

Estudio Económico y Técnico para Implementar un Programa y Prototipo de Mantenimiento 5.0
para un Equipo de un Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad
Industrial de Santander

Fredy Alejandro Acevedo Acevedo y Andrés Felipe Muñoz Piza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Directora

Paula Andrea Cuervo Velásquez

Doctora en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Este trabajo no es solo mío, es el resultado de una historia construida con el amor, el esfuerzo y los sacrificios de mi familia, y quiero dedicarlo a ustedes. Así como a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría para afrontar cada reto, y por acompañarme en cada momento hasta permitirme llegar aquí.

A mis padres, Myriam Acevedo y Jaime Acevedo, por ser el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor, su apoyo incondicional y por cada sacrificio que hicieron para que hoy pudiera estar aquí. Mamá, gracias por ser ese ejemplo de lucha y perseverancia, por enseñarme que rendirse nunca fue una opción y por impulsarme siempre a soñar sin límites. Papá, gracias por enseñarme el valor del trabajo, por tu dedicación, tu confianza y por demostrarme que los sueños se cumplen con esfuerzo. Hoy quiero que sepan el profundo amor, admiración y orgullo que siento por ustedes; todo lo que soy y lo que estoy logrando tiene sus raíces en los valores que me inculcaron.

A mi hermana, Geraldine, por acompañarme siempre en este camino. Gracias por la carta que dejaste en mi maleta el día que me fui a empezar este sueño; encontrarla, solo en una ciudad nueva, fue uno de los momentos que más me marcó. Tus palabras fueron mi fuerza en los momentos más difíciles y me impulsaron a no rendirme. Hoy estas cumpliendo tus sueños y estoy muy orgulloso de ti, siempre contarás conmigo.

A mi hermana menor, Mayra, por tu ternura, tus abrazos y tu nobleza. Eres una parte esencial de mi vida. Me siento profundamente orgulloso de ti y siempre estaré para apoyarte, cuidarte y ayudarte a cumplir tus sueños, no importa cuánto tiempo pase siempre serás mi hermanita pequeña.

A mi abuelita, Esther Sierra, no tengo palabras suficientes para expresar cuánto te amo y cuán agradecido estoy contigo por tu amor incondicional, tus consejos y por ser ese refugio al que siempre puedo volver. Gracias por cuidarme desde niño y seguir haciéndolo hoy; tu cariño ha sido una de las fuerzas más bonitas que me han sostenido.

A mi abuelito, Filemón Acevedo, a quien admiro profundamente y de quien me siento inmensamente orgulloso de ser su nieto. Aunque no estés físicamente conmigo, vives en cada paso que doy. Este logro también es tuyo. Me habría dado todo por tenerte aquí y poder decirte que lo logré. Cambiaría lo que fuera por poder abrazarte una vez más y agradecerte por tu amor, tu ejemplo y todos los recuerdos que dejaste en mi vida... Un abrazo hasta el cielo, abuelito.

A mi tío, Edgar Acevedo, por tu cariño, por cuidarme, defenderme y estar siempre para mí. Gracias por apoyar cada uno de mis sueños y locuras, por demostrar que tus sobrinos son lo más importante.

Este trabajo representa noches difíciles, dudas y esfuerzos que nadie vio, pero también cada palabra de aliento y todo el amor que encontré en ustedes. Hoy cierro esta etapa con orgullo y, sobre todo, con gratitud, porque este logro no es solo mío... es de ustedes, que nunca me soltaron.

Fredy Acevedo

Dedicatoria

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental de este logro. Gracias por su amor y apoyo incondicional

A todos los compañeros que estuvieron desde el inicio, compartiendo largas jornadas de estudio y valiosos momentos, gracias por su compañía, apoyo y por hacer de este proceso una experiencia enriquecedora.

A mi directora de tesis, por su constante acompañamiento, orientación y dedicación durante el desarrollo de este trabajo de grado. Su guía fue esencial para culminar con éxito esta etapa.

A mi compañero de tesis, por su perseverancia, compromiso y por depositar su confianza en este paso final tan importante de la carrera. Gracias por el apoyo mutuo y por recorrer juntos este camino.

A mi pareja, por ser mi compañía y apoyo emocional

A toda mi familia, por su respaldo incondicional. De manera muy especial, a mis primos, quienes me animaron a iniciar esta travesía y estuvieron presentes en uno de los momentos más difíciles de la carrera, brindándome fuerza y apoyo.

Finalmente, a todas las personas que hicieron parte de este paso tan importante en mi vida, gracias por su aporte, por creer en mí y por acompañarme en este proceso.

Felipe Muñoz

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo y culminación de este trabajo de grado.

En primer lugar, agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la formación académica, los recursos y el espacio necesario para el desarrollo de este proyecto, permitiéndonos fortalecer nuestras competencias profesionales y personales.

A nuestra directora de tesis, Paula Andrea Cuervo Velásquez, por su acompañamiento constante, orientación académica, dedicación y valiosos aportes durante todo el proceso. Su guía fue fundamental para el desarrollo exitoso de este trabajo.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, quienes a lo largo de nuestra formación compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo significativamente a nuestra preparación como futuros ingenieros.

A nuestros compañeros y amigos, por su apoyo, colaboración y por compartir este proceso académico lleno de retos y aprendizajes.

De manera muy especial, agradecemos a nuestras familias, quienes han sido el pilar fundamental en este camino, brindándonos su apoyo incondicional, motivación y confianza en cada etapa de nuestra formación.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas que, de una u otra forma, aportaron al desarrollo de este proyecto y nos acompañaron en este importante logro académico.

Tabla de contenido

Introducción	17
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Planteamiento del problema.....	19
3. Marco teórico	22
3.1 Evolución del Mantenimiento Industrial	22
3.2 Tecnologías Clave en el Mantenimiento 5.0.....	23
3.3 Gestión Económica y Uso Eficiente de Recursos	24
3.4 Formación Académica y Capacitación en Mantenimiento 5.0.....	24
3.5 Implementación Práctica en Laboratorios Universitarios.....	24
4. Metodología	25
4.1 Fase 1: Documentación y análisis de condición	25
4.2 Fase 2: Identificación y análisis de parámetros de monitoreo	26
4.3 Fase 3: Análisis de viabilidad económica.....	26
4.4 Fase 4: Diseño de implementación del mantenimiento 5.0 con apoyo en realidad virtual y gemelos digitales.....	27
4.5 Fase 5: Elaboración de un protocolo para plan de mantenimiento basado en Mantenimiento 5.0.....	27
4.6 Fase 6: Traducir documento.....	28
5. Diagnóstico del estado de operaciones	29

5.1 Descripción técnica del banco motor monocilíndrico de vibraciones	29
5.1.1 Evaluación documental y mantenimiento actual	31
5.1.2 Inspección física y condiciones de seguridad	32
5.1.3 Evaluación funcional del sistema.....	32
5.1.4 Nivel de digitalización	33
5.1.5 Historial del banco de laboratorio motor mono cilíndrico	33
5.1.6 Hoja de vida y trazabilidad.....	34
5.1.7 Fallos recurrentes reportados.....	34
5.2 Clasificación de Banco motor mono cilíndrico de vibraciones según la ISO 14224	36
5.3 Digitalización y automatización actual del banco motor mono cilíndrico vibraciones.....	38
5.4 Diagnóstico del estado de operaciones para tribómetro.....	41
5.4.1 Descripción técnica del equipo	42
5.4.2 Sistema de movimiento	43
5.3.3 Sistema de control y monitoreo.....	44
5.4.4 Características físicas y requisitos de instalación.....	44
5.4.4 Taxonomía del tribómetro bruker según la ISO 14224	45
5.4.5 Evaluación documental y mantenimiento actual del tribómetro	46
5.5 Evaluación de viabilidad para la integración de tecnologías 5.0	53
6. Diseño del plan de mantenimiento 5.0 basado en parámetros de monitoreo e instrumentación.....	60
6.1 Descripción del ensayo tribológico seleccionado (Bola–Disco).....	60
6.2 Definición de puntos de medición del sistema.....	65
6.3 Selección de sensores e instrumentación compatible	66

6.3.1 Carga normal.....	67
6.3.2 Coeficiente de fricción	68
6.3.3 Velocidad de rotación.....	69
6.3.4 Número de ciclos.....	70
6.3.5 Instrumentación de temperatura seleccionada para el ensayo en el tribómetro	71
6.3.6 Instrumentación de desgaste seleccionada para el ensayo en el tribómetro	72
6.3.7 Sensor de emisión acústica seleccionada para el ensayo en el tribómetro	73
6.3.8 Sensor de vibración para el ensayo en el tribómetro	75
6.4 Arquitectura de adquisición y almacenamiento de datos	77
6.5 Sistema de adquisición de datos (DAQ)	78
6.6 Infraestructura de comunicación IoT	80
6.7 Almacenamiento de datos del sistema de monitoreo	81
6.8 Análisis y visualización	81
6.9 Análisis inteligente.....	82
6.10 Arquitectura IoT para el monitoreo de condición y análisis inteligente del tribómetro.....	83
7. Plan de mantenimiento basado en condición	86
7.1 Fundamento de la curva P-F.....	87
7.2 Clasificación de rangos de condición para el monitoreo del tribómetro.....	88
8. Análisis de viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0.	92
8.1 Identificación de instrumentos y tecnologías necesarias.....	93
8.2 Estimación de costos de implementación	94
8.3 Escenarios de costos de implementación	97
8.3.1 Escenario de bajo costo	97

8.3.2 Escenario de costo medio	97
8.3.3 Escenario de alto costo	97
8.3.4 Análisis de escenarios	99
9. Desarrollo de un protocolo de mantenimiento basado en realidad virtual y aproximación a gemelos digitales.....	102
9.1 Fase 1: Diseño del protocolo de mantenimiento 5.0	102
9.1.1 Protocolo para implementar mantenimiento en el equipo seleccionado	102
9.1.2 Integración del modelo digital y entorno virtual	103
9.1.3 Implementación y simulación del sistema de monitoreo del tribómetro bajo enfoque de mantenimiento 5.0.....	106
9.2 Implementación de la realidad virtual en ensayos de laboratorio	107
9.3 Aplicación de la herramienta como apoyo educativo y de capacitación	108
10. Resultados alcanzados y trabajos futuros	110
10.1 Producción académica derivada del trabajo.....	111
10.2 Trabajos futuros	112
11. Conclusiones	114
12. Recomendaciones	116
Referencias Bibliográficas	118
Apéndices.....	121

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Dimensiones del banco motor monocilíndrico de vibraciones</i>	31
Tabla 2 <i>Características eléctricas del banco motor monocilíndrico de vibraciones</i>	31
Tabla 3 <i>Métodos actuales de monitoreo y limitaciones del sistema de diagnóstico</i>	33
Tabla 4 <i>Análisis Digitalización y Automatización del banco motor monocilíndrico</i> <i>vibraciones</i>	38
Tabla 5 <i>Evaluación de viabilidad tecnologías 5.0 para el banco motor monocilíndrico</i>	39
Tabla 6 <i>Características físicas del tribómetro</i>	44
Tabla 7 <i>Requisitos eléctricos y condiciones ambientales de instalación</i>	45
Tabla 8 <i>Resumen de especificaciones operativas y de control del equipo</i>	47
Tabla 9 <i>Fallas frecuentes y acciones correctivas</i>	48
Tabla 10 <i>Diagnóstico del nivel de automatización y gestión de mantenimiento del equipo</i>	49
Tabla 11 <i>Tecnologías 5.0 aplicables al tribómetro</i>	49
Tabla 12 <i>Evaluación de viabilidad tecnologías 5.0 para el tribómetro</i>	50
Tabla 14 <i>Criterios de calificación para la evaluación tecnológica</i>	53
Tabla 15 <i>Evaluación de viabilidad tecnológica del banco motor monocilíndrico de</i> <i>vibraciones</i>	54
Tabla 16 <i>Evaluación de viabilidad tecnológica del tribómetro</i>	55
Tabla 18 <i>Resultados globales de viabilidad tecnológica por equipo</i>	57
Tabla 19 <i>Identificación de variables críticas del ensayo</i>	64
Tabla 20 <i>Puntos de medición de las variables del ensayo tribológico bola–disco.</i>	65
Tabla 21 <i>Variables que mide directamente el tribómetro</i>	67

Tabla 22 <i>Variables que no se pueden medir directamente por el tribómetro.....</i>	70
Tabla 23 <i>Variables del ensayo tribológico y sensores utilizados para su medición</i>	76
Tabla 22 <i>Comparación de alternativas para el sistema de adquisición de datos del sistema de monitoreo</i>	78
Tabla 23 <i>Algoritmos de Machine Learning aplicados al análisis de datos del tribómetro.....</i>	83
Tabla 24 <i>Rangos de condición para el monitoreo del tribómetro</i>	89
Tabla 25 <i>Plan de mantenimiento basado en condición para el tribómetro.....</i>	90
Tabla 26 <i>Recursos tecnológicos y de capacitación para la implementación del mantenimiento 5.0.....</i>	93
Tabla 27 <i>Estimación de costos de los recursos necesarios para la implementación del sistema de monitoreo del tribómetro.</i>	95
Tabla 30 <i>Escenarios técnicos para la implementación del monitoreo del tribómetro</i>	98

Lista de Figuras

Figura 1 Banco motor monocilíndrico de vibraciones	30
Figura 2 Estructura jerárquica de activos del banco motor monocilíndrico de vibraciones	37
Figura 3 Sistemas del tribómetro	42
Figura 4 Sistema de movimiento del tribómetro	42
Figura 5 Estructura jerárquica de activos del tribómetro del laboratorio de ingeniería mecánica	46
Figura 6 Esquema de funcionamiento del ensayo tipo bola–disco	61
Figura 7 Diagrama de flujo del ensayo tribológico tipo bola–disco.	63
Figura 8 Tipos de sensores de carga normal que se pueden instalar en el tribómetro según el manual.....	68
Figura 9 Módulos de accionamiento del tribómetro Bruker.....	70
Figura 10 Sensor de temperatura.....	72
Figura 11 Sensor de desgaste.....	73
Figura 12 Sensor de emisión acústica.....	74
Figura 13 Sensor de vibración	76
Figura 14 Tarjeta NI-USB6009.....	80
Figura 15 Arquitectura IoT para el monitoreo y análisis inteligente del tribómetro	84
Figura 16 Representación conceptual de la curva P-F aplicada al monitoreo de condición en el ensayo tribológico tipo bola–disco.	88
Figura 17 Escenarios didácticos de visualización a) Nivel de integración De tecnologías, b) implementación de sensores	100

Figura 18 <i>Metodología integral para la implementación de mantenimiento 5.0 basado en monitoreo y digitalización</i>	103
Figura 19 <i>Proceso de integración del modelo digital y entorno virtual.....</i>	105
Figura 20 <i>Modelado 3D del tribómetro para la implementación de mantenimiento 5.0</i>	106
Figura 21 <i>Entorno Virtual de Laboratorio Académico en Blender</i>	107
Figura 22 <i>Resultado etapa Interacción 3 simulada en entorno de realidad virtual desarrollado en Unity.....</i>	108

Lista de Apéndices

Apéndice A. Certificado de vinculación al grupo de investigación DIMA 121

Apéndice B. Póster académico sobre mantenimiento 5.0 en sistemas navales 122

Resumen

Título: Estudio económico y técnico para implementar un programa y protocolo de mantenimiento

5.0 para un equipo de un laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la universidad industrial de Santander¹

Autor: Fredy Alejandro Acevedo Acebedo, Andrés Felipe Muñoz Piza²

Palabras clave: mantenimiento 5.0, Internet de las Cosas (IoT), gemelo digital, monitoreo de condición, mantenimiento predictivo, análisis de datos, realidad virtual.

Descripción: El presente trabajo de grado tuvo como objetivo el diseño e implementación de un prototipo de mantenimiento 5.0 aplicado a un equipo del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el fin de mejorar la gestión del mantenimiento mediante la integración de tecnologías digitales. Este proyecto surgió como respuesta a la necesidad de mejorar los procesos de monitoreo, diagnóstico y toma de decisiones en sistemas industriales, incorporando herramientas propias de la industria 4.0 y 5.0. Inicialmente, se realizó un diagnóstico técnico del equipo seleccionado, identificando sus variables críticas de operación y posibles modos de falla. Posteriormente, se planteó el diseño de un sistema basado en sensores para la adquisición de datos en tiempo real, complementado con plataformas de almacenamiento y análisis de información. Asimismo, se desarrolló un modelo digital del sistema (gemelo digital), el cual permitió simular condiciones de operación y evaluar el comportamiento del equipo bajo distintos escenarios. Finalmente, se llevó a cabo un análisis técnico y económico del prototipo propuesto, verificando su viabilidad y beneficios en términos de reducción de fallas, administración de recursos y mejora en la confiabilidad del sistema. Este trabajo contribuyó al fortalecimiento del mantenimiento inteligente, promoviendo la transición hacia entornos industriales más eficientes, sostenibles y orientados a la toma de decisiones basada en datos.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingeniería Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Paula Andrea Cuervo Velásquez

Abstract

Title: Economic and technical study for the implementation of a Maintenance 5.0 programme and protocol for laboratory equipment at the School of Mechanical Engineering, Universidad Industrial de Santander¹

Authors: Fredy Alejandro Acevedo Acebedo, Andrés Felipe Muñoz Piza²

Keywords: Maintenance 5.0, Internet of Things (IoT), digital twin, condition monitoring, predictive maintenance, data analysis, virtual reality.

Description: This undergraduate thesis aimed to design and implement a Maintenance 5.0 prototype applied to a piece of equipment in the laboratory of the School of Mechanical Engineering, with the purpose of improving maintenance management through the integration of digital technologies. This project arose in response to the need to enhance monitoring, diagnostic, and decision-making processes in industrial systems by incorporating tools from Industry 4.0 and 5.0. Initially, a technical diagnosis of the selected equipment was carried out, identifying its critical operating variables and possible failure modes. Subsequently, the design of a sensor-based system for real-time data acquisition was proposed, complemented by information storage and analysis platforms. Likewise, a digital model of the system (digital twin) was developed, which allowed the simulation of operating conditions and the evaluation of the equipment's behavior under different scenarios. Finally, a technical and economic analysis of the proposed prototype was conducted, verifying its feasibility and benefits in terms of failure reduction, resource management, and improved system reliability. This work contributed to the strengthening of intelligent maintenance, promoting the transition towards more efficient, sustainable industrial environments oriented toward data-driven decision-making.

¹ Degree Work

² Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Paula Andrea Cuervo Velásquez

Introducción

El mantenimiento industrial evolucionó de enfoques correctivos y preventivos hacia estrategias más avanzadas basadas en el análisis de datos y la digitalización. En este contexto, el Mantenimiento 5.0 integra tecnologías como IoT, análisis en tiempo real y gemelos digitales para mejorar la gestión de activos y la eficiencia operativa.

El presente trabajo de grado, titulado “Diseño de un prototipo de mantenimiento 5.0 aplicado a equipos del laboratorio de ingeniería mecánica”, se desarrolló en el marco de la necesidad de modernizar los procesos de mantenimiento en entornos académicos, específicamente en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Estos espacios requirieron herramientas innovadoras que permitieran no solo el monitoreo constante de los equipos, sino también la anticipación de fallas y la administración de recursos.

Para ello, el proyecto se fundamentó en el diseño e implementación de un prototipo que integró sensores para la adquisición de datos en tiempo real, plataformas de almacenamiento y análisis de información, y el desarrollo de un gemelo digital del equipo seleccionado. Este enfoque permitió simular diferentes condiciones de operación, evaluar el comportamiento del sistema y apoyar la toma de decisiones basada en datos.

Finalmente, el desarrollo del prototipo incluyó un análisis técnico y económico que permitió validar su viabilidad y aporte al fortalecimiento del mantenimiento inteligente. De esta manera, el proyecto contribuyó a la transición hacia entornos más eficientes, sostenibles y alineados con las tendencias actuales de la industria. Adicionalmente, se contó con vinculación a un grupo de investigación y con producción académica asociada al tema de estudio, lo cual respaldó el desarrollo del presente trabajo (ver Apéndices A y B).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un plan que permita implementar mantenimiento 5.0 en un equipo de laboratorio de la Escuela de ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, estableciendo los parámetros clave a medir, evaluando la viabilidad económica y técnica de su aplicación, con el fin de implementar prácticas de mantenimiento 5.0 para los estudiantes.

1.2 Objetivos Específicos

Diagnosticar el estado de los equipos Banco motor mono cilíndrico de vibraciones y Tribómetro, operación, historial de mantenimiento para determinar la viabilidad de integrar tecnologías 5.0 de mantenimiento.

Diseñar plan de mantenimiento 5.0 con base en los parámetros de monitoreo claves y la instrumentación necesaria en el equipo de mayor viabilidad técnica con el fin de establecer las condiciones y tecnologías adecuadas a instrumentar.

Analizar la viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0 propuesto, evaluando los costos de los instrumentos y técnicas seleccionadas, así como los distintos escenarios económicos y técnicos, con el fin de que la escuela, con este estudio, avance en la implementación de estas nuevas prácticas.

Diseñar un plan de protocolo para implementar mantenimiento en el equipo seleccionado con realidad virtual y aproximación a gemelos digitales, que permita el acercamiento técnico y tecnológico que facilite a los estudiantes de la escuela una mayor apropiación del conocimiento en estos nuevos avances.

2. Planteamiento del Problema

En la actualidad, desde la gestión de mantenimiento se requirió mejorar la gestión industrial mediante herramientas como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés *Internet of Things*) y la robótica, herramientas que permitieron mejorar la interacción humano-máquina con sostenibilidad. Estas ayudaron a reducir la toma de decisiones, lo cual redujo costos, mejoró la seguridad laboral y aumentó la eficiencia energética de las máquinas utilizadas en el entorno laboral. Por lo tanto, la implementación del Mantenimiento 5.0 creó entornos más automatizados y promovió el mantenimiento moderno y su aplicación.

En el ámbito académico, se presentó un incremento exponencial en la enseñanza de los avances en tecnologías de la industria 4.0 y 5.0 (ITCL Centro Tecnológico, 2024; Oficina Asesora de Planeación y Estudios Sectoriales, 2019; Pal, 2024; Tecnologías Habilitadoras 4.0 _ TÜV SÜD, 2024). Por ende, surgió la necesidad de enseñar avances en prácticas y tecnologías del mantenimiento, que se encontraban en su última generación, denominada Mantenimiento 5.0 (Fractal, 2022; TRACTIAN, 2025). Asimismo, se evidenció la necesidad de actualizar la enseñanza, incorporando tecnologías como las TIC y la realidad virtual, ya que permitieron una mejor interacción con las personas y facilitaron la apropiación del conocimiento de manera más didáctica. Esto se trabajó a nivel nacional mediante capacitaciones en mantenimiento y, a nivel mundial, en mayor medida, lo que permitió preparar mejor a los estudiantes mediante entornos simulados (Fractal, 2022; Pal, 2024; TRACTIAN, 2025).

