

FORMULACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA UN EQUIPO
DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL



Por:

KATHERIN JOHANNA FAUSTINO MOLINA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS
VILLAVICENCIO
2025

FORMULACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA UN EQUIPO
DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL

Por:

KATHERIN JOHANNA FAUSTINO MOLINA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de
Mantenimiento y Gestión de Activos

Asesor

PhD. HANDEL ANDRÉS MARTINEZ SARACHE

Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

VILLAVICENCIO

2025

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

PhD. Handel Andrés MARTÍNEZ SARACHE

Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica

Agradecimientos

Este proyecto de especialización fue posible gracias al apoyo y la colaboración del Grupo de Investigación en Metalurgia Física y Procesos (GIMEFP) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Tunja, y de su director, el Doctor Martín Oliveros Mendoza. Agradezco profundamente la oportunidad de realizar una visita a la universidad donde me formé como ingeniera metalúrgica, un espacio que sigue siendo fundamental en mi crecimiento profesional. Extiendo también mi gratitud al Doctor Ingeniero Handel Sarache, director de este proyecto, por su valiosa orientación, atención y consejos, que fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Asimismo, este trabajo marca un nuevo paso en mi trayectoria académica, consolidando mi proyección en 2025 hacia la especialización en Gerencia de Mantenimiento y Gestión de Activos en la Universidad Santo Tomás de Villavicencio.

...Y al amor de mis padres....

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	4
Contenido.....	5
Lista de Tablas.....	8
Resumen	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema	14
3. Justificación	15
4. Objetivos.....	16
4.1 Objetivo General	16
4.2 Objetivos Específicos.....	16
5. Marco referencial.....	17
5.1 Diseño del equipo de soldadura por fricción rotacional.....	17
5.1.1 Construcción del equipo	18
5.2 Literatura del mantenimiento predictivo	21
5.2.1 YouTube	21
5.2.2 Google Scholar	21
5.2.3 Scopus.....	21
5.2.4 Repositorios universitarios virtuales de Colombia.....	22
5.3 Definiciones	23
5.3.1 ISO 14224:2016.....	23
5.3.2 ISO 18434-1	24
5.3.3 NETA ATS-2017.....	25
5.3.4 El mantenimiento.....	26
5.3.5 Mantenimiento correctivo.....	26
5.3.6 Mantenimiento preventivo.....	27
5.3.7 Mantenimiento predictivo	27

5.4 Algunas técnicas preventivas	27
5.4.1 Análisis de aceite	28
5.4.2 Código ASME Section V (Ensayos no destructivos)	28
5.4.3 Partículas magnéticas Article 7	29
5.4.4 Ultrasonido para soldaduras Article 5	29
5.4.5 Vibraciones mecánicas	29
5.4.6 Termografía	30
6. Planificación de actividades	31
6.1 Objetivos de la recolección de datos	31
7. Metodología	33
7.1 Cronograma	35
7.2 Resultados	36
7.2.1 Inspección visual y hallazgos de la etapa 2	36
7.2.2 Análisis Taxonómico de la etapa 3	40
7.3 Taxonomía	41
7.4 Límites del equipo	41
7.4.1 Codificación de activos	43
7.5 Análisis de falla	43
7.6 Matriz de criticidad	46
8. Análisis de resultados	50
8.1 Acciones predictivas de la etapa 4	52
8.2 Inspección del motor	53
8.2.1 Prueba de continuidad	53
8.2.2 Pruebas de aislamiento con respecto a tierra	54
8.2.3 Medición de resistencia entre fases	55
8.3 Técnicas predictivas propuestas	55
8.3.1 Inspección termográfica	55
8.3.2 Evaluación de Puntos a alta temperatura (puntos calientes)	56
8.3.3 Análisis de aceites	57
8.3.4 Partículas magnéticas	58
8.4 Programación de mantenimiento	58

