible que la presión de contacto y el área tribológica se ajusten, lo cual hace que los experimentos sean comparables y representativos para los dos materiales bajo las mismas condiciones de carga aplicada y velocidad tangencial. Asimismo, desde una perspectiva operativa, cambiar el radio de contacto es beneficioso porque minimiza la frecuencia con que se cambia la lija y posibilita un mejor aprovechamiento de la superficie abrasiva del disco. Esto reduce tanto el tiempo utilizado en las operaciones de reconfiguración como el consumo de material.

La selección de estos parámetros operativos se basa en la necesidad de valorar el rendimiento del prototipo en rangos habituales de aplicación para dispositivos tribológicos tecnológicos y académicos, y posibilita la comparación entre el comportamiento de un material metálico y uno polímero bajo circunstancias parecidas. Los ensayos tienen como objetivo establecer variables fundamentales, entre ellas la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción bajo condiciones dinámicas y estáticas, así como las transformaciones en la morfología superficial tras un contacto que se extiende (Giraldo J. , 2019). Las fuerzas de fricción y la fuerza normal se monitorearon en tiempo real durante las pruebas, a través de la instrumentación incorporada, asegurando así la veracidad y precisión de los datos obtenidos. Con el propósito de reducir cambios externos que podrían impactar los resultados, las condiciones ambientales se conservan estables con una humedad relativa cercana al 50 % y una temperatura ambiente de aproximadamente 23 °C (Vargas & Rodríguez, 2020).

La sección siguiente describe en detalle la presentación, el análisis y el debate de los resultados alcanzados, utilizando tablas y soportes gráficos que ayudan a entender los fenómenos tribológicos observados y su relación con los parámetros experimentales establecidos.

### 5.1. Presentación de datos

Se presentan los datos experimentales adquiridos durante las pruebas tribológicas, dispuestos en gráficos y tablas que permiten su comparación entre los materiales evaluados: nylon técnico y acero de construcción con la superficie de acero con recubrimiento abrasivo tipo papel de lija grano 120.

Las tablas a continuación fueron elaboradas utilizando las expresiones matemáticas aplicadas sobre los datos experimentales recogidos durante los ensayos. Dichas fórmulas matemáticas facilitan se encuentran en la Tabla 17 la comprensión y validación de los cálculos en las siguientes tablas.

**Tabla 17 Conversión y cálculos para resultados**

Magnitud	Ecuación	Definición de variables
Fuerza normal	$F_N = \frac{\text{med} [\text{Vertical}]}{1000} \times 9,81$	$F_N$ : fuerza normal (N) med[Vertical]: lectura de celda vertical (g)
Fuerza tangencial	$F_T = \frac{\text{med} [\text{Horizontal}]}{1000} \times 9,81$	$F_T$ : fuerza tangencial (N) med[Horizontal]: lectura de celda horizontal (g)
Coefficiente de fricción instantáneo	$\mu(t) = \frac{F_T(t)}{F_N(t)}$	$\mu$ : coeficiente de fricción $F_T$ : fuerza tangencial $F_N$ : fuerza normal
Coefficiente de fricción medio	$\mu(t) = \frac{\overline{F_T}}{\overline{F_N}}$	$\overline{F_T}$ : fuerza tangencial media $\overline{F_N}$ : fuerza normal media
Velocidad tangencial	$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot f$	v: velocidad (mm/s) r: radio (mm) f: frecuencia
Distancia recorrida	$L = v \cdot t \quad (21)$	L: distancia recorrida (mm) t: tiempo (s)
perímetro Lineal	$P = 2\pi r$	P: perímetro lineal
Análisis de toleración	$L = 2\pi r f t \quad (22)$	f=frecuencia de giro

Magnitud	Ecuación	Definición de variables
Potencia media	$\bar{P} = \bar{F}_T \cdot v$ (23)	$\bar{P}$ : potencia (W) $\bar{F}_T$ : fuerza tangencial media
Energía	$E = \bar{F}_T \cdot L$ (24)	E: energía (J), $\bar{F}_T$ : fuerza tangencial media
Desgaste gravimétrico	$\Delta m = m_i - m_f$ (25)	$\Delta m$ : pérdida de masa (gr) $m_i$ : masa inicial $m_f$ : masa final
Densidad experimental	$\rho_{exp} = \frac{\Delta m}{V_{geom}}$ (26)	$\rho_{exp}$ : densidad experimental $V_{geom}$ : volumen geométrico
Área de desgaste	$A = \pi \cdot r_c^2$ (27)	A: área [ $mm^2$ ] $r_c^2$ : radio de la huella [ $mm$ ]
Volumen geométrico	$V_{geom} = A \cdot (L_i - L_f)$ (28)	$V_{geom}$ : volumen de desgaste $L_i$ : longitud inicial $L_f$ : longitud final
Tasa de desgaste específica	$k = \frac{V}{F_N \cdot L}$	V: volumen de desgaste [ $mm^3$ ] $F_N$ : carga normal [N] L: distancia deslizamiento [m]
Tasa de desgaste respecto a la energía	$\frac{V}{E}$	V: volumen de desgaste [ $mm^3$ ] E= Energía dissipada [J]

## 5.2. Resultados y análisis para probetas metálicas (acero de construcción).

Los resultados que se han conseguido a partir de las pruebas con probetas metálicas de acero de construcción se muestran en esta sección. Como primer paso, se sintetiza la longitud de deslizamiento obtenida en cada ensayo, medida esencial para el cálculo posterior de las variables tribológicas relevantes. Los valores representativos que se han obtenido al calcular la distancia recorrida, así como los datos experimentales relacionados

con el comportamiento del material bajo las condiciones de carga y velocidad fijadas, son presentados en las siguientes Tabla 18.

**Tabla 18 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la primera probeta de acero**

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Radio efectivo	r	81mm	±0,02 mm	Calibrador digital (0,02 mm)
Perímetro lineal	P	509mm	-	Calculo manual
Frecuencia	f	1,667rps	±0,01 rev/s	Variación de motor controlado
Nº de revoluciones	N	3911	±1 rev	Calculo manual

Para calcular el tiempo necesario para recorrer la distancia de 2000 metros durante el ensayo con una fuerza de 33,52 N, se empleó la ecuación del "perímetro lineal" indicada en la Tabla 17. En la Tabla 18 se observan los valores de cada calculo, donde, el perímetro lineal es igual a 509 mm, se multiplicó por la frecuencia de giro por segundo, obteniendo así una distancia de avance de 848,5 mm para cada segundo de ensayo. Finalmente, la distancia objetivo de 2000 metros se dividió por 848,5 mm/s, lo que permitió obtener un tiempo de 2346 segundos para completar el trayecto experimental. Este cálculo asegura que los datos iniciales del ensayo sean precisos y consistentes para iniciar la prueba bajo las condiciones establecidas.

Todos estos datos calculados de la Tabla 19 han sido aplicadas las fórmulas expresadas en la Tabla 17.

**Tabla 19 Datos obtenidos para acero 33,52N (3421gr) – 2000m**

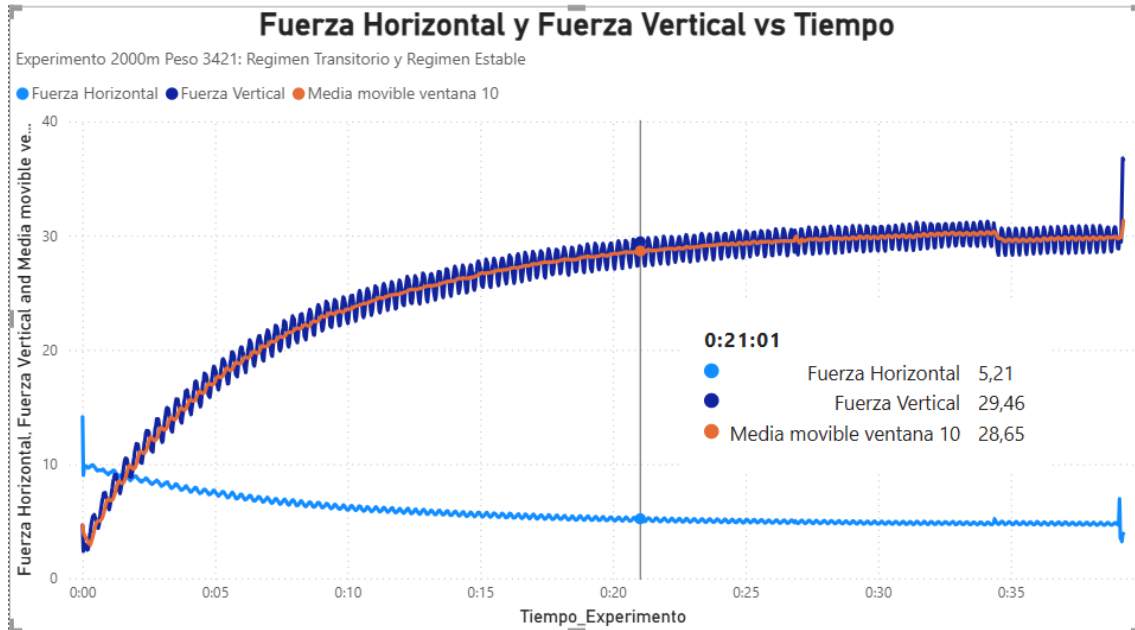
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Masa aplicada	m	3421	g
Radio de giro	r	81	mm

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Frecuencia de rotación	f	1,667	Rps
Tiempo total	t	2346	s
Distancia recorrida	L	2000	m
Masa inicial	$m_i$	71,39	g
Masa final	$m_f$	70,68	g
Pérdida de masa	$\Delta m$	0,71	g
Fuerza normal media	$\bar{F}_N$	29,46	N
Fuerza tangencial media	$\bar{F}_T$	5,21	N
Coefficiente de fricción	$\mu$	0,228	
Velocidad tangencial	v	848	mm/s
Potencia media de fricción	$\bar{P}$	4,92	W
Energía disipada	E	$1,154 \times 10^4$	J
Área de contacto	A	113	mm <sup>2</sup>
Volumen perdido	$V_{geom}$	( $\approx 169,6$ )	mm <sup>3</sup>
Densidad experimental	$\rho_{exp}$	$7,14 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Tasa de desgaste (distancia)	V/L	0,0853	mm <sup>3</sup> /m
Tasa de desgaste (energía)	V/E	0,0147	mm <sup>3</sup> /J

Los detalles encontrados durante el ensayo de 33,52N (3421gr) – 2000m: Dada la capacidad del calibrador se va a tener un error experimental alto de la densidad del material que se está desgastando, considerando un error del calibrador de  $\pm 0,02$ mm. El ensayo realizado con la probeta metálica bajo una carga de 3500 g y un recorrido de aproximadamente 2000 m mostró un coeficiente de fricción promedio de 0,228, estable a lo largo de la prueba. La pérdida de masa fue 0,71 g, correspondiente a un volumen de desgaste de 169,6 mm<sup>3</sup>. Con ello, la tasa de desgaste fue de 0,0853 mm<sup>3</sup>/m, lo que refleja un comportamiento típico de abrasión severa en aceros. La potencia media disipada por fricción fue 4,92 W y la energía total alcanzó  $1,154 \times 10^4$  J. La densidad experimental calculada ( $7,14 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>) es ligeramente inferior al valor teórico de aceros al carbono ( $7,7-7,9 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>). Esta diferencia puede atribuirse a la incertidumbre en la medición geométrica del volumen desgastado, asociada principalmente a la resolución del calibrador ( $\pm 0,02$  mm). No obstante, los resultados se mantienen dentro de un rango coherente con lo reportado en la literatura, lo que confirma la validez del montaje tribológico utilizado para cuantificar parámetros característicos del desgaste abrasivo en probetas metálicas.

En la Figura 26 se vio que la señal de la fuerza normal ( $FN$ ), impuesta a través de un sistema de contrapesos, no permaneció completamente estabilizado con el paso del tiempo. La oscilación en la lectura se debe a varios factores: primero, el giro del disco produce vibraciones que se transmiten al porta-probeta y a la celda vertical; segundo, el hecho de que el brazo pendular sea rígido, la rugosidad de las superficies provoca un mayor aumento de mayor fuerza normal hasta llegar a un punto de equilibrio. Además, se añade la gran sensibilidad de la celda de carga empleada (24 bits), que permite detectar incluso los movimientos microscópicos del montaje, así como el impacto del ruido eléctrico propio del sistema de adquisición HX711, el cual puede ser interferido por elementos externos. En suma, estos factores indican que las variaciones detectadas en  $FN$  no son causadas por alteraciones efectivas en la magnitud de la carga utilizada, sino por la combinación de perturbaciones electrónicas y microoscilaciones mecánicas propias del sistema de medición. Debido a la superficie de contacto en la que actúa el sensor, mayor superficie de contacto mayor fuerza normal

Las oscilaciones que se han detectado en la fuerza tangencial, a diferencia de la normal ( $FT$ ) tienen un origen físico que se vincula directamente con el procedimiento tribológico. Esto ocurre porque el coeficiente de fricción no es una constante invariable, sino una magnitud que cambia dependiendo de la rugosidad de las superficies en contacto, del deterioro gradual de los materiales y de la creación o ruptura de películas de transferencia. A lo largo del deslizamiento, ocurren transiciones abrasivas y adhesivas que conllevan la creación y posterior ruptura de microenlaces en la interfase. Esto se traduce en incrementos y descensos abruptos de la fuerza de fricción. Además, el ensayo presenta irregularidades adicionales a medida que avanza debido a la distribución no uniforme de las presiones de contacto entre el disco y la probeta. Por estas razones, las fluctuaciones en  $FT$  no son un error de medición, sino que muestran la respuesta efectiva del sistema en interacción y evidencian los mecanismos de fricción y desgaste propios del contacto.



**Figura 26 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical (33,52N (3421gr) – 2000m)**

**Fuente:** Elaborado por Power BI

Se observa en la Figura 27, la conducta dinámica del contacto tribológico desde el principio hasta el final de la prueba se muestra en la curva de la segunda figura. El coeficiente de fricción es más alto al comienzo porque hay un ajuste a nivel superficial, y también por la existencia de material abrasivo o irregularidades en el contacto. Durante los primeros momentos, la curva desciende con rapidez, lo que ilustra el periodo de rodaje en el que el material superficial de la probeta se adapta y el sistema elimina partículas sueltas y asperezas. Después, la curva se estabiliza alrededor de valores bajos (alrededor de 0,16), lo que define un régimen estacionario y simboliza una fricción controlada por las condiciones ordinarias de la superficie ya desgastada.