A nivel industrial en Colombia, los sectores energético, aeronáutico y farmacéutico adoptaron estas tecnologías de Mantenimiento 5.0. Por parte de otros sectores industriales, estas herramientas no se implementaron completamente debido a la falta de capacitación del personal

encargado del mantenimiento; los profesionales de ingeniería mecánica no conocían estas prácticas avanzadas ni habían tenido cercanía con estas tecnologías, debido a que no se enseñaban en la universidad. No obstante, cuando se implementaron, se evidenció una mayor eficiencia y reducción de costos gracias a la prevención de daños futuros en los equipos utilizados (Infraspeak, 2024).

En este contexto, resultó clave evaluar, para la Escuela de Ingeniería Mecánica, cómo integrar prácticas de mantenimiento 5.0 en las máquinas del laboratorio, considerando los parámetros clave de medición, la viabilidad económica y las tecnologías y técnicas utilizadas. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar un programa que estableciera directrices para la implementación de prácticas de mantenimiento 5.0 en un equipo del laboratorio. Dado que no existía un enfoque alineado con la demanda actual, se llevó a cabo un diagnóstico de los equipos para evaluar su viabilidad.

Además, se realizó un estudio económico considerando diversos escenarios para la implementación del mantenimiento 5.0. En relación con el plan de mantenimiento, se evaluó la viabilidad de mejorar el existente o rediseñarlo según fuera necesario.

Esta iniciativa permitió fortalecer competencias en el análisis de datos para la toma de decisiones fundamentadas, así como en la gestión de activos y fiabilidad para mejorar el desempeño de los equipos. También fomentó la integración de simulaciones y software de mantenimiento para una experiencia práctica, junto con la capacitación en gestión de riesgos y análisis de fallas.

Asimismo, un requisito esencial tanto en la academia como en la industria fue el enfoque sostenible, el cual no solo implicó el desarrollo de habilidades de gestión y trabajo en equipo, sino también la consideración de los impactos ambientales y sociales. Estos aspectos fueron clave para

la formación de ingenieros preparados para un entorno industrial moderno y eficiente.

3. Marco teórico

3.1 Evolución del Mantenimiento Industrial

El mantenimiento industrial evolucionó desde enfoques correctivos y preventivos hacia modelos más avanzados basados en predicción y automatización. Con la llegada de la Industria 4.0, se han incorporado tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la Inteligencia Artificial (IA), el Big Data y la computación en la nube, lo que permite el desarrollo de un mantenimiento predictivo basado en datos en tiempo real (Galar et al., 2016). Sin embargo, la Industria 5.0 propone un enfoque más humano, sostenible y personalizado, dando lugar al concepto de Mantenimiento 5.0 (Bokrantz et al., 2020).

A nivel mundial, sectores como el aeronáutico, farmacéutico y energético implementan prácticas asociadas al mantenimiento 5.0, obteniendo resultados positivos en eficiencia y gestión del riesgo operativo (Zibta et al., 2020). En Colombia, su adopción es incipiente y está limitada por la falta de formación técnica especializada y de recursos tecnológicos en las industrias tradicionales.

La Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander cuenta con equipos de laboratorio que no han sido sometidos a esquemas modernos de mantenimiento basados en análisis predictivo o herramientas digitales. La implementación de un programa piloto de Mantenimiento 5.0 no solo permitiría extender la vida útil de estos equipos, sino que además representaría un avance importante en la formación integral de los estudiantes, acercándolos a las tendencias de la industria moderna. Asimismo, se genera la oportunidad de integrar plataformas de monitoreo, desarrollar competencias en gestión de activos y fomentar el trabajo interdisciplinario en temas de mantenimiento avanzado.

3.2 Tecnologías Clave en el Mantenimiento 5.0

El mantenimiento evolucionó en estrecha relación con los avances tecnológicos, pasando de enfoques reactivos a estrategias inteligentes basadas en datos. En este contexto, el Mantenimiento 5.0 surge como una integración de tecnologías digitales avanzadas que permiten no solo mejorar la gestión de activos, sino también la toma de decisiones, la sostenibilidad y la interacción humano-máquina. Estas tecnologías no operan de manera aislada, sino que se articulan para dar soporte a estrategias como el mantenimiento basado en condición y el mantenimiento predictivo, dentro de un enfoque integral que abarca todas las generaciones del mantenimiento. A continuación, se describen las principales tecnologías que sustentan este paradigma:

Internet de las Cosas (IoT): Permite el monitoreo en tiempo real de las condiciones de los equipos mediante sensores inteligentes (Jiménez et al., 2021).

Inteligencia Artificial (IA): Facilita el análisis predictivo y la automatización de decisiones en mantenimiento (Zibta et al., 2020).

Big Data y Analítica de Datos: Ayuda a mejorar el mantenimiento con base en el análisis masivo de información operativa (Smycotech, 2024).

Realidad Aumentada (RA): Mejora la capacitación del personal y la asistencia técnica en tareas de mantenimiento.

Gemelos Digitales: Simulan y mejoran procesos de mantenimiento (Lineview, 2024).

Robótica Colaborativa (Cobots): Permite una mayor interacción humano-máquina en labores de mantenimiento.

3.3 Gestión Económica y Uso Eficiente de Recursos

El Mantenimiento 5.0 no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también impacta en la reducción de costos mediante el mantenimiento predictivo y la gestión de recursos. Su implementación requiere un análisis de viabilidad económica para evaluar el retorno de inversión y los beneficios operacionales (Ammar et al., 2021).

3.4 Formación Académica y Capacitación en Mantenimiento 5.0

La integración del Mantenimiento 5.0 en entornos académicos es fundamental para preparar a los futuros ingenieros, ya que los avances tecnológicos requieren que se forme a los profesionales en estas herramientas. La incorporación de simulaciones, entornos virtuales y software de mantenimiento fomenta una mejor apropiación del conocimiento y la formación práctica de los estudiantes (Consejo General Universitario, 2023).

3.5 Implementación Práctica en Laboratorios Universitarios

Para aplicar Mantenimiento 5.0 en equipos de laboratorio, es necesario realizar un diagnóstico del estado actual de los equipos, evaluar la infraestructura tecnológica disponible y desarrollar prototipos para validar su viabilidad. La información académica del investigador, así como su vinculación al grupo de investigación, se encuentra registrada en el Apéndice B.

4. Metodología

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque de investigación aplicada, ya que buscó utilizar conocimientos teóricos para resolver una problemática práctica dentro de un entorno académico. Se adoptó un diseño metodológico mixto, que combinó técnicas cualitativas y cuantitativas. El enfoque cualitativo permitió comprender el contexto actual del mantenimiento en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, mientras que el enfoque cuantitativo sirvió para analizar datos técnicos y económicos que justificaron la implementación del prototipo de mantenimiento 5.0.

Desde el punto de vista teórico, el estudio se enmarcó en el paradigma empírico-analítico, el cual se fundamenta en la observación, medición y verificación de datos para tomar decisiones sustentadas. Esto permitió evaluar tanto la viabilidad técnica como la viabilidad económica del prototipo propuesto, garantizando que los resultados obtenidos pudieran ser replicables y generalizables a otros entornos similares.

4.1 Fase 1: Documentación y Análisis de Condición

Se documentaron y analizaron las condiciones actuales del mantenimiento de los equipos banco motor monocilíndrico de vibraciones y tribómetro en los laboratorios 212 y 312 de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el fin de diagnosticar su estado de operación, historial de mantenimiento y determinar la viabilidad de integrar tecnologías 5.0 de mantenimiento.

Se llevó a cabo una revisión de la documentación técnica y de las hojas de vida de los equipos, complementada con una inspección visual, funcional y técnica de sus principales componentes. Se identificaron fallas recurrentes y el historial de intervenciones operativas.

Además, se evaluaron las tecnologías implementadas en los equipos y la información disponible relacionada con su mantenimiento, con el fin de establecer cuál de ellos presentó mayor viabilidad técnica para la implementación del plan de mantenimiento 5.0.

4.2 Fase 2: Identificación y Análisis de Parámetros de Monitoreo

Se identificaron y analizaron los parámetros de monitoreo clave en el equipo seleccionado con mayor viabilidad técnica, con el fin de diseñar un plan de mantenimiento 5.0 que permitió establecer las condiciones y tecnologías adecuadas a instrumentar.

Se seleccionaron variables críticas de desempeño como temperatura, vibraciones y consumo energético, que permitieron caracterizar el comportamiento del equipo durante su operación. Se determinaron los puntos de medición apropiados y se evaluó el estado actual de monitoreo en el equipo.

Posteriormente, se identificaron las tecnologías y sensores compatibles con la infraestructura existente, considerando su disponibilidad, facilidad de integración y capacidad para conectarse con herramientas digitales. Finalmente, se analizó la integración de plataformas de recolección de datos y su conectividad con sistemas digitales asociados al mantenimiento 5.0.

4.3 Fase 3: Análisis de Viabilidad Económica

Se llevó a cabo un estudio detallado que incluyó la recopilación de cotizaciones para la implementación de tecnologías de Mantenimiento 5.0 y capacitación. Se analizaron los costos asociados a la adquisición de equipos, la adaptación de infraestructura y la compatibilidad con los sistemas actuales, creando así posibles escenarios de bajo, medio y alto costo.

A partir del diagnóstico realizado en la fase anterior, donde se identificaron variables y

puntos clave de los equipos, se definieron estrategias de implementación acordes con las necesidades del laboratorio.

4.4 Fase 4: Diseño de Implementación del Mantenimiento 5.0 con Apoyo en Realidad Virtual y Gemelos Digitales

En esta fase se desarrolló una aproximación hacia gemelos digitales del equipo seleccionado, como una primera etapa, con el propósito de evaluar su desempeño bajo distintas condiciones operativas, mejorar su mantenimiento y simular su comportamiento en un entorno virtual, probando diferentes estrategias de mantenimiento, evaluando la respuesta del sistema ante diversas condiciones operativas y detectando posibles fallas o áreas de mejora.

Para ello, se inició con una capacitación técnica dirigida al personal docente y estudiantes, donde se abordaron los conceptos y herramientas necesarias para la creación del modelo digital basado en la tecnología seleccionada.

Los datos obtenidos en la simulación fueron analizados con el objetivo de identificar oportunidades de mejorar su desempeño y realizar ajustes en el modelo.

4.5 Fase 5: Elaboración de un Protocolo para Plan de Mantenimiento Basado en Mantenimiento 5.0

- Diseño del esquema de mantenimiento adaptado a las condiciones del equipo.
- Definición de rutinas, frecuencias, recursos y responsables.
- Integración de las tecnologías de monitoreo y análisis de datos en la planificación.
- Generación de protocolos y lineamientos para replicar el modelo en otros equipos o

laboratorios.

4.6 Fase 6: Traducir Documento

El proyecto de grado se complementó con un artículo de investigación sobre Mantenimiento 5.0, desarrollado por integrantes del grupo de investigación en diseño y manufactura Dima, el cual aportó un respaldo teórico a su implementación. El artículo fue finalizado y sometido a una revista científica, lo que permitió su uso como soporte académico del presente trabajo y su proyección como referencia en futuras investigaciones. Asimismo, se realizó la traducción del contenido para su publicación, facilitando su accesibilidad.

El proyecto garantizó el cumplimiento de principios éticos en el manejo de la información, el respeto por los equipos y recursos institucionales, y el consentimiento de los actores participantes. Se veló por el uso responsable de los datos técnicos y se priorizó el trabajo colaborativo con docentes y personal de mantenimiento. Este trabajo se complementó con un producto académico desarrollado en el marco del Mantenimiento 5.0, el cual se presentó en el Apéndice A.

5. Diagnóstico del Estado de Operaciones

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del diagnóstico del estado de operación y mantenimiento de los equipos analizados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica. A partir de la metodología planteada, se realizó una evaluación técnica, funcional y tecnológica del banco motor monocilíndrico de vibraciones y del tribómetro, considerando aspectos como su nivel de digitalización, gestión de mantenimiento, disponibilidad de información y condiciones operativas.

Los resultados permitieron identificar el grado de madurez en mantenimiento de cada equipo, así como sus principales limitaciones en términos de monitoreo, trazabilidad y confiabilidad. Asimismo, se estableció un análisis comparativo que permitió determinar la viabilidad de integración de tecnologías asociadas al Mantenimiento 5.0, justificando la selección del equipo con mayor potencial para la implementación del modelo propuesto. De esta manera, este capítulo constituyó la base técnica para el desarrollo del plan de mantenimiento basado en condición y la posterior integración de herramientas digitales orientadas a la mejora de la gestión de activos en el entorno académico.

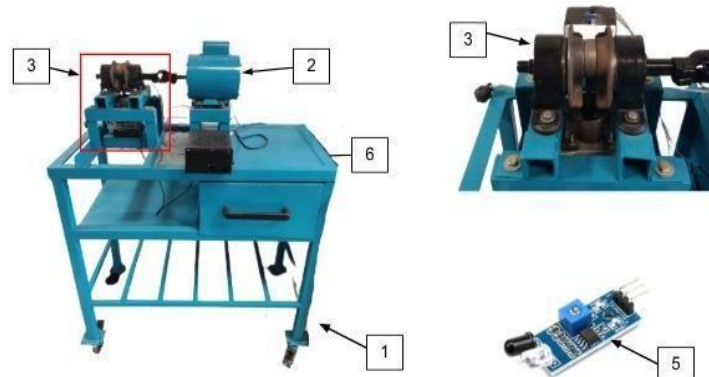
5.1 Descripción técnica del banco motor monocilíndrico de vibraciones

El banco motor monocilíndrico de vibraciones es un equipo experimental que fue diseñado con el fin de analizar la resistencia al desgaste de materiales empleados en sistemas tipo cilindro-émbolo. Su funcionamiento simula el movimiento alternativo de un motor de combustión interna por medio de un sistema transmisor que es accionado por un motor eléctrico trifásico de 1 HP, 120 V y 1200 RPM.

La Figura 1 muestra los principales componentes del banco motor monocilíndrico y su ubicación dentro del sistema.

Figura 1

Banco motor monocilíndrico de vibraciones



Nota. Escuela de Ingeniería Mecánica (2024). Manual de operación banco de laboratorio desgaste en cilindro émbolo. Universidad Industrial de Santander

El equipo motor monocilíndrico de vibraciones, mostrado en la Figura 1, contiene:

Sistema estructural: banco de trabajo y bastidor.

Motor eléctrico trifásico: dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica en energía mecánica de rotación.

Sistema transmisor (Figura 1, inciso 3): en esta sección del banco de laboratorio de desgaste en cilindro-émbolo se realiza la acción de simulación del trabajo de un motor de combustión interna de una motocicleta, con el fin de analizar el movimiento y el desgaste con ayuda del módulo detector de obstáculos.

El sistema transmisor del banco de laboratorio contiene elementos como: cilindro-émbolo, eje estriado, junta universal, contrapesas, motor de moto JY-1, sistema de encendido (interruptor eléctrico de dos posiciones), módulo detector de obstáculos con sensor infrarrojo MH-B

(dispositivo electrónico que detecta la presencia de un objeto mediante la reflexión de la luz), caja electrónica (lugar donde se encuentran ubicadas las conexiones electrónicas con el fin de recibir y enviar señales de los dispositivos), e ITG/MPU – giroscopio y acelerómetro (dispositivo electrónico que contiene un giroscopio de tres ejes, utilizado para medir la velocidad angular, y un acelerómetro de tres ejes que proporciona la medición en los ejes X, Y y Z de la aceleración).

Las Tablas 1 y 2 presentan las especificaciones físicas del equipo (dimensiones y peso) y sus características eléctricas de funcionamiento (tensión, corriente y potencia).

Tabla 1

Dimensiones del banco motor monocilíndrico de vibraciones

Dimensiones	
Alto	120 cm
Largo	100 cm
Ancho	50 cm
Peso	45 kg

Tabla 2

Características eléctricas del banco motor monocilíndrico de vibraciones

Suministro eléctrico	
Tensión	120 [V]
Corriente	6 [A]
Potencia	1 [HP]

Nota. Escuela de Ingeniería Mecánica. (2024). Ficha técnica: Desgaste en cilindro émbolo. Universidad Industrial de Santander.

5.1.1 Evaluación documental y mantenimiento actual

De acuerdo con el manual de mantenimiento, el equipo cuenta con un plan de

mantenimiento preventivo como se explica a continuación:

- Inspección de rutina antes de cada encendido
- Limpieza externa cada 15 días No existe evidencia de:
- Monitoreo continuo de variables
- Histórico de fallas
- Indicadores de disponibilidad y confiabilidad
- Mantenimiento predictivo

Con base en lo anterior, se clasificó el mantenimiento como correctivo y preventivo básico.

5.1.2 Inspección física y condiciones de seguridad

Con base en la ficha técnica y el manual de operación, se identificó que el equipo presenta riesgos de tipo eléctrico y mecánico, los cuales se evidencian en las partes móviles del sistema. Con el fin de mitigar estos riesgos, se estableció lineamientos de seguridad como el uso de EPP (elementos de protección personal), la verificación de conexiones eléctricas y la inspección visual del equipo antes de cada operación. Estas medidas son adecuadas, pero dependen en gran medida de la supervisión por parte del operario.

5.1.3 Evaluación funcional del sistema

Cuando el equipo está en funcionamiento requiere verificación manual del estado de las conexiones, verificación del correcto funcionamiento del sensor infrarrojo y confirmación de ausencia de ruidos anormales

En este contexto, la Tabla 3 presenta los métodos actuales de monitoreo utilizados, junto

con sus principales limitaciones, permitiendo identificar las debilidades del sistema de diagnóstico existente y establecer una base para la propuesta de estrategias de mantenimiento más avanzadas.

Tabla 3

Métodos actuales de monitoreo y limitaciones del sistema de diagnóstico

Tipo	Descripción
Métodos actuales de diagnóstico	Observación visual del equipo
	Inspección auditiva durante la operación
	Validación manual de los sensores
Limitaciones del sistema	No detecta variaciones anormales de vibración
	No identifica incrementos de temperatura
	No permite detectar desbalance dinámico
	No analiza tendencias progresivas de falla

5.1.4 Nivel de digitalización

Aunque el equipo incorpora una placa de 33rduino y el módulo giroscopio acelerómetro estos dispositivos no se encuentran integrados en un sistema estructurado de monitoreo predictivo. El estado tecnológico actual del equipo puede clasificarse en un nivel básico de instrumentación, no cuenta con análisis predictivo, almacenamiento de datos ni integración con plataformas digitales

5.1.5 Historial del banco de laboratorio motor mono cilíndrico

El equipo cuenta con los siguientes documentos técnicos formales

- Hoja de vida institucional.
- Manual de operación

MANUAL OPERACIÓN DESGASTE EN CILINDRO ÉMBOLO

- Manual de mantenimiento

MANUAL MANTENIMIENTO DESGASTE CILINDRO ÉMBOLO

- Ficha técnica con especificaciones generales

FICHA TECNICA DESGASTE EN CILINDRO EMBOLO

La existencia de esta documentación evidencia una estructura organizativa básica para su gestión. Sin embargo, no se identificó un sistema digital de registro histórico de eventos, ni bases de datos que consolidan información sobre intervenciones, tiempos fuera de servicio o evolución de fallas.

5.1.6 Hoja de vida y trazabilidad

Aunque se dispone de hoja de vida del equipo la información registrada no evidencia:

- Seguimiento cronológico detallado de intervenciones.Registro cuantitativo de horas de operación.
- Indicadores de desempeño o confiabilidad.

Esto indica que la trazabilidad histórica es limitada y depende principalmente de registros manuales y conocimiento del personal del laboratorio.

5.1.7 Fallos recurrentes reportados

Estas fallas afectan principalmente la disponibilidad para prestar el servicio que es dar continuidad para la práctica académica y la confiabilidad de los resultados experimentales. De acuerdo con el manual de operación, las principales incidencias registradas en el equipo corresponden a fallas de encendido asociadas a problemas en las conexiones eléctricas y a lecturas erróneas provenientes del sistema de sensores y su integración con la plataforma Arduino. Estas

fallas impactan directamente la disponibilidad del equipo, afectando la continuidad de las prácticas académicas, así como la confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos durante su operación.

Adicionalmente, no se evidencian reportes formales ni registros estructurados, en formato físico o digital, de las actividades de mantenimiento, intervenciones realizadas o historial de fallas del equipo. Esta ausencia de trazabilidad limita el análisis del comportamiento del activo a lo largo del tiempo y dificulta la implementación de estrategias basadas en confiabilidad. Aunque el equipo es utilizado en asignaturas relacionadas con ingeniería de mantenimiento y vibraciones, las intervenciones realizadas dependen principalmente del conocimiento empírico de estudiantes y personal del laboratorio.

Por ejemplo, se tiene conocimiento de reemplazos de rodamientos efectuados en semestres anteriores; sin embargo, estos no cuentan con documentación técnica ni garantizan el cumplimiento de las especificaciones originales del fabricante, lo cual puede generar variaciones en el desempeño dinámico del sistema.

Asimismo, no se identificaron reportes estructurados de fallas mecánicas progresivas, lo que sugiere la inexistencia de un sistema de seguimiento de degradación del equipo. No obstante, mediante inspección visual se evidencian signos de desgaste asociados a procesos de oxidación y corrosión en algunos componentes, como se observa en la Figura 1, lo cual indica la presencia de mecanismos de degradación no controlados.

En cuanto al plan de mantenimiento existente en el laboratorio, se observa que este se limita a la definición general de actividades como “inspección rutinaria”, de carácter preoperacional, asignadas al operador y sin un desarrollo técnico detallado. No se evidencian procedimientos estandarizados, criterios de aceptación, frecuencias estructuradas ni registros asociados a la

ejecución de dichas actividades. De igual manera, no existe un sistema de seguimiento ni control de intervenciones, lo que confirma la ausencia de una gestión de mantenimiento estructurada.

En conjunto, estas condiciones evidencian que el equipo se encuentra bajo un esquema de mantenimiento de baja madurez, caracterizado por la ausencia de planificación, trazabilidad y control técnico de las intervenciones. Predomina un enfoque reactivo, donde las acciones de mantenimiento se ejecutan únicamente ante la ocurrencia de fallas, limitándose en la práctica a un mantenimiento correctivo no programado. Esta situación impide anticipar fallas, incrementa el riesgo operativo, afecta la disponibilidad del equipo y compromete la confiabilidad de los resultados experimentales. Asimismo, la falta de integración de monitoreo de condición, análisis de datos y gestión basada en confiabilidad restringe la evolución del sistema hacia enfoques más avanzados, justificando la necesidad de implementar estrategias alineadas con los principios del Mantenimiento 5.0.