9. Recomendaciones	61
10. Conclusiones.....	62
Referencias	63
Anexos	65

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Especificaciones del equipo de soldadura por fricción rotacional.....	18
Tabla 2 Parámetros de pruebas realizadas	20
Tabla 3 Aislamiento prueba valores de resistencia para maquinaria rotativa.....	25
Tabla 4 Resultados de la inspección visual.....	39
Tabla 5 Categorización de la taxonomía del FRW	41
Tabla 6 Codificación de los sistemas del equipo FRW	43
Tabla 7 Mecanismos y modos de falla según la tabla B.2 y B.3 de la ISO 14224	45
Tabla 8 Valor A.....	47
Tabla 9 Valor B.....	47
Tabla 10 Valor C.....	47
Tabla 11 Matriz de seguimiento del equipo FRW.	49
Tabla 12 Activos de alta criticidad.	52

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Proceso de la soldadura por fricción rotacional.	17
Figura 2 Diagrama isométrico del equipo de soldadura por fricción rotacional	19
Figura 3 Pruebas de tensión de las probetas A1-B1-C1 rotacional	20
Figura 4 Diagrama de flujo para búsqueda bibliográfica.	22
Figura 5 Mapa bibliométrico para el “mantenimiento predictivo”	23
Figura 6 Cojinetes de piñón y caja de engranajes del piñón de accionamiento.....	24
Figura 7 Categorías del mantenimiento	26
Figura 8 Colorimetría del aceite hidráulico	28
Figura 9 Calidad de los datos.....	31
Figura 10 Diagrama de flujo para el desarrollo de la metodología.	34
Figura 11 Cronograma de actividades.	35
Figura 12 Panorámica del equipo de soldadura por fricción.	36
Figura 13 Recomendaciones de seguridad.....	37
Figura 14 Taxonomía del FRW.	40
Figura 15 Límites del equipo FRW.	42
Figura 16 Diagrama de causa Raíz	45
Figura 17 Distribución de la evaluación con respecto a la criticidad	50
Figura 18 Grafica de resultados con respecto a la criticidad de activos.	51
Figura 19 Diagrama de fases del motor instalado.....	54
Figura 20 Medición de resistencia entre fases.	55
Figura 21 Puntos de referencia para la inspección de termografía infrarroja.	56
Figura 22 Puntos de referencia para la inspección por partículas magnéticas.....	58
Figura 23 Programación del mantenimiento.....	59
Figura 24 Formato de inspección.....	60

Resumen

El equipo de soldadura por fricción rotacional, ubicado en los laboratorios de ingeniería metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, es una herramienta clave en la formación académica y en el desarrollo de investigaciones sobre soldadura en estado sólido. Para asegurar la confiabilidad de los resultados experimentales y prolongar la vida útil del equipo, es fundamental implementar estrategias de mantenimiento adecuadas. En este contexto, se diseñó un plan de mantenimiento predictivo que, a través de inspecciones visuales y visitas presenciales, permitió evaluar su estado operativo y su entorno de funcionamiento.

La metodología aplicada sigue la norma (ISO 14224, 2016) incluyendo un análisis taxonómico, la definición de límites operativos y la codificación de sistemas y componentes para facilitar el análisis de fallas. Mediante un diagrama de causa raíz, se identificaron mecanismos de fallo asociados con vibraciones durante la soldadura, fallas eléctricas y de instrumentación, así como problemas derivados de manipulación no autorizada. Estos hallazgos fueron comparados con las tablas B.2 y B.3 de la norma (ISO 14224, 2016). A partir de los resultados obtenidos, se propusieron acciones predictivas específicas, como termografía, ensayos de partículas magnéticas y análisis del aceite hidráulico, complementadas con un formato estandarizado de inspección.

La documentación del historial operativo permitirá un análisis más preciso para programar mantenimientos predictivos de manera eficiente y alineada con el presupuesto disponible. Esta metodología no solo optimiza el rendimiento del equipo en estudio, sino que también puede aplicarse a otras máquinas que requieran evaluación y optimización.

Palabras Clave: ISO 14224:2016, análisis de falla, mantenimiento predictivo, historial operativo.

Abstract

The rotary friction welding equipment, located in the metallurgical engineering laboratories of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, is a key tool in academic training and research on solid-state welding. To ensure the reliability of experimental results and extend the equipment's service life, it is essential to implement appropriate maintenance strategies. In this context, a predictive maintenance plan was designed, which, through visual inspections and on-site visits, allowed for the assessment of its operational status and working environment.