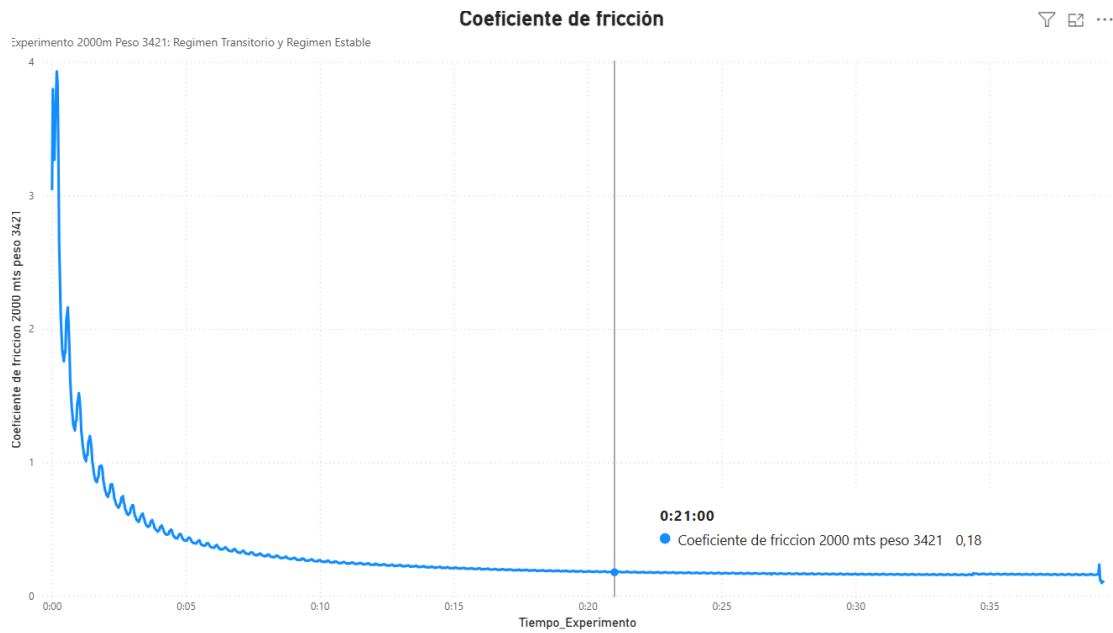
La Figura 27 muestra la evolución temporal de ese coeficiente bajo una fuerza aproximada de 33,52 N durante un recorrido de 2000 metros, mientras la Figura 28 presenta un histograma del coeficiente de fricción obtenido durante el ensayo.

La distribución de los valores medidos durante el ensayo se muestra a través del histograma del coeficiente de fricción (Figura 28). En torno a valores bajos, particularmente alrededor de 0,1-0,2 se puede apreciar una concentración importante de datos, lo que sugiere que el sistema funcionó la mayor parte del tiempo en un estado de fricción estable y baja. La escasa frecuencia de las barras en valores superiores, junto con

su presencia, indican que los picos de fricción son incidentales y probablemente están vinculados a transitorios iniciales o a sucesos específicos (por ejemplo, microdesprendimientos de material o rugosidad superficial remanente).

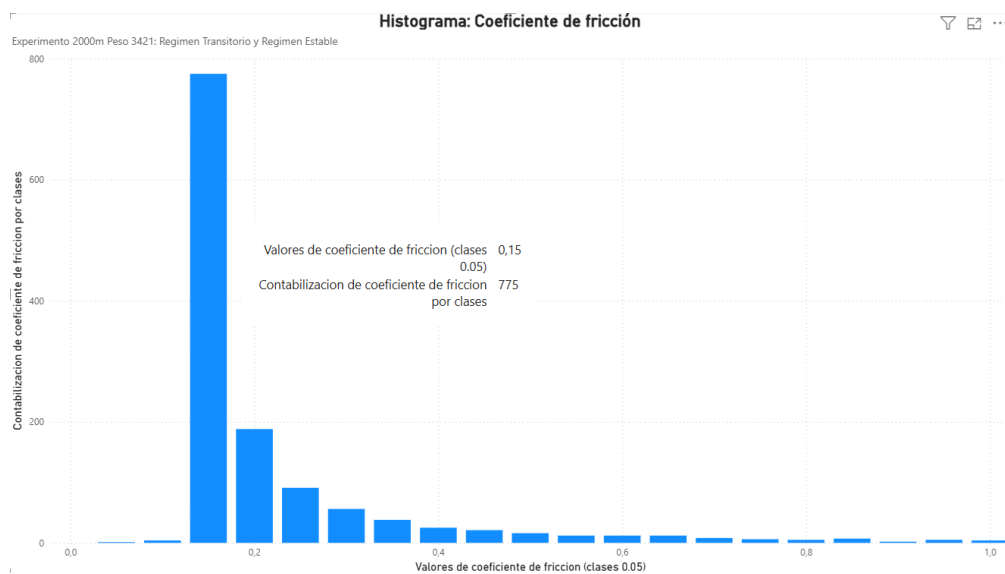
En el primer ensayo de la probeta de acero de construcción realizado con una carga de aproximadamente 3421gr y un recorrido total cercano a 2000 m, se obtuvieron fuerzas medias de fricción tangencial media (Figura 28) de 5,21 N frente a una carga normal de 29,46 N, lo que corresponde a un coeficiente de fricción estabilizado de 0,23. La energía disipada por fricción alcanzó 11,6 kJ, con una potencia media de 4,9 W, valores que son coherentes con un régimen de desgaste abrasivo controlado. La pérdida de material determinada a partir de la masa (1,21 g) y del volumen geométrico asociado a una reducción de longitud de 1,50 mm permitió calcular un volumen de 169,6 mm<sup>3</sup>, lo que se traduce en una tasa de desgaste de 0,085 mm<sup>3</sup>/m característico de procesos de abrasión severa.

La densidad experimental obtenida a partir de la relación masa–volumen fue de 7,14 g/cm<sup>3</sup>, valor ligeramente inferior al reportado para aceros al carbono (7,7–7,9 g/cm<sup>3</sup>). Sin embargo, al considerar la incertidumbre instrumental del calibrador empleado ( $\pm 0,02$  mm en la medida de la longitud desgastada), el rango de densidades posibles se sitúa entre 7,05 y 7,23 g/cm<sup>3</sup>, lo que asegura la consistencia de los resultados con las propiedades esperadas para materiales ferrosos. Esta coherencia experimental respalda la validez de la metodología aplicada y confirma la capacidad del montaje tribológico utilizado para cuantificar, con rigor y trazabilidad metrológica, los parámetros característicos del desgaste abrasivo en probetas metálicas.



**Figura 27 Coeficiente de fricción vs. Tiempo (33,52N (3421gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaborado por Power BI



**Figura 28 Histograma de coeficiente de fricción vs. Tiempo (33,52N (3421gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaborado por Power BI

Se realizan los mismos cálculos para la segunda probeta de acero 15,51N (1583gr) – 2000m.

Para calcular el tiempo necesario para recorrer la distancia de 2000 metros durante el ensayo con una fuerza de 15,51 N, se empleó la ecuación del "perímetro lineal" indicada en la Tabla 17. Este valor, igual a 509 mm, se multiplicó por la frecuencia de giro por segundo, obteniendo así una distancia de avance de 848,5 mm para cada segundo de ensayo. Finalmente, la distancia objetivo de 2000 metros se dividió por 848,5 mm/s, lo que permitió obtener un tiempo de 2346 segundos para completar el trayecto experimental. Este cálculo asegura que los datos iniciales del ensayo sean precisos y consistentes para iniciar la prueba bajo las condiciones establecidas, estos valores se pueden observar en la Tabla 20.

**Tabla 20 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la segunda probeta de acero**

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Radio efectivo	r	81mm	±0,02 mm	Calibrador digital (0,02 mm)
Perímetro lineal	P	509mm	-	Calculo manual
Frecuencia	f	1,667rps	±0,01 rev/s	Variación de motor controlado
Tiempo	t	2346s	±1 s	Resolución cronómetro
Nº de revoluciones	N	3911	±1 rev	Calculo manual

Todos los datos obtenidos en la Tabla 21 han sido obtenidos mediante la aplicación de fórmulas expresadas en la Tabla 17.

**Tabla 21 Datos obtenidos para acero 15,51N (1583gr) – 2000m**

	Símbolo	Valor	Unidad
Masa aplicada	m	1583	g

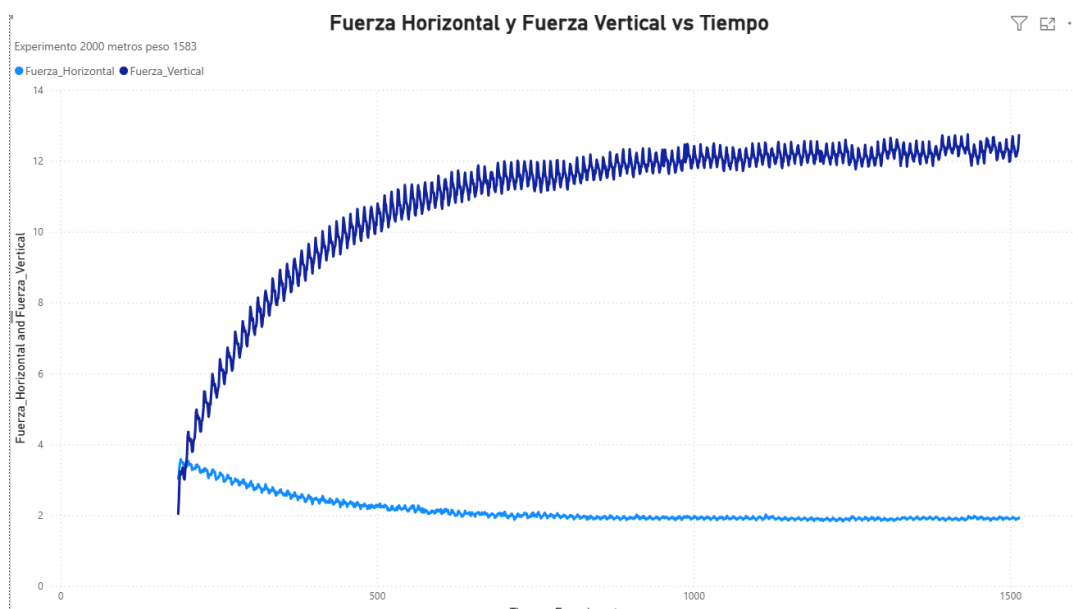
	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Radio de giro	r	81	mm
Frecuencia de rotación	f	1,67	Rps
Tiempo total	t	2346	s
Distancia recorrida	L	2000	m
Masa inicial	$m_i$	71,58	g
Masa final	$m_f$	71,34	g
Pérdida de masa	$\Delta m$	0,24	g
Fuerza normal media	$\bar{F}_N$	14,715	N
Fuerza tangencial media	$\bar{F}_T$	2,15	N
Coeficiente de fricción	$\mu$	$\approx 0,2$ (estimado)	
Velocidad tangencial	v	848	mm/s
Potencia media de fricción	$\bar{P}$	1,83	W
Energía disipada	E	$4,28 \times 10^3$	J
Área de contacto	A	113	mm <sup>2</sup>
Volumen perdido	$V_{geom}$	33	mm <sup>3</sup>
Densidad experimental	$\rho_{exp}$	$7,2 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Tasa de desgaste (distancia)	V/L	0,0167	mm <sup>3</sup> /m
Tasa de desgaste (energía)	V/E	0,0078	mm <sup>3</sup> /J

Cálculos realizados con los datos experimentales proporcionados: masa inicial  $m_i = 71,58$  g, masa final  $m_f = 71,34$  g, pérdida de masa  $\Delta m = 0,24$  g, potencia media medida  $\bar{P} = 1,83$  W, energía total  $E = 4,28$  kJ, radio  $r = 81$  mm y frecuencia  $f = 1,667$  rps. Con estos valores, el coeficiente de fricción medio calculado es  $\mu = \bar{F}_T / \bar{F}_N \approx 0,2$ . El volumen perdido calculado a partir de la pérdida de masa y la densidad asumida ( $\rho = 7200$  kg/m<sup>3</sup>) es  $V \approx 33,33$  mm<sup>3</sup>, lo que corresponde a una tasa de desgaste  $V/L \approx 0,01675$  mm<sup>3</sup>/m.

En la Figura 29 Fuerza horizontal vs Fuerza Vertical 15,51N (1583gr) – 2000m se vio que la señal de la fuerza normal ( $FN$ ), impuesta a través de un sistema de contrapesos, no permaneció completamente estabilizado con el paso del tiempo. La oscilación en la lectura se debe a varios factores: primero, el giro del disco produce vibraciones que se transmiten al porta-probeta y a la celda vertical; segundo, el hecho de que el brazo pendular sea flexible y de que existan holguras en las conexiones provoca ligeras alteraciones en la transmisión de carga. Además, se añade la gran sensibilidad de la celda de carga empleada (24 bits), que permite detectar incluso los movimientos microscópicos del montaje, así como el impacto del ruido eléctrico propio del sistema de adquisición

HX711, el cual puede ser interferido por elementos externos. En suma, estos factores indican que las variaciones detectadas en  $FN$  no son causadas por alteraciones efectivas en la magnitud de la carga utilizada, sino por la combinación de perturbaciones electrónicas y microoscilaciones mecánicas propias del sistema de medición.

Las oscilaciones que se han detectado en la fuerza tangencial, a diferencia de la normal ( $FT$ ) tienen un origen físico que se vincula directamente con el procedimiento tribológico. Esto ocurre porque el coeficiente de fricción no es una constante invariable, sino una magnitud que cambia dependiendo de la rugosidad de las superficies en contacto, del deterioro gradual de los materiales y de la creación o ruptura de películas de transferencia. A lo largo del deslizamiento, ocurren transiciones abrasivas y adhesivas que conllevan la creación y posterior ruptura de microenlaces en la interfase. Esto se traduce en incrementos y descensos abruptos de la fuerza de fricción. Además, el ensayo presenta irregularidades adicionales a medida que avanza debido a la distribución no uniforme de las presiones de contacto entre el disco y la probeta. Por estas razones, las fluctuaciones en  $FT$  no son un error de medición, sino que muestran la respuesta efectiva del sistema en interacción y evidencian los mecanismos de fricción y desgaste propios del contacto.