5.2 Clasificación de Banco motor mono cilíndrico de vibraciones según la ISO 14224

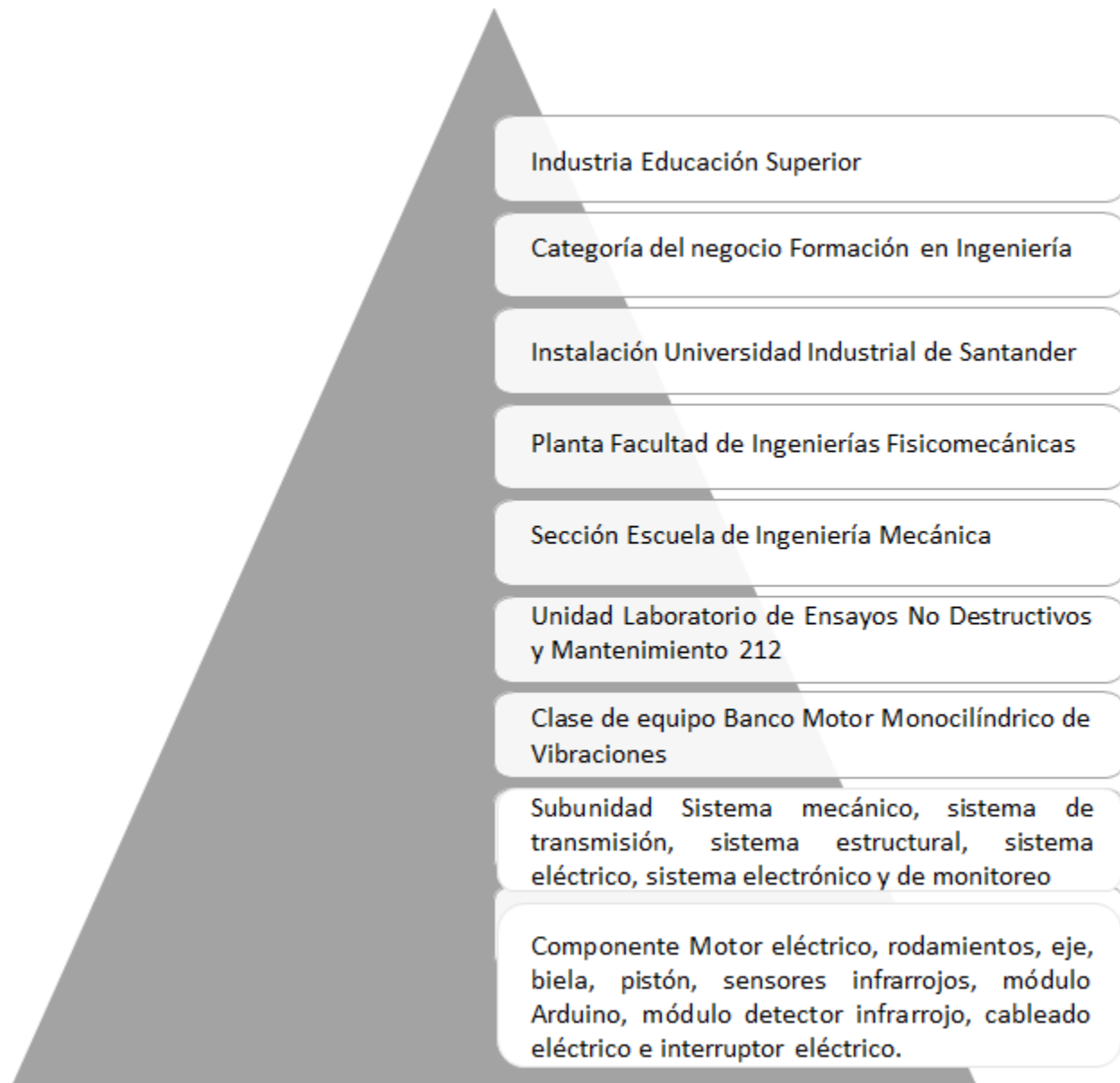
Con el fin de estructurar adecuadamente el análisis del equipo bajo un enfoque de gestión de mantenimiento y confiabilidad, se realizó la clasificación jerárquica del banco motor monocilíndrico de vibraciones siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14224. Esta norma permite organizar los activos en diferentes niveles, desde el sistema principal hasta sus componentes, facilitando la identificación de elementos críticos, modos de falla y estrategias de mantenimiento asociadas.

En la Figura 2 se presenta la estructura jerárquica del equipo, partiendo desde el nivel institucional hasta sus subsistemas y componentes principales, lo cual permite establecer una base organizada para el análisis de fallas, la definición de variables de monitoreo y la implementación

de estrategias de mantenimiento más avanzadas, alineadas con enfoques de confiabilidad y mantenimiento 5.0.

Figura 2

Estructura jerárquica de activos del banco motor monocilíndrico de vibraciones



5.3 Digitalización y automatización actual del banco motor mono cilíndrico vibraciones

Para conocer la condición tecnológica actual del equipo, se llevó a cabo un análisis del nivel de digitalización y automatización de su operación. Este diagnóstico permitió identificar qué tan avanzado se encuentra el sistema en términos tecnológicos y si está preparado para incorporar estrategias de mantenimiento 5.0.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis, evidenciando que el equipo opera bajo un esquema predominantemente manual, con ausencia de automatización, monitoreo de condición y herramientas de análisis de datos, lo cual limita su evolución hacia enfoques de mantenimiento más avanzados.

Tabla 4

Análisis Digitalización y Automatización del banco motor monocilíndrico vibraciones

Aspecto evaluado	Situación actual del equipo	Observaciones
Modo de operación	Encendido manual	El arranque del equipo depende directamente de la acción del operador mediante interruptor ON/OFF.
Inspección previa	Inspección visual manual	Se requiere revisión visual del estado general antes de cada operación.
Control del proceso	Control manual del operador	No existen sistemas de control automático ni asistencia electrónica.
Nivel de automatización	Sin automatización	El proceso no cuenta con control automático ni retroalimentación.
Intervención del usuario	Alta	El equipo no cuenta con control automático ni retroalimentación.
Tipo de mantenimiento	Mantenimiento manual	Las tareas de mantenimiento se realizan de forma correctiva y preventiva básica.
Inspecciones de mantenimiento	Inspecciones visuales manuales	No se emplean instrumentos digitales ni registros automáticos.
Limpieza del equipo	Limpieza manual	Realizada directamente por el usuario sin procedimientos automatizados.
Monitoreo de condición	No disponible	El equipo no dispone de sensores de vibración, temperatura u otras variables.
Mantenimiento predictivo	Inexistente	No se cuenta con análisis predictivo ni adquisición de datos en tiempo real.

En la Tabla 4 se presentó el diagnóstico del nivel de automatización y mantenimiento del equipo, evidenciando un funcionamiento manual, sin monitoreo digital ni mantenimiento predictivo.

A partir de este diagnóstico en la tabla 5 se muestra que el banco motor monocilíndrico de vibraciones presenta una viabilidad técnica media–baja con un promedio de 2.33/5 para la integración de tecnologías 5.0, debido a sus limitaciones en automatización, digitalización y monitoreo de condición. El equipo opera principalmente de forma manual y no cuenta con sistemas estructurados de adquisición y análisis de datos, lo que dificulta la implementación de estrategias avanzadas como mantenimiento predictivo, IoT y gemelos digitales.

Tabla 5

Evaluación de viabilidad tecnologías 5.0 para el banco motor monocilíndrico

Área de Evaluación	Estado Actual	Propuesta Tecnología 5.0	Viabilidad Cualitativa (0–5)	Clasificación	Observaciones Técnicas
Automatización	Operación manual mediante interruptores y supervisión del operador.	Implementación de monitoreo inteligente externo y alertas automáticas.	Baja	2	El equipo no cuenta con control automático ni sistemas avanzados de supervisión.
Digitalización	Instrumentación básica con Arduino y almacenamiento no estructurado.	Plataforma IoT con visualización y registro digital de variables.	Baja	2	Requiere integración de sistemas de adquisición y almacenamiento de datos.

Continuación Tabla 5

Área de Evaluación	Estado Actual	Propuesta Tecnología 5.0	Viabilidad Cualitativa	Clasificación (0-5)	Observaciones Técnicas
Monitoreo de condición	Inspección visual y verificación manual del funcionamiento.	Sensores IoT de vibración, temperatura y corriente.	Media	3	Permite evolucionar hacia estrategias de mantenimiento basado en condición.
Gestión de datos	No existe base de datos histórica ni trazabilidad digital.	Implementación de historial digital y análisis de tendencias.	Media	3	Mejoraría la trazabilidad y la gestión de mantenimiento del equipo.
Mantenimiento	Enfoque correctivo y preventivo básico.	Mantenimiento predictivo apoyado en análisis de datos e IA.	Media	3	Requiere generación continua de datos para modelos predictivos.
Simulación	No cuenta con modelo virtual del sistema.	Desarrollo de aproximación a gemelo digital.	Baja	2	Se necesita modelado dinámico y captura de variables operativas.
Integración industrial	No dispone de conectividad IoT ni monitoreo remoto.	Sistema paralelo IoT para monitoreo externo del equipo.	Muy baja	1	Requiere infraestructura de red y adaptación tecnológica adicional.
Impacto académico	Equipo utilizado en prácticas convencionales de laboratorio.	Evolución hacia laboratorio académico orientado a Industria 5.0.	Media	3	Presenta alto potencial formativo en monitoreo y mantenimiento inteligente.

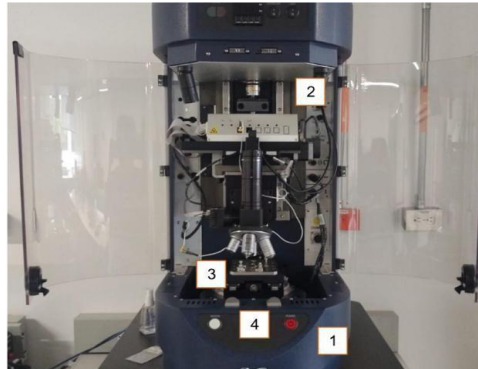
A partir del análisis realizado, se evidenció que el banco motor monocilíndrico de vibraciones no cuenta actualmente con un nivel adecuado de automatización, digitalización ni monitoreo de condición que permita una integración directa de tecnologías asociadas al Mantenimiento 5.0. El equipo opera principalmente bajo procedimientos manuales y presenta

limitaciones en adquisición de datos, trazabilidad e integración con plataformas digitales, lo que restringe la implementación inmediata de estrategias avanzadas como mantenimiento predictivo, IoT y gemelos digitales.

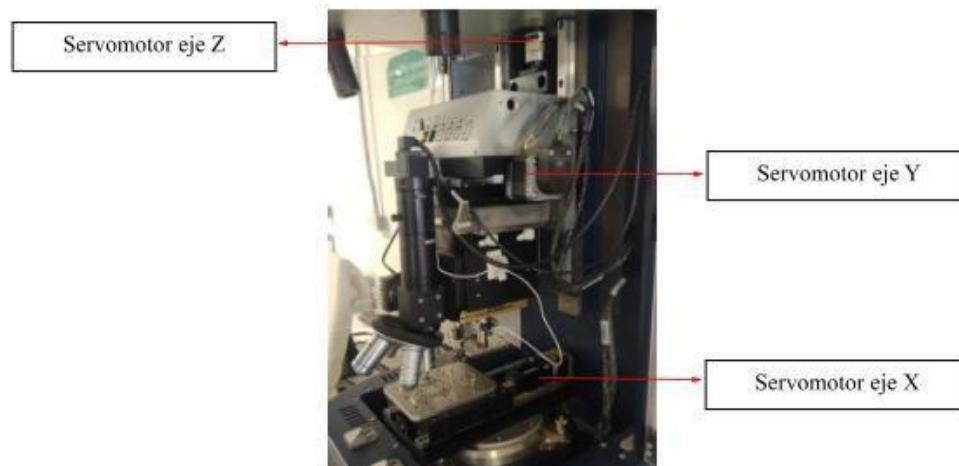
5.4 Diagnóstico del estado de operaciones para tribómetro

Con el propósito de evaluar las condiciones operativas y el estado actual de gestión de mantenimiento del tribómetro, se realizó un análisis técnico y funcional del equipo, considerando su estructura, sistemas de accionamiento, control y monitoreo. Este diagnóstico permitió identificar el nivel de desempeño del sistema, su grado de automatización y las capacidades tecnológicas disponibles para la implementación de estrategias de mantenimiento avanzado.

En la Figura 3 se presenta el tribómetro, y a partir de esta Figura se explicará los sistemas que son 1. Estructura, 2. Sistema de movimiento, 3. Accesorios de accionamiento y 4. Sistema de control y monitoreo y los subsistemas se pueden ver en la Figura 4 constituyendo la base para el análisis de su operación y comportamiento en el contexto del mantenimiento, los cuales forman parte del sistema de movimiento del equipo. De acuerdo con la taxonomía de activos, estos elementos se clasifican dentro de los subsistemas de accionamiento, responsables de garantizar el desplazamiento controlado y preciso durante la ejecución de los ensayos tribológicos

Figura 3*Sistemas del tribómetro*

Nota. Tomado de *UMT-TriboLab Manual* (Bruker Nano, Inc., 2015, p. 29)

Figura 4*Sistema de movimiento del tribómetro***5.4.1 Descripción técnica del equipo**

El tribómetro Bruker es un equipo de laboratorio diseñado para la realización de ensayos tribológicos, enfocado en el análisis del comportamiento de fricción, desgaste y lubricación entre materiales. El sistema está conformado por una estructura rígida que proporciona soporte mecánico y estabilidad, garantizando una adecuada alineación de los componentes y condiciones seguras durante la operación.

Desde el punto de vista funcional, el equipo se compone de varios subsistemas principales, entre los que se destacan el sistema de accionamiento, encargado de generar el movimiento controlado en los ejes de trabajo; el sistema de control y monitoreo, que permite la configuración de parámetros y adquisición de datos durante los ensayos; y los dispositivos de protección, orientados a garantizar la seguridad del usuario y la integridad del equipo. Esta configuración permite la ejecución precisa y repetible de ensayos bajo diferentes condiciones operativas, siendo un equipo ampliamente utilizado en investigación y formación académica en el área de ingeniería de materiales y mantenimiento.

Debido a su capacidad para generar y registrar variables críticas como fuerza, fricción, desplazamiento y ciclos de operación, el tribómetro se considera un equipo de alta relevancia desde el enfoque de mantenimiento, ya que su adecuado funcionamiento incide directamente en la confiabilidad de los resultados experimentales. En este sentido, los subsistemas de accionamiento y control adquieren una alta criticidad, dado que cualquier desviación en su desempeño puede afectar la precisión del ensayo. Por lo tanto, este equipo presenta condiciones favorables para la implementación de estrategias de monitoreo de condición, permitiendo la integración de variables adicionales como vibración, temperatura y emisión acústica, las cuales son fundamentales para el desarrollo de enfoques de mantenimiento basado en condición y mantenimiento predictivo.

5.4.2 Sistema de movimiento

Este sistema está conformado por los servomotores asociados X, Y y Z, que sirven para realizar desplazamientos controlados según el tipo de ensayo que se quiere realizar como se ve en la Figura 4.

5.3.3 Sistema de control y monitoreo

Este dispositivo integra diversos sensores, un microscopio y paneles de control en su estructura para un monitoreo completo. Su operación se centraliza en un software especializado conectado por USB, lo que facilita el desarrollo preciso de cada prueba.

5.4.4 Características físicas y requisitos de instalación

Con el fin de complementar el diagnóstico técnico del equipo, se presentan sus características físicas y requisitos de instalación, las cuales constituyen un aspecto relevante para evaluar su operatividad y condiciones de integración tecnológica. Estos parámetros permitieron analizar la estabilidad, ubicación y facilidad de adaptación del equipo dentro del laboratorio, aspectos clave para la implementación de sistemas de monitoreo y estrategias asociadas al Mantenimiento 5.0. En la Tabla 6 se resumen las principales características físicas del tribómetro, incluyendo sus dimensiones y requisitos de instalación.

Tabla 6

Características físicas del tribómetro

Parámetro	Especificación
Dimensiones (ancho × fondo × alto)	394 mm × 610 mm × 775 mm
Masa aproximada	132 kg
Requisito de soporte	Superficie rígida, nivelada y con capacidad suficiente para soportar la masa del equipo

La Tabla 7 presenta los requisitos eléctricos y ambientales necesarios para el correcto funcionamiento del equipo.

Tabla 7*Requisitos eléctricos y condiciones ambientales de instalación*

Parámetro	Valor especificado
Tensión de alimentación	220 – 240 VAC
Frecuencia	50 / 60 Hz
Demanda de potencia	Aproximadamente 2.5 kW
Rango de temperatura de operación	10 °C – 30 °C
Rango de humedad relativa	30 % – 80 %

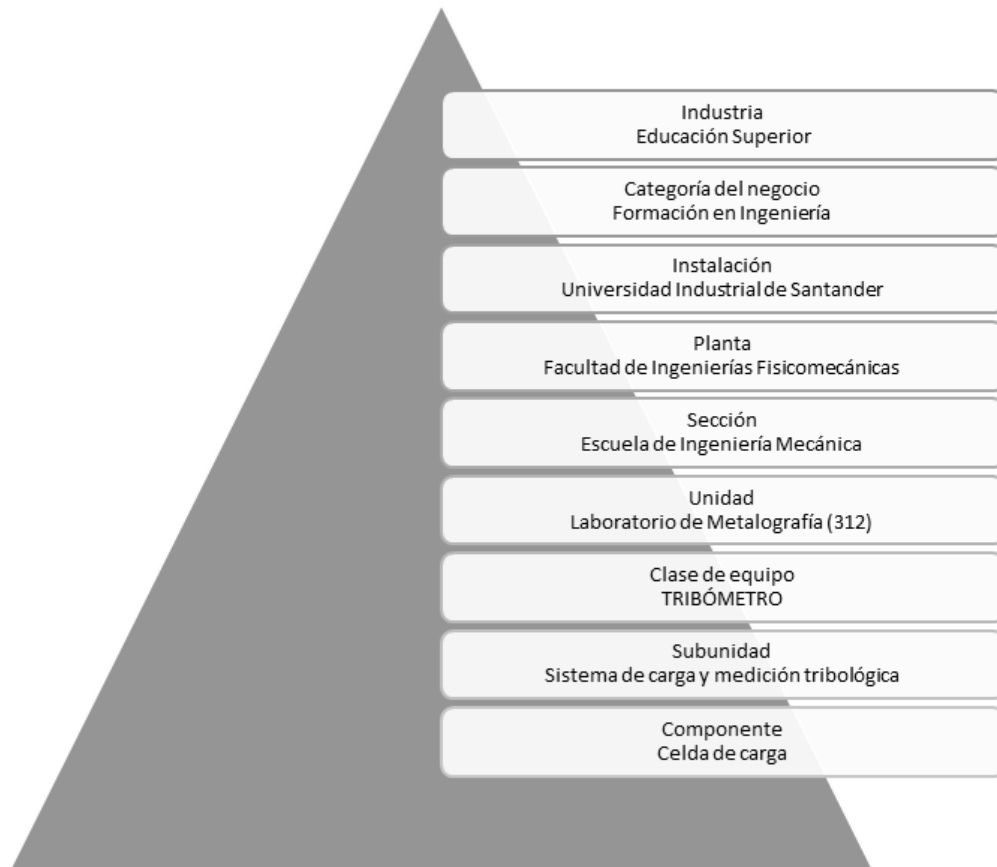
5.4.4 Taxonomía del tribómetro bruker según la ISO 14224

Con el fin de estructurar el análisis del equipo bajo un enfoque de gestión de mantenimiento y confiabilidad, se realizó la clasificación jerárquica del tribómetro Bruker siguiendo los lineamientos de la norma ISO 14224. Esta clasificación permite organizar el activo en diferentes niveles, desde el contexto organizacional hasta sus componentes específicos, facilitando la identificación de subsistemas funcionales, componentes críticos y posibles modos de falla.

En la Figura 5 se presenta la estructura jerárquica del tribómetro, partiendo desde el nivel institucional hasta sus componentes principales, lo cual constituye una base fundamental para el análisis técnico del equipo y la definición de variables relevantes para su evaluación y posterior desarrollo de estrategias de mantenimiento.

Figura 5

Estructura jerárquica de activos del tribómetro del laboratorio de ingeniería mecánica



5.4.5 Evaluación documental y mantenimiento actual del tribómetro

Se realizó una evaluación documental del tribómetro con el fin de identificar su estado actual, los parámetros de funcionamiento y la información disponible para la gestión del mantenimiento. A partir del análisis de manuales técnicos y documentación del fabricante, se recopilaron los datos necesarios para el diagnóstico del equipo. En las tablas 8 a 12 se presenta el resumen de la información técnica utilizada para la definición de los parámetros de monitoreo. Con el fin de consolidar el diagnóstico técnico y funcional del tribómetro, se presenta un conjunto de tablas que resumen la información clave relacionada con su operación, fallas, nivel de

automatización y gestión de mantenimiento. Estas tablas permiten estructurar de manera organizada los aspectos más relevantes del equipo, facilitando la identificación de sus condiciones actuales, limitaciones operativas y oportunidades de mejora.

En las Tablas 8 a 12 se recopila la información técnica que sirve como base para el análisis del estado del equipo y la evaluación de su capacidad de evolución hacia estrategias de mantenimiento más avanzadas. La información presentada integra tanto criterios cualitativos como cuantitativos, siguiendo enfoques utilizados en ingeniería de mantenimiento para la evaluación de activos, los cuales permiten establecer niveles de análisis comparables y apoyar la determinación de criticidad del equipo dentro del entorno operativo.

A partir del análisis de estas tablas, se evidencia que el tribómetro presenta un alto nivel de desarrollo en términos de control operativo y generación de datos, pero mantiene limitaciones en la gestión estructurada del mantenimiento, especialmente en lo relacionado con monitoreo de condición, trazabilidad histórica y análisis predictivo. No obstante, sus características técnicas, su nivel de instrumentación y su capacidad de integración con tecnologías externas lo posicionan como un equipo con alto potencial para la implementación de estrategias avanzadas de mantenimiento. Así, la Tabla 8 resume el sistema de control, los requerimientos eléctricos, las condiciones ambientales, el tipo de mantenimiento y el nivel de automatización del equipo.

Tabla 8

Resumen de especificaciones operativas y de control del equipo

Ítem	Descripción
Nombre del equipo	Tribómetro de laboratorio
Fabricante	Bruker Nano, Inc.
Modelo / Plataforma	UMT-Tribolab
Ubicación	Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica – UIS

Función principal	Realización de ensayos tribológicos para el estudio de fricción, desgaste y lubricación de materiales
Sistema de movimiento	Servomotores en ejes X, Y y Z
Tipos de ensayo	Lineal, reciprocante, rotativo y bloque-anillo
Sistema de control	Paneles de control + software de control mediante conexión USB
Alimentación eléctrica	220–240 VAC, 50/60 Hz
Potencia demandada	~2.5 kW
Condiciones ambientales	10 °C a 30 °C; 30 % a 80 % HR
Tipo de mantenimiento	Manual, preventivo básico
Nivel de automatización	Operación asistida por software, sin mantenimiento predictivo

La Tabla 9 describe los fallos o problemas recurrentes que pueden presentarse durante la operación del equipo, indicando para cada uno

Tabla 9

Fallas frecuentes y acciones correctivas

Fallo o problema recurrente	Causa probable	Acción correctiva indicada
El equipo no enciende	Fallas en conexiones eléctricas o tomacorriente	Verificar estado de cables y conexiones; cambiar tomacorriente
El computador no enciende	Problemas de conexión eléctrica	Revisar cables y fuente de alimentación
No hay comunicación con el software	Fallo en conexión USB	Revisar cable USB y cambiar puerto
Uno o más motores no funcionan	Conexiones deficientes de los motores	Verificar estado de cables y conectores
Mala visibilidad durante ensayos	Lentes sucios del microscopio	Limpieza con líquido y papel óptico
Ruidos o vibraciones anormales	Condición mecánica irregular	Detener el equipo y reportar al encargado

La Tabla 10 resume el estado actual del equipo en automatización, monitoreo y mantenimiento, sirviendo como base para evaluar posibles mejoras tecnológicas

Tabla 10

Diagnóstico del nivel de automatización y gestión de mantenimiento del equipo

Aspecto	Situación actual
Nivel de automatización	Operación asistida por software, sin automatización del mantenimiento.
Monitoreo de condición	Inexistente. No se realiza seguimiento continuo del estado interno del equipo.
Sensores instalados	Solo cuenta con sensores propios del ensayo (fuerza, desplazamiento, fricción), no dispone de sensores para monitoreo de condición.
Mantenimiento	Manual, con actividades preventivas básicas programadas.
Historial de fallos	No digitalizado. No existe base de datos estructurada para análisis histórico.
Toma de decisiones	Dependiente del operador y basada en experiencia técnica.