The applied methodology follows the (ISO 14224, 2016) standard, including a taxonomic analysis, the definition of operational limits, and the coding of systems and components to facilitate failure analysis. Using a root cause diagram, failure mechanisms related to vibrations during welding, electrical and instrumentation failures, as well as issues caused by unauthorized handling, were identified. These findings were compared with Tables B.2 and B.3 of the (ISO 14224, 2016) standard. Based on the obtained results, specific predictive actions were proposed, such as thermography, magnetic particle testing, and hydraulic oil analysis, complemented by a standardized inspection format.

The documentation of the operational history will allow for a more accurate analysis to efficiently schedule predictive maintenance while aligning with the available budget. Furthermore, this methodology not only optimizes the performance of the studied equipment but can also be applied to other machinery requiring evaluation and optimization.

Keywords: ISO 14224:2016, failure analysis, predictive maintenance, operational history.

1. Introducción

La gestión eficiente de los activos vinculados a la producción económica de una organización es fundamental para maximizar la rentabilidad de sus operaciones. Un aspecto clave para lograr este objetivo es garantizar el buen funcionamiento y la confiabilidad de dichos activos; por lo tanto, es esencial implementar planes de mantenimiento alineados con las necesidades específicas de producción. En la actualidad, las estrategias de mantenimiento han evolucionado, integrando la interpretación y análisis de datos sistemáticos, un enfoque que se enmarca en la definición de la Industria 4.0. Este concepto hace referencia a la convergencia de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la analítica de datos y la inteligencia artificial, aplicadas a la optimización de procesos industriales (Akinlabi & Mahamood, 2020). Dentro de este paradigma, destaca el mantenimiento predictivo, el cual se define como el desarrollo de metodologías que permiten reducir costos, extender la vida útil de los equipos, y prever posibles fallos futuros mediante el monitoreo y procesamiento de datos fiables obtenidos a partir de inspecciones no destructivas. Este tipo de mantenimiento se aplica tanto a equipos individuales como a grandes sistemas industriales (Nunes, Santos, & Rocha, 2022).

En Colombia, la implementación de esta metodología ha ganado el interés en diversos sectores económicos, incluyendo las industrias alimentaria, metalmecánica, energética, entre otras. Este enfoque también se ha extendido al ámbito educativo e investigativo, donde la fiabilidad operativa de los equipos didácticos y de medición es crucial para garantizar la coherencia entre la teoría y la práctica. Un ejemplo notable de esta aplicación es el trabajo del grupo de investigación en Metalurgia Física y Procesos de Manufactura (GIMEFP) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), que en 2022 presentó una tesis de grado titulada “Diseño y puesta a punto de un equipo de soldadura por fricción rotacional” (Faustino Molina, 2022). Este proyecto facilitó el desarrollo de diversas actividades de investigación centradas en el análisis del comportamiento microestructural y mecánico de probetas soldadas mediante soldadura por fricción rotacional (Faustino Molina, 2022, p.20).

El equipo desarrollado en este proyecto está sujeto, durante su operación, a diferentes modos de fallo, como el desalineamiento y el desgaste. Estos factores pueden afectar los resultados experimentales obtenidos en las probetas de investigación, resulta pertinente establecer un plan de

mantenimiento predictivo que permita diagnosticar posibles fallos en los componentes dinámicos del equipo, asegurando así la confiabilidad y precisión en las investigaciones futuras.

2. Planteamiento del problema

El equipo de soldadura por fricción rotacional permite realizar soldaduras en estado sólido en piezas con geometría de revolución, específicamente en barras metálicas, lo que facilita el análisis posterior de su comportamiento mecánico y microestructural (Figura 1). Este equipo es un activo esencial dentro de las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) para el desarrollo de actividades educativas e investigativas. Como cualquier activo mecánico, es crucial implementar un plan de mantenimiento predictivo adaptado al contexto operativo específico del equipo.