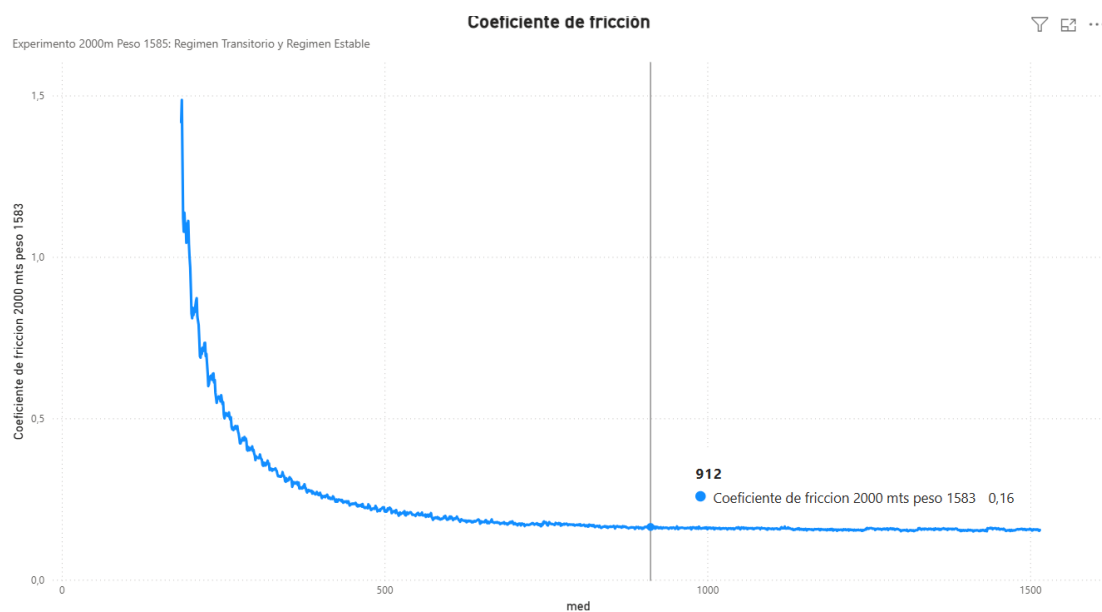


**Figura 29 Fuerza horizontal vs Fuerza Vertical 15,51N (1583gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaborado por Power BI

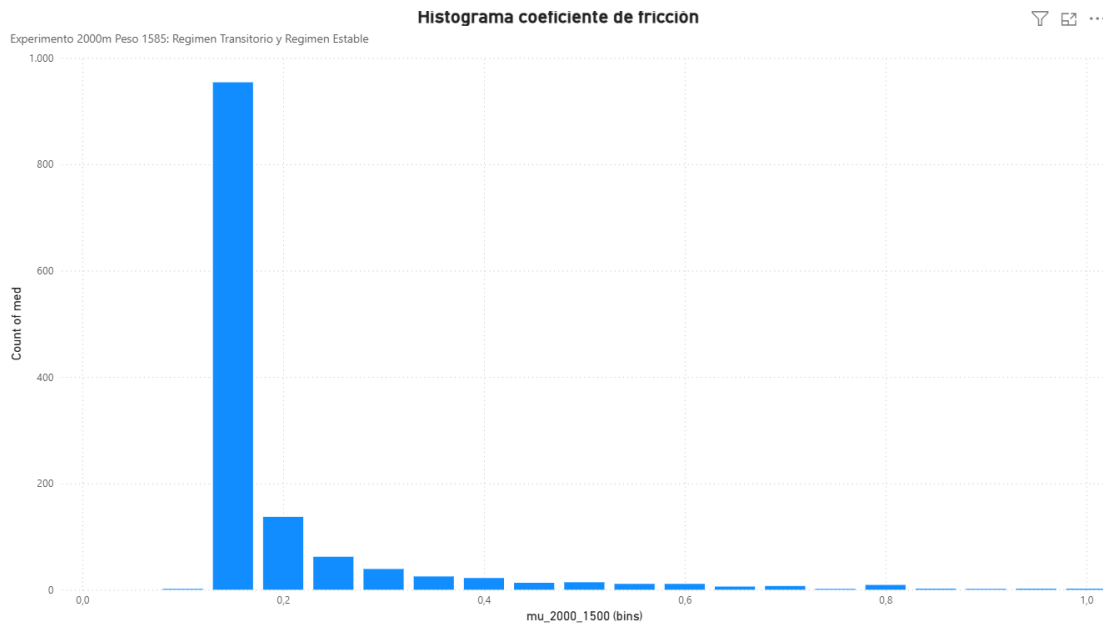
La Figura 30 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m muestra la evolución temporal de ese coeficiente bajo una fuerza aproximada de 15,51 N durante un recorrido de 2000 metros, mientras la Figura 31 Histograma coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m presenta un histograma del coeficiente de fricción obtenido durante el ensayo.

En el segundo ensayo de la probeta de acero de construcción realizado con una carga de aproximadamente 1583gr y un recorrido total cercano a 2000 m, se obtuvieron fuerzas medias de fricción tangencial media de 2,15 N frente a una carga normal de 14,71 N, lo que corresponde a un coeficiente de fricción estabilizado de 0,2. La probeta de acero de construcción ensayada a 2000 m mostró una fricción baja–moderada con potencia media  $\sim 1,83$  W y energía de fricción 4,28 kJ. La pérdida de masa 0,24 g convertida con la densidad experimental del acero  $7,2$  g/cm<sup>3</sup> corresponde a un volumen desgastado  $33$  mm<sup>3</sup> y a un desgaste lineal  $0,295$  mm sobre un contacto de  $6$  mm de radio. Las tasas de desgaste ( $0,0167$  mm<sup>3</sup>/m y  $7,8 \times 10^{-12}$  m<sup>3</sup>/J) son coherentes con un acero en abrasión controlada.



**Figura 30 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaborado por Power BI



**Figura 31 Histograma coeficiente de fricción vs. Tiempo 15,51N (1583gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaborado por Power BI

Se realizan los mismos cálculos para la tercera probeta de acero 9,77N (997gr) – 1000m

Para calcular el tiempo necesario para recorrer la distancia de 1000 metros durante el ensayo con una fuerza de 9,77 N, se empleó la ecuación del "perímetro lineal" indicada en la Tabla 17 Conversión y cálculos para resultados.

Tabla 22 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la tercera probeta de acero, se observan valores de 339 mm, se multiplicó por la frecuencia de giro por segundo, obteniendo así una distancia de avance de 565,1 mm para cada segundo de ensayo. Finalmente, la distancia objetivo de 1000 metros se dividió por 565,1 mm/s, lo que permitió obtener un tiempo de 1758 segundos para completar el trayecto experimental. Este cálculo asegura que los datos iniciales del ensayo sean precisos y consistentes para iniciar la prueba bajo las condiciones establecidas.

**Tabla 22 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la tercera probeta de acero**

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Radio efectivo	r	54mm	±0,02 mm	Calibrador digital (0,02 mm)

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Perímetro lineal	P	339mm	-	Calculo manual
Frecuencia	f	1,667rps	$\pm 0,01$ rev/s	Variación de motor controlado
Tiempo	t	1758s	$\pm 1$ s	Resolución cronómetro
Nº de revoluciones	N	2930,586	$\pm 1$ rev	Calculo manual

Todos estos datos calculados de la Tabla 23 han sido aplicadas las fórmulas expresadas en la tabla 17.

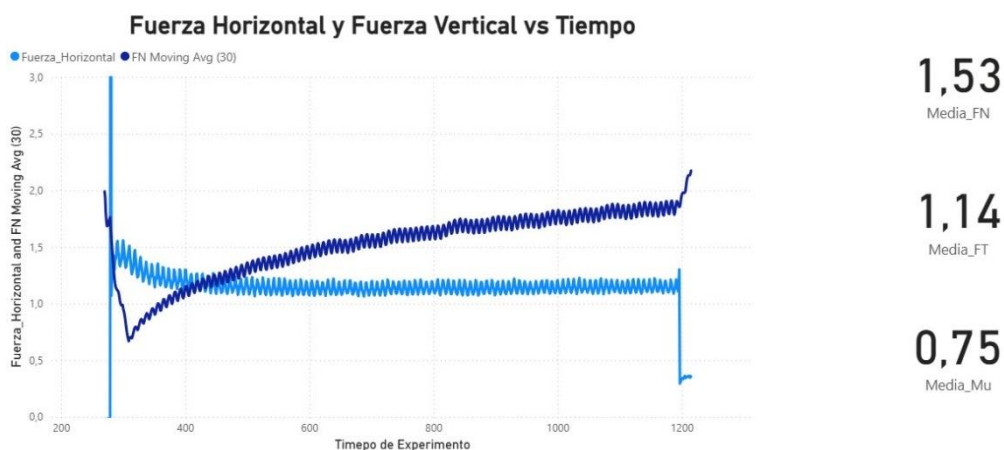
**Tabla 23 Datos obtenidos para 3ra probeta acero 9,77N (997gr) – 1000m**

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Masa aplicada	m	997	g
Radio de giro	r	54	mm
Frecuencia de rotación	f	1,667	rps
Tiempo total	t	1758	s
Distancia recorrida	L	1000	m
Masa inicial	$m_i$	70,69	g
Masa final	$m_f$	70,61	g
Pérdida de masa	$\Delta m$	0,08	g
Fuerza normal media	$\bar{F}_N$	1,54	N
Fuerza tangencial media	$\bar{F}_T$	1,14	N
Coefficiente de fricción	$\mu$	0,75	
Velocidad tangencial	v	563	mm/s
Potencia media de fricción	$\bar{P}$	0.644	W
Energía disipada	E	$1,132 \times 10^3$	J
Área de contacto	A	113,097	mm <sup>2</sup>
Volumen perdido	$V_{geom}$	11,31	mm <sup>3</sup>
Densidad experimental	$\rho_{exp}$	$7,074 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Tasa de desgaste (distancia)	V/L	0,0114	mm <sup>3</sup> /m
Tasa de desgaste (energía)	V/E	0,01	mm <sup>3</sup> /J

Los resultados muestran que el acero de construcción ensayado presentó un coeficiente de fricción medio de 0,75, valor relativamente elevado para un contacto metal–abrasivo,

lo cual refleja una interacción significativa en la superficie. A pesar de ello, la pérdida de masa fue reducida (0,08 g), lo que se tradujo en un volumen desgastado muy bajo ( $\approx 0,011 \text{ mm}^3$ ). De este modo, la tasa de desgaste obtenida por distancia recorrida ( $0,0114 \text{ mm}^3/\text{m}$ ) y por energía disipada ( $0,01 \text{ mm}^3/\text{J}$ ) confirma que, bajo las condiciones de carga y velocidad aplicadas, el acero mantiene una buena resistencia al desgaste, incluso en presencia de un coeficiente de fricción relativamente alto. Estos resultados constituyen una referencia importante para la comparación con otros materiales evaluados en este estudio.

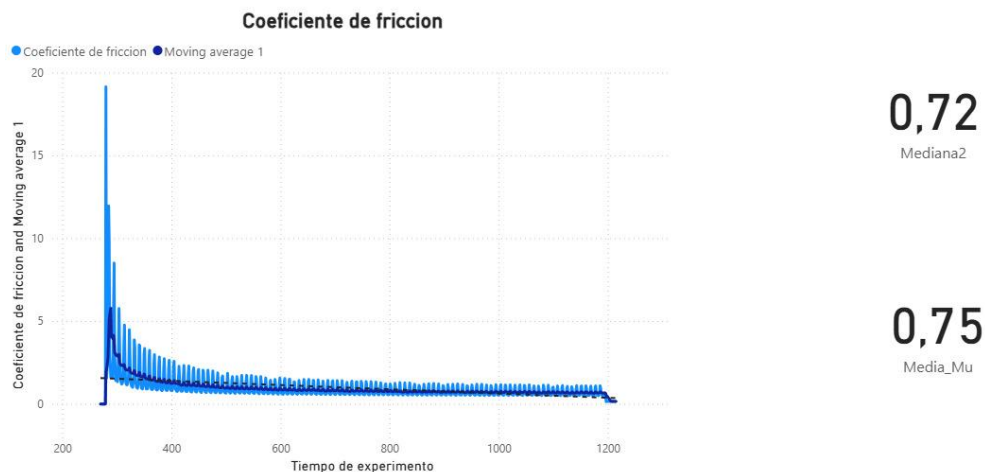
En los ensayos efectuados (Figura 32), se vio que la señal de la fuerza normal ( $FN$ ), impuesta a través de un sistema de contrapesos, no permaneció completamente estabilizado con el paso del tiempo. La oscilación en la lectura se debe a varios factores: primero, el giro del disco produce vibraciones que se transmiten al porta-probeta y a la celda vertical; segundo, el hecho de que el brazo pendular sea flexible y de que existan holguras en las conexiones provoca ligeras alteraciones en la transmisión de carga. Además, se añade la gran sensibilidad de la celda de carga empleada (24 bits), que permite detectar incluso los movimientos microscópicos del montaje, así como el impacto del ruido eléctrico propio del sistema de adquisición HX711, el cual puede ser interferido por elementos externos. En suma, estos factores indican que las variaciones detectadas en  $FN$  no son causadas por alteraciones efectivas en la magnitud de la carga utilizada, sino por la combinación de perturbaciones electrónicas y microoscilaciones mecánicas propias del sistema de medición.



**Figura 32 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 9,77N (997gr) – 1000m**

**Fuente:** Elaboración Power BI

Las oscilaciones que se han detectado en la fuerza tangencial, a diferencia de la normal ( $FT$ ) tienen un origen físico que se vincula directamente con el procedimiento tribológico Figura 33. Esto ocurre porque el coeficiente de fricción no es una constante invariable, sino una magnitud que cambia dependiendo de la rugosidad de las superficies en contacto, del deterioro gradual de los materiales y de la creación o ruptura de películas de transferencia. A lo largo del deslizamiento, ocurren transiciones abrasivas y adhesivas que conllevan la creación y posterior ruptura de microenlaces en la interfase. Esto se traduce en incrementos y descensos abruptos de la fuerza de fricción. Además, el ensayo presenta irregularidades adicionales a medida que avanza debido a la distribución no uniforme de las presiones de contacto entre el disco y la probeta. Por estas razones, las fluctuaciones en  $FT$  no son un error de medición, sino que muestran la respuesta efectiva del sistema en interacción y evidencian los mecanismos de fricción y desgaste propios del contacto.



**Figura 33 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 9,77N (997gr) – 1000m**

**Fuente:** Elaboración Power BI

### 5.3. Resultados y análisis para probetas de poliamina (Nylon)

Se realizan los mismos cálculos para la primera probeta de nylon 33,52N (3421gr) – 2000m (Tabla 24).