En la Tabla 11 se presentan diferentes tecnologías de Industria 5.0 aplicadas al tribómetro, indicando su función dentro del sistema y su nivel de viabilidad técnica para mejorar el monitoreo, diagnóstico y mantenimiento del equipo.

Tabla 11

Tecnologías 5.0 aplicables al tribómetro

Tecnología 5.0	Aplicación en el tribómetro	Viabilidad técnica
Sensores de vibración	Monitoreo de servomotores y accionamientos para detección temprana de fallos mecánicos.	Alta
Sensores de temperatura	Supervisión de rodamientos, motores y componentes electrónicos para evitar sobrecalentamientos.	Alta
Sensores de corriente	Detección de sobrecargas eléctricas y posibles	

	fallos en el sistema de accionamiento.	Alta
Digitalización de hoja de vida	Registro histórico de operación, intervenciones y mantenimiento del equipo.	Muy alta
Mantenimiento predictivo	Análisis de tendencias de vibración y temperatura para anticipar fallos.	Media – Alta
Gemelo digital	Simulación del comportamiento mecánico y operativo del sistema basado en datos reales.	Media
Interacción humano-máquina	Generación de alertas visuales y apoyo en la toma de decisiones del operador.	Alta
IA para diagnóstico	Identificación de patrones de falla mediante análisis de datos históricos.	Media

La Tabla 12 muestra que la integración de tecnologías 5.0 en el UMT-TriboLab presenta una alta viabilidad técnica, con un promedio de 4.31/5. Las áreas con mayor potencial son el monitoreo de condición, la digitalización mediante IoT y el impacto académico, ya que pueden implementarse sin modificar el software propietario del equipo. Los aspectos con viabilidad media, como el mantenimiento predictivo con IA y el gemelo digital, requieren mayor desarrollo en adquisición y análisis de datos, pero siguen siendo factibles dentro del enfoque de Mantenimiento 5.0.

Tabla 12

Evaluación de viabilidad tecnologías 5.0 para el tribómetro

Área de Evaluación	Estado Actual	Propuesta Tecnología 5.0	Viabilidad Cualitativa	Clasificación (0-5)	Observaciones Técnicas
Automatización	Control mediante software propietario y servomotores X-Y-Z.	Implementación de sistema de monitoreo inteligente externo.	Alta	4.5	No requiere modificación interna del equipo.
Digitalización	Comunicación USB y almacenamiento local.	Plataforma IoT con conexión a la nube y <i>dashboard</i> de visualización.	Alta	4.5	Implementación externa no invasiva.

Área de Evaluación	Estado Actual	Propuesta Tecnología 5.0	Viabilidad Cualitativa	Clasificación (0-5)	Observaciones Técnicas
Monitoreo de condición	Inspección visual y supervisión básica.	Sensores IoT (vibración, temperatura y consumo energético).	Alta	5	Ideal para migrar hacia mantenimiento predictivo.
Gestión de datos	Almacenamiento local sin análisis avanzado.	Base de datos histórica con análisis de tendencias.	Alta	4.5	Mejora la trazabilidad y la toma de decisiones.
Mantenimiento	Enfoque preventivo y correctivo.	Mantenimiento predictivo apoyado en IA.	Media	3.5	Requiere datos históricos suficientes para entrenamiento.
Simulación	No cuenta con modelo virtual.	Desarrollo de gemelo digital del sistema.	Media-Alta	4	Necesita modelado matemático y captura de variables reales.
Integración industrial	No dispone de protocolos abiertos.	Sistema paralelo IoT sin intervenir software propietario.	Media	3.5	Se debe evitar modificar el software original del fabricante.
Impacto académico	Uso experimental tradicional.	Evolución a laboratorio inteligente 5.0.	Muy Alta	5	Alto valor investigativo y formativo para la universidad.

A partir del análisis realizado, se evidenció que el equipo no contaba previamente con un esquema formal de mantenimiento, presentando fallas operativas asociadas principalmente a condiciones de instalación inadecuadas y prácticas de operación no estandarizadas. En este sentido, las intervenciones realizadas recientemente corresponden a las primeras acciones orientadas a restablecer condiciones adecuadas de funcionamiento, destacándose la corrección de la nivelación del equipo mediante su ubicación sobre una superficie completamente plana, así como la ejecución de procesos básicos de calibración que han permitido mejorar la estabilidad y

precisión de los ensayos.

Adicionalmente, se encuentra en proceso la adecuación de un mesón de soporte que garantice condiciones óptimas de operación, junto con el fortalecimiento de las capacitaciones en el manejo del equipo, lo cual ha contribuido a la reducción de fallas asociadas al uso inadecuado.

Sin embargo, a pesar de estas mejoras, aún no se cuenta con un sistema de registro de actividades de mantenimiento, ni en formato físico ni digital, lo que limita la trazabilidad de las intervenciones y el análisis del comportamiento del equipo en el tiempo.

Desde el punto de vista económico, se evidenció que el mantenimiento especializado por parte del fabricante representa un costo elevado, estimado en aproximadamente 40 millones de pesos colombianos, sin incluir repuestos, para actividades de alineación, actualización, revisión y diagnóstico del equipo. Esta condición resalta la necesidad de desarrollar estrategias internas de gestión de mantenimiento que permitan aprovechar los recursos disponibles y reducir la dependencia de servicios externos.

En este contexto, el equipo se encuentra en una etapa incipiente de gestión de mantenimiento, caracterizada por intervenciones correctivas iniciales y mejoras operativas puntuales, pero sin un enfoque estructurado ni basado en datos, lo cual representa una oportunidad significativa para la implementación de estrategias más avanzadas y eficientes.

Según esta evaluación, el tribómetro se identificó como el activo con mayor viabilidad técnica para el desarrollo del presente trabajo, al ofrecer condiciones favorables para la incorporación de herramientas de monitoreo, análisis de datos y mejora en la gestión de mantenimiento, constituyéndose como una base adecuada para la aplicación de enfoques orientados a la mejora del desempeño y la confiabilidad del sistema.

5.5 Evaluación de viabilidad para la integración de tecnologías 5.0

La evaluación de viabilidad para la integración de tecnologías 5.0 constituyó una etapa fundamental en el diagnóstico del estado actual del equipo, ya que permitió analizar su capacidad de adaptación hacia entornos de mantenimiento inteligente y digitalizado. A través de esta evaluación, se consideraron aspectos clave como el nivel de digitalización, conectividad, generación de datos, automatización y potencial de implementación de herramientas avanzadas como el gemelo digital. Con el fin de estructurar este análisis, en las Tablas 13 a la 16 se presentan los instrumentos y criterios definidos para llevar a cabo la evaluación

A continuación, se presenta la Tabla 13 con el fin de establecer un criterio uniforme de evaluación, se definió una escala de calificación cualitativa y cuantitativa para analizar el nivel de viabilidad tecnológica de los equipos. Esta escala permitió clasificar cada criterio evaluado según su grado de desarrollo tecnológico, digitalización y capacidad de integración con herramientas asociadas al Mantenimiento 5.0.

Tabla 13

Criterios de calificación para la evaluación tecnológica

Calificación	Nivel
1	Muy baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy alta

Esta escala sirvió como base para evaluar comparativamente ambos equipos, permitiendo identificar fortalezas, limitaciones y oportunidades de integración tecnológica.

La Tabla 14 presenta la evaluación de viabilidad tecnológica del banco motor

monocilíndrico de vibraciones, considerando criterios asociados al nivel de digitalización, monitoreo, automatización y capacidad de integración tecnológica. Cada criterio fue evaluado mediante la escala definida previamente, permitiendo identificar el grado de preparación del equipo frente a estrategias de Mantenimiento 5.0.

Tabla 14

Evaluación de viabilidad tecnológica del banco motor monocilíndrico de vibraciones

Criterio	Descripción	calificación	Nivel	Justificación
Nivel de digitalización	Presencia de sensores y sistema de registro digital	2	Baja	Cuenta con instrumentación básica, pero no posee un sistema digital integrado para registrar datos continuamente.
Generación de datos	Capacidad de guardar y consultar información histórica	2	Baja	Los datos no se almacenan de forma estructurada ni permiten un análisis histórico organizado.
Integración a red (IoT)	Posibilidad de conexión remota o monitoreo en línea	1	Muy baja	No dispone de conexión a red ni plataforma para monitoreo remoto.
Complejidad del sistema	Integración entre partes mecánicas y eléctricas	3	Media	Tiene componentes mecánicos y eléctricos funcionales, pero su nivel de integración es básico.
Documentación disponible	Existencia de manuales y registros técnicos	3	Media	Cuenta con manuales y registros, aunque sin enfoque en digitalización avanzada.
Potencial para gemelo digital	Posibilidad de crear un modelo virtual basado en datos reales	2	Baja	Para lograrlo sería necesario agregar sensores y sistemas adicionales.
Impacto académico	Uso en prácticas e investigación	3	Media	Es útil en formación, pero con alcance tecnológico limitado.
Facilidad para agregar sensores	Posibilidad de mejorar el equipo sin rediseñarlo completamente	3	Media	Se podrían añadir sensores, pero implicaría modificaciones técnicas.
Nivel de automatización	Control automático del equipo	2	Baja	El control es básico y no cuenta con funciones inteligentes de monitoreo.

Los resultados obtenidos evidencian que el banco motor presenta un bajo nivel de digitalización y automatización, debido principalmente a la ausencia de monitoreo continuo, almacenamiento de datos e integración con plataformas digitales. No obstante, el equipo presenta posibilidades de adaptación tecnológica mediante la incorporación de sensores y herramientas de adquisición de datos, lo cual representa una oportunidad para la implementación gradual de estrategias de mantenimiento inteligente.

La Tabla 15 presenta la evaluación de viabilidad tecnológica del tribómetro, en la cual se incluyen los criterios definidos previamente junto con sus respectivas calificaciones. Los resultados evidencian un nivel de digitalización y automatización predominantemente bajo y medio, lo que permite identificar el estado actual del sistema y su limitada capacidad de adaptación a tecnologías asociadas al mantenimiento 5.0.

Tabla 15

Evaluación de viabilidad tecnológica del tribómetro

Criterio	Descripción	Calificación	Nivel	Justificación
Nivel de digitalización	Sensores integrados y software de control	5	Muy alta	El equipo trabaja completamente con control digital y registro automático de datos.
Generación de datos	Registro y almacenamiento organizado	5	Muy alta	Guarda información de cada ensayo y permite exportarla fácilmente para análisis.
Integración a red (IoT)	Posibilidad de conexión externa	4	Alta	Aunque funciona de forma local, permite exportar datos y puede integrarse a sistemas externos.
Complejidad del sistema	Integración mecánica, electrónica y software	5	Muy alta	Integra motor, sensores y software en una plataforma controlada

Documentación disponible	Manuales y especificaciones técnicas	5	Muy alta	automáticamente. Dispone de documentación completa del fabricante.
Potencial para gemelo digital	Posibilidad de modelar el sistema con datos reales	5	Muy alta	Genera datos en tiempo real que facilitan la creación de un modelo virtual.
Impacto académico	Aplicación en investigación avanzada	5	Muy alta	Es un equipo ampliamente utilizado en investigación de materiales y tribología.
Facilidad para agregar sensores	Posibilidad de ampliación tecnológica	4	Alta	Permite integración adicional sin modificaciones estructurales complejas.
Nivel de automatización	Control programable del ensayo	5	Muy alta	El ensayo se ejecuta de forma automática con parámetros configurables.

A diferencia del banco motor monocilíndrico, el tribómetro presenta un mayor nivel de digitalización y automatización, debido a la integración de software especializado, sensores internos y sistemas de control automatizado. Estas características evidencian una mayor preparación tecnológica para implementar estrategias avanzadas de monitoreo y mantenimiento basado en condición.

En la Tabla 16 se resumen los puntajes totales, promedios y el nivel global obtenido por cada equipo evaluado.

Tabla 16*Resultados globales de viabilidad tecnológica por equipo*

Equipo	Puntaje Total	Promedio	Nivel Global
Banco Motor	21	2.33	Baja – Media
Tribómetro	43	4.78	Muy Alta

Con base en las tablas anteriores de evaluación del nivel de digitalización y automatización, se evidenció una diferencia significativa entre los equipos analizados. El banco motor presentó calificaciones mayormente bajas y medias, con un puntaje de 21, reflejando limitaciones en integración digital, almacenamiento estructurado de datos y automatización avanzada.

Por otro lado, el tribómetro obtuvo calificaciones altas en la mayoría de los criterios evaluados, con un puntaje total de 43, destacándose en el nivel de digitalización, generación de datos, automatización y potencial para gemelo digital.

El dispositivo con mayor viabilidad tecnológica y mejor proyección para aplicaciones de investigación, integración a sistemas digitales y desarrollo bajo enfoques de industria 4.0/5.0 fue el tribómetro, al contar con mayores capacidades de control, registro, análisis e integración de información, por lo cual el análisis se centró en este equipo.

La metodología empleada permitió evaluar de manera estructurada la viabilidad de implementar estrategias de mantenimiento 5.0 en los equipos analizados, mediante el análisis de criterios técnicos, operativos y tecnológicos. A partir de esta evaluación, se evidenció que el banco motor presentó una gestión de mantenimiento básica, con predominio de intervenciones correctivas y preventivas sin soporte en datos, lo cual limita su capacidad de integración hacia enfoques más avanzados.

Por el contrario, el tribómetro, aunque aún no implementa estrategias de mantenimiento predictivo, cuenta con condiciones técnicas favorables para su desarrollo, tales como

disponibilidad de información operativa, automatización de procesos y potencial de integración con sistemas de monitoreo.

Los resultados obtenidos en la evaluación de viabilidad tecnológica reflejaron esta diferencia, evidenciando un nivel global bajo-medio para el banco motor y muy alto para el tribómetro, lo que permitió concluir que este último presenta una mayor capacidad de adaptación hacia entornos de mantenimiento inteligente y digitalizado. En este sentido, el tribómetro se posicionó como el equipo con mayor potencial para la implementación de estrategias de mantenimiento 5.0, constituyéndose como el activo seleccionado para el desarrollo del presente trabajo.

El diagnóstico técnico realizado permitió identificar el nivel de madurez en mantenimiento de los equipos analizados, evidenciando limitaciones significativas en términos de monitoreo de condición, trazabilidad de información y gestión basada en datos.

A partir del análisis comparativo, se determinó que el tribómetro presenta el mayor nivel de digitalización, automatización y capacidad de integración tecnológica, con un puntaje promedio de 4.78 frente a 2.33 del banco motor, lo que justifica su selección como equipo base para la implementación del mantenimiento 5.0.

El diagnóstico técnico realizado permitió caracterizar el estado actual de los equipos desde un enfoque de ingeniería de mantenimiento, evidenciando diferencias significativas en términos de nivel de digitalización, automatización, trazabilidad y capacidad de integración tecnológica.

El banco motor monocilíndrico presenta un esquema de mantenimiento de baja madurez, con predominio de actividades correctivas y ausencia de monitoreo de condición, lo cual limita la identificación temprana de fallas y la toma de decisiones basada en datos. En contraste, el tribómetro mostró un alto nivel de instrumentación y capacidad de generación de datos, alcanzando

un nivel de viabilidad tecnológica superior, lo que lo posiciona como el activo más adecuado para la implementación de estrategias de mantenimiento 5.0.

Este análisis permitió no solo identificar las debilidades estructurales del sistema de mantenimiento actual, sino también establecer criterios técnicos de selección del equipo de estudio, dando cumplimiento al objetivo de diagnóstico y sentando las bases para el desarrollo de soluciones orientadas a la mejora de la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

6. Diseño del plan de mantenimiento 5.0 basado en parámetros de monitoreo e instrumentación

Una vez seleccionado el tribómetro como el equipo con mayor viabilidad técnica, se desarrolló en este capítulo el diseño de un plan de mantenimiento 5.0 orientado al monitoreo de condición y a la integración de tecnologías digitales. Este proceso busca transformar la gestión de mantenimiento tradicional hacia un enfoque basado en datos, que permita mejorar la confiabilidad, disponibilidad y desempeño del equipo en el entorno académico.

Para ello, se realizó la identificación de variables críticas del sistema a partir del ensayo tribológico seleccionado, seguido de la definición de puntos de medición, la selección de sensores e instrumentación adecuada y el diseño de una arquitectura para la adquisición, almacenamiento y análisis de datos. De esta manera, se establece una propuesta integral que articula el monitoreo en tiempo real, la gestión de información y el uso de herramientas de análisis inteligente, constituyendo la base para la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo en el laboratorio

6.1 Descripción del ensayo tribológico seleccionado (Bola–Disco)

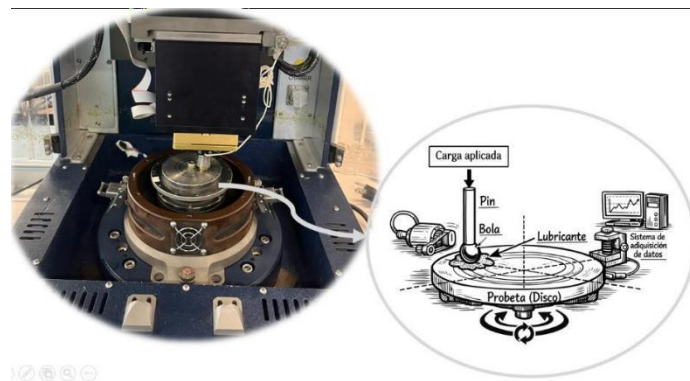
Con el fin de garantizar la representatividad y confiabilidad de los resultados, se seleccionó un ensayo tribológico clásico ampliamente utilizado en estudios de ingeniería de materiales: el ensayo tipo bola–disco. Este tipo de ensayo permite analizar de manera controlada los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación entre superficies en contacto, siendo una referencia estándar en investigaciones tribológicas.

En la Figura 6 se muestra el tribómetro durante la ejecución del ensayo, que es el ensayo

donde se tienen más datos, pues es el más usado en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica, donde se observa la configuración tipo bola–disco; adicionalmente, al lado se presenta el tribosistema, en el cual se identifican las superficies en contacto y los elementos que intervienen directamente en el proceso, permitiendo comprender la interacción mecánica que da lugar a los fenómenos tribológicos analizados.

Figura 6

Esquema de funcionamiento del ensayo tipo bola–disco



Nota. Fuente propia desarrollada con IA

El ensayo tribológico bola–disco es una de las pruebas más utilizadas para estudiar el comportamiento de fricción, desgaste y lubricación entre materiales en contacto deslizante. Este se realiza en el tribómetro mediante la interacción controlada entre una bola cerámica de alúmina y una probeta en forma de disco que gira bajo condiciones definidas de carga, velocidad y lubricación. Durante la prueba se registran variables como la fuerza normal, la fuerza tangencial, el coeficiente de fricción (COF) y la emisión acústica, las cuales permiten analizar el comportamiento tribológico del material bajo condiciones operativas controladas.

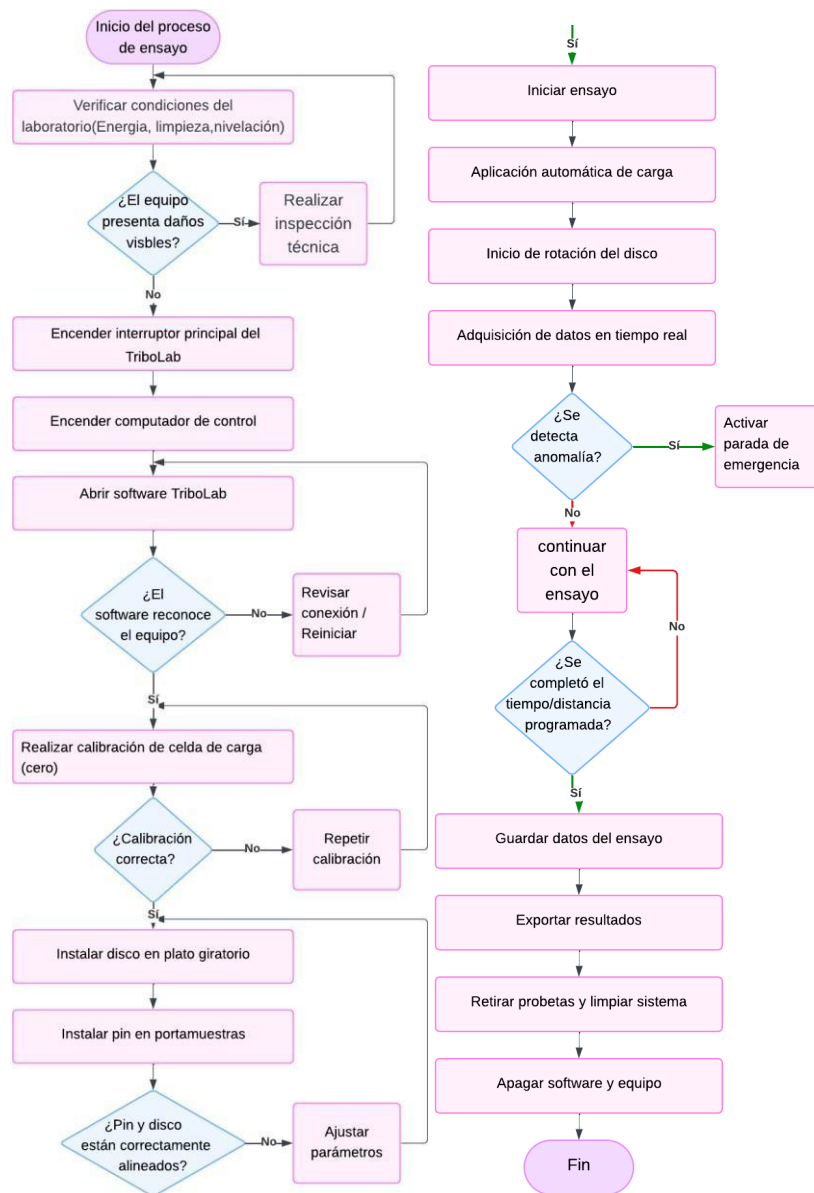
Este tipo de ensayo es ampliamente utilizado en ingeniería debido a su capacidad para simular condiciones reales de operación en componentes mecánicos como rodamientos, engranajes

y superficies deslizantes. En el contexto del presente proyecto, su relevancia radica en la generación continua de datos, lo que permite identificar variables críticas como la fricción, la vibración, la temperatura y el desgaste superficial, las cuales pueden ser monitoreadas mediante sensores e instrumentación adicional.