En este trabajo se desarrolló e implementó un plan de mantenimiento predictivo para evaluar las condiciones físicas, eléctricas y mecánicas del equipo de soldadura por fricción rotacional. Para ello, se identificaron y monitorearon parámetros operativos fundamentales, entre los que se incluyeron la alineación de componentes, el nivel de desgaste en superficies de contacto, la estabilidad térmica durante el proceso de soldadura y la integridad de los sistemas eléctricos. Estos parámetros fueron seleccionados con base en la información documentada en la tesis de referencia (Faustino Molina, 2022, p.57) y en consultas técnicas realizadas con los operadores del equipo en la UPTC.

El objetivo principal fue asegurar que el equipo operara dentro de los límites establecidos durante su construcción, con el fin de minimizar riesgos de fallos y garantizar la fiabilidad de los resultados experimentales. Para ello, se analizaron e implementaron técnicas de inspección no destructiva, como la termografía infrarroja aplicada a componentes eléctricos y elementos rotativos (Aldana Rodríguez, 2017) que apliquen. Todo el proceso se estructuró bajo los lineamientos de la norma (ISO 14224, 2016), lo que permitió un análisis sistemático y estandarizado de las condiciones del equipo.

3. Justificación

Tras la construcción del equipo de soldadura por fricción rotacional (FRW), surgió la preocupación de que pudiera sufrir daños a corto plazo, propios de las fallas tempranas asociadas al inicio del ciclo de vida del activo (Pérez Rondón, 2021, p.43). Entre las posibles causas que podrían afectar al equipo se encuentran factores como desgaste de elementos críticos, desalineación mecánica, diferencias elevadas de temperatura, fallo de instrumentos, etc. Asimismo, durante los dos años que el equipo lleva en funcionamiento, no se ha previsto una metodología adecuada de mantenimiento, ya sea correctivo o preventivo. Este equipo, diseñado específicamente para investigar el comportamiento de uniones iguales o disimilares mediante soldadura en estado sólido, ha sido crucial en la experimentación con probetas de 14 mm de diámetro bajo diferentes parámetros programables (Faustino Molina, 2022, p.58).

Actualmente se ha popularizado la implementación de metodologías apoyadas en la industria 4.0, la cual se basa en la convergencia de tecnologías físicas y digitales como por ejemplo el internet de las cosas, enfocadas en la recopilación de datos en tiempo real y la analítica de datos, con el fin de mejorar la eficiencia a través de planes de mantenimiento predictivo, de tal manera que se pueda anticipar fallas, optimizar la gestión de activos y disminuir costos de producción (Nunes, Santos, & Rocha, 2022).

La implementación de un plan de mantenimiento predictivo es esencial para garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del equipo FRW, lo que permitirá al grupo de investigación GIMEFP y a la UPTC responder de manera efectiva a la demanda académica y de investigación. Este plan no solo contribuirá a prolongar la vida útil del equipo, sino que también facilitará la detección temprana de posibles fallas en sus componentes, asegurando así la certeza, confiabilidad y disponibilidad del activo. De este modo, se fortalecerá tanto el proceso de formación académica de los estudiantes como la investigación en el área de materiales y procesos de fabricación, asegurando que el equipo continúe siendo una herramienta clave para actividades de investigación y formación académica.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Formular un plan de mantenimiento predictivo para el equipo de soldadura por fricción rotacional ubicada en los laboratorios de la escuela de ingeniería metalúrgica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia perteneciente al grupo de investigación en Metalurgia Física de Procesos de Manufactura (GIMEFP).

4.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico actual del estado del equipo de soldadura por fricción rotacional mediante una inspección visual.
- Proponer técnicas de mantenimiento predictivo aplicables al estado actual del equipo de soldadura por fricción rotacional que permitan la detección de anomalías en los sistemas.
- Formular un plan de mantenimiento predictivo basado en la evaluación de modos y análisis de falla conforme a los criterios de la norma ISO 14224 del 2016.