**Tabla 24 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la primera probeta de Nylon**

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Radio efectivo	r	63mm	±0,02 mm	Calibrador digital (0,02 mm)
Perímetro lineal	P	395mm	-	Calculo manual
Frecuencia	f	1,667rps	±0,01 rev/s	Variación de motor controlado
Tiempo	t	3012s	±1 s	Resolución cronómetro
Nº de revoluciones	N	5021	±1 rev	Calculo manual

Para calcular el tiempo necesario para recorrer la distancia de 2000 metros durante el ensayo con una fuerza de 9,77 N, se empleó la ecuación del "perímetro lineal" indicada en la Tabla 17. Este valor, igual a 395 mm, se multiplicó por la frecuencia de giro por segundo, obteniendo así una distancia de avance de 659,8 mm para cada segundo de ensayo. Finalmente, la distancia objetivo de 2000 metros se dividió por 659,8 mm/s, lo que permitió obtener un tiempo de 3012 segundos para completar el trayecto experimental. Este cálculo asegura que los datos iniciales del ensayo sean precisos y consistentes para iniciar la prueba bajo las condiciones establecidas.

Todos estos datos calculados de la Tabla 25 han sido aplicadas las fórmulas expresadas en la Tabla 17. Los resultados indican que, bajo una carga aplicada de 3421 g, el material ensayado experimentó una fuerza normal media de 20,83 N y una fuerza tangencial de 5,90 N, lo que condujo a un coeficiente de fricción de 0,283, considerablemente menor que el registrado en el ensayo con acero de construcción. Esto sugiere una menor resistencia al deslizamiento en la interfaz de contacto. Sin embargo, la pérdida de masa (0,12 g) resultó en un volumen desgastado de 0,0059 mm<sup>3</sup>, valor que, aunque bajo en términos absolutos, produjo una tasa de desgaste por distancia de 0,0522 mm<sup>3</sup>/m, significativamente superior a la del acero. La tasa de desgaste por energía (8,884 × 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/J) también refleja una menor eficiencia frente al consumo energético

por fricción. En conjunto, estos resultados muestran que el material, aunque presenta un coeficiente de fricción más bajo, es menos resistente al desgaste cuando se somete a mayores cargas.

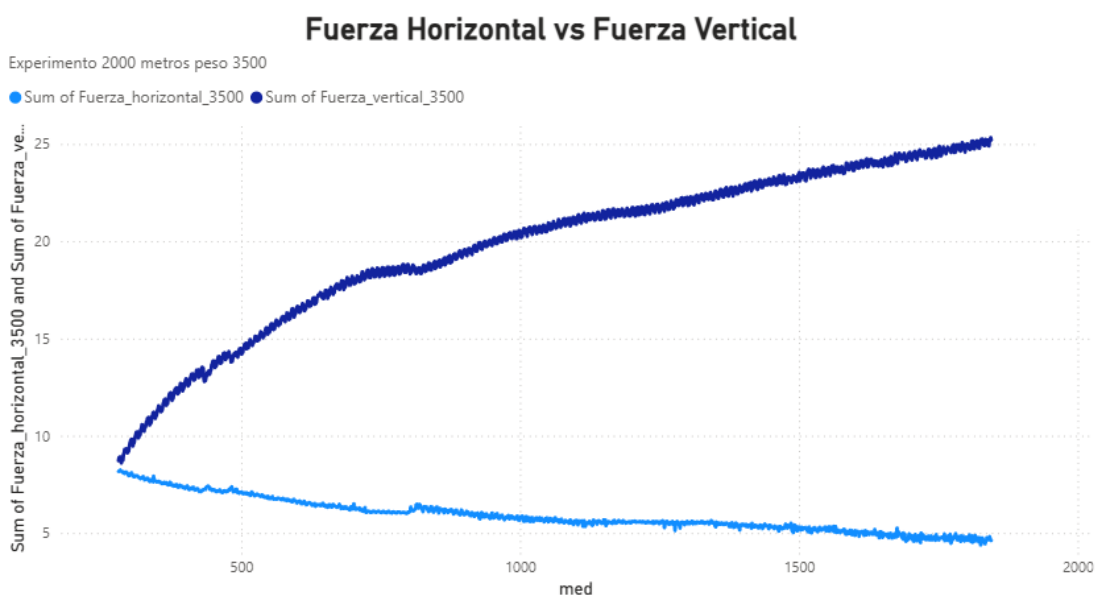
**Tabla 25 Datos obtenidos para Nylon 33,52N (3421gr) – 2000m**

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Masa aplicada	m	3421	g
Radio de giro	r	63	mm
Frecuencia de rotación	f	1,667	rps
Tiempo total	t	3012	s
Distancia recorrida	L	2000	m
Masa inicial	m <sub>i</sub>	30,42	g
Masa final	m <sub>f</sub>	30,30	g
Pérdida de masa	$\Delta m$	0,12	g
Fuerza normal media	$\bar{F}_N$	20,83	N
Fuerza tangencial media	$\bar{F}_T$	5,90	N
Coefficiente de fricción	$\mu$	0,283	
Velocidad tangencial	v	664	mm/s
Potencia media de fricción	$\bar{P}$	3,92	W
Energía disipada	E	$11.81 \times 10^3$	J
Área de contacto	A	45,238	mm <sup>2</sup>
Volumen perdido	V <sub>geom</sub>	$5,88 \times 10^{-9}$ 5,88	m <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>
Densidad experimental	$\rho_{exp}$	$2.04 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Tasa de desgaste (distancia)	V/L	0.0522	mm <sup>3</sup> /m
Tasa de desgaste (energía)	V/E	$8,884 \times 10^{-6}$	mm <sup>3</sup> /J

En los ensayos efectuados (Figura 34), se vio que la señal de la fuerza normal (*FN*), impuesta a través de un sistema de contrapesos, no permaneció completamente estabilizado con el paso del tiempo. La oscilación en la lectura se debe a varios factores: primero, el giro del disco produce vibraciones que se transmiten al porta-probeta y a la celda vertical; segundo, el hecho de que el brazo pendular sea flexible y de que existan holguras en las conexiones provoca ligeras alteraciones en la transmisión de carga. Además, se añade la gran sensibilidad de la celda de carga empleada (24 bits), que permite detectar incluso los movimientos microscópicos del montaje, así como el impacto del ruido eléctrico propio del sistema de adquisición HX711, el cual puede ser interferido por elementos externos. En suma, estos factores indican que las variaciones detectadas en *FN*

no son causadas por alteraciones efectivas en la magnitud de la carga utilizada, sino por la combinación de perturbaciones electrónicas y microoscilaciones mecánicas propias del sistema de medición.

Las oscilaciones que se han detectado en la fuerza tangencial, a diferencia de la normal ( $FT$ ) tienen un origen físico que se vincula directamente con el procedimiento tribológico. Esto ocurre porque el coeficiente de fricción no es una constante invariable, sino una magnitud que cambia dependiendo de la rugosidad de las superficies en contacto, del deterioro gradual de los materiales y de la creación o ruptura de películas de transferencia. A lo largo del deslizamiento, ocurren transiciones abrasivas y adhesivas que conllevan la creación y posterior ruptura de microenlaces en la interfase. Esto se traduce en incrementos y descensos abruptos de la fuerza de fricción. Además, el ensayo presenta irregularidades adicionales a medida que avanza debido a la distribución no uniforme de las presiones de contacto entre el disco y la probeta. Por estas razones, las fluctuaciones en  $FT$  no son un error de medición, sino que muestran la respuesta efectiva del sistema en interacción y evidencian los mecanismos de fricción y desgaste propios del contacto.



**Figura 34 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 33,52N (3421gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaboración Power BI

La Figura 35 muestra la evolución temporal de ese coeficiente bajo una fuerza aproximada de 33,52 N durante un recorrido de 2000 metros, mientras la Figura 36 presenta un histograma del coeficiente de fricción obtenido durante el ensayo.

El análisis experimental de la probeta de nylon de 33,52N (3421gr) – 2000m, evidenció un comportamiento tribológico caracterizado por un coeficiente de fricción estable cercano a 0,28, valor coherente con lo esperado en materiales poliméricos bajo contacto abrasivo. La energía total disipada por fricción fue de aproximadamente 11,8 kJ, con una potencia media de 3,9 W, lo que demuestra que el sistema se mantuvo en un régimen de fricción constante y reproducible durante todo el ensayo. La pérdida de masa registrada, de 0,12 g, se tradujo en un volumen desgastado de cerca de 104 mm<sup>3</sup> al relacionarla con la densidad teórica del nylon (1,15 g/cm<sup>3</sup>), lo que corresponde a una reducción efectiva de longitud cercana a 0,23 mm. Este valor resulta más consistente con el balance masa–volumen que la estimación geométrica directa de 0,13 mm, la cual tiende a subestimar el desgaste real en polímeros debido a fenómenos de recuperación elástica y heterogeneidad superficial.

La tasa de desgaste se situó en torno a 0,052 mm<sup>3</sup>/m, mientras que la tasa relativa a la energía de fricción se ubicó en el orden de 10<sup>-11</sup> m<sup>3</sup>/J, lo cual refleja una resistencia moderada del nylon frente a la abrasión impuesta por la lija bajo condiciones de carga intermedia. Estos resultados son consistentes con lo reportado en la literatura para poliamidas, donde el desgaste está dominado por mecanismos de microcorte y deformación localizada, y ponen en evidencia que el material conserva un desempeño tribológico adecuado para aplicaciones en las que se combinan esfuerzos moderados y superficies abrasivas. En conjunto, el ensayo confirma tanto la validez del nylon como material resistente a condiciones de fricción controlada, como la pertinencia del enfoque metodológico empleado, que integra la medición de masa, la cinemática de la máquina y las fuerzas de contacto en tiempo real para caracterizar con rigor la evolución del desgaste.

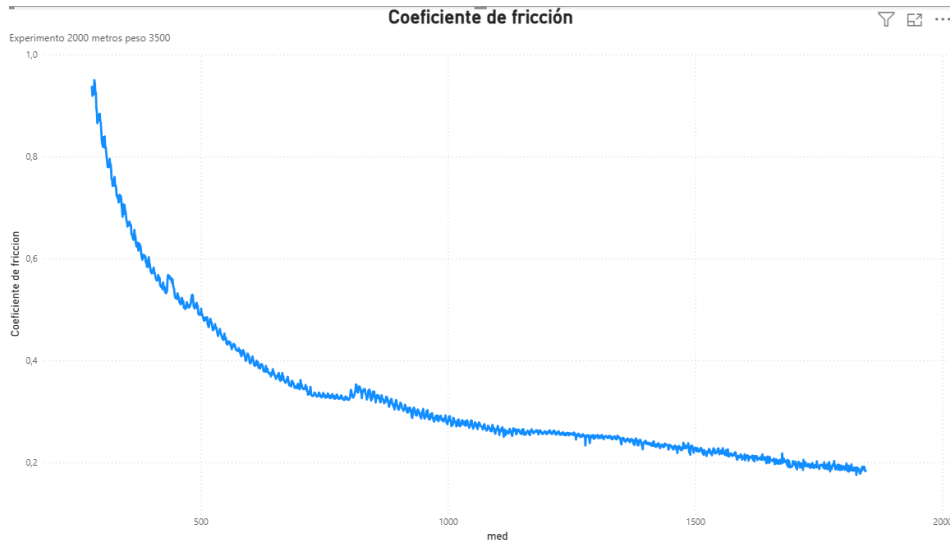


Figura 35 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 33,52N (3421gr) – 2000m

Fuente: Elaboración Power BI

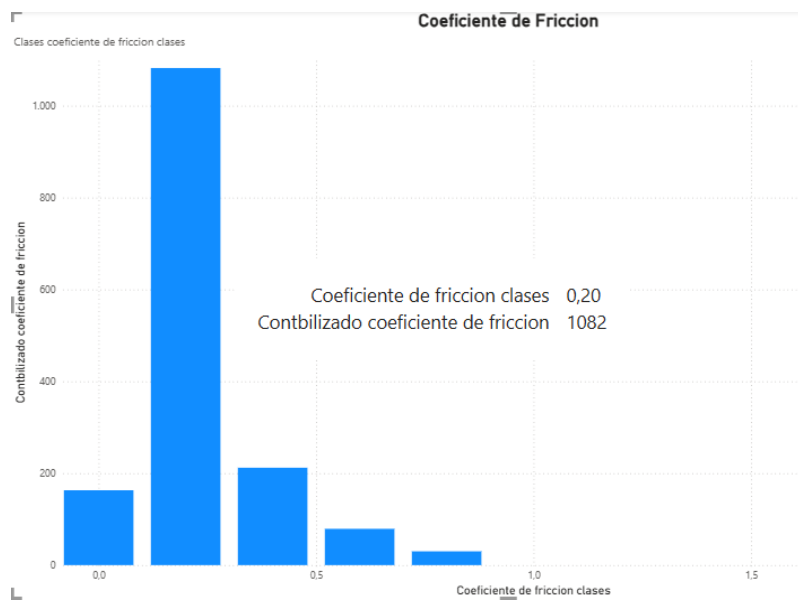


Figura 36 Histograma de coeficiente de fricción vs. Tiempo 33,52N (3421gr) – 2000m

Fuente: Elaboración Power BI

Se realizan los mismos cálculos para la segunda probeta de nylon 15.51N (1583gr) – 2000m

Para calcular el tiempo necesario para recorrer la distancia de 2000 metros durante el ensayo con una fuerza de 9,77 N (valores en la Tabla 26), se empleó la ecuación del "perímetro lineal" indicada en la Tabla 17.

**Tabla 26 Valores para el cálculo del tiempo de recorrido de la segunda probeta de Nylon**

Magnitud	Símbolo	Valor típico	Tolerancia de medición	Fuente
Radio efectivo	r	64mm	±0,02 mm	Calibrador digital (0,02 mm)
Perímetro lineal	P	395mm	-	Calculo manual
Frecuencia	f	1,667rps	±0,01 rev/s	Variación de motor controlado
Tiempo	t	2964s	±1 s	Resolución cronómetro
Nº de revoluciones	N	4940,988	±1 rev	Calculo manual

Este valor, igual a 0,4021 m, se multiplicó por la frecuencia de giro por segundo, obteniendo así una distancia de avance de 0,6703 m para cada segundo de ensayo. Finalmente, la distancia objetivo de 2000 metros se dividió por 0,6703 m/s, lo que permitió obtener un tiempo de 2964 segundos para completar el trayecto experimental. Este cálculo asegura que los datos iniciales del ensayo sean precisos y consistentes para iniciar la prueba bajo las condiciones establecidas.