En concordancia con la evolución del mantenimiento, este ensayo permite avanzar desde enfoques tradicionales hacia estrategias basadas en monitoreo de condición y análisis de datos. De esta manera, se constituye como una base para la implementación de mantenimiento 5.0, al facilitar la adquisición de información en tiempo real y apoyar la toma de decisiones orientada a la confiabilidad y el desempeño del sistema. El ensayo tribológico tipo bola–disco sigue una secuencia operativa que incluye verificación, calibración, ejecución y adquisición de datos. Esta secuencia se representa de manera clara en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 7, que representa la secuencia operativa del ensayo, incluyendo verificación, ejecución, monitoreo y finalización.

Figura 7

Diagrama de flujo del ensayo tribológico tipo bola–disco.



Nota. Elaboración propia basada en el manual de operación del tribómetro UMT TriboLab (Bruker, 2015) y en el procedimiento experimental desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica Identificación de variables críticas del ensayo bola – disco

Para el ensayo bola-disco, el comportamiento tribológico depende de diferentes variables que están relacionadas directamente con el contacto entre las superficies, dichas variables afectan el desgaste, la fricción y condiciones estables de operación A continuación, se presentan las

variables críticas identificadas para el monitoreo del sistema. La Tabla 17 presenta las variables críticas que están presentes en el ensayo tribológico bola-disco. a identificación de estas variables va a permitir establecer los parámetros que son necesarios para monitorear el ensayo, así mismo es la base para la selección de sensores y el desarrollo de mantenimiento basado en condición

Tabla 17

Identificación de variables críticas del ensayo

Variable	Tipo de variable	Influencia en el ensayo	Método de medición
Carga normal	Operacional / Control	Determina la presión de contacto entre la bola y el disco, afectando directamente el desgaste y el comportamiento tribológico del sistema.	Sensor de fuerza del tribómetro
Velocidad de rotación	Operacional / Control	Controla la velocidad de deslizamiento entre las superficies y afecta la generación de calor y el régimen de fricción.	Sensor de velocidad o encoder del motor
Coefficiente de fricción	Variable de respuesta	Permite evaluar el comportamiento tribológico del sistema y detectar cambios en las condiciones de operación del ensayo.	Sensor de fuerza tangencial integrado en el tribómetro
Temperatura de contacto	Variable de condición	Indica el aumento de temperatura generado por fricción, lo cual puede afectar las propiedades de los materiales y la estabilidad del ensayo.	Termopar o sensor de temperatura cercano al punto de contacto
Desgaste	Variable de resultado	Representa la pérdida de material en la superficie del disco o de la bola como resultado del contacto tribológico.	Inspección visual del surco de desgaste después del ensayo
Vibración	Variable de condición	Permite detectar inestabilidades mecánicas, irregularidades en el contacto o posibles fallas en el sistema durante el ensayo.	Acelerómetro instalado en la estructura del tribómetro
Emisión acústica	Variable de condición	Permite identificar eventos asociados a fricción, desgaste o posibles daños en el contacto	Sensor de emisión acústica o micrófono especializado

		tribológico.	
Tiempo o número de ciclos control	Variable de control	Determina la duración del ensayo y permite analizar la evolución del comportamiento tribológico a lo largo del tiempo.	Sistema de control del tribómetro

6.2 Definición de puntos de medición del sistema

La definición de puntos de medición del sistema consiste en identificar y establecer los lugares específicos dentro del equipo donde se deben realizar las mediciones de las variables relevantes del proceso. La Tabla 18 presenta estos puntos del sistema tribológico donde se realiza la medición de cada variable considerada en el ensayo.

Tabla 18

Puntos de medición de las variables del ensayo tribológico bola–disco.

Variable	Punto de medición en el sistema	Descripción del punto de medición
Carga normal	Sistema de aplicación de carga del tribómetro (brazo o soporte de la bola)	El sensor de fuerza se ubica en el mecanismo que aplica la carga sobre la bola, permitiendo medir la presión ejercida contra el disco durante el ensayo.
Velocidad de rotación	Eje del motor que hace girar el disco	Se mide mediante un encoder o sensor de velocidad instalado en el motor o en el eje de rotación del disco para controlar la velocidad de deslizamiento.
Coefficiente de fricción	Sistema de medición de fuerza tangencial del tribómetro	Se obtiene a partir de la fuerza tangencial generada en el contacto bola–disco mediante un sensor integrado en la estructura del equipo.
Temperatura de contacto	Zona cercana al punto de contacto entre la bola y el disco	Se mide mediante un termopar o sensor de temperatura ubicado lo más cerca posible de la zona de fricción para detectar el aumento térmico producido durante el ensayo.
Desgaste	Superficie del disco y de la bola después del ensayo	Se evalúa en el surco de desgaste generado en el disco o en la bola mediante inspección visual o técnicas de medición superficial una vez finalizado el ensayo.

Variable	Punto de medición en el sistema	Descripción del punto de medición
Vibración	Estructura o base del tribómetro cerca del sistema de contacto	Se mide con un acelerómetro instalado en la estructura del equipo para detectar vibraciones producidas por irregularidades en el contacto o fallas mecánicas.
Emisión acústica	Estructura del tribómetro cerca de la zona de contacto	Un sensor de emisión acústica o micrófono especializado se ubica cerca del contacto tribológico para captar señales generadas por fricción o desgaste.
Tiempo o número de ciclos	Sistema de control del tribómetro	Se registra mediante el software o sistema de control del equipo para determinar la duración del ensayo y analizar la evolución del comportamiento tribológico.

6.3 Selección de sensores e instrumentación compatible

Según el manual del TriboLab, el sistema incorpora sensores de fuerza y sistemas de control de movimiento que permiten medir variables tribológicas durante el ensayo. (UMT-TRIBOLAB MANUAL-20151123). El contacto entre las muestras se fija a un sensor de fuerza tipo *strain-gauge*, el cual registra el comportamiento mecánico del contacto y permite calcular parámetros como la fricción. (UMT-TRIBOLAB MANUAL-20151123) Además, el sistema cuenta con *encoders* de posición y control del motor para registrar velocidad y ciclos de ensayo (B1004 - RevA0 - UMT TriboLab). La Tabla 19 muestra las variables que puede medir directamente el tribómetro con los sensores que tiene instalados.

Tabla 19*Variables que mide directamente el tribómetro*

Variable	Sensor o sistema del equipo	Justificación técnica
Carga normal	Sensor de fuerza 2D (<i>Friction/Load Sensor</i>)	El sistema utiliza sensores de fuerza basados en galgas extensométricas para medir la fuerza normal aplicada durante el ensayo.
Velocidad de rotación	Motor con encoder integrado	El tribómetro posee un motor de alta velocidad con control automático y encoder, lo que permite registrar la velocidad de rotación del sistema durante el ensayo.
Coefficiente de fricción	Sensor de fuerza normal y tangencial	El coeficiente de fricción se calcula a partir de las fuerzas normal y tangencial medidas por el sensor de fuerza del sistema.
Número de ciclos	Software y encoder del sistema	El sistema registra la duración del ensayo y el número de ciclos mediante el control del motor y el procesamiento de la señal del encoder.

6.3.1 Carga normal

El tribómetro usa un Sensor de fuerza/fricción de dos ejes (*2-axis friction/load sensor*), son intercambiables según el rango de carga del experimento ya que todos no sirven para la misma carga. los sensores tipo FVLG (mN) se usan para ensayos muy pequeños, para ensayos pequeños son los DFM (N) y para ensayos grandes los DFH (decenas o cientos de N) estos sensores miden simultáneamente:

- Fuerza normal (F_n) → la carga aplicada sobre la muestra
- Fuerza tangencial (F_t) → la fuerza de fricción

Con esas dos señales el software calcula el coeficiente de fricción. Para este ensayo tribológico se utilizó el sensor DFM-2G, con un rango de medición de 0.20 -- 20 N y una resolución de 1 mN, adecuado para los ensayos realizados a 10 N de carga normal. ya que el sensor DFM-1G quedaba justo al límite y el DFH-5G también sirve, pero es menos sensible,

como se puede ver en el manual del tribómetro (Figura 8)

Figura 8

Tipos de sensores de carga normal que se pueden instalar en el tribómetro según el manual

5: Technical Specifications		Bruker UMT TriboLab
	<ul style="list-style-type: none"> • 0.5kg Suspension and DFM Rigid Adapter Included 	
DFM-1G	DFM - 1G Friction / Load Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Gold Series 2-axis Medium-Range Friction/Load Sensor • Range: 0.10 to 10 N; Resolution: 0.5 mN • 1kg Suspension and DFM Rigid Adapter Included
DFM-2G	DFM - 2G Friction / Load Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Gold Series 2-axis Medium-Range Friction/Load Sensor • Range: 0.20 to 20 N; Resolution: 1.0 mN • 2kg Suspension and DFM Rigid Adapter Included
DFH-5G	DFH - 5G Friction / Load Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Gold Series 2-axis High-Range Friction/Load Sensor • Range: 0.5 to 50 N; Resolution: 2.5 mN • 5kg Suspension and DFH Rigid Adapter Included
DFH-10G	DFH - 10G Friction / Load Sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Gold Series 2-axis High-Range Friction/Load Sensor • Range: 1 to 100 N; Resolution: 5.0 mN • 10kg Suspension and DFH Rigid Adapter Included

Nota. Tomado de *Bruker UMT TriboLab: Technical Specifications* (p. 5), por Bruker, s.f.

6.3.2 Coeficiente de fricción

Luego de medir la fuerza normal y tangencial mediante el sensor seleccionado en la Figura 8 el sistema del tribómetro Bruker UMT TriboLab calcula automáticamente el coeficiente de fricción (μ) durante el ensayo. El parámetro representa una relación entre la fuerza de fricción que se genera por el contacto y la carga normal aplicada sobre la superficie del disco

El coeficiente de fricción se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n}$$

Donde: μ = Coeficiente de fricción (adimensional)

F_t = Fuerza tangencial o fuerza de fricción medida por el sensor (N)

F_n = Fuerza normal aplicada sobre la muestra (N)

El cof (coeficiente de fricción) viene siendo un parámetro fundamental para estudios tribológicos, ya que evalúa el comportamiento del contacto entre las superficies que se encuentran

en movimiento relativo. El software del tribómetro registra de una forma continua las variaciones de F_t y F_n , permitiendo así obtener la evolución del cof en función del número de ciclos del experimento o tiempo.

De esta manera, se pueden analizar cambios en el comportamiento tribológico del material, como desgaste, estabilización de contacto y variaciones en condiciones de fricción durante el ensayo.

6.3.3 Velocidad de rotación

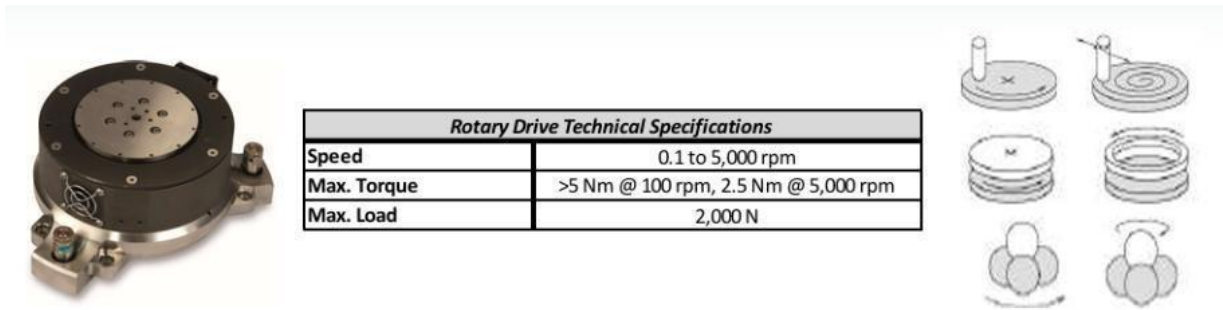
Según la documentación del tribómetro la velocidad de rotación se mide por medio de un *encoder* de posición integrado en el motor servo del sistema rotatorio. Este sistema funciona de la siguiente manera: Motor servo + encoder rotatorio

- Motor servo: hace girar la plataforma donde está la muestra.
- Encoder: mide la posición angular del eje del motor.

A partir de esa información el sistema calcula la velocidad de rotación (RPM), es decir que el encoder cuenta cuántas vueltas da el eje por unidad de tiempo. En la Figura 9 se ve el módulo que permite generar el movimiento rotatorio del sistema, el cual opera en un rango de velocidad de 0.1 a 5000 rpm, permitiendo realizar ensayos tribológicos bajo diferentes condiciones de velocidad

Figura 9

Módulos de accionamiento del tribómetro Bruker



Nota. Tomado de Bruker UMT TriboLab: Technical Specifications (p. 5), por Bruker, s.f

6.3.4 Número de ciclos

El número de ciclos corresponde a la cantidad de repeticiones que se dan durante el movimiento relativo entre las superficies en contacto, en el tribómetro esta variable se determina por medio del sistema de control del motor servo, el cual incorpora el encoder rotatorio como se muestra en la Figura 9 y registra la posición angular del eje.

A partir de esta información proporcionada por el encoder, el software del equipo calcula el número de revoluciones realizadas durante el ensayo, permitiendo así determinar el número total de ciclos. El tribolab tiene variables que no puede medir directamente las cuales se presentan a continuación en la Tabla 20

Tabla 20

Variables que no se pueden medir directamente por el tribómetro

Variable	Sensor o sistema del equipo	Justificación técnica
Temperatura de contacto	Controlador de temperatura o sensores adicionales	El sistema puede integrar sensores de temperatura y cámaras térmicas como módulos adicionales.
Desgaste	Microscopía o perfilometría	El desgaste generalmente se evalúa mediante análisis de la superficie después del ensayo. El catálogo menciona que pueden conectarse

Vibración	Sensor externo requerido	sensores externos al sistema de adquisición de datos.
Emisión acústica	Sensor de emisión acústica adicional	El sistema permite instalar sensores de emisión acústica para monitoreo avanzado.

6.3.5 Instrumentación de temperatura seleccionada para el ensayo en el tribómetro

El sensor de temperatura en el tribómetro se utiliza especialmente en la zona de contacto entre la bola y el disco, donde se genera la fricción del calor. En el documento de sensores UMT Tribolab se identificaron diferentes alternativas para la medición de temperatura durante el ensayo tribológico, entre las opciones más utilizadas se encuentran los sensores RTD (*Resistance Temperature Detector*) y los termopares tipo K

El RTD funciona a partir del principio de la resistencia eléctrica de un metal, cuando la temperatura cambia también cambia la resistencia, por otro lado, el termopar tipo k se opera con el efecto *Seebeck*, el cual se produce cuando dos metales distintos se unen formando una unión caliente produciendo una pequeña diferencia de voltaje proporcional a la temperatura la cual es interpretada como un valor de electricidad y se transforma en un valor de temperatura

En la busca de monitoreo inteligente, datos precisos y estrategias de mantenimiento predictivo, el sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*) se considera una opción más adecuada debido a su mayor precisión y estabilidad en las mediciones, facilitando la detección temprana de variaciones de temperatura

En la Figura 10 se presentan las características generales del sensor TMR-RTD utilizado para la medición y registro de temperatura en el tribómetro, incluyendo su rango de operación y los componentes integrados como el sensor RTD y el amplificador.

Figura 10*Sensor de temperatura*

Sensor	Imagen	Presupuesto	Comentarios
TMR-RTD IDT Temperatura Medición y registro Image		Rango: -50° a +150°C (-58 °F a +302 °F)	Incluye amplificador y sensor RTD

Nota. Tomado de *UMT TriboLab Parts Catalog* (Bruker Nano, Inc., 2024).

6.3.6 Instrumentación de desgaste seleccionada para el ensayo en el tribómetro

El instrumento seleccionado para medir el desgaste en el ensayo CAP-500 es un sensor capacitivo que permite medir microdesgaste y deformaciones en la superficie del disco o la bola del tribómetro. Funciona detectando cambios en la capacitancia cuando varía la distancia entre el sensor y la superficie, lo que permite calcular con alta precisión la profundidad del desgaste. Por esta razón, es uno de los métodos más adecuados, ya que permite medir el desgaste en tiempo real sin detener el ensayo, lo cual lo hace apropiado para su integración en estrategias de mantenimiento 5.0.

Ubicación: cerca de la superficie del disco o del soporte, apuntando a la zona de contacto donde ocurre el desgaste. En la Figura 11 se presentan las características del sensor CAP-500, utilizado para la medición de desgaste y microdeformación vertical mediante tecnología capacitiva en el tribómetro. Se incluyen parámetros como resolución, precisión y rango de medición, así como los componentes de montaje compatibles con el sistema L-Drive, información basada en el catálogo de accesorios del equipo.

Figura 11*Sensor de desgaste*

Sensor	Imagen	Presupuesto	Comentarios
<p>CAP-500</p> <p>Micro- vertical Desgaste, Micro- Deformación Capacidad Sensor</p>		<p>Resolución lineal: 50 nm Precisión: 200 nm Rango: 0,50 mm</p>	<p>SOLO PARA L-Drive</p> <p>Incluye los siguientes componentes: Porta sensores de tapa (compatibles con IH-63- Kits de soporte de bola y DFH-CAP)</p> <p>Adaptador de placa de sensor, para recorrido extendido, compatible con L-Drive</p> <p>Placa de montaje de muestra L-Drive, con varios orificios roscados n.º 4-40 para mayor compatibilidad con el montaje de muestras</p> <p>Soporte de muestra vertical, con canal abierto para pruebas de rayado</p> <p>Nota: No se puede actualizar en campo. Requiere instalación de fábrica si se adquiere posteriormente.</p>

Nota. Tomado de *UMT TriboLab Parts Catalog* (Bruker Nano, Inc., 2024). tomada de *UMT TriboLab Parts Catalog* (Bruker Nano, Inc., 2024).

6.3.7 Sensor de emisión acústica seleccionada para el ensayo en el tribómetro

El sensor de emisión acústica en el tribómetro es utilizado para monitorear los fenómenos dinámicos que ocurren justo en la zona de contacto entre la bola y el disco durante el ensayo tribológico, el proceso de fricción y desgaste genera unas pequeñas liberaciones de energía en forma de ondas elásticas que se propagan a través del material. Estas ondas se pueden detectar mediante sensores de emisión acústica ubicados cerca de la zona de contacto. Estos sensores de emisión acústica permiten detectar eventos microscópicos asociados al comportamiento de las superficies en contacto, como microfracturas, procesos de desgaste y eventos acústicos generados por la fricción. que producen señales de alta frecuencia que pueden ser captadas y luego analizadas para evaluar el estado del sistema tribológico durante el ensayo.

Dentro de las opciones disponibles para la emisión acústica se encuentran sensores especializados como el AE-5 *Acoustic Emission Sensor*, diseñado para detectar ondas eléctricas generadas por procesos de fricción, deformación o propagación de grietas en los materiales. su

ubicación es cerca de la zona de contacto permitiendo captar las señales acústicas originadas durante el proceso

El sensor seleccionado es el modelo AE-5 proporcionado directamente por el fabricante, lo que asegura plena compatibilidad con el sistema de adquisición del tribómetro, sin necesidad de instrumentación externa ni ajustes adicionales, garantizando una integración directa y eficiente en el ensayo.

Su funcionamiento se basa en convertir las ondas elásticas generadas en el material en señales eléctricas para luego ser procesadas por el sistema de adquisición de datos. A partir de estas señales se pueden analizar algunos parámetros como la frecuencia, la intensidad y la evolución temporal de estos sucesos acústicos, lo que permite identificar cambios en los mecanismos de fricción y desgaste. En la Figura 12 se presenta el sensor de emisión acústica modelo AE-5 utilizado para la medición y registro de señales acústicas generadas durante el ensayo.

Figura 12

Sensor de emisión acústica



Nota. Tomado de *UMT TriboLab Parts Catalog*, Bruker Corporation, 2024.

6.3.8 Sensor de vibración para el ensayo en el tribómetro

El sensor seleccionado para la medición de vibraciones en el ensayo es el MPU6050, el cual integra un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes, utilizado para medir vibraciones y movimientos del sistema, registrando datos como:

- Aceleración
- Vibración
- Frecuencia de vibración
- Amplitud de movimiento

Este sensor es importante para la supervisión del estado de las máquinas, ya que el monitoreo de vibraciones es una herramienta clave dentro de las estrategias de mantenimiento predictivo.

El sensor se ubica en la estructura base del tribómetro, generalmente cerca del motor o de la zona de contacto entre la bola y el disco, con el fin de captar las vibraciones generadas durante el funcionamiento del equipo.

En la Figura 13 se presenta el sensor de vibraciones, el cual puede instalarse en la estructura o base del equipo, cerca del motor o de la zona de contacto, para registrar variables como aceleración, frecuencia de vibración y amplitud del movimiento.

Figura 13

Sensor de vibración



Nota. Tomado de MPU6050 module (gyroscope and accelerometer sensor), por CircuitDigest (2021), CircuitDigest.

En la Tabla 21 se muestran las variables e instrumento que participan en el ensayo tribológico.

Tabla 21

Variables del ensayo tribológico y sensores utilizados para su medición









Imagen	Variable	Sensor / Referencia
	Emisión acústica	Sensor de Emisión Acústica AE-5
	Vibración	Sensor de vibración MPU6050
	Desgaste	CAP-500

Imagen	Variable	Sensor / Referencia
	Temperatura	Sensor TMR-RTD
	Carga normal	Sensor de carga
	Velocidad de rotación	Encoder de posición integrado en el servomotor
	Coeficiente de fricción	Sensor de fricción / <i>Load Sensor</i>
	Número de ciclos	Contador de ciclos / Encoder

6.4 Arquitectura de adquisición y almacenamiento de datos

Los sensores actuales y los que fueron seleccionados adicionalmente para la instrumentación del tribómetro son dispositivos convencionales que registran variables físicas como vibración, emisión acústica y temperatura. Estos sistemas no tienen conectividad a internet, pero se puede integrar con sistemas de adquisición de datos y plataformas de comunicación que permite su incorporación en una arquitectura IoT (internet de las cosas)

Entonces es importante que un dispositivo IoT pueda cumplir con lo siguiente, un sensor físico que pueda medir las variables, que tenga un sistema de procesamiento microcontrolador o *gateway* y que tenga una conectividad de red ya sea Wifi, Ethernet, Bluetooth, LoRa. etc, en caso

de no haber conectividad no es IoT todavía.

6.5 Sistema de adquisición de datos (DAQ)

El DAQ es el dispositivo que recibe señales de los sensores, las convierte a datos digitales y finalmente las envía a un computador o servidor. Para implementar el sistema de monitoreo de condición es necesario seleccionar un dispositivo adecuado para la adquisición de datos que generan los sensores. Para seleccionar la alternativa más apropiada, se realizó una comparación entre diferentes dispositivos teniendo en cuenta criterios como resolución, conectividad, facilidad de integración con software y costo. La Tabla 22 muestra la comparación entre las posibles plataformas NI USB-6009, ESP32 y Arduino UNO para sistemas que de adquisición de datos. Se evalúan las características mostradas con el propósito de identificar la alternativa más adecuada para la implementación del sistema más adecuado para el monitoreo del ensayo.