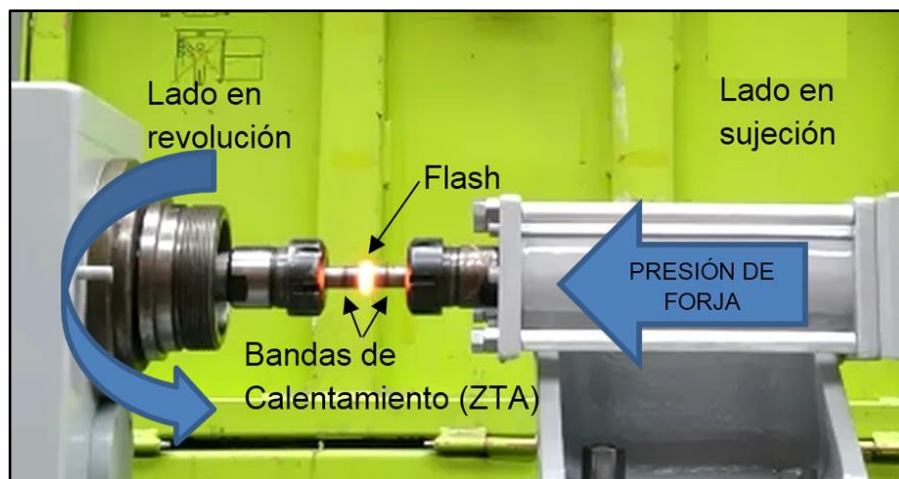
5. Marco referencial

5.1 Diseño del equipo de soldadura por fricción rotacional

El equipo de soldadura por fricción rotacional permite la unión metalúrgica de probetas metálicas similares o disimilares mediante la fricción mutua entre ellas, alcanzando un estado de plasticidad (Figura 1). En este punto crítico, se aplica una fuerza axial que asegura un enlace metalúrgico de las piezas (Akinlabi & Mahamood, 2020).

Figura 1

Proceso de la soldadura por fricción rotacional.



Nota. Adaptado de (Faustino Molina, 2022, p.57).

El diseño de este equipo se basó en la modificación y adecuación de un torno tipo revólver, cuyas características iniciales se detallan en la Tabla 1. Las variables clave consideradas durante el diseño consistieron en el tiempo de soldadura (segundos), la velocidad de soldadura (RPM) y la presión de soldadura (Bar).

En la revisión bibliográfica se identificó que el cobre comercial, debido a su alta conductividad térmica, requiere una mayor velocidad de revolución para lograr una unión metalúrgica efectiva. Con base en estas características, se ajustó la velocidad máxima del equipo a 4500 RPM (Faustino Molina, 2022, p.40). Para la relación de poleas, se determinó instalar una polea de Ø190 mm en el motor y una de Ø160 mm en el husillo. Con el fin de optimizar la

eficiencia del sistema eléctrico, se optó por instalar un variador de frecuencia, el cual permite ajustar la velocidad según las necesidades del proceso, aumentando la frecuencia hasta 75 Hz y alcanzando las 4500 RPM incluso se instaló un motor de 6 HP y 60 Hz de frecuencia, modelo B112Ma2-EC.

Tabla 1

Especificaciones del equipo de soldadura por fricción rotacional

Torno tipo revolver		Ajustes
Parte	Observaciones	Características
Potencia del motor	3Hp	6Hp
Velocidades	V1: 1700 RPM V2: 3500 RPM	Programable hasta los 4500 RPM
Contrapunto	Buen estado	Adecuación para el sistema hidráulico
Relación de poleas	Diámetro polea motor: 65mm Diámetro polea superior: 160mm	Diámetro polea motor: 160mm Diámetro polea superior: 190mm
Frecuencia	60 Hz	60 Hz

Nota. Adaptado de (Faustino Molina, 2022, p.40).