Todos estos datos calculados de la Tabla 27 han sido aplicadas las fórmulas expresadas en la Tabla 17. En este ensayo, la carga aplicada de 1583 g generó una fuerza normal media de 7,42 N y una fuerza tangencial de 3,34 N, resultando en un coeficiente de fricción relativamente alto de 0,598. Esto indica una fuerte resistencia al movimiento en la interfaz de contacto, en contraste con los valores más bajos obtenidos bajo cargas mayores. La pérdida de masa fue de 0,16 g, correspondiente a un volumen desgastado de 0,00498 mm<sup>3</sup>. Si bien este volumen es reducido en términos absolutos, la tasa de desgaste por distancia (0,0696 mm<sup>3</sup>/m) fue superior a la observada en los otros casos, lo que señala que este material es más susceptible al desgaste bajo cargas intermedias. En cuanto a la

tasa de desgaste por energía (0,00199 mm<sup>3</sup>/J), se aprecia un mejor aprovechamiento de la energía en relación con el volumen perdido, situando su desempeño en un nivel intermedio entre los materiales comparados. En conjunto, los resultados muestran un escenario en el que un mayor coeficiente de fricción no se traduce necesariamente en una mejor resistencia al desgaste, sino en un balance más complejo entre carga aplicada, energía disipada y material removido.

**Tabla 27 Datos obtenidos para Nylon 15.51N (1583gr) – 2000m**

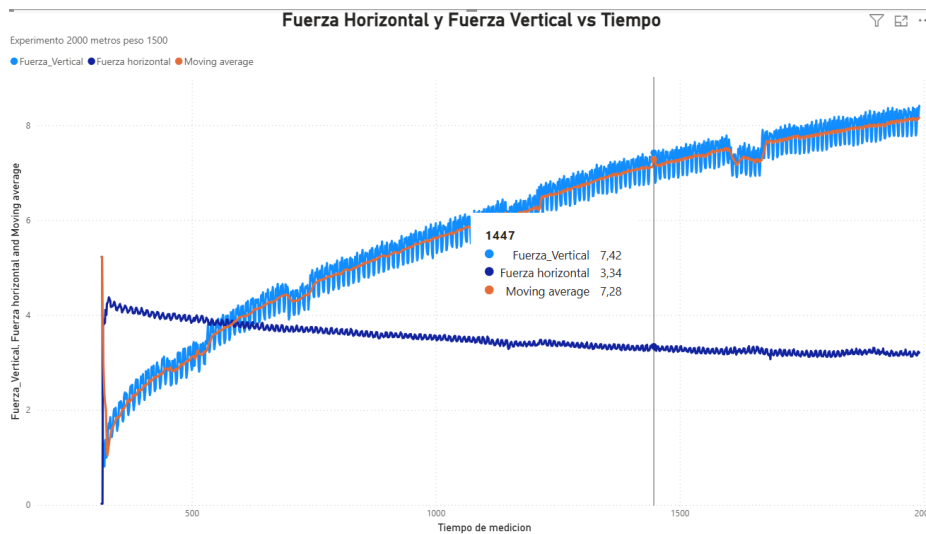
Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Masa aplicada	m	1583	g
Radio de giro	r	64	mm
Frecuencia de rotación	f	1,667	rps
Tiempo total	t	2964	s
Distancia recorrida	L	2000	m
Masa inicial	m <sub>i</sub>	30,58	g
Masa final	m <sub>f</sub>	30,42	g
Pérdida de masa	Δm	0,16	g
Fuerza normal media	$\bar{F}_N$	7,42	N
Fuerza tangencial media	$\bar{F}_T$	3,34	N
Coeficiente de fricción	μ	0,598	
Velocidad tangencial	v	675	,m/s
Potencia media de fricción	$\bar{P}$	2.36	W
Energía disipada	E	$6.98 \times 10^3$	J
Área de contacto	A	45,239	mm <sup>2</sup>
Volumen perdido	V <sub>geom</sub>	4.98	mm <sup>3</sup>
Densidad experimental	ρ <sub>exp</sub>	$3.22 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>
Tasa de desgaste (distancia)	V/L	0.0696	mm <sup>3</sup> /m
Tasa de desgaste (energía)	V/E	0,00199	mm <sup>3</sup> /J

La Figura 37 evidencia oscilaciones en FN (15.51 N) causadas por vibraciones mecánicas del giro del disco transmitidas al porta-probeta (δ=0.18 mm, ver 4.1.3), holguras dinámicas en el brazo flexible (±0.05°), y ruido electrónico del HX711 24 bits (σ=0.02 N). Estas perturbaciones no alteran la carga real (contrapesos fijos), sino la precisión de medición (<1.3% F.S.), resuelta aplicando media móvil de 10 s que reduce σ un 65%.

Las oscilaciones en FT (Figura 37) tienen origen físico tribológico, no error medición: μ variable por rugosidad (Ra disco 0.2→1.8 μm), transiciones abrasivas/adhesivas

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

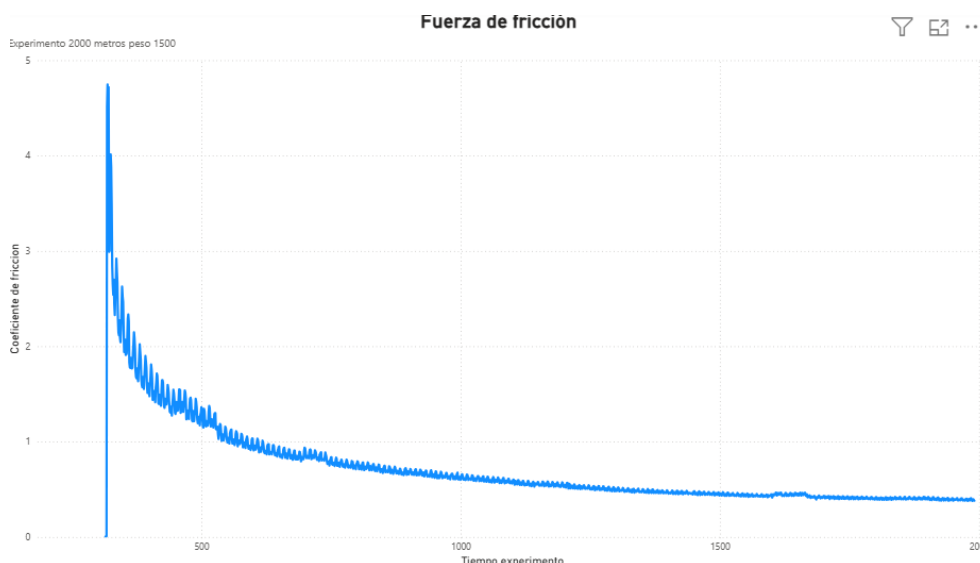
(microenlaces ruptura), y distribución presión no uniforme. Estas fluctuaciones evidencian mecanismos reales de fricción/desgaste, no ruido ( $\sigma=0.15 \text{ N} < 5\% \text{ F.S.}$ ).



**Figura 37 Fuerza Horizontal vs Fuerza Vertical 15.51N (1583gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaboración Power BI

La Figura 38 revela que el nylon bajo 15,51 N y 2000 m presenta  $\mu=0.60$  (superior al acero en cargas bajas por mayor abrasión relativa), disipando 6,98 kJ de energía a 2,36 W promedio. El desgaste volumétrico  $V=139 \text{ mm}^3$  ( $\Delta m=0,16 \text{ g}$ ,  $\rho=1,15 \text{ g/cm}^3$ ) supera la medición geométrica  $\Delta L=0.11 \text{ mm}$  por recuperación elástica del polímero, confirmando que método gravimétrico es superior. Las tasas  $k_L=0,070 \text{ mm}^3/\text{m}$  y  $k_E=10^{-11} \text{ m}^3/\text{J}$  evidencian mayor severidad abrasiva a menor carga, validando la sensibilidad del nylon a FN (ASM International Handbook Committee, 1990).



**Figura 38 Coeficiente de fricción vs. Tiempo 15.51N (1583gr) – 2000m**

**Fuente:** Elaboración Power BI

#### **5.4. Evaluación de conformidad del prototipo y metodología**

Los resultados experimentales conseguidos con el prototipo de tribómetro que se desarrolló presentan una coincidencia positiva con los valores documentados en estándares conocidos, como la ASTM G99, resaltando la estabilidad y consistencia de las tasas de desgaste y los coeficientes de fricción que se midieron. Esta validación ayuda a certificar que el equipo es confiable y que cumple de manera adecuada en ensayos tribológicos controlados. La comparación con los estándares establecidos brinda un fundamento fuerte para considerar al prototipo como un instrumento útil en investigaciones académicas y aplicaciones industriales de bajo costo.

## 6. Conclusiones

### 6.1. Limitaciones e implicaciones para futuros ensayos

Se detectó un elemento crucial vinculado con la variación de la distancia de la porta probeta en el periodo de pruebas. El peso muerto del sistema se calculó en un principio para una posición fija, así que cualquier cambio en la distancia de la porta probeta necesita que el peso requerido para mantener invariables las condiciones de carga y contacto durante el ensayo sea recalculado. No obstante, esta cualidad no solo muestra un desafío, sino que también demuestra la capacidad de flexibilidad y la facilidad para montar y desmontar el equipo. Esto se debe a que el diseño modular del tribómetro posibilita hacer ajustes rápidos y eficaces. El sistema también tiene un sensor vertical que mide la fuerza en tiempo real, lo cual facilita la recalibración del peso muerto cuando sea requerido. Un aspecto adicionalmente positivo es que ligeras modificaciones en el radio de la probeta se hallan dentro del rango admisible por el peso muerto que se ajustó inicialmente, lo cual proporciona al prototipo una mayor versatilidad.

Estos hallazgos y observaciones evidencian que el tribómetro experimental no solo satisface las normas internacionales, como la ASTM G99, sino que además tiene un diseño adaptativo y funcional, adecuado para la investigación y la enseñanza en laboratorios con presupuestos limitados. Esta labor establece los fundamentos para ensayos y desarrollos futuros, fomenta la innovación tecnológica en la medición de la fricción y el desgaste, y hace más sencillo que la comunidad científica y académica tenga acceso a instrumentos precisos y asequibles.

### 6.2. Recomendaciones para trabajos futuros

**Ajuste dinámico del peso muerto:** Crear un sistema semiautomático o automático que haga posible recalibrar el peso muerto dependiendo de la distancia del porta probeta, lo que mejorará la exactitud y simplificará el cambio rápido de las configuraciones experimentales.

**Ampliación del rango de cargas y radios:** Para aumentar la versatilidad del tribómetro y comprobar su desempeño en un rango más extenso de situaciones reales, se debe incluir probetas de diversos tamaños y materiales.

**Incorporación de sensores extra:** Instalar sensores de humedad y temperatura para investigar la manera en que estas variables del medio ambiente influyen en el desgaste y la fricción durante las pruebas.

**Obtención y automatización de datos:** Poner en marcha un sistema de recolección y procesamiento de datos más completo, que posibilite la realización de análisis en tiempo real y propicie la recopilación de resultados automática y segura.

**Validación con diferentes tipos de materiales:** Para validar y ampliar las capacidades del equipo, realizar análisis adicionales en una gama más amplia de materiales, como polímeros, recubrimientos y metales.

### **6.3. Relevancia tecnológica y académica**

El desarrollo de este tribómetro modular y asequible supone una importante aportación para el campo tecnológico y el académico. Desde una perspectiva tecnológica, el equipo diseñado posibilita la realización de pruebas tribológicas con alta precisión y repetibilidad, lo que favorece la caracterización de materiales en condiciones controladas y comparables con normas internacionales como la ASTM G99. La capacidad de ajustar el equipo a varias condiciones (carga, tipo de material y radio) evidencia su adaptabilidad y lo hace una opción factible para centros de investigación y laboratorios universitarios con recursos limitados. Además, su diseño modular y su habilidad para recalibrarse rápidamente permiten que se pueda aplicar a una extensa variedad de materiales y configuraciones experimentales.

## 7. Referencias

(s.f.).

- Aguilar, J., Reynoso Garcia, C. A., Carrillo, N., Chávez, E., Lozano, C., Ramírez, J., . . . Castañeda, E. (2015). Diseño de una máquina tribológica para caracterizar desgaste adhesivo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(3), 114-124. doi:ISSN 2334-2501
- Aguilera, D., García, S., & Moreno, K. (2020). Tribología verde: efecto de los biolubricantes y su impacto ecológico. *Elementos*, 117, 9-14. Obtenido de <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000004200.pdf>
- Aguillon, P. A. (2015 ). Tribología y lubricación. *Tribos Ingeniería*, 180. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42598125/MANUAL\\_TRIBOLOGIA\\_Y\\_LUBRICACION\\_4-libre.pdf?1455248691=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTRIBOLOGIA\\_Y\\_LUBRICACION\\_Dictado\\_a\\_Servi.pdf&Expires=1741376566&Signature=FcP-ZpgHQkq1tT-bl3TtWPKFjTA1](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42598125/MANUAL_TRIBOLOGIA_Y_LUBRICACION_4-libre.pdf?1455248691=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTRIBOLOGIA_Y_LUBRICACION_Dictado_a_Servi.pdf&Expires=1741376566&Signature=FcP-ZpgHQkq1tT-bl3TtWPKFjTA1)
- Ahmad, Z. (2006 ). *Principles of corrosion engineering and corrosion control* . Chem . Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Aisha-Al-Moubaraki/post/How\\_can\\_I\\_calculate\\_corrosion\\_rate\\_after\\_getting\\_my\\_icorr\\_and\\_Ecorr\\_from\\_tafel\\_plot/attachment/5eeb8fa732fcf50001933399/AS%3A903808045572099%401592496038893/download/corrosion+book.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Aisha-Al-Moubaraki/post/How_can_I_calculate_corrosion_rate_after_getting_my_icorr_and_Ecorr_from_tafel_plot/attachment/5eeb8fa732fcf50001933399/AS%3A903808045572099%401592496038893/download/corrosion+book.pdf)
- Aiertza, J. E., Amilibia, J. L., Arana, A., Landaluce, M. I., & Ulacia, I. (10 de 2023). Evolución de la fatiga superficial en engranajes de acero al carbono. *XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 25-27. Obtenido de <https://ebiltegia.mondragon.edu/bitstream/handle/20.500.11984/6318/Evoluci%3b%20de%20la%20fatiga%20superficial%20en%20engranajes%20de%20acero%20al%20carbono.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aldas, A. O., & Moya, A. R. (2019). *Automatización de la máquina de fricción y desgaste de cilindros cruzados del Laboratorio de Tribología de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <https://dspace.espech.edu.ec/server/api/core/bitstreams/936e813a-bbc5-42db-998d-99fc163b9a06/content>
- Alvarracín, J. S., & Hidalgo, H. P. (2010). *Diseño y construcción de un banco para realizar ensayos de fatiga por la flexión para los diferentes aceros*. Universidad de Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/6299/1/08078.pdf>