Tabla 22

Comparación de alternativas para el sistema de adquisición de datos del sistema de monitoreo

Característica	Opción 1: NI USB-6009	Opción 2: ESP32	Opción 3: Arduino Uno
Tipo de dispositivo	Sistema DAQ profesional de laboratorio	Microcontrolador con conectividad IoT	Microcontrolador para prototipos
Entradas analógicas	8	ADC integrado (hasta 18 canales dependiendo del modelo)	6
Resolución	14 bits	12 bits	10 bits
Conectividad	USB	WiFi y Bluetooth	USB
Integración con software	Compatible con LabVIEW y MATLAB	Compatible con plataformas IoT y programación en C/C++	Compatible con Arduino IDE
Costo	Alto	Bajo	Bajo
Facilidad de programación	Media	Media	Alta

Característica	Opción 1: NI USB-6009	Opción 2: ESP32	Opción 3: Arduino Uno
Aplicación principal	Investigación y mediciones de alta precisión	Sistemas IoT y monitoreo remoto	Prototipos electrónicos y educativos
Ventajas principales	Alta precisión y confiabilidad en medición	Conectividad inalámbrica integrada y bajo costo	Fácil implementación y gran comunidad de soporte
Desventajas	Alto costo	Menor precisión que un DAQ profesional	No posee conectividad inalámbrica integrada

Para la adquisición de datos del tribómetro, se seleccionó un sistema de adquisición de datos (DAQ), específicamente el NI USB-6009 (Figura 14), debido a que las señales de los sensores utilizados son de alta sensibilidad, como es el caso de los sensores de emisión acústica.

Los sistemas DAQ permiten una mayor resolución, precisión y tasa de muestreo en comparación con microcontroladores convencionales, lo cual resulta útil en aplicaciones de monitoreo tribológico.

En la Figura 14 se muestra la tarjeta NI USB-6009, la cual se utiliza para captar las señales de los sensores y enviarlas al computador para su procesamiento y visualización en la interfaz gráfica.

Figura 14

Tarjeta NI-USB6009



Nota. Tomado de *NI USB-6009 Data Acquisition Device*, por National Instruments (s. f.).

6.6 Infraestructura de comunicación IoT

La transmisión de datos entre el sistema de adquisición y la plataforma de monitoreo se realizará mediante la red WiFi disponible en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Esta infraestructura con la que se cuenta actualmente permite establecer una conexión estable entre el computador encargado de la adquisición de datos y el servidor donde se almacenará la información generada por los sensores del tribómetro.

Para la comunicación de los datos se propone el uso del protocolo MQTT, el cual es ampliamente utilizado en aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) debido a su eficiencia en la transmisión de información proveniente de los sensores. Este protocolo permite enviar los datos capturados por el sistema de adquisición hacia un servidor o plataforma de monitoreo en tiempo real, facilitando así su almacenamiento, análisis y visualización.

6.7 Almacenamiento de datos del sistema de monitoreo

La arquitectura del sistema incorpora una capa de almacenamiento encargada de registrar la información generada por los sensores instalados en el tribómetro. Los datos adquiridos son enviados inicialmente al computador del laboratorio, el cual actúa como servidor local, permitiendo el almacenamiento y procesamiento de la información en tiempo real.

Para la gestión de los datos se propone el uso de la base de datos InfluxDB, la cual está diseñada específicamente para el manejo de series de tiempo, siendo adecuada para el almacenamiento de datos continuos provenientes de sensores. Esta base de datos permite gestionar grandes volúmenes de información y facilita el análisis histórico del comportamiento del tribómetro. Como alternativa se consideró MySQL; sin embargo, no fue seleccionada debido a que no está modificada para el manejo eficiente de datos continuos en tiempo real.

El almacenamiento de la información se realiza de forma local en el computador del laboratorio, lo que permite registrar y analizar los datos sin depender de servicios externos o de una conexión permanente a internet. No obstante, con el fin de mejorar la disponibilidad, respaldo y acceso remoto a la información, se propone complementar la arquitectura mediante el uso de soluciones en la nube como InfluxDB Cloud. Esta integración permite almacenar los datos de forma escalable, facilitando su consulta remota, análisis avanzado y respaldo seguro de la información generada por el sistema de monitoreo.

6.8 Análisis y visualización

En esta etapa, los datos obtenidos de los sensores son procesados y transformados en información útil para el monitoreo del tribómetro. Para ello, se propone el uso de la herramienta Grafana, ampliamente utilizada en sistemas de monitoreo e IoT, la cual permite conectarse de

manera eficiente con bases de datos como InfluxDB y visualizar la información en tiempo real mediante paneles de control interactivos.

A través de esta plataforma es posible representar variables como vibración, temperatura, tendencias de desgaste y comportamiento histórico de los sensores, lo que facilita el análisis del estado del equipo y la toma de decisiones basada en datos. Como alternativas se consideraron herramientas como Node-RED o Power BI; sin embargo, Grafana fue seleccionada debido a su facilidad de integración con bases de datos de series de tiempo y su capacidad para el monitoreo continuo en tiempo real.

La implementación de un sistema de monitoreo con almacenamiento local y en la nube requiere la incorporación de mecanismos de seguridad que garanticen la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información. En este sentido, se plantea el uso de protocolos de comunicación seguros como HTTPS y cifrado mediante TLS para la transmisión de datos desde el sistema de adquisición hacia las plataformas de almacenamiento. Asimismo, se emplean mecanismos de autenticación basados en tokens de acceso para restringir el uso de la base de datos únicamente a usuarios autorizados. De igual forma, se establecen políticas de control de acceso que permiten definir permisos sobre la lectura, escritura y modificación de los datos. Finalmente, el uso de almacenamiento en la nube contribuye a la disponibilidad y respaldo de la información, reduciendo el riesgo de pérdida de datos y asegurando la continuidad del sistema de monitoreo dentro del enfoque de mantenimiento 5.0.

6.9 Análisis inteligente

Se propone técnicas de *Machine Learning* basadas en algoritmos clásicos que son más fáciles de manejar porque necesita menos cantidad de datos y menor capacidad computacional,

debido a que el entorno corresponde a un laboratorio se prioriza el uso de modelos menos complejos y muy comunes en el mantenimiento predictivo para identificar patrones de desgaste y predecir tendencias de falla de manera eficiente.

Los algoritmos presentados en la Tabla 23 pertenecen al campo de *Machine Learning* y se utilizan para analizar los datos obtenidos de los sensores del tribómetro, permitiendo así detectar anomalías, identificar patrones de desgaste y apoyar estrategias de mantenimiento predictivo.

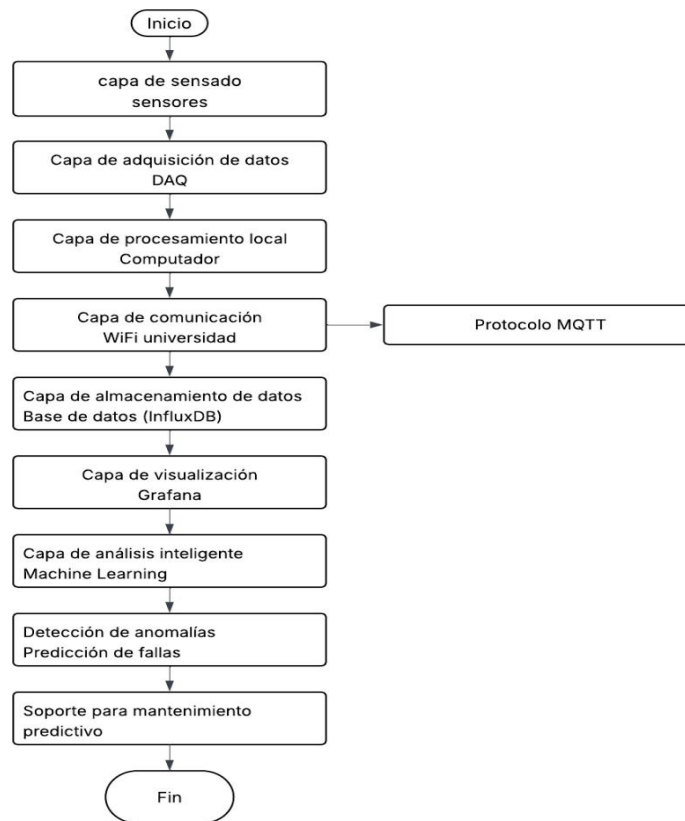
Tabla 23

Algoritmos de Machine Learning aplicados al análisis de datos del tribómetro

Algoritmo	Para qué sirve
Random Forest	Detectar patrones en los datos
Support Vector Machine	Clasificación de fallas
K-means	Detección de anomalías
Regresión	Predicción de tendencias

6.10 Arquitectura IoT para el monitoreo de condición y análisis inteligente del tribómetro

La Figura 15 muestra la arquitectura propuesta para el sistema de monitoreo inteligente del tribómetro. También muestra el flujo de información iniciando por la toma de datos mediante sensores hasta llegar al análisis inteligente, esta tecnología permite implementar tecnología IoT para apoyar el monitoreo de condición del equipo. La Figura 15 muestra la arquitectura integra de sensores, adquisición de datos mediante DAQ, protocolo MQTT, comunicación mediante Wifi y análisis inteligente mediante técnicas de *machine learning*

Figura 15*Arquitectura IoT para el monitoreo y análisis inteligente del tribómetro*

El diseño del sistema de monitoreo permitió establecer de manera estructurada y técnicamente fundamentada las variables críticas del ensayo tribológico, tales como temperatura, vibración, emisión acústica, coeficiente de fricción y condiciones operativas del sistema, las cuales inciden directamente en los mecanismos de desgaste, pérdida de eficiencia y generación de fallas en el equipo.

A partir de este análisis, se definieron los puntos estratégicos de medición y la selección de sensores e instrumentación compatible con la arquitectura del tribómetro, garantizando la captura de información relevante bajo condiciones reales de operación. Asimismo, se estructuró la infraestructura necesaria para la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos en tiempo

real, integrando sistemas de adquisición de datos (DAQ) y arquitecturas basadas en IoT, lo que permite la consolidación de información histórica y el análisis continuo del comportamiento del sistema.

La integración de estas tecnologías no solo permitió la digitalización del equipo, sino que estableció un modelo funcional orientado al mantenimiento basado en condición (CBM), en el cual la toma de decisiones deja de depender de inspecciones periódicas y se fundamenta en el análisis de variables operativas en tiempo real. Este enfoque representa un avance significativo desde esquemas tradicionales de mantenimiento hacia estrategias predictivas, alineadas con los principios del mantenimiento 5.0.

Adicionalmente, el sistema propuesto habilita la implementación de análisis inteligente mediante técnicas de procesamiento de datos y aprendizaje automático, permitiendo la identificación de patrones de degradación, tendencias de falla y comportamiento dinámico del equipo bajo diferentes condiciones de operación. Esto no solo mejora la confiabilidad del sistema, sino que fortalece la planificación de intervenciones, reduce tiempos de inactividad y fortalece la gestión de activos desde un enfoque basado en datos.

En este sentido, el resultado obtenido no se limita al diseño de un sistema de monitoreo, sino que constituye una base técnica robusta para la implementación de estrategias avanzadas de mantenimiento predictivo, validando el cumplimiento del objetivo de diseño del plan de mantenimiento 5.0 y posicionando el laboratorio como un entorno con capacidad de evolución hacia modelos de mantenimiento inteligente y digitalizado.

7. Plan de mantenimiento basado en condición

El plan de mantenimiento para el tribómetro se basa en un sistema de toma de decisiones fundamentado en datos obtenidos del monitoreo continuo del equipo. En este se definen las variables a monitorear, los sensores utilizados y los métodos de análisis de la información, con el fin de identificar desviaciones en el comportamiento del sistema y posibles modos de falla. De esta manera, es posible ejecutar acciones de mantenimiento de acuerdo con la condición real del equipo, permitiendo la detección temprana de anomalías y mejorar las intervenciones.

Adicionalmente, el sistema de monitoreo no solo cumple una función diagnóstica, sino también operativa y de seguridad, ya que permite supervisar en tiempo real las condiciones de funcionamiento del equipo. Esto posibilita la generación de alertas y la implementación de paradas seguras del sistema ante la presencia de variables fuera de rango o condiciones inadecuadas de montaje que puedan comprometer la integridad del equipo, la calidad del ensayo o la seguridad del operador.

Asimismo, la instrumentación implementada permite utilizar el tribómetro como una plataforma para la realización de ensayos orientados al mantenimiento predictivo, en los cuales es posible analizar el comportamiento de componentes bajo condiciones controladas y evaluar su degradación a lo largo del tiempo. Esto amplía el alcance del sistema, pasando de un monitoreo pasivo a un entorno activo de experimentación y generación de conocimiento aplicado al mantenimiento.

Las variables críticas del ensayo tribológico y los sensores empleados para su medición fueron definidos previamente durante el proceso de instrumentación del equipo. Estas variables conforman la base del sistema de monitoreo requerido para implementar un enfoque de

mantenimiento basado en condición, integrando el seguimiento del estado del equipo, el control de su operación y el soporte a estrategias de mantenimiento predictivo.

7.1 Fundamento de la curva P-F

La curva P-F representa el intervalo existente entre la detección potencial de una falla (P) y la falla funcional del sistema (F), permitiendo identificar el tiempo disponible para ejecutar acciones de mantenimiento antes de que ocurra una pérdida significativa de funcionalidad. Este enfoque constituye una herramienta fundamental del mantenimiento basado en condición, ya que permite anticipar procesos de degradación mediante el monitoreo de variables operativas.

En el presente estudio, la aproximación de la curva P-F se desarrolló específicamente para el ensayo tribológico tipo bola–disco realizado en el tribómetro, considerando las condiciones operativas y variables monitoreadas durante el proceso experimental. Bajo este enfoque, el análisis no se plantea desde una perspectiva global del equipo, sino a partir del comportamiento funcional de los subsistemas involucrados directamente en el ensayo, particularmente el sistema de movimiento, el contacto tribológico y el sistema de adquisición de datos.

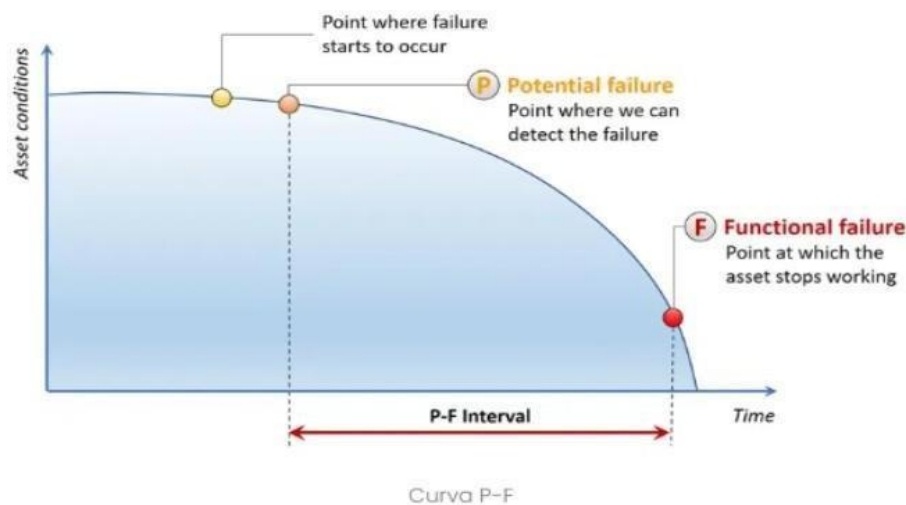
Para el caso de estudio, se consideraron variables como vibración, emisión acústica, temperatura, coeficiente de fricción, velocidad de rotación, carga normal y número de ciclos, debido a que estas permiten identificar cambios progresivos asociados a fenómenos de desgaste, incremento de fricción, desalineación o deterioro operacional durante la ejecución del ensayo. En este contexto, el intervalo P-F corresponde al periodo en el cual las variables monitoreadas comienzan a evidenciar cambios asociados a procesos de degradación progresiva antes de alcanzar una condición crítica de operación.

En este sentido, los rangos de condición presentados posteriormente corresponden a una

propuesta de análisis desarrollada para las condiciones específicas del ensayo bola–disco y no deben interpretarse como valores universales aplicables a todos los regímenes de operación del tribómetro. Su propósito consiste en establecer una referencia inicial para el monitoreo de condición y la proyección de estrategias de mantenimiento predictivo asociadas al Mantenimiento 5.0.

Figura 16

Representación conceptual de la curva P-F aplicada al monitoreo de condición en el ensayo tribológico tipo bola–disco.



Nota. Tomado de (Power-MI, 2024)

7.2 Clasificación de rangos de condición para el monitoreo del tribómetro

A partir de este principio, las variables monitoreadas en el tribómetro se clasificaron en tres niveles de condición: leve, severa y catastrófica, permitiendo identificar diferentes etapas del deterioro del sistema. En la Tabla 24 se presentan las variables monitoreadas en el tribómetro junto con los sensores seleccionados para su medición dentro del sistema propuesto.

Tabla 24*Rangos de condición para el monitoreo del tribómetro*

Variable monitoreada	Condición leve	Condición severa	Condición catastrófica	Interpretación
Emisión acústica (AE)	< 320	320 – 350	> 350	incremento del contacto o inicio de desgaste desbalance o
Vibración	< 2 mm/s	2 – 4 mm/s	> 4 mm/s	irregularidad del sistema deterioro progresivo de la superficie
Desgaste (Z)	< 280 μm	280 – 350 μm	> 350 μm	
Temperatura	25 – 40 °C	40 – 60 °C	> 60 °C	incremento de fricción o lubricación deficiente
Carga normal (Fz)	9.5 – 10.5 N	9 – 9.5 N ó 10.5 – 11 N	< 9 N ó > 11 N	posible falla del sistema de carga
Velocidad de rotación	± 2 % del valor nominal	desviación 2 – 5 %	desviación >5 %	problema en control del servomotor
Coefficiente de fricción (COF)	0.06 – 0.08	0.08 – 0.12	>0.12	desgaste progresivo o fallo tribológico
Número de ciclos	< 80 % del límite del ensayo	80 – 100 %	> 100 %	fin de vida del ensayo o del contacto

La definición de rangos de condición permite evaluar el estado operativo del tribómetro a partir del monitoreo continuo de las variables críticas del ensayo, de igual manera se genera una alerta que permite realizar inspecciones o ajustes operativos antes de que se alcance una condición crítica. De esta manera se facilita la implementación de estrategias de mantenimiento basadas en condición dentro del enfoque del mantenimiento 5.0.

A partir de las variables críticas del ensayo tribológico y de los sensores utilizados para su medición, se estructuró un plan de mantenimiento basado en condición para el tribómetro, presentado en la Tabla 25. Este plan integra el monitoreo de parámetros operativos, definición de acciones de mantenimiento y la asignación de responsabilidades en el entorno del laboratorio.

Tabla 25*Plan de mantenimiento basado en condición para el tribómetro*

Sistema / componente	Variable monitoreada	Sensor utilizado	Frecuencia de monitoreo	Acción de mantenimiento	Responsable	Integración mantenimiento 5.0
Sistema de contacto tribológico	Emisión acústica	Sensor de Emisión Acústica AE-5	Monitoreo continuo	Inspección del contacto tribológico y verificación de desgaste	Operador de laboratorio	Análisis digital de señales
Sistema mecánico del tribómetro	Vibración	Sensor de vibración MPU6050	Monitoreo continuo	Revisión de alineación y fijaciones del sistema	Técnico de laboratorio	Monitoreo predictivo
Superficie de contacto	Desgaste	Sensor CAP-500	Por ensayo	Inspección de superficies y reemplazo de muestra	Operador de laboratorio	Registro digital de datos
Sistema térmico	Temperatura	Sensor TMR-RTD	Monitoreo continuo	Verificación de condiciones térmicas y fricción	Técnico de laboratorio	Monitoreo en tiempo real
Sistema de carga	Carga normal	DFM-2G Friction/Load Sensor	Monitoreo continuo	Recalibración del sistema de carga	Técnico de laboratorio	Adquisición digital de datos
Sistema de movimiento	Velocidad de rotación	Encoder de posición (servomotor)	Monitoreo continuo	Revisión del sistema de accionamiento	Técnico de laboratorio	Control digital del sistema
Contacto tribológico	Coefficiente de fricción	Sensor de fricción / Load Sensor	Monitoreo continuo	Inspección del contacto tribológico	Operador de laboratorio	Análisis de comportamiento tribológico
Sistema de operación del ensayo	Número de ciclos	Contador de ciclos / Encoder	Por ensayo	Verificación del límite de operación del ensayo	Operador de laboratorio	Registro en base de datos

La formulación del plan de mantenimiento basado en condición permitió establecer un modelo estructurado de gestión fundamentado en el comportamiento físico del equipo y en la

evolución de sus variables operativas. A través de la aplicación del concepto de curva P-F, se definieron rangos de condición que permiten identificar las etapas de degradación del sistema, facilitando la detección temprana de fallas antes de su manifestación funcional.

Este enfoque representa un cambio significativo respecto a los esquemas tradicionales de mantenimiento, al permitir la transición desde intervenciones reactivas hacia estrategias predictivas soportadas en monitoreo continuo. Como resultado, se mejora la planificación de actividades, se reducen intervenciones innecesarias y se mejora la confiabilidad del equipo.

En este sentido, el plan desarrollado constituye una herramienta técnica alineada con los principios del mantenimiento moderno, permitiendo integrar variables físicas del sistema con criterios de decisión, y fortaleciendo la gestión del mantenimiento desde un enfoque basado en condición y análisis de datos.

8. Análisis de viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0.

El análisis de viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0 tiene como objetivo evaluar los costos y beneficios asociados a la implementación de tecnologías avanzadas en el sistema estudiado. En este apartado se consideran las inversiones necesarias y su impacto en la mejora de las actividades de mantenimiento, con el fin de determinar la factibilidad económica de la propuesta.

En este contexto, el análisis de viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0 integra la identificación de recursos tecnológicos, la estimación de costos y la evaluación de escenarios de implementación, con el fin de determinar la factibilidad de aplicar el sistema de monitoreo propuesto en el tribómetro. A partir de este análisis, se evidencia que, aunque la implementación completa del sistema implica una inversión significativa en instrumentación, adquisición de datos y tecnologías digitales, su desarrollo es viable dentro del contexto académico, especialmente considerando el uso compartido de recursos y su aplicabilidad en múltiples actividades de formación e investigación.

Asimismo, la evaluación por escenarios demuestra que el sistema puede implementarse de manera progresiva, iniciando con configuraciones básicas y evolucionando hacia un modelo de mantenimiento inteligente, lo cual permite adaptar la inversión según la disponibilidad de recursos. En este sentido, los beneficios asociados al monitoreo continuo, la mejora en la confiabilidad del equipo, la reducción de fallas y la generación de información para la toma de decisiones, justifican la implementación del plan desde una perspectiva técnica y económica.