5.1.1 Construcción del equipo

A partir del diseño inicial, se adecuaron los tres subsistemas principales del equipo (Faustino Molina, 2022, p.40):

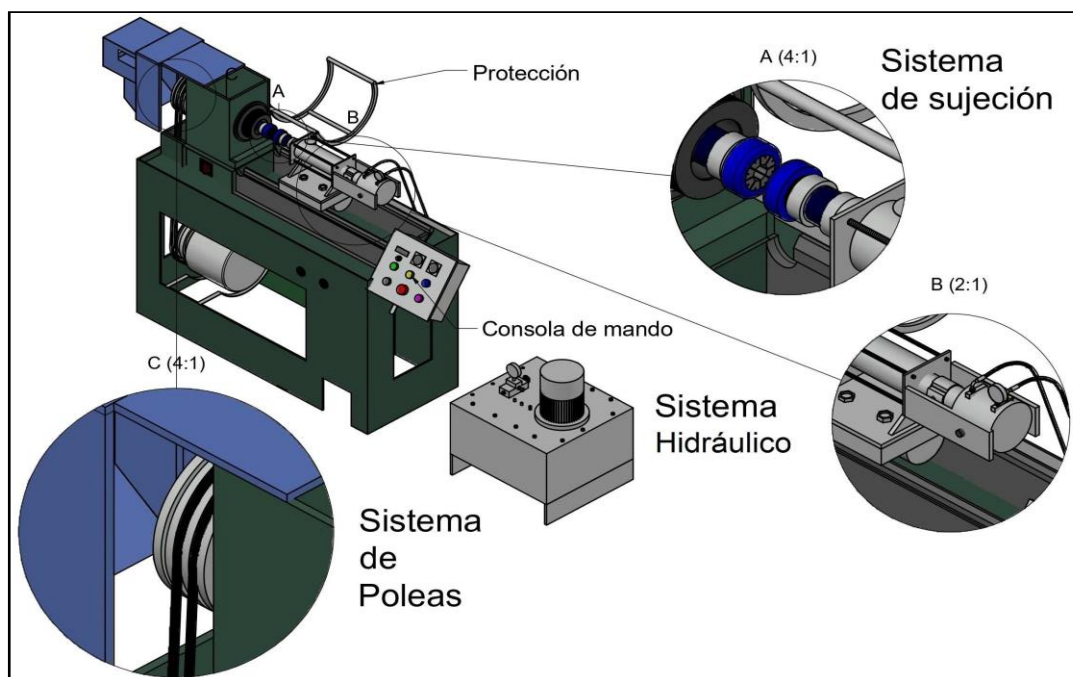
- Sistema de sujeción: Compuesto por el contrapunto, el cual está fijado mediante una placa ajustable a la bancada. El sistema de sujeción incluye pinzas de alta precisión que aseguran la probeta a lo largo de todo su perímetro.
- Sistema hidráulico: Este sistema está acoplado al contrapunto e incluye un cilindro hidráulico para la aplicación de la fuerza axial necesaria tanto en la fase de forjado como en la de

calentamiento. El pistón de doble efecto opera mediante la fluctuación del fluido bajo presión, regulada por válvulas y electroválvulas. El sistema es impulsado por un motor de 1 HP.

- Sistema de poleas: Compuesto por un eje central sujeto a una caja de rodamientos N313 ECP y una polea superior de 160 mm.
- Sistema de control: Incluye medidores de velocidad, medidores de temperatura, un husillo, y un regulador de velocidad.
- Sistema eléctrico: Este sistema permite la conexión con los dos motores, las electroválvulas, y el centro de control del proceso (Figura 2).

Figura 2

Diagrama isométrico del equipo de soldadura por fricción rotacional .



Nota. Adaptado de (Faustino Molina, 2022, p.95).

Luego de la instalación de cada sistema que conforma el equipo, se llevaron a cabo pruebas de soldadura en estado sólido para evaluar la efectividad del proceso según los parámetros establecidos en la Tabla 2 como también pruebas de tensión para comparar el desempeño de tres probetas sometidas a diferentes velocidades tangenciales (A1 a 1500 RPM- B1 a 1200 RPM -C1 base comparativa), analizando su resistencia a la tracción (Figura 3). Los resultados indicaron que,

para un acero AISI-SAE 1020, la velocidad tangencial más adecuada es de 1500 RPM en la probeta A1.