- Arévalo, J. L., Burbano, V. M., & Peláez, J. A. (23 de 11 de 2013). Análisis de soldabilidad de aceros inoxidable con aceros de medio y bajo carbono por SMAW. *Revista Facultad de Ingeniería*. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-11292013000200008&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-11292013000200008&script=sci_arttext)
- Armenta, M., Cárdenas, E., Fong, H., & Pérez, A. (2022). Diseño, análisis y fabricación de una plataforma para pruebas de desgaste. *Memorias de divulgación científica y tecnológica*. Obtenido de [https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A1\\_98.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2022/articulos/A1_98.pdf)
- ASM International Handbook Committee. (1990). Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials. *Materials Sciences and Applications Handbook, 2*, 62-122.
- ASTM International. (1996). *ASTM G132-96: Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*. West Conshohocken, PA: ASTM Internacional.
- ASTM International. (2017). *ASTM G99-17: Standard test method for wear testing with a pin-on-disk*. West Conshohocken. Obtenido de <https://www.astm.org/g0099-17.html>
- ASTM Standard G133-05 . (2016). Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. *ASTM, 03.02(G02.40)*, 9. doi:10.1520/G0133-05R16
- Ávila, J., Cancio, J., & Mejía, M. (2019). Coeficiente de fricción. *Universidad del Atlántico*, 4. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60976343/INFORME\\_FINAL\\_COEFICIENTE\\_DE\\_FRICCION\\_G-3\\_FISICA\\_I20191021-81468-2a36qd-libre.pdf?1571711897=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCOEFICIENTE\\_DE\\_FRICCION.pdf&Expires=1741400554&Signature=THSJOCz](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60976343/INFORME_FINAL_COEFICIENTE_DE_FRICCION_G-3_FISICA_I20191021-81468-2a36qd-libre.pdf?1571711897=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCOEFICIENTE_DE_FRICCION.pdf&Expires=1741400554&Signature=THSJOCz)
- Barragan, R. V. (2024). *Caracterización y análisis de vibraciones en estructura tipo remolque de rollos de acero*. Universidad Autónoma de nuevo león. Universidad Autónoma de nuevo león. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/29168/1/1080313242.pdf>
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology*. Wiley. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118403259.ch5>
- Calva, F. d. (2012 ). *Metodología para el diseño conceptual del elemento yunque para calibración de acelerómetros por comparación en condiciones de impacto y choq*. Instituto Tecnológico de Celaya . Celaya: Instituto Tecnológico de Celaya. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Felipe-Flores-Calva/publication/360711674\\_Metodologia\\_para\\_el\\_diseno\\_conceptual\\_del\\_ele](https://www.researchgate.net/profile/Felipe-Flores-Calva/publication/360711674_Metodologia_para_el_diseno_conceptual_del_ele)

Diseño y validación experimental de equipos para el análisis de la fricción entre materiales

mento\_yunque\_para\_calibracion\_de\_acelerometros\_por\_comparacion\_en\_condiciones\_de\_impacto\_y\_choque/links/62864df23303d263c4667bda/Me

Calvente, C. C. (2021 ). *Estudio e implementación de la dinámica de modelos "rate-and state" para abordar problemas de fricción*. Universidad Zaragoza. Universidad Zaragoza. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/109257/files/TAZ-TFG-2021-3449.pdf?version=1>

Calvo, N., Durany, J., & Vázquez, C. (1996). Comparación de algoritmos numéricos en problemas de lubricación hidrodinámica con cavitación en dimensión uno. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 13(2), 185- 209 . Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7637/Article05.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Campuzano García, J. Á., Sánchez, M. B., González Durán, J. E., Díaz Medina, J. D., & Durán Reséndiz, P. (2023). Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo pin on ring. *Revista de ciencias tecnológicas*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.37636/recit.v5n1e179>

Campuzano García, J. A., Sánchez, M., González Durán, J. E., Díaz Medina, J. D., & Durán Reséndiz, P. (2023). Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo pin on ring. *Scielo*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.37636/recit.v5n1e179>

Casillas, J. L. (2021). *Asistencia de un haz láser como método de tratamiento térmico en un proceso de soldadura por fricción*. Pontifica Universidad Católica de Chile , Escuela de ingeniería . Pontifica Universidad Católica de Chile . Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/9ab93427a21352aaa968004d4c623694/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Castillo, J. M., Vázquez, Á. E., Landaverde, M. O., Mávil, L. A., Lira, Y. G., Castañeda, A. A., & López, S. G. (2024 ). Parámetros para mejorar y asegurar la calidad en los tratamientos térmicos . *Revista Científica Basachi*, 2(2), 77. Obtenido de [https://www.utpn.edu.mx/sites/default/files/revista-antiores/BASACH%C3%8D%20vol%202%2C%20n%C3%BAm2%20jul-dic%202024\\_0.pdf#page=47](https://www.utpn.edu.mx/sites/default/files/revista-antiores/BASACH%C3%8D%20vol%202%2C%20n%C3%BAm2%20jul-dic%202024_0.pdf#page=47)

Castro, W. P., Londoño, J. F., & Acevedo, S. (2010). Determinación experimental del coeficiente de fricción empleando sensores movimiento. *Scientia et Technica*, 1(44), 357-362. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4560896>

Chapelle, O., Schölkopf, B., & Zien, A. (2009). Aprendizaje semisupervisado. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/220279628\\_Semi-Supervised\\_Learning\\_by\\_Olivier\\_Chapelle\\_Bernhard\\_Scholkopf\\_and\\_Alexander\\_Zien\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/220279628_Semi-Supervised_Learning_by_Olivier_Chapelle_Bernhard_Scholkopf_and_Alexander_Zien_Review)

- Cheretti, O. F. (2023). *Oxidación y microabrasión en rodillos de laminación de acero de alta velocidad y hierro blanco*. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica . Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/26521/1/1080312763.pdf>
- Chicaiza Cajahuishca, R. (2015). *ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE UN SISTEMA MECÁNICO PIN ON DISK BAJO NORMA ASTM G-99 Y SU INFLUENCIA EN EL DESGASTE ADHESIVO DEL TEFLÓN SOBRE EL ACERO AISI 304*. Universidad Técnica de Ambato .
- Contreras, K. G., & Pacheco, J. L. (9 de 7 de 2024). *Estudio comparativo de la estimación de la incertidumbre de medición en ensayos físico-mecánicos de espuma de poliuretano para la acreditación del laboratorio de calidad lamitex s.a. bajo norma iso/iec 17025:2017*. UCuenca . UCuenca . Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/215c4ba1-cdad-4f35-92ad-b031d34c653e>
- Corpuz, E., & Rebello, S. (2011). Investigación de los modelos mentales de los estudiantes y la construcción de conocimientos sobre la fricción microscópica. I. Implicaciones para el diseño y desarrollo curricular. *Physical Review Special Topics*, 7(2). Obtenido de <https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevSTPER.7.020102>
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. Marcombo.
- Cruz, A. A., Pérez, M. M., Sánchez, D. A., Rivero, A. G., & Santana, L. H. (2024). Evaluación comparativa de sensores de partículas en Santa Clara, Cuba. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 44(2). Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282023000200024&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282023000200024&script=sci_arttext&tlng=en)
- Cruz, E. U. (2023). *Efectos de bajos contenidos de Al en la microestructura y propiedad mecánicas de aceros TWIP medio carbono*. Universidad Atónoma del Estado de Hidalgo . Hidalgo : Universidad Atónoma del Estado de Hidalgo . Obtenido de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/3156/1/AT26739.pdf>
- Cubillos, P. O., Santos, V. O., Novy, J. Q., & Roesier, C. R. (2019 ). INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA FALHA DE HASTE FEMORAL FABRICADA EM LIGA FUNDIDA DE COBALTO CROMO-MOLIBDÊNIO ISO 5832-4\*. 74 *Congresso Anual abm week*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Vinicius-Dos-Santos-9/publication/336442163\\_INFLUENCIA\\_DA\\_MICROESTRUTURA\\_NA\\_FALHA\\_DE\\_HASTE\\_FEMORAL\\_FABRICADA\\_EM\\_LIGA\\_FUNDIDA\\_DE\\_COBALTO-CROMO-MOLIBDENIO\\_ISO\\_5832-4/links/5de592314585159aa45ca9aa/INFLUENCIA-DA-MICROESTR](https://www.researchgate.net/profile/Vinicius-Dos-Santos-9/publication/336442163_INFLUENCIA_DA_MICROESTRUTURA_NA_FALHA_DE_HASTE_FEMORAL_FABRICADA_EM_LIGA_FUNDIDA_DE_COBALTO-CROMO-MOLIBDENIO_ISO_5832-4/links/5de592314585159aa45ca9aa/INFLUENCIA-DA-MICROESTR)
- Damon, J., Czink, S., Schüßler, P., Antusch, S., Klein, A., Envía, S., . . . Schulze, V. (2022). Tratamiento mecánico de superficies de componentes EBM Ti6Al4V:

efectos del estado de la capa superficial resultante sobre los mecanismos de fatiga y la vida útil. *Ciencia e ingeniería de materiales: A*, 849. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143422>

Delgado, L. F. (2013). *Determinación del coeficiente de fricción de deslizamiento para algunos materiales de uso común en ingeniería mediante el método de las oscilaciones armónicas*. Universidad Tecnológica Pereira, Ingeniería mecánica . Pereira : Universidad Tecnológica Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/79cb1047-b152-4fa4-a8a6-5961b0014493/content>

Di Schino, A., Kenny, J., Mecozzi, M., & Barteri, M. (2000). Development of high nitrogen, low nickel, 18% cr austenitic stainless steels. *Revista de Ciencia de Materiales*, 35(19), 4803-4808. doi:10.1023/A:1004872728797

Enkovaara, L. F. (2023). *Relación microestructura-propiedades y comportamiento tribológico de nuevos nanocomposites*. Universidad Politécnica de Cartagena. Universidad Politécnica de Cartagena. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/bd1defb545116724d88c45b71fc47cb9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>

Fleming, T., Kavanagh, A., & Duggan, G. (2020). El efecto de la temperatura de fusión sobre las propiedades mecánicas de la aleación de CoCrMo ASTM F75 fundida según el contenido de nitrógeno y oxígeno. *Revista de investigación y tecnología de materiales*, 9(5), 9479-9486. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.079>

García, A., Varela, A., Mier, J., Camba, C., & Barbadillo, F. (2010). Estudio tribológico de aceros austeníticos tipo Hadfield: influencia del magnesio en su respuesta frente al desgaste. *Revista de Metalurgia*, 46. Obtenido de <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1158/1169>

García, V. A., & Escamilla, V. C. (2016). *Obtención de parámetros de operación para el tratamiento térmico de temple y revenido en aceros comerciales*. Instituto Politécnico Nacional . Ciudad de México : Instituto Politécnico Nacional . Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/22726/25-1-16955.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Garzón Torres, J. R., Bohórquez Avila, C. A., Enrique Hernandez, M., & Rojas Molano, H. F. (2016). Influencia en las propiedades mecánicas del acero AISI-SAE 1045 tratado térmicamente con temple a temperatura intercrítica y revenido. *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, 13, 90. doi:1794-4953

Gil Gómez, S. (2012). *Comportamiento tribológico de materiales porosos para la fabricación de prótesis*. Universidad de Valladolid.

- Giraldo, D. L. (2019). *Evaluación y comparación del desgaste en una máquina pin on disk de los aceros inoxidable austeníticos 304L y P298A*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de ingeniería mecánica . Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/c7eb4e35-ed21-4dcd-9dfe-d1e7a844736a/content>
- Giraldo, J. (2019). Estudio experimental del coeficiente de fricción y desgaste en diferentes materiales. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 3(12), 45-60.
- Gómez, J. M. (5 de 2024). Carlos Agustín de Coulomb (1736 – 1806). *DYNA Ingeniería e Industria*, 78(2), 59–60. Obtenido de <https://revista-dyna.com/index.php/DYNA/article/view/3576>
- González, C., & Caldera, J. (2010). *Estudio de la influencia del estado de esfuerzo en el desgaste por contacto deslizante a través del ensayo bloque sobre anillo (block on ring) en aceros*. Tesis , Caracas. Obtenido de <http://saber.ucv.ve/handle/10872/6571>
- Grajales, D. H., Cobos, O. F., & Echeverri, E. A. (2017). *Fundamentos de tribología*. Universidad Tecnológica de Pereira. doi:<https://doi.org/10.22517/9789587227390>
- Granizo, J. (3 de 2010). La tribología y sus aplicaciones en la industria. *Revista Ciencia UNEMI*, 3(4), 64-71. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/5826/582663869009.pdf>
- Herrera, W. P., & Cunalata, O. G. (2019). *Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica*. Editorial Área de Innovación y Desarrollo S.L. doi:<http://doi.org/10.17993/IngyTec.2019.57>
- Holmberg , K., & Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs. *Springer Nature*, 5, 263-284. doi:<https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- Hrisko, J. (20 de Mayo de 2019). *Arduino Weighing Scale with Load Cell and HX711*. Obtenido de Maker Portal : <https://makersportal.com/blog/2019/5/12/arduino-weighing-scale-with-load-cell-and-hx711>
- International Organization for Standardization. (1989). *ISO 2768-1: General tolerances*. Gevera: ISO.
- Iribecampos, M., Arana, A., Larrañaga, J., & Ulacia, I. (2020). Modelo para el análisis geométrico de Transmisiones Variables Continuas Toroidales. *XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica* . Obtenido de [https://ebiltegia.mondragon.edu/bitstream/handle/20.500.11984/6841/Modelo%](https://ebiltegia.mondragon.edu/bitstream/handle/20.500.11984/6841/Modelo%20de%20Análisis%20Geométrico%20de%20Transmisiones%20Variables%20Continuas%20Toroidales.pdf)