De esta manera, el plan de mantenimiento 5.0 no solo resulta viable, sino que también se consolida como una estrategia que aporta valor al laboratorio, al integrar tecnologías digitales,

fortalecer el proceso de enseñanza–aprendizaje y sentar las bases para el desarrollo de mantenimiento basado en datos. A continuación, se presenta el desarrollo del análisis de viabilidad económica del plan de mantenimiento 5.0, estructurado en la identificación de recursos tecnológicos, la estimación de costos y la evaluación de diferentes escenarios de implementación.

8.1 Identificación de instrumentos y tecnologías necesarias

Para llevar a cabo la implementación del sistema de monitoreo propuesto se requiere de diferentes sensores, dispositivos de adquisición de datos y herramientas tecnológicas las cuales permiten registrar, procesar y visualizar las variables críticas del ensayo tribológico. Adicionalmente, es necesario considerar recursos asociados al desarrollo de modelos digitales y a la capacitación técnica que sea necesaria para lograr la implementación de estrategias de mantenimiento 5.0. Estos elementos permiten evaluar de manera integral la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto. La Tabla 26 corresponde a los elementos necesarios para la implementación, procesamiento, almacenamiento y visualización de los datos generados durante el ensayo tribológico, así como herramientas de apoyo para el desarrollo de estrategias de monitoreo y mantenimiento basadas en datos.

Tabla 26

Recursos tecnológicos y de capacitación para la implementación del mantenimiento 5.0

Categoría	Equipo / Actividad	Función
Instrumentación	Sensor AE-5	Emisión acústica
Instrumentación	Sensor MPU6050	Vibración
Instrumentación	Sensor CAP-500	Desgaste
Instrumentación	Sensor TMR-RTD	Temperatura
		Adquisición de
Instrumentación	Tarjeta NI-USB 6009	datos

Categoría	Equipo / Actividad	Función
Instrumentación	Módulos de acondicionamiento de señal	Adaptación de señales sensor-DAQ Conectividad para
Infraestructura	Servicio de internet	transmisión de datos
Infraestructura	Computador	Adquisición y procesamiento de datos Almacenamiento de
Software	InfluxDB/Digitalocean	datos de sensores Visualización y
Software	Grafana	monitoreo de datos
Capacitación	Capacitación sobre el uso de realidad virtual aplicada al mantenimiento industrial	Formación académica y entrenamiento
Instrumentación	Gafas de realidad Mixta Oculus quest 3	ver e interactuar con entornos virtuales

8.2 Estimación de costos de implementación

Con el propósito de analizar la viabilidad económica del sistema de monitoreo propuesto, se averiguaron los costos asociados a los recursos humanos, tecnológicos y de infraestructura requeridos para su implementación. La Tabla 27 presenta el resumen de dichos costos y su tipo de financiación. La estimación de costos permite cuantificar la inversión requerida para la implementación del sistema de monitoreo propuesto, considerando recursos tecnológicos, humanos y de infraestructura. Este análisis no solo refleja el valor económico del sistema, sino que también permite evaluar su viabilidad en función de los beneficios esperados en términos de confiabilidad y disponibilidad del mantenimiento. Asimismo, constituye una herramienta de apoyo para la toma de decisiones a nivel institucional, permitiendo a la Escuela de Ingeniería Mecánica identificar qué equipos son viables para este tipo de implementación y estimar los costos asociados a su desarrollo.

A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que la mayor inversión se concentra en los sistemas tecnológicos y de adquisición de datos, lo cual es coherente con la naturaleza del sistema propuesto. Sin embargo, algunos elementos, como las herramientas de visualización, pueden implementarse mediante plataformas de acceso libre o institucional, reduciendo costos. Adicionalmente, deben considerarse aspectos asociados a la gestión y seguridad de la información, como almacenamiento en servidores o centros de datos y mecanismos de respaldo, los cuales son fundamentales para garantizar la confiabilidad y sostenibilidad del sistema. En este contexto, la inversión se justifica no solo por su impacto en el mantenimiento, sino también por su aplicabilidad académica y su contribución al desarrollo de entornos alineados con el mantenimiento 5.0.

En términos tecnológicos, herramientas como Grafana pueden utilizarse en versiones gratuitas para monitoreo básico, con planes pagos desde aproximadamente 19 USD/mes o por usuario según el nivel de uso. Por su parte, sistemas de almacenamiento como InfluxDB también cuentan con versiones libres o esquemas de pago por uso, con costos cercanos a 0.002 USD por GB-hora de almacenamiento.

Tabla 27

Estimación de costos de los recursos necesarios para la implementación del sistema de monitoreo del tribómetro.

Descripción	Costos por unidad (COP)	Cantidad (unidades)	Costo parcial (COP)
Recurso humano			
Capacitación virtual sobre el uso de realidad virtual aplicada al mantenimiento industrial	\$500,000.00	1	\$500,000.00
Subtotal recurso		\$500,000.00	

humano	Recursos tecnológicos / Instrumentación		
Sensor AE-5 (emisión acústica)	739615.02	1	\$739,615.02
Sensor MPU6050 (vibración)	\$32,474.00	1	\$32,474.00
Sensor CAP-500 (desgaste)	\$7,144,000.00	1	\$7,144,000.00
Sensor TMR-RTD (temperatura)	\$52,000.00	1	\$52,000.00
Tarjeta NI-USB 6009 (adquisición de datos)	\$702,953.00	1	\$702,953.00
Módulos de acondicionamiento de señal (sensor-DAQ)	\$450,000.00	1	\$450,000.00
Computador para adquisición y procesamiento de datos	\$14,112,209.00	1	\$14,112,209.00
Servicio de internet para transmisión de datos	\$102,000.00	12	\$1,224,000.00
Software			
InfluxDB Digital ocean (almacenamiento de datos x sensores COF, Vibración, Temperatura, Acustica, imagen)/mensual	\$30,000.00	12	\$360,000.00
Grafana (visualización y monitoreo de datos)	\$20,000.00	12	\$240,000.00
Equipamiento			
Gafas de realidad virtual	\$3,000,000.00	1	\$3,000,000.00
Total Efectivo	\$27,093,251.02		
Imprevistos (5 % costo total estimado)	\$2,709,325.10		
TOTAL PROYECTO	\$29,802,576.12		

8.3 Escenarios de costos de implementación

8.3.1 Escenario de bajo costo

En el escenario de bajo costo, la mayoría de los equipos necesarios para la implementación del sistema ya se encuentran disponibles en el laboratorio y son aportados en modalidad de especie por la universidad. En este caso, únicamente se requiere realizar inversiones mínimas asociadas a capacitación y algunos componentes complementarios.

Este escenario se relaciona principalmente con la capacitación en el uso de herramientas de realidad virtual aplicadas al mantenimiento industrial. Este escenario representa la situación más favorable para la implementación del proyecto, ya que permite desarrollar el sistema de monitoreo aprovechando los recursos existentes del laboratorio.

8.3.2 Escenario de costo medio

En el escenario de costo medio, además de la capacitación se considera la adquisición de algunos componentes adicionales necesarios para mejorar la instrumentación del sistema, como módulos de acondicionamiento de señal o herramientas complementarias para el procesamiento de datos.

En este caso dependiendo del costo final de los componentes electrónicos requeridos. El escenario sigue siendo económicamente viable debido a que el costo adicional es relativamente bajo frente a los beneficios que puede generar el sistema de monitoreo.

8.3.3 Escenario de alto costo

En el escenario de alto costo, se contempla la adquisición completa de los equipos tecnológicos necesarios para la implementación del sistema, incluyendo dispositivos de realidad

virtual y otros recursos de infraestructura que podrían no estar disponibles en el laboratorio. Considerando la adquisición de algunos instrumentos necesarios como gafas de realidad virtual, la capacitación correspondiente y los componentes tecnológicos asociados al sistema de monitoreo, a pesar de representar el mayor nivel de inversión, este escenario continúa siendo económicamente viable dentro del contexto académico, ya que los equipos adquiridos pueden utilizarse en múltiples actividades de investigación, formación y desarrollo tecnológico.

La Tabla 28 muestra que, a partir del análisis de los escenarios planteados, se observa que la implementación progresiva del sistema de monitoreo permite adaptar la inversión según la disponibilidad de recursos del laboratorio. Mientras el escenario básico implica un monitoreo limitado, los escenarios intermedio y avanzado permiten integrar herramientas digitales para el análisis de datos y la toma de decisiones basada en condición, acercando el sistema hacia los principios del mantenimiento 5.0.

Tabla 28

Escenarios técnicos para la implementación del monitoreo del tribómetro

Escenario	Recursos existentes	Recursos adicionales	Costo estimado	Alcance técnico
Bajo costo	Sensores propios del tribómetro	Registro manual de datos	Bajo	Monitoreo básico del ensayo
Costo medio	Sensores del tribómetro	NI-USB 6009, sistema de adquisición de datos, base de datos y visualización	Medio	Monitoreo digital de variables tribológicas
Alto costo (Mantenimiento 5.0)	Sensores del tribómetro	Sensores adicionales, sistema DAQ, base de datos, dashboards, análisis con algoritmos y realidad virtual	Alto	Monitoreo inteligente y análisis predictivo

8.3.4 Análisis de escenarios

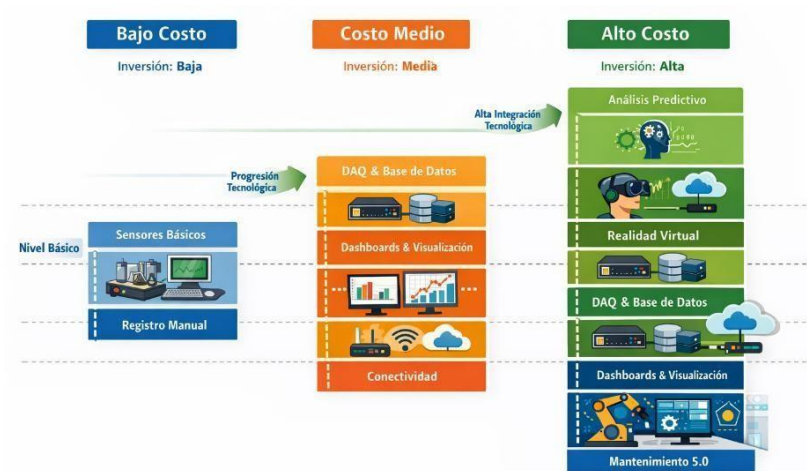
En conjunto, el análisis de los escenarios de implementación evidencia que el desarrollo del sistema de monitoreo puede abordarse de manera progresiva, adaptándose a la disponibilidad de recursos del laboratorio sin comprometer su viabilidad. Mientras el escenario de bajo costo permitió establecer una base operativa inicial, los escenarios de costo medio y alto facilitan la integración de tecnologías digitales y herramientas de análisis que potencian el alcance del sistema. De esta manera, se demuestra que la transición hacia un modelo de mantenimiento basado en condición y alineado con el mantenimiento 5.0 no depende únicamente de grandes inversiones, sino de una adecuada planificación y evolución tecnológica, lo cual permite garantizar la sostenibilidad y aplicabilidad del sistema en el entorno académico.

Con el fin de representar el nivel de integración tecnológica en cada uno de los escenarios de implementación, se presenta la Figura 17, donde se comparan los componentes y tecnologías involucradas en el sistema de monitoreo del tribómetro. Esta representación permite evidenciar cómo la incorporación progresiva de herramientas digitales incrementa el nivel de desarrollo del sistema.

A partir de la gráfica se observa que el escenario de bajo costo se limita al uso de sensores básicos, mientras que el escenario de costo medio incorpora herramientas de adquisición, almacenamiento y visualización de datos. Por su parte, el escenario de alto costo integra tecnologías avanzadas como análisis inteligente y realidad virtual, permitiendo la implementación de un sistema de mantenimiento 5.0. Esto demuestra que la evolución del sistema no depende únicamente de la inversión, sino de la integración progresiva de tecnologías.

Figura 17

Escenarios didácticos de visualización a) Nivel de integración De tecnologías, b) implementación de sensores



a)



b)

El análisis de viabilidad económica permitió evaluar de manera integral la factibilidad de implementación del sistema de mantenimiento 5.0, considerando diferentes escenarios de inversión asociados a la adquisición de sensores, sistemas de adquisición de datos y plataformas tecnológicas.

Los resultados evidencian que, si bien la implementación completa del sistema implica una inversión significativa, existen alternativas escalables que permiten una adopción progresiva del modelo, iniciando desde configuraciones de bajo costo hasta esquemas más avanzados de

monitoreo e integración digital.

Adicionalmente, el análisis permitió identificar beneficios potenciales asociados a la reducción de fallas, mejora del uso de recursos y mejora en la vida útil de los equipos, lo que respalda la sostenibilidad económica del proyecto.

De esta manera, se valida el cumplimiento del objetivo de análisis económico, demostrando que la propuesta no solo es técnicamente viable, sino también adaptable a las condiciones presupuestales del entorno académico, facilitando su implementación real.

9. Desarrollo de un protocolo de mantenimiento basado en realidad virtual y aproximación a gemelos digitales

Inicialmente se evaluaron dos equipos del laboratorio, el banco motor monocilíndrico y el tribómetro, con el fin de seleccionar el más adecuado para la implementación del mantenimiento 5.0, siendo elegido el tribómetro. Posteriormente se diseñó un plan de mantenimiento basado en monitoreo de condición, identificando las variables a medir y seleccionando los sensores correspondientes. Finalmente, se realizó un análisis de viabilidad económica y se planteó la integración de realidad virtual mediante el modelado del tribómetro.

9.1 Fase 1: Diseño del protocolo de mantenimiento 5.0

En esta fase se estableció la base conceptual y estructural del sistema

- 6.1: Definición del protocolo de mantenimiento
- 6.2: Integración inicial del modelo digital y entorno virtual

9.1.1 Protocolo para implementar mantenimiento en el equipo seleccionado

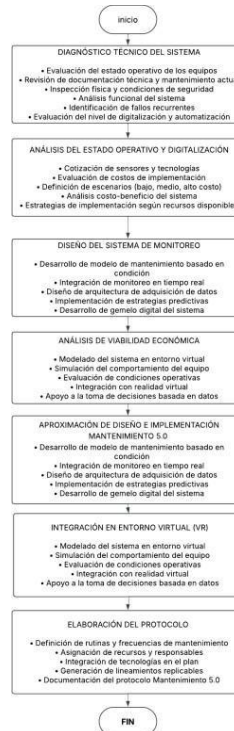
En el siguiente diagrama de flujo describe el protocolo propuesto para la implementación de un sistema de Mantenimiento 5.0, integrando de manera estructurada las diferentes etapas del proceso. En la Figura 18 presentada a continuación, se ilustra de manera secuencial y organizada cada una de las fases que componen este modelo, permitiendo visualizar la relación lógica entre el diagnóstico inicial, el análisis operativo y el desarrollo de soluciones tecnológicas.

Este inicia con el diagnóstico técnico del sistema y el análisis del estado operativo y de digitalización, seguido del diseño del sistema de monitoreo, que incluye la adquisición de datos en

tiempo real y el desarrollo de estrategias predictivas.

Figura 18

Metodología integral para la implementación de mantenimiento 5.0 basado en monitoreo y digitalización



9.1.2 Integración del modelo digital y entorno virtual

Una vez seleccionado el equipo, se procedió a la creación del entorno virtual y del modelo digital del sistema. El proceso de integración se desarrolló mediante el uso de diferentes herramientas de modelado, simulación e interacción virtual, a través de tres etapas:

Etapa 1: Modelado del sistema en SolidWorks. En esta etapa se realizó la definición del modelo digital del tribómetro, iniciando con la identificación de requerimientos del sistema y la recolección de información técnica, como planos, dimensiones, fotografías y observaciones del

equipo real. Posteriormente, se desarrolla el modelado de los componentes mecánicos en SolidWorks, representando la geometría principal y la estructura del sistema. Finalmente, los modelos son exportados en formatos compatibles (FBX, OBJ, STL) para su posterior procesamiento el resultado de esta etapa se puede ver en la Figura 20.

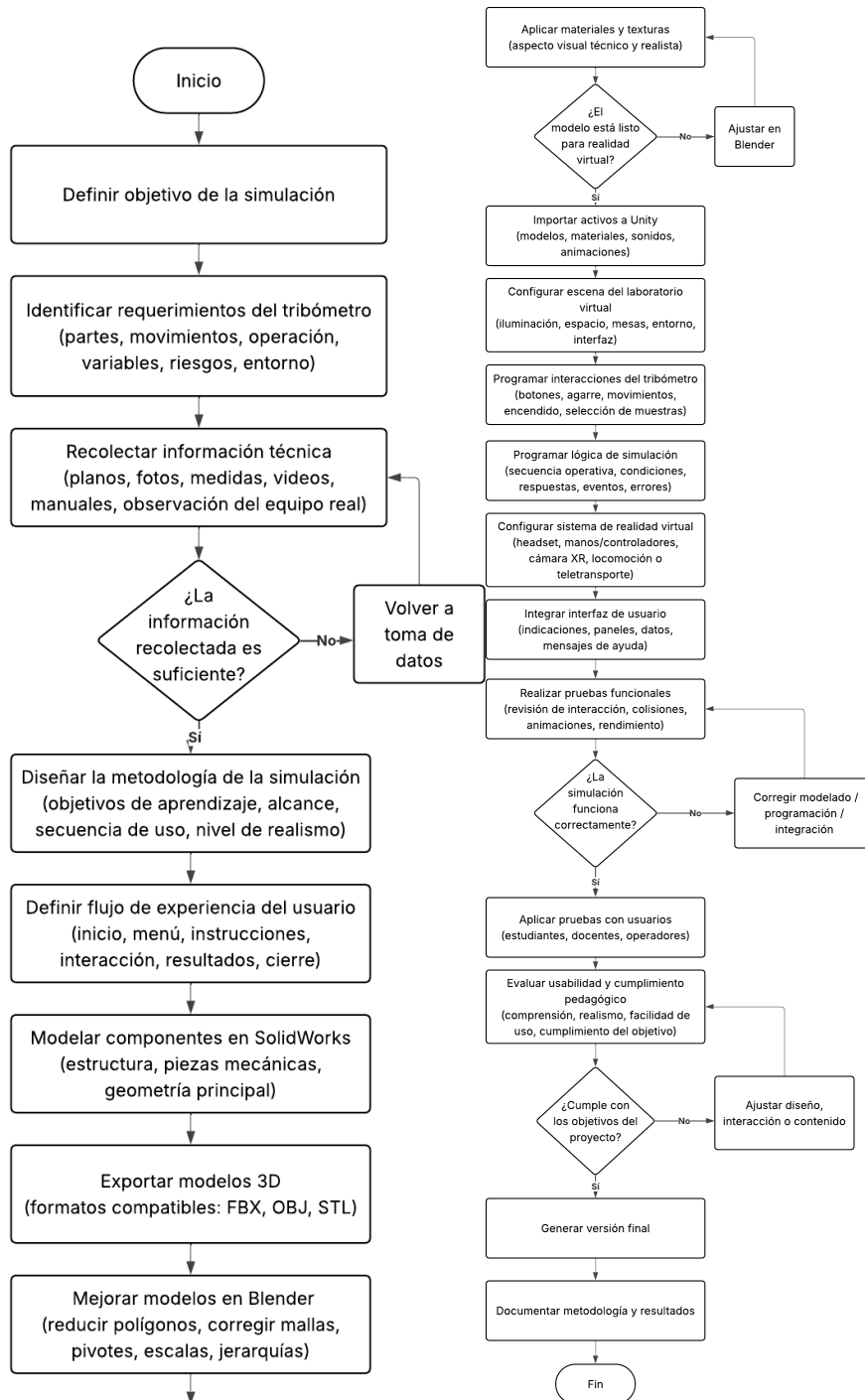
Etapa 2: Preparación del modelo en Blender. Una vez exportados los modelos, se procede a su importación en Blender, donde se realizó el modelo para su uso en entornos virtuales. Esta etapa incluye la reducción de polígonos, corrección de mallas, ajuste de escalas y jerarquías, así como la aplicación de materiales y texturas que permitan obtener un aspecto visual técnico y realista. Adicionalmente, se verifica que el modelo cumpla con los requerimientos de rendimiento para su implementación en realidad virtual el resultado de esta etapa se puede ver en la Figura 21.

Etapa 3: Integración e implementación en Unity. Finalmente, los modelos modificados son importados en Unity, donde se lleva a cabo la integración del entorno virtual. En esta etapa se configura la escena del laboratorio, incluyendo iluminación, entorno y elementos de interacción. Asimismo, se programan las interacciones del sistema, la lógica de simulación y la interfaz de usuario. Posteriormente, se realizan pruebas funcionales y validaciones con usuarios, permitiendo ajustar el modelo y garantizar su correcto funcionamiento. Como resultado, se obtiene una versión final del entorno virtual, lista para su implementación y documentación el resultado de esta etapa se puede ver en la Figura 22

La Figura 19 muestra el diagrama de flujo del proceso seguido para la creación del entorno virtual del tribómetro, donde se integran de forma secuencial las etapas de definición, modelado e implementación. Además, se incluyen puntos de decisión que permiten realizar ajustes y garantizar el correcto funcionamiento y cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Figura 19

Proceso de integración del modelo digital y entorno virtual

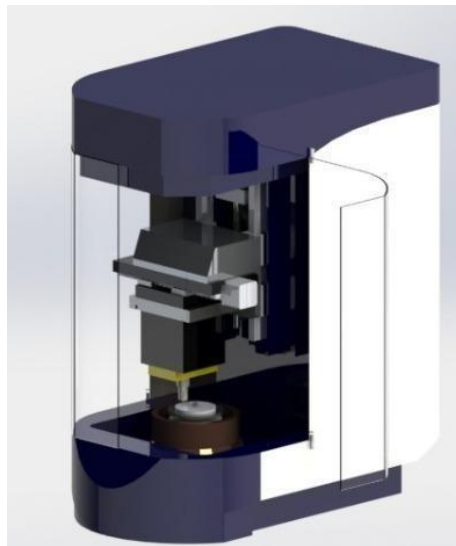


9.1.3 Implementación y simulación del sistema de monitoreo del tribómetro bajo enfoque de mantenimiento 5.0

Se incorpora una aproximación a un modelo digital del sistema, mediante la simulación del comportamiento del sistema en un entorno virtual, con el fin de analizar su desempeño bajo diferentes condiciones de operación, identificar posibles fallas y evaluar estrategias de mantenimiento. Este enfoque contribuye a la mejora del funcionamiento del equipo, al fortalecimiento de la toma de decisiones basada en datos y al desarrollo de competencias tecnológicas en el ámbito del mantenimiento avanzado. La Figura 20 presenta el Modelo tridimensional del tribómetro desarrollado en entorno CAD.