Tabla 2

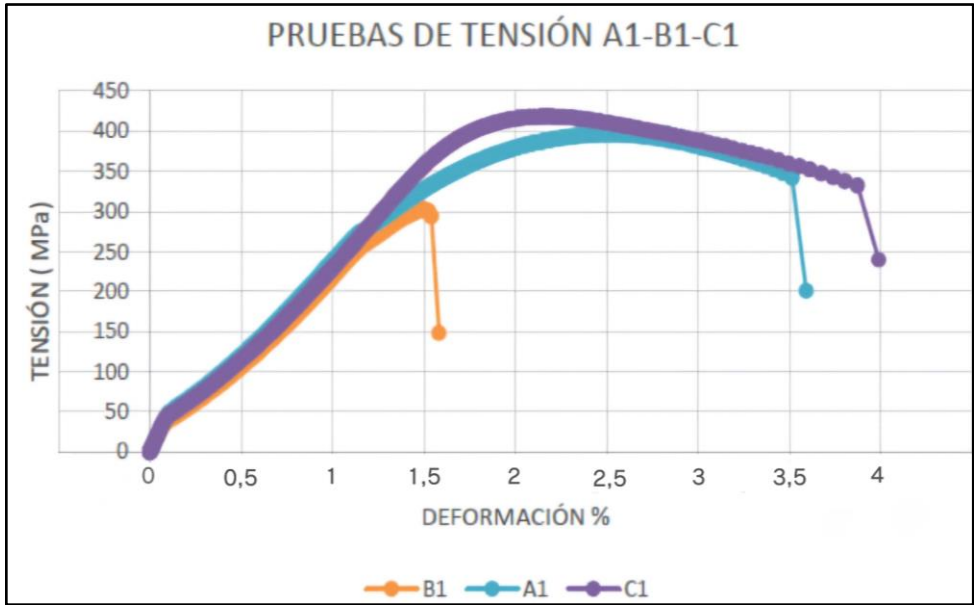
Parámetros de pruebas realizadas

Variables de la prueba		Probetas de prueba
Velocidad tangencial	V2= 1900 RPM	B1 pruebas de tensión- B2 pruebas metalográficas y durezas.
	V1= 1500 RPM	A1 Pruebas de tensión – A2 pruebas metalográficas y durezas. C1 base SAE 1020
Presión de calentamiento	40 Bar	Tamaño: Diámetro: 14 mm Área: 153.938 mm^2 Velocidad de ensayo: 400 N/s Off limite elástico 0.2%
Presión de forja	2.5 Bar	
Tiempo de calentamiento	11 Segundos	
Tiempo de forjado	3 Segundos	Resultados: Mejor condición para trabajar es a 1500 RPM

Nota. Adaptado de (Faustino Molina, 2022, p.57).

Figura 3

Pruebas de tensión de las probetas A1-B1-C1 rotacional



Nota. Adaptado de (Faustino Molina, 2022, p.72).

5.2 Literatura del mantenimiento predictivo

El desarrollo y la metodología de un plan de mantenimiento se adaptan a las particularidades de cada proyecto, en función de sus necesidades y objetivos. Para orientar esta investigación hacia parámetros más específicos, se llevó a cabo una revisión bibliográfica estructurada en dos etapas tal como se esquematiza en la Figura 4:

- **Búsqueda inicial:** Se exploraron antecedentes relacionados con mantenimiento predictivo aplicado a tornos modificados para soldadura. Sin embargo, no se identificaron estudios directamente vinculados a este enfoque técnico.
- **Estrategia de focalización:** Ante la falta de resultados relevantes, se definieron tres ejes temáticos clave: “Industria 4.0”, “Mantenimiento predictivo” y “Termografía infrarroja”. Estos términos se utilizaron como filtros en cuatro motores de búsqueda académicos, restringiendo el rango temporal a publicaciones entre 2019 y 2023.

5.2.1 YouTube

Búsqueda centrada en Webinars online de empresas líderes con respecto al mantenimiento, se han seleccionado de 4 videos importantes que reflejan los conceptos fundamentales sobre la termografía infrarroja, aplicación del mantenimiento predictivo e industria 4.0.

5.2.2 Google Scholar

Se utilizaron motores de búsqueda académicos encontrando un total de 230 artículos centrados en la aplicación de planes de mantenimiento industrial para equipo rotativo.