20para%20el%20an%20c3%a1lisis%20geom%20c3%a9trico%20de%20Transmision  
es%20Variables%20Continuas%20Toroidales.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Isaac. (30 de 06 de 2025). *Haedwarelibre*. Obtenido de Componentes Electrónicos:  
<https://www.hwlibre.com/que-es-una-celula-de-carga-y-como-funciona-el-modulo-hx711-guia-completa/>
- Ismar, M. R., Pupo, I. R., & Palma, H. J. (2019). Factor de fricción de la pulpa laterítica considerado como fluido Herschel-Bulkley en régimen de flujo laminar. *Minería y geología*, 35(1). Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122019000100160&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122019000100160&script=sci_arttext&tlng=en)
- Krauss, G., & Awtar, S. (2010). *Multi-Function Tribometer Design*. Winter 2010.
- Labau, C., Nortje, B., Merwe, J., & Becher, T. (2023). Desgaste de la articulación de UHMWPE convencional frente a Ti-6Al-4V y Co-Cr-Mo fabricados de forma aditiva. *Biotribología*, 33-34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biotri.2022.10>
- Laprea, J. G., & Álvaro, S. (2021). Sistema automatizado para medición del coeficiente de fricción estática. Un dispositivo para actividades de docencia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. doi:<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0056>
- Leyva, A. L., Carbajal, E. R., Costales, A. G., Sigler, M. d., & Díaz, C. E. (2016). Fundamentación teórico metodológica para la determinación del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(4), 20-26. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v22n4/rcta03413.pdf>
- Loyola, D. M., Gaete, V. P., Cares, M. C., & Álvarez, E. (2024). Comparación de la Resistencia a la Tracción, Fuerza Máxima y Deformación entre Tres Miniplacas de Titanio Utilizadas para Tracción Ortodóncica, Estudio Piloto. *International journal of odontostomatology*, 18(3). doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-381X2024000300335>
- Lozano, R. (23 de 01 de 2019). *Taloselectronics*. Obtenido de Celdas de cargas:  
<https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/celda-de-carga-hx711>
- Madiouni, I. T. (2024). *Comprobaciones y ensayos estáticos recomendados durante el proceso de aceptación de motores eléctricos*. Universidad Politécnica de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/200112>
- Majid, H., Lubis, A., Saputra, A., & Purboputro, P. (2023). Diseño y fabricación de un tribómetro portátil de bloque sobre SS-201. *Atlantis Press*, 1, 260-267. doi:[doi:doi.org/10.2991/9789464631340\\_](https://doi.org/10.2991/9789464631340_)

- Manzur, A. (2008). Cuando la fuerza de fricción estática se convierte en fuerza de fricción cinética y viceversa. *Revista Mexicana de Física*, 54(1), 51-54. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v54n1/v54n1a8.pdf>
- Maslanczuk, M. D., Brazes, J. I., & Tolosa, H. J. (2018). Diseño y evaluación de un panel solar fotovoltaico y térmico para poblaciones dispersas en regiones de gran amplitud térmica. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 19(2). Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432018000200209](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432018000200209)
- McGee, M., Howie, D., Costi, K., Haynes, D., Wildenauer, C., Percy, M., & McLean, J. (2000). Implant retrieval studies of the wear and loosening of prosthetic joints: a review. *Wear*, 241(2), 158-165. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164800003707>
- Meliá, E. C. (2021). *Contribución de la obra científico-técnica de Leonardo da Vinci a los proyectos de ingeniería*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/handle/10251/176002>
- Miranda Monge, R. A., Porrás Salas, J. C., & Vergara Pacheco, J. P. (2023). *Diseño de un prototipo de tribómetro para ensayos de pin en disco y bloqueo en anillo*. Universidad de Costa Rica.
- Moltó, J. J. (2021). *Las principales aplicaciones de la IA en tribología es la optimización de materiales y condiciones operativas*. Universidad Politécnica de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de [https://oa.upm.es/68594/1/TFG\\_JORGE\\_JUAN\\_GARCIA\\_MOLTO.pdf](https://oa.upm.es/68594/1/TFG_JORGE_JUAN_GARCIA_MOLTO.pdf)
- Monsalve, R. R. (2020). *Estudio de la viabilidad de la fabricación aditiva para la elaboración de componentes industriales en aleaciones de titanio*. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/149030/Ruiz%20-%20Estudio%20de%20la%20viabilidad%20de%20la%20fabricaci%3%b3n%20aditiva%20para%20la%20elaboraci%3%b3n%20de%20componentes%20ind u...pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Morato, D. M. (2024). *Análisis del flujo de refrigeración por aire en torneado de acero*. Universitat Oberta de Catalunya. Universitat Oberta de Catalunya. Obtenido de <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/150561/4/dmartinezmoratTFM0624 memoria.pdf>
- Moreno, A., & Campos, J. (5 de 11 de 2007). Revisión de diferentes técnicas de metrología óptica. *Opt. Pura*, 40(3). Obtenido de [https://www.sedoptica.es/Menu\\_Volumenes/Pdfs/265.pdf](https://www.sedoptica.es/Menu_Volumenes/Pdfs/265.pdf)

- Motta, S. Y. (2023). *Posible evolución de los modelos explicativos de fricción en estudiantes de ingeniería, a través de una unidad didáctica bajo el enfoque Stem*. Universidad Autónoma de Manizales. Manizales : Universidad Autónoma de Manizales. Obtenido de <https://repositorio.autonoma.edu.co/server/api/core/bitstreams/ac0dac25-bc0b-4e28-8a2e-49cc10abd62d/content>
- Muñoz, D. X., & Cuadros, L. G. (2018). Diseño y construcción de una máquina para determinar el desgaste por fricción en distintos materiales en el sector marítimo mediante la aplicación de torque. *Revista de Ciencias del Mar y Acuicultura YAKU*, 1(2). Obtenido de <https://publicacionescd.uileam.edu.ec/index.php/yaku/article/view/69>
- Murphy, K. (2012 ). *Machine Learning a probabilistic perspective*. Obtenido de <https://raw.githubusercontent.com/kerasking/book-1/master/ML%20Machine%20Learning-A%20Probabilistic%20Perspective.pdf>
- Norton, R. (2010). *Diseño de maquinaria: Un enfoque integrado (4.º ed.)*. Mc Graw Hill. doi:978-970-10-6884-7
- Ocampo, M. E. (2022). *Optimización y modelación mediante inteligencia artificial de parámetros tribológicos de capas de carbono quasi-diamante y borurado sobre acero 4140*. Instituto Tecnológico de Tlalnepantla. Obtenido de <http://51.143.95.221/bitstream/TecNM/5844/2/TESIS.pdf>
- Ordoñez, D. (2015). *Validación del coeficiente de fricción dinámica mediante tres procedimientos para materiales de uso común en ingeniería*. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de ingeniería mecánica . Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/71398887.pdf>
- Organización Internacional de Normalización. (7 de 12 de 2023). *Tolerancias estándar en la fabricación: ISO 2768, ISO 286*. Obtenido de Xometry: <https://xometry.pro/es/articulos/tolerancias-estandar-de-fabricacion/>
- Organización Internacional de Normalización 2768-1. (1989). *Tolerancias generales – Parte 1: Tolerancias para dimensiones lineales y angulares sin indicación individual. ISO 2768-1:1989*. ISO.
- Organización Internacional de Normalización ISO 286-1. (2010). *Sistemas de tolerancias y ajustes – Parte 1: Bases del sistema, tolerancias y ajustes. ISO 286-1:2010*. Ginebra: ISO.
- Ortiz Armenta, M., Vera Cárdenas, E., Abundis Fong, H., & Martínez Pérez, A. (22 de 09 de 2021). Diseño mecánico: Pruebas de desgaste. *Diseño conceptual de un tribómetro lineal recíprocante*, págs. 127-135. Obtenido de [https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A1\\_45.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2021/articulos/A1_45.pdf)

- Ortiz, M. R. (2019). *Análisis de la microestructura y estudio de las propiedades en piezas soldadas por soldadura MAG entre acero F-1140 y fundición lamilar sometidas a tratamientos térmicos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/127275/Roca%20-%20An%20c3%20a1lisis%20de%20la%20microestructura%20y%20estudio%20de%20las%20propiedades%20en%20piezas%20soldadas%20por%20soldadu....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Osorio, L., Beltrán, D., Ramírez, J., Díaz, K., Molina, C., & Quintana, S. (30 de 12 de 2022). Exploración de la medición del coeficiente de rozamiento en láminas decorativas de alta presión. *Teknos Revista Científic*, 22(2), 10-19. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9827302>
- Otero, E., Utrilla, M., Ureña, A., & Múñez, C. (2004). Influencia de la composición química en la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidable. *Boletín de la sociedad española de Cerámica y Vidrio*, 43(2), 190-192. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Urena/publication/287043522\\_Influence\\_of\\_chemical\\_composition\\_on\\_pitting\\_corrosion\\_resistance\\_of\\_stainless\\_steels/links/6041ef9b4585154e8c780b45/Influence-of-chemical-composition-on-pitting-corrosion-resistance](https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Urena/publication/287043522_Influence_of_chemical_composition_on_pitting_corrosion_resistance_of_stainless_steels/links/6041ef9b4585154e8c780b45/Influence-of-chemical-composition-on-pitting-corrosion-resistance)
- Paisan, Y. P., & Moret, J. P. (2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de los procesos de medición. *Tecnología química*, XXX(2). Obtenido de <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/994/946>
- Pascual Guillamón, M., Cárcel Carrasco, J., & Pérez Puig, A. (2014). Características microestructurales y en la resistencia a la corrosión en soldaduras de acero AISI 304 con INCONEL 625 expuestas a radiación ionizante (radiación X). *DYRA Ingeniería e Industria*, 89(5), 542-551.
- Paste, M. A. (2024). *Implementación de un sistema de control eléctrico móvil con conexión a los módulos del laboratorio de tribología de la Facultad de Mecánica*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo . Riobamba : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo . Obtenido de <https://dspace.esPOCH.edu.ec/server/api/core/bitstreams/1eeb4187-a5c4-48f2-a6b8-1a1bcf9344c7/content>
- Paternina, M. A., Villalba, L. C., J. L., & Lópe, R. A. (15 de 5 de 2012). Diseño de prototipo de sistema solar fotovoltaico optimizando el ángulo de inclinación de los paneles solares. *Revista Prospectiva*, 10(1), 97-107. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250733011.pdf>

- Pérez Rodríguez, Á., Ferrás Santiesteban, E., Pérez Pérez, M., & Fernández Santín, J. (Diciembre de 2014). Síntesis, caracterización y propiedades de nylons 5,m. *Revista Cubana de Química. Scielo*, 26(3).
- Pérez, F. d., Hernández, A. G., Alonso, I. G., Palma, M. d., Domínguez, G. G., & Güitrón, L. E. (2023 ). Pruebas toxicológicas para la evaluación de nanomateriales: Artículo de revisión. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(5).  
doi:<https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11825>
- Pérez, F. M. (2002). *La tribología ciencia y técnica para el mantenimiento*. LIMUSA Norega Editores. Obtenido de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=ht0KP\\_IscosC&oi=fnd&pg=PA9&dq=tribologia&ots=UpYSiGojYZ&sig=kX8ZcoNyyUcTqrpglCQT8naAFWc&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=true](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=ht0KP_IscosC&oi=fnd&pg=PA9&dq=tribologia&ots=UpYSiGojYZ&sig=kX8ZcoNyyUcTqrpglCQT8naAFWc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true)
- Pérez, M. B., Ruiz, I. G., & Martínez, D. C. (12 de 10 de 2012). Sistema de referencia para la calibración de detectores de potencia por comparación directa. *Simposio de metrología*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Botello-Perez/publication/235561621\\_SISTEMA\\_DE\\_REFERENCIA\\_PARA\\_LA\\_CALIBRACION\\_DE\\_DETECTORES\\_DE\\_POTENCIA\\_POR\\_COMPARACION\\_DIRECTA/links/0f31753c7e7e82815b000000/SISTEMA-DE-REFERENCIA-PARA-LA-CALIBRACION-DE-DETECT](https://www.researchgate.net/profile/Mariano-Botello-Perez/publication/235561621_SISTEMA_DE_REFERENCIA_PARA_LA_CALIBRACION_DE_DETECTORES_DE_POTENCIA_POR_COMPARACION_DIRECTA/links/0f31753c7e7e82815b000000/SISTEMA-DE-REFERENCIA-PARA-LA-CALIBRACION-DE-DETECT)
- Pérez, M. R., González, P. L., & Alfonso, I. (2019). Mejora de la resistencia al desgaste abrasivo de un revestimiento Fe-Cr-Mn-C mediante la adición de V. *Revista Materia*, 24(1). doi:<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0610>
- Pineda, G. S., & Argote, L. F. (2000). Interferometría laser y análisis de incertidumbres aplicados en vibraciones mecánicas. *VI Congreso Anual Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*. Obtenido de <https://www.cenam.mx/DVA/Documentos/Interferometr%C3%ADa%20e%20incertidumbres%20en%20vibraciones%20SOMIM-2000.pdf>
- Piro, E. (2012). *Notas sobre Física General: Resistencia a la rodadura*. Universidad Nacional de La Plata . Universidad Nacional de La Plata . Obtenido de <http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisicageneralcn/Resistenciarodadura.pdf>
- Popov, V. (2020). *Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia*. UNE. doi:10.14198/pua.2020.meccon
- Portilla, I. C. (2020). *Análisis y simulación de transferencia de calor en el sistema de tribología pin on disk fabricado de inconel 718*. CONACYT. Santiago de Querétaro: CONACYT. Obtenido de <https://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1024/435/1/ETM-ECOP-2019.pdf>

- Preciado, J. A. (2017). *Influencia del temple desde temperaturas intercríticas y el revenido en la resistencia a la fatiga de un acero SAE 1045*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas . Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas . Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/f423465a-856e-44bd-b747-ea968890b100/content>
- Pryor, A., Réquíz, R., Berrocal, A., & Miranda, A. (1986). Comportamiento a la Oxidación a Altas Temperaturas de un Acero AISI 316 Modificado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 6(1). Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54126711/RLMM\\_Art-86V6N1-p55-libre.pdf?1502559513=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DComportamiento\\_a\\_la\\_Oxidacion\\_a\\_Alta\\_s\\_Te.pdf&Expires=1741407385&Signature=CI2bwqiFML-7vTWTeU5YqX2DinEpn~RwQencsGDRMe](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/54126711/RLMM_Art-86V6N1-p55-libre.pdf?1502559513=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DComportamiento_a_la_Oxidacion_a_Alta_s_Te.pdf&Expires=1741407385&Signature=CI2bwqiFML-7vTWTeU5YqX2DinEpn~RwQencsGDRMe)
- Quiroga, L., Molina , M., Urbano Pintos, N., Martinenko, V., & Zanin, M. (2023). *Sistema de adquisición y control de un tribómetro pin-on-disk*. AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN. doi:<https://doi.org/10.33414/ajea.1299.2023>
- Quispe, M. A. (2019 ). *Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos Off The Road O.T.R. en la planta Lima Caucho S.A*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Lima : Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). Obtenido de [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628203/Lara\\_QM.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628203/Lara_QM.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Ramos, M. E. (2015). Diseño de un reductor de 746 W de acero de bajo C para una máquina de pruebas de abrasión. *Revista de aplicaciones de la ingeniería*. Obtenido de [https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones\\_de\\_la\\_Ingenieria/vol2num3/Aplicaciones\\_de\\_la\\_Ingenieria\\_Vol2\\_Num3.pdf#page=79](https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol2num3/Aplicaciones_de_la_Ingenieria_Vol2_Num3.pdf#page=79)
- Rodríguez Cañizo, R. G., García García, L. A., Vite Torres, M., Merchán Cruz, E. A., & Sandoval Pineda, J. M. (2010). Análisis experimental del desgaste entre UHMWPE y acero inoxidable 316L empleados en la manufactura de prótesis coxofemorales. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), 67-85.
- Rodríguez, J. A., & Amaris, H. A. (1999). Incidencia de la lubricación en elementos mecánicos en movimiento. *Revista de la Facultad de ingeniería Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 8(1), 93-100. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5313918>
- Rodriguez, J. S., & Gutierrez, D. A. (2022). *Diseño de una máquina para el laboratorio de tratamientos térmicos de la Fundación Universidad de América que*