Figura 20

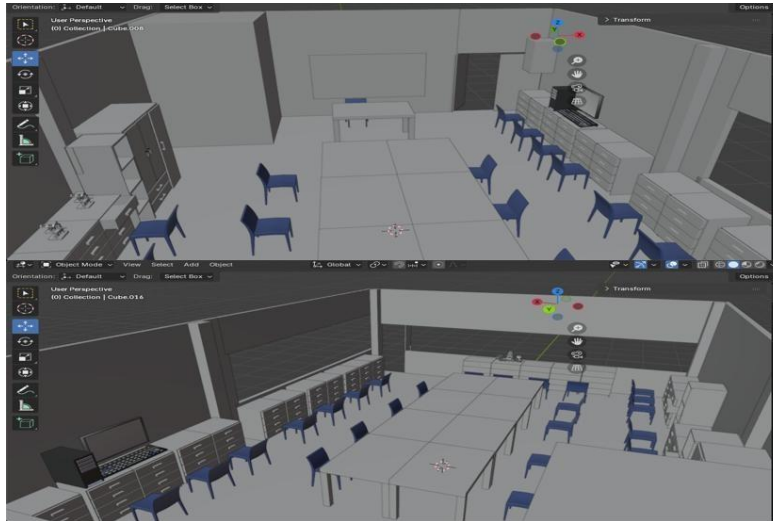
Modelado 3D del tribómetro para la implementación de mantenimiento 5.0



El modelo 3D de la Figura 21 representa un laboratorio de ingeniería mecánica orientado a la implementación de mantenimiento 5.0, donde se integran espacios de trabajo y simulación para el análisis y monitoreo de equipos.

Figura 21

Entorno Virtual de Laboratorio Académico en Blender

**9.2 Implementación de la realidad virtual en ensayos de laboratorio**

En el video se presenta la realidad virtual como una herramienta que permite a los estudiantes interactuar con entornos de laboratorio simulados de manera inmersiva. A través de esta tecnología, es posible comprender mejor los conceptos teóricos mediante experiencias prácticas sin los riesgos o costos de un laboratorio real.

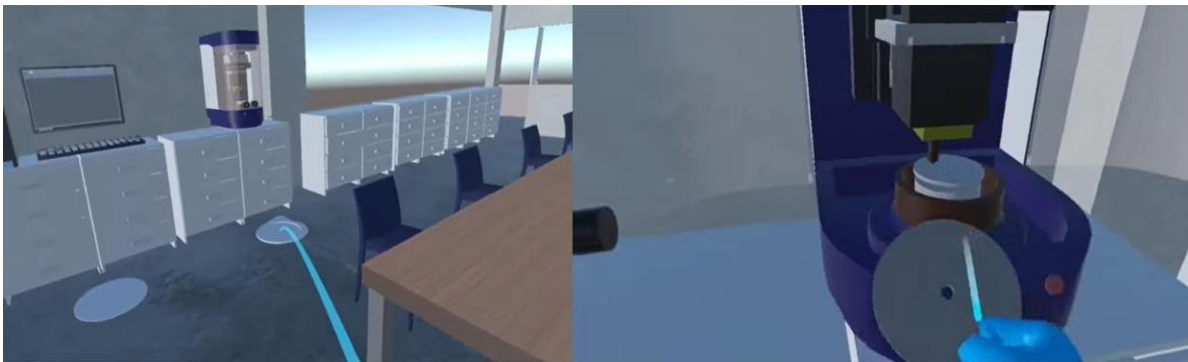
Además, la realidad virtual facilita la repetición de ensayos, el análisis de variables y el desarrollo de habilidades como la toma de decisiones y la resolución de problemas. De esta forma, se convierte en una herramienta clave para fortalecer el aprendizaje en áreas de ingeniería y formación en el siguiente enlace se evidencia el funcionamiento y la implementación del prototipo desarrollado: <https://youtu.be/Q9vFA4SdeCU>.

La Figura 22 presenta un entorno virtual desarrollado en Unity que simula la interacción del usuario con equipos de laboratorio en un contexto de realidad virtual. Este entorno permite la

visualización y manipulación de los elementos del sistema de manera inmersiva, facilitando la comprensión de los procesos de ensayo y el comportamiento del equipo. A través de esta simulación, se busca replicar condiciones reales de operación.

Figura 22

Resultado etapa Interacción 3 simulada en entorno de realidad virtual desarrollado en Unity



9.3 Aplicación de la herramienta como apoyo educativo y de capacitación

La herramienta de realidad virtual presentada constituye un apoyo para el aprendizaje de los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, ya que permite complementar la formación tradicional mediante entornos virtuales interactivos. A través de esta herramienta, los estudiantes pueden comprender mejor los procesos y ensayos de laboratorio de una manera más didáctica y práctica.

Si bien esta herramienta aún se encuentra en una etapa inicial, representa el inicio para el desarrollo de futuros proyectos académicos orientados a la implementación de tecnologías 5.0 en la formación educativa. Si bien esta herramienta representa una aproximación inicial, establece una base para futuros desarrollos académicos orientados a la integración de tecnologías digitales en procesos de formación y mantenimiento.

Adicionalmente, la herramienta puede ser utilizada como un medio de capacitación tanto para estudiantes como para docentes, permitiendo la simulación de procedimientos y la enseñanza de protocolos de manera segura y accesible. En este sentido, funciona como un apoyo metodológico que facilita los procesos de enseñanza y aprendizaje dentro del entorno académico. El desarrollo del protocolo de mantenimiento con integración de realidad virtual y aproximación a gemelos digitales permitió extender el alcance del proyecto hacia un entorno de simulación avanzada, en el cual es posible analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas sin intervenir directamente el equipo físico.

La construcción del modelo digital y su integración en entornos virtuales posibilita la validación de estrategias de mantenimiento, la identificación de condiciones críticas de operación y la mejora de parámetros sin riesgo para el sistema real.

Este enfoque no solo fortalece la gestión del mantenimiento desde una perspectiva técnica, sino que también mejora la interacción humano-máquina, permitiendo la visualización, análisis y comprensión del sistema de manera más intuitiva y controlada.

En este sentido, el desarrollo de estas herramientas posiciona el proyecto dentro de las tendencias del mantenimiento 5.0, integrando simulación, digitalización y análisis de datos como pilares para la toma de decisiones, y ampliando el alcance del modelo hacia aplicaciones tanto técnicas como formativas.

10. Resultados alcanzados y trabajos futuros

Hasta el desarrollo del presente trabajo se logró el estudio técnico y económico para la implementación de un programa y protocolo de mantenimiento 5.0 aplicado al tribómetro Bruker del laboratorio. Adicionalmente, se realizó un acercamiento inicial al concepto de gemelos digitales, logrando establecer la comunicación básica y la visualización del sistema mediante herramientas de simulación. Este trabajo se articula con procesos investigativos previos relacionados con el mantenimiento 5.0, los cuales han sido abordados y presentados en escenarios académicos como el Octavo Congreso Mundial en Gestión de Activos, evidenciando la continuidad y pertinencia de la línea de investigación desarrollada.

A pesar de las limitaciones económicas, fue posible adquirir los elementos mínimos necesarios, como el computador y las gafas de visualización, lo que permitió avanzar hasta esta etapa del proyecto.

En el caso específico del gemelo digital, este se compone principalmente de tres elementos: el sistema físico, el modelo virtual y la integración de datos en tiempo real. En el presente trabajo se logró avanzar hasta la segunda fase, correspondiente al componente visual y a la simulación del sistema, además de un primer acercamiento a la comunicación entre el sistema físico y el entorno digital.

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación del enfoque de mantenimiento 5.0 permite transformar la gestión del mantenimiento en el entorno académico, pasando de un modelo basado en inspecciones manuales y correctivas hacia un esquema estructurado, digitalizado y orientado al análisis de datos.

Se logró establecer un sistema de monitoreo capaz de capturar variables críticas en tiempo

real, diseñar un plan de mantenimiento basado en condición, evaluar su viabilidad económica y desarrollar herramientas de simulación mediante gemelos digitales y realidad virtual.

Este conjunto de resultados permite anticipar fallas, mejorar la confiabilidad del equipo, aprovechar el uso de recursos y fortalecer la toma de decisiones técnicas, constituyendo una base sólida para la evolución hacia mantenimiento predictivo.

Asimismo, el modelo desarrollado presenta un carácter escalable y replicable, lo que permite su aplicación en otros equipos del laboratorio, contribuyendo a la modernización de la gestión de mantenimiento y alineando el entorno académico con las tendencias actuales de la industria.

10.1 Producción académica derivada del trabajo

Como parte de los resultados académicos derivados del presente trabajo, se logró la divulgación de sus fundamentos y avances en un evento científico especializado en mantenimiento, mediante la presentación de un póster académico titulado “Cartografiando el horizonte tecnológico: una revisión de literatura sobre mantenimiento 5.0 en sistemas navales”.

Esta participación permitió someter el enfoque desarrollado a discusión en un entorno académico y técnico, validando su pertinencia frente a las tendencias actuales del mantenimiento inteligente, particularmente en la integración de tecnologías como IoT, inteligencia artificial, análisis de datos y gemelos digitales. Asimismo, estos resultados amplían el alcance del trabajo hacia aplicaciones en sistemas industriales complejos, como el sector naval.

Adicionalmente, como resultado del proceso investigativo, se consolidó la elaboración de un artículo científico titulado “*Mapping the Technological Horizon: A Literature Review on Maintenance 5.0 in Naval Systems*”, el cual se encuentra actualmente en proceso de sometimiento

a una revista internacional en el área de mantenimiento y confiabilidad.

Este producto académico fue desarrollado en el marco del grupo de investigación DIMA de la Universidad Industrial de Santander, en colaboración con COTECMAR, fortaleciendo el componente investigativo del proyecto y ampliando su proyección hacia el ámbito científico e industrial.

En este sentido, estos resultados evidencian que el presente trabajo no solo aporta a la solución de una problemática técnica en el entorno académico, sino que también contribuye a la generación, validación y divulgación de conocimiento en el campo del mantenimiento 5.0.

10.2 Trabajos futuros

Como trabajo futuro, se propone continuar con la implementación completa del sistema planteado durante esta investigación, especialmente en lo relacionado con la integración de sensores, adquisición y procesamiento de datos en tiempo real, y desarrollo de un sistema de monitoreo inteligente. Esto permitiría que el software analice automáticamente la información obtenida, genere alertas cuando se detecten condiciones anormales y clasifique el estado del equipo según niveles de severidad. De esta manera, se podría evolucionar hacia un sistema de mantenimiento predictivo capaz de estimar el tiempo restante de vida útil de los componentes y determinar con mayor precisión el momento adecuado para su reemplazo.

Como aporte adicional, el presente trabajo trasciende su aplicación técnica al integrar herramientas propias del mantenimiento 5.0 en un entorno académico, generando recursos que pueden ser utilizados en procesos de formación en ingeniería mecánica.

La implementación de sistemas de monitoreo, el uso de gemelos digitales y la incorporación de entornos de realidad virtual constituyen estrategias alineadas con el uso de

tecnologías TIC y metodologías de aprendizaje aplicado, permitiendo fortalecer la comprensión de conceptos asociados al mantenimiento moderno.

En este sentido, el proyecto se articula indirectamente con iniciativas académicas de la Universidad Industrial de Santander relacionadas con proyectos de aula y desarrollo de materiales didácticos, aportando al fortalecimiento de la enseñanza mediante herramientas tecnológicas, aunque este componente no hacía parte del alcance inicial del trabajo.

11. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió evidenciar que la implementación de un sistema de Mantenimiento 5.0 en equipos de laboratorio es técnicamente viable, No obstante, el estudio demostró que estas limitaciones pueden mitigarse mediante estrategias de implementación gradual, selección de escenarios de bajo y medio costo, digitalización progresiva de la gestión de mantenimiento y aprovechamiento de herramientas académicas de software y simulación.

En este sentido, aunque el diseño propuesto cumple con los requerimientos técnicos para la implementación de monitoreo inteligente, su aplicación inmediata en la Escuela de Ingeniería Mecánica no resulta completamente viable, debido a la necesidad de realizar inversiones adicionales en infraestructura, integración tecnológica y capacitación del personal. De acuerdo con el análisis económico desarrollado, la implementación requiere una inversión progresiva que varía según el nivel de instrumentación, digitalización y alcance tecnológico adoptado. Por esta razón, se considera más viable una ejecución por fases, iniciando con la incorporación de monitoreo básico, digitalización de registros y fortalecimiento de la capacitación técnica, permitiendo una transición gradual hacia un modelo de mantenimiento 5.0 más sostenible y adaptable a las condiciones del laboratorio.

No obstante, el proyecto constituye un avance significativo hacia la modernización de los procesos de mantenimiento en el entorno académico, ya que establece una base metodológica y tecnológica que puede ser implementada progresivamente. Asimismo, se destaca el potencial de integrar herramientas como la realidad virtual y los gemelos digitales, lo que permite llevar el mantenimiento a un entorno simulado donde los estudiantes pueden interactuar con los equipos sin necesidad de intervenir directamente en ellos.

Este enfoque ofrece múltiples beneficios, entre los que se destaca la mejora de recursos, la reducción del desgaste físico de los equipos, la disminución del riesgo de fallas por manipulación inadecuada y la mejora en los procesos de capacitación. De esta manera, se facilita el aprendizaje del mantenimiento en un entorno seguro, controlado y altamente interactivo.

El trabajo desarrollado abre la puerta para que la Escuela de Ingeniería Mecánica incorpore progresivamente tecnologías asociadas al Mantenimiento 5.0, no solo como una herramienta de gestión técnica, sino también como una estrategia de formación académica. Esto permitirá preparar a los estudiantes para enfrentar los retos de la industria moderna, promoviendo una educación basada en la innovación y la digitalización de sistemas.

El presente trabajo evidencia su proyección investigativa mediante la participación en eventos académicos especializados y el sometimiento de un artículo científico, lo cual valida su pertinencia y contribución en el desarrollo del mantenimiento 5.0.

12. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a la consolidación del mantenimiento 5.0 en la Escuela de Ingeniería Mecánica:

Se recomienda avanzar en la evolución del sistema desarrollado hacia la implementación de gemelos digitales completos, integrando el modelo virtual del tribómetro con datos en tiempo real provenientes de sensores, lo que permitirá simular su comportamiento, anticipar fallas y optimizar estrategias de mantenimiento sin intervención directa sobre el equipo físico.

Asimismo, es fundamental promover la digitalización progresiva de la operación de los equipos de laboratorio, mediante la incorporación de sistemas de monitoreo continuo, plataformas de adquisición de datos y arquitecturas IoT que faciliten el análisis del estado de los activos en tiempo real.

Desde el punto de vista tecnológico, se sugiere fortalecer la inversión en herramientas de analítica avanzada, tales como algoritmos de Machine Learning y plataformas de procesamiento de datos, que permitan evolucionar hacia esquemas de mantenimiento predictivo basados en inteligencia artificial.

Se recomienda implementar un sistema de gestión de mantenimiento asistido por computadora (CMMS), que permita organizar la información técnica, mejorar la trazabilidad de las intervenciones y optimizar la toma de decisiones basada en datos históricos y operativos.

Adicionalmente, se propone adoptar una estrategia de implementación progresiva del mantenimiento 5.0, iniciando con los equipos de mayor criticidad y nivel de digitalización, lo que permitirá aprovechar recursos, validar resultados y facilitar la escalabilidad del modelo hacia otros

sistemas del laboratorio.

De manera complementaria, se recomienda fortalecer la formación académica mediante la creación de cursos, talleres o módulos especializados en mantenimiento 5.0, enfocados en el uso de tecnologías como IoT, análisis de datos, inteligencia artificial, gemelos digitales y realidad virtual.

Estos espacios formativos permitirán desarrollar competencias en monitoreo de condición, análisis predictivo y modelado digital, facilitando la integración entre la teoría y la práctica, y preparando a los estudiantes para enfrentar los desafíos de la industria moderna.

Lo anterior es especialmente relevante considerando que el mantenimiento evoluciona de forma paralela al desarrollo industrial, por lo que la actualización en estas tecnologías resulta fundamental para la formación de ingenieros mecánicos con capacidades alineadas a los entornos productivos actuales.

Finalmente, se recomienda dar continuidad a este trabajo mediante el desarrollo de proyectos de investigación aplicada que profundicen en la integración de tecnologías emergentes, permitiendo consolidar un modelo de mantenimiento inteligente, sostenible y basado en datos dentro de la institución.

Referencias Bibliográficas

ACCA software. (2023). Curva P-F: qué es y cómo usarla para mejorar el mantenimiento.

BibLus. <https://biblus.accasoftware.com/es/curva-p-f-que-es-y-como-usarla-para-mejorar-el-mantenimiento/>

Ammar, A., Karnik, A., & otros. (2021). Interconectividad en tiempo real para mejorar la gestión de la calidad de procesos y productos. *Revista de Innovación Tecnológica*, 15(2), 45-60.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-80642022000100216&script=sci_arttext

Bokrantz, J., Skoogh, A., Berlin, C., & Stanhre, J. (2020). Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(3), 410-

430. <https://doi.org/10.1108/JQME-12-2018-0083>

Bruker Nano, Inc. (2015). UMT TriboLab manual.

Bruker. (2024). UMT TriboLab parts and accessories catalog (B1004 RevA0). Bruker Corporation.

CircuitDigest (2007). NI USB-6009 Data Acquisition Device [Imagen].

CircuitDigest (2021). MPU6050 module (gyroscope and accelerometer sensor) [Imagen].

Consejo General Universitario. (2023). Informe de Actividades UdeG 2023. Universidad de

Guadalajara. https://www.hcgu.udg.mx/sites/default/files/sesiones_cgu/2023-2024/2024-06-12%2000%3A00%3A00/informe_actividades_udg_2023_dr_ricardo_villanueva_lomeli.pdf

Fractal. (2022, June 19). *El Mantenimiento 5.0 y la era del mantenimiento inteligente*.

<https://www.fractal.com/es/blog/mantenimiento-5.0>

Fractal. (2022, June 19). El Mantenimiento 5.0 y la era del mantenimiento inteligente.

<https://www.fractal.com/es/blog/mantenimiento-5.0>

Galar, D., Kumar, U., Lee, J., & Zhao, X. (2018). Smart Maintenance for Human–Robot

Interaction. An Intelligent Search Algorithmic Perspective. https://dokumen.pub/smart-maintenance-for-human-robot-interaction-an-intelligent-search-algorithmic-perspective-978-3-319-67480-3-3319674803-978-3-319-67479-7.html?utm_source=chatgpt.com

Infraspeak (2024, November 28). Estadísticas y tendencias de mantenimiento 2025. Infraspeak

Blog. <https://blog.infraspeak.com/es/mantenimiento-estadisticas-desafios-tendencias/>

ITCL Centro Tecnológico (2024). Industria 5.0 - ITCL. <https://itcl.es/ambitos/industria-5-0/>

Jiménez, D., Pérez, F., & Cardona, J. (2021). Implementación de herramientas de Industria 4.0

en el mantenimiento industrial colombiano. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 7(1), 45-58.

https://www.researchgate.net/publication/337457160_La_industria_4_0_en_el_mantenimiento_industrial

Lineview. (2024). ¿Qué es la Industria 5.0? Centricidad humana, personalización y

sostenibilidad. <https://lineview.com/es/que-es-la-industria-5-0-centricidad-humana-personalizacion-y-sostenibilidad/>

Oficina Asesora de Planeación y Estudios Sectoriales. (2019). Aspectos básicos de la industria

4.0. https://colombiatic.mintic.gov.co/679/articles-124767_recurso_1.pdf

Pal, S. (2024). Artificial Intelligence-Based IoT-Edge Environment for Industry 5.0 (pp.111–

148). https://doi.org/10.1007/978-3-031-58388-9_4

Sgarbossa, F., Peruzzini, M., Rauch, E., & Matt, D. T. (2022). Human-centric smart

manufacturing: theoretical foundations, research issues and future perspectives.

Computers & Industrial Engineering, 163, 107827.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107827>

Smycotech. (2024). Industria 5.0 y Mantenimiento 5.0: qué son, beneficios y nuevas tecnologías.

<https://smycotech.com/es/industria-5-0/>

Tecnologías Habilitadoras 4.0 - TÜV SÜD. (n.d.). TRACTIAN. (2025, January 27). El

mantenimiento en la industria 4.0: el rol del software de gestión.

<https://tractian.com/es/blog/mantenimiento-industria-4-rol-software-gestion>

Universidad Industrial de Santander. (2017). Manual de operación banco de laboratorio del

tribómetro. Escuela de Ingeniería Mecánica.

Zibta, A., et al. (2020). Implementación de prácticas de Mantenimiento 5.0 en sectores

industriales. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 26(3), 410-430.


<https://doi.org/10.1108/JQME-12-2018-0083>

Apéndices

Apéndice A. Certificado de vinculación al grupo de investigación DIMA



Ciencias



CVLAE
CURRÍCULUM VITAE
DE LATINOAMÉRICA
Y EL CARIBE

Datos generales

Participación en grupos de Investigación

Actividades de formación

Actividades como evaluador

Procesos de Apropiación Social del Conocimiento (PASC)

Divulgación pública de la ciencia (DP)

Fredy Alejandro Acevedo

Grupos en los que se encuentra vinculado:

Grupo de Investigación en Diseño y Manufactura - DIMA
Este grupo está avalado por las siguientes instituciones: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Datos de la vinculación
Tipo: Integrante, Desde (Mes-Año): 1 - 2025 (Actual) Horas de dedicación al grupo: 8
Actividad realizada: Estudiantes en semillero. Sup. Paula Cuervo.

Apéndice B. Póster académico sobre mantenimiento 5.0 en sistemas navales

Cartografiando el horizonte tecnológico: Una revisión de literatura sobre mantenimiento 5.0 en sistemas navales

Freddy Acevedo, Jahir Garavito, Paula Cuervo,
Edwin Paipa
Universidad Industrial de Santander – UIS
Freddy2204073@correo.uis.edu.co,
jahir2182312@correo.uis.edu.co, paulacuerv@uis.edu.co
cpipa@icecmar.com
Bucaramanga - Colombia

Resumen

El mantenimiento en la industria naval está evolucionando gracias al desarrollo tecnológico, orientándose hacia estrategias predictivas dentro de la Gestión de Activos 4.0. Esta transformación incluye el uso de sensores IoT, inteligencia artificial y gemelos digitales, con el objetivo de aumentar la disponibilidad, fiabilidad y vida útil de los activos en el entorno de la industria 5.0.

Introducción

La industria naval enfrenta el desafío de mantener la disponibilidad, eficiencia y sostenibilidad de sus activos. Para ello, el mantenimiento 5.0 introduce estrategias inteligentes apoyadas en tecnologías digitales, permitiendo una gestión más conectada, predictiva y adaptada a las exigencias operativas y ambientales del sector.

Del mantenimiento tradicional al enfoque 5.0

El mantenimiento naval es esencial para la operatividad, seguridad y vida útil de los buques. Ante desafíos como costos altos y condiciones adversas, ha evolucionado de métodos manuales a plataformas digitales como AMOS.

Tecnologías clave del mantenimiento 5.0 en la industria naval

Sensores IoT, almacenamiento de histórico de falla en la industria, estrategias de seguridad para la data, gemelo digital.

Fig. 1 Pilares del Mantenimiento 5.0 en la Industria Naval

Conclusiones

El mantenimiento naval evoluciona hacia un modelo inteligente y sostenible, apoyado en tecnologías como IoT, IA y gemelos digitales. La recopilación de datos, la seguridad de la información y el uso de históricos de fallas son clave para una gestión predictiva y eficiente. Su implementación exige habilidades técnicas, cumplimiento normativo y una base sólida en mantenimiento convencional.