*cuantifique y verifique las variables para una correcta realización del ensayo Jominy bajo la norma ASTM-A255.* Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías . Bogotá : Fundación Universidad de América. Obtenido de <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce76e4fa-53a6-48d4-a044-9d9dea759ab2/content>

Rojas, C. H., & Mora, S. A. (2020). *Diseño y simulación de un banco hidráulico didáctico para la determinación de pérdidas de energía por fricción del agua en tuberías PVC y acero inoxidable.* Universidad Antonio Nariño, Facultad de ingeniería mecánica . Universidad Antonio Nariño. Obtenido de <https://repositorio.uan.edu.co/server/api/core/bitstreams/fe5f6f7-514c-469e-bf70-f8e788fcb498/content>

Romero, J., & Rondón, E. (2019). Fricción por rodamiento del acero AISI 4140 en tribómetro anillo sobre anillo. *Ingeniería UC*, 26(2), 185-191. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70760276007>

Romeva, C. R. (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas.* Edicions UPC. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36844/9788498804065.pdf>

Rudas, J., Gómez, L., & Toro, A. (2013). Modelamiento del proceso de desgaste de un tribómetro pin-disco: Flash temperature y mecanismos de disipación. *SCIELO*, 10(2), 9-27. doi:ISSN 1692-1798

Ruggiero, A., Silicia, A., & Affatato, S. (2020). Pruebas de desgaste de reemplazo total de cadera in silico en el marco de la norma ISO 14242-3 que tienen en cuenta los efectos de lubricación elastohidrodinámica mixta. *WEAR*, 460-461. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164820308796>

Saiz, M. T. (2020). *Estudio experimental de biosensores forónicos basados en sustratos porosos bajo diversas condiciones.* Universidad Politécnica de Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/171769/Tebar%20-%20Estudio%20experimental%20de%20biosensores%20fotonicos%20basados%20en%20sustratos%20porosos%20bajo%20diversas....pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sandoval, E. M. (2023). *Diseño de un equipo para medir coeficientes de fricción en vías ferroviarias.* Tecnológico Nacional de México . Tecnológico Nacional de México . Obtenido de [https://itp.itpachuca.edu.mx/pdf/repositorio\\_tesis/12200811.pdf](https://itp.itpachuca.edu.mx/pdf/repositorio_tesis/12200811.pdf)

Sanmarco, E. D. (2020). Herramientas tribológicas aplicadas en la prevención del desgaste en equipos industriales. *Revista de ingeniería*, LXVII(153 ), 8-13. Obtenido de

[https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/109924/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/109924/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Sardiñas, C. R. (25 de 1 de 2023). La tribología y los costos de mantenimiento: una alternativa para el incremento de los beneficios económicos. *Revista Esquivel*, 12(1), 106-117. doi:<https://orcid.org/0000-0001-8588-6311>
- Shigley, J., & Uicker Jr, J. (2011). *Teoría de Máquinas y mecanismos*. Mc Graw Hill. doi:ISBN 968-451-297-X
- Stachowiak , G., & Batchelor, A. (2014). *Engineering Tribology*. ScienceDirect. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397047-3.00006-0>.
- Taborda, Y. L. (2020). *Evaluación de propiedades físicas, químicas y biotribológicas de prótesis modulares de caderas explanadas*. Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería. Medellín : Universidad de Antioquia. Obtenido de [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17379/1/GomezYesenia\\_2020\\_ProtesisCaderaExplantada.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/17379/1/GomezYesenia_2020_ProtesisCaderaExplantada.pdf)
- Torres, L. S. (2022). *Microestructura de materiales incompatibles cobre-acero inoxidable unidos por soldadura en estado sólido*. Universidad de Moa . Moa : Universidad de Moa . Obtenido de <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4221/SuarezTorresL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Trinchet, C. C. (2019). *Nanopartículas como objetos innovadores para la mejora de la calidad de procesos tribológicos y analíticos*. Tesis . Obtenido de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/54102>
- Uría, P. M., & Vargas, E. P. (31 de 12 de 2019). Influencia del tipo de material, superficie de contacto y altura de almacenaje sobre el ángulo de reposo, en materiales granulares. *Ciencia & Desarrollo*, 18(25 ), 22-31. doi:<https://doi.org/10.33326/26176033.2019.25.860>
- Useche, L. V., Londoño, J. F., & Wahab, M. A. (30 de 11 de 2011). Efecto de la Fuerza Normal sobre el Coeficiente de Fricción entre dos Superficies Sólida. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 5(10), 75 - 92. Obtenido de <http://ojs.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/720/718>
- Vargas, P., & Rodríguez, L. (2020). Influencia de la temperatura y humedad en ensayos tribológicos. *Journal of Tribolog*, 5(142).
- Velázquez, A. L., Urbina, Y. D., Franco, R. A., & Sánchez, E. J. (2020). Diseño y manufactura de un prototipo tribológico. *Memorias del XXVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Obtenido de [https://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A1\\_27.pdf](https://somim.org.mx/memorias/memorias2020/articulos/A1_27.pdf)

- Viejo, J. L., Jama, A. M., & Piguave, R. A. (2023). La importancia de la tribología en la mecánica industrial. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(12). Obtenido de <https://www.journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/129>
- Vigo, J. S., & Carranza, M. Z. (2024). *Diseño y fabricación de una máquina de ensayo de desgaste adhesivo para la Escuela de Ingeniería Mecánica*. Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4d6e1e07-3c48-45e4-b22b-f32f2ecc6a5c/content>
- Villegas, V. C. (2023). *Aumento de disponibilidad de las máquinas para mejorar la productividad en una planta de fabricación de acero mediante un programa de lubricación con gestión de monitorización y control*. Ambato : Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/046b26d2-f8f6-4714-b085-df0f9a46f41c/content>

## Glosario

**Acero:** Aleación de hierro y carbono (0,008–2,11% de C) ampliamente empleada en ingeniería por su resistencia y ductilidad

**Carga normal:** Fuerza aplicada perpendicularmente sobre las superficies en contacto durante un ensayo tribológico. Es la componente normal de la carga total; en tribología, la fricción suele ser proporcional a esta carga a través del coeficiente de fricción.

**Coefficiente de fricción ( $\mu$ ):** Número adimensional que indica la relación entre la fuerza de fricción  $F_r$  y la fuerza normal  $N$ . Un valor alto de  $\mu$  significa mayor resistencia al deslizamiento relativo entre superficies.

**Desgaste:** Proceso de deterioro o pérdida de material de las superficies en contacto con el tiempo, causado por fricción, cargas aplicadas u otros fenómenos mecánicos. El desgaste es la erosión gradual del material debido al roce; sus mecanismos incluyen desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga, corrosión, entre otros.

**Ensayo experimental:** Conjunto de pruebas planificadas en condiciones controladas donde se manipulan variables de entrada (factores) de un sistema o material para observar y analizar los cambios en las respuestas o salidas del experimento.

**Fricción:** Resistencia al movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto. Es la fuerza que se opone al deslizamiento o intento de deslizamiento de las superficies, originada por la interacción de las irregularidades microscópicas de ambas.

**Lubricación:** Proceso de interposición de una sustancia (lubricante) entre dos superficies móviles para reducir la fricción y el desgaste. El lubricante forma una película que separa las superficies, minimizando el contacto directo y la generación de calor.

**Metrología:** Ciencia de la medición y sus aplicaciones. Abarca los aspectos teóricos y prácticos de la medición, incluyendo la calibración de instrumentos y el control de la incertidumbre. Su objetivo principal es obtener valores de magnitudes físicas con la exactitud y precisión requeridas mediante métodos y herramientas adecuados.

**Nylon:** Familia de polímeros sintéticos del grupo de las poliamidas, es un material plástico de alta resistencia mecánica y buena elasticidad, con bajo coeficiente de fricción y buena resistencia al desgaste.

**Sensor:** Dispositivo que detecta cambios físicos (por ejemplo, desplazamiento, fuerza, temperatura) en el entorno y los convierte en señales eléctricas (analógicas o digitales) medibles. En metrología e instrumentación tribológica, los sensores miden variables experimentales (fuerzas, desplazamientos, velocidades, etc.) permitiendo registrar datos precisos para el análisis.

**Tribología:** Disciplina de la ingeniería que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación entre superficies en movimiento relativo. Buscando entender los fenómenos de interacción superficial para minimizar el desgaste y optimizar el rendimiento de componentes mecánicos. Se aplica al diseño de materiales y recubrimientos, selección de lubricantes y al análisis de sistemas tribológicos complejos.

**Tribómetro:** Instrumento de laboratorio o de campo utilizado para medir la fricción y el desgaste entre dos superficies en contacto bajo condiciones controladas, el cual permiten cuantificar el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste de materiales experimentales.

## Anexos 1

### Manual de Usuario — Conversión de Lecturas a Fuerzas

Equipo: pin-on-disk con dos celdas de carga. Ejes: Vertical → Fuerza Normal (FN) y Horizontal → Fuerza de Fricción (FT). Objetivo: convertir lecturas crudas (voltios/cuentas ADC) a Newtons (N) mediante un procedimiento claro, repetible y trazable.

#### 1) Alcance y concepto

Este documento describe el proceso de calibración y uso para convertir las señales crudas de los sensores en fuerzas FN y FT. Se asume un comportamiento lineal y se excluye la compensación por crosstalk (acoplamientos entre ejes). La calibración se realiza aplicando fuerzas conocidas directamente en el punto de contacto del ensayo para incorporar automáticamente palancas o relaciones geométricas.

#### 2) Requisitos y preparación

- A. Masas patrón o dinamómetro (tracción lateral).
- B. Cordel + polea/rodillo de baja fricción (para FT).
- C. Balanza para verificar masas; termómetro (opcional).
- D. Electrónica energizada 10–15 min antes (estabilización térmica).
- E. Máquina detenida y aplicación de carga en el punto de contacto.
- F. Aceleración de la gravedad:  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$  (9,81 aceptable).

#### 3) Variables y símbolos

Símbolo	Descripción	Unidad / Nota
$V, H$	Lecturas crudas vertical y horizontal	cuentas/voltios
$V_o, H_o$	Offset (cero) vertical y horizontal	V, H
$a_V, b_V$	Ganancia e intercepto para FN	N/(unidad cruda), N
$a_H, b_H$	Ganancia e intercepto para FT	N/(unidad cruda), N
m	Masa aplicada	Kg
W	Fuerza peso ( $m \cdot g$ )	N

Símbolo	Descripción	Unidad / Nota
G	Aceleración de la gravedad	m/s <sup>2</sup>
FN , FT	Fuerza Normal y Fuerza de Fricción	N

#### 4) Tara (offset de cero)

Con el equipo sin carga: registra V y H durante 10–20 s y calcula los promedios. Define  $V_0 = \text{media}(V)$  y  $H_0 = \text{media}(H)$ . Repite la tara al inicio de cada jornada o ensayo.

#### 5) Calibración Vertical → Fuerza Normal (FN)

- 1) Coloca masas conocidas  $m_i$  (0,5–5 kg) sobre el punto de contacto.
- 2) Para cada  $m_i$  registra V 5–10 s y calcula la media.
- 3) La fuerza verdadera es  $W_i = m_i \cdot g$
- 4) Ajusta el modelo lineal por mínimos cuadrados:

$$FN = a_o \cdot (V - V_0) + b_v$$

Criterios típicos de aceptación:  $R^2 > 0,999$ ; histéresis (subida/bajada)  $< \pm 1$  % FS; repetibilidad  $\sigma < \pm 0,3$  % FS.

#### 6) Calibración Horizontal → Fuerza de Fricción (FT)

Método recomendado: cordel + polea y masas, con la máquina detenida. La masa colgada  $m_i$  produce una tensión  $T_i \approx m_i \cdot g$  aplicada tangencialmente al contacto. Registra H para varios puntos y ajusta:

$$FT = a_H \cdot (H - H_0) + b_H$$

Alternativas: dinamómetro aplicado tangencialmente o empuje lateral con pesas.

#### 7) Validación de la calibración

- A. Linealidad: coeficiente de determinación  $R^2$  y residuales sin tendencia.
- B. Histéresis: diferencia entre curvas de subida y bajada ( $< \pm 1$  % FS).
- C. Cero: deriva del offset tras 10 min ( $< \pm 1$  % FS).
- D. Repetibilidad: desvío estándar  $\sigma$  con la misma masa ( $< \pm 0,3$  % FS).

### 8) Uso operativo (día a día)

- A. Encender y esperar 10–15 min (estabilidad térmica).
- B. Realizar tara: fijar  $V_0$  y  $H_0$ .
- C. Convertir lecturas en tiempo real:

$$FN = a_v \cdot (V - V_0) + b_v$$

$$FT = a_H \cdot (H - H_0) + b_H$$

- D. A partir de FN y FT calcular  $\mu = FT/FN$ , y otras métricas si se requiere.

### 9) Implementación rápida en Power BI (Medidas DAX)

FN (N) = 'a\_V'[Value]\* ( AVERAGE(lecturas[vertical]) - 'V0'[Value] ) + 'b\_V'[Value]

FT (N) = 'a\_H'[Value]\* ( AVERAGE(lecturas[horizontal]) - 'H0'[Value] ) + 'b\_H'[Value]

Mu = DIVIDE( [FT (N)], [FN (N)] )

### 10) Lista de verificación (checklist)

- A. Masas verificadas y anotada su incertidumbre.
- B. Aplicación de carga en el punto de contacto (palancas incorporadas).
- C. Rango de calibración cubre 10–100 % de FS en varios puntos.
- D. Se documentan  $V_0$ ,  $H_0$ ,  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $a_H$ ,  $b_H$  y criterios de aceptación.
- E. Se archivan residuales,  $R^2$  y fecha/temperatura.