5.2.3 Scopus

Mediante una consulta general en la plataforma Scopus, se identificaron 440 documentos científicos relevantes publicados a nivel global en el período 2019-2023 sobre metodologías de mantenimientos.

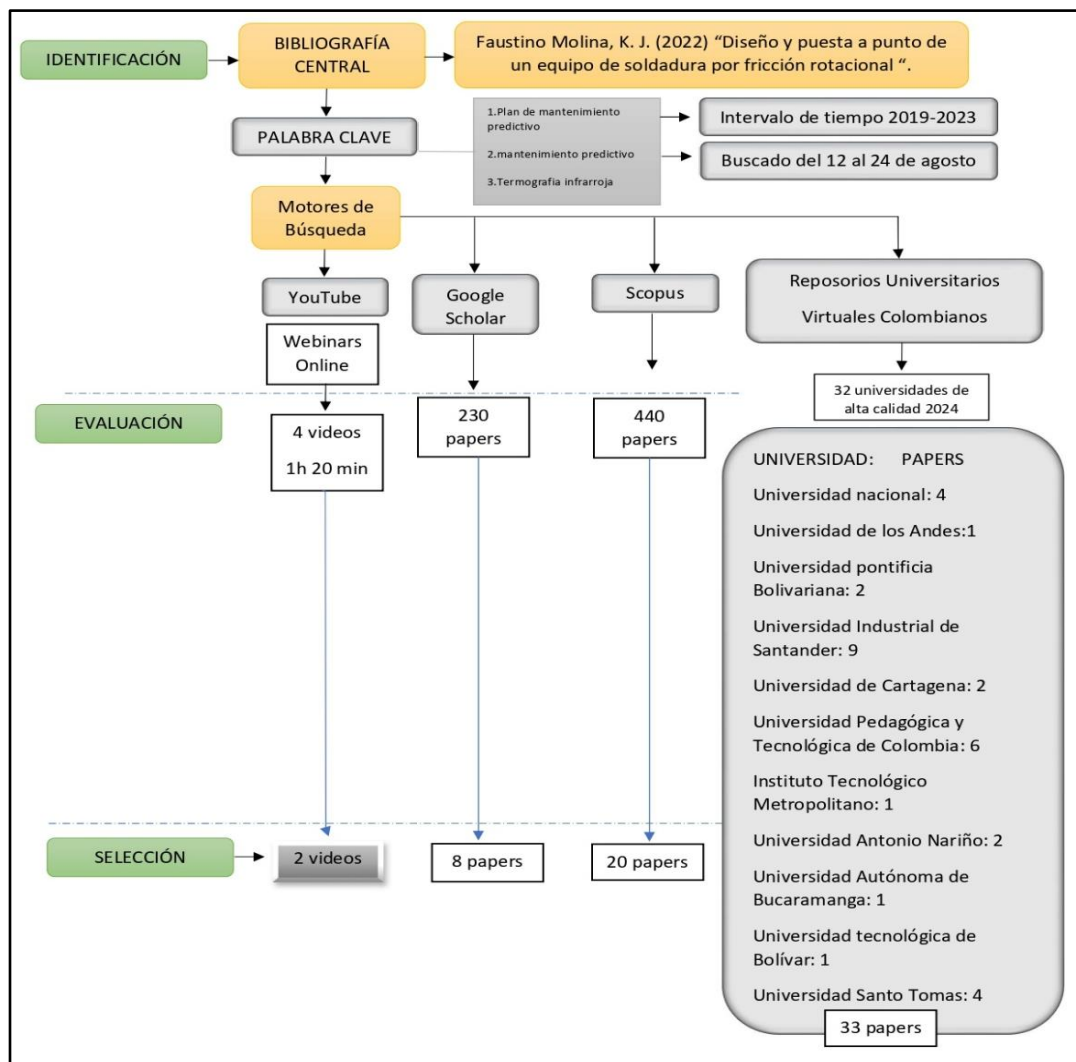
5.2.4 Repositorios universitarios virtuales de Colombia

Para dar contexto al mantenimiento en Colombia, se parte por buscar las primeras 32 universidades colombianas cuyos resultados bibliográficos concuerden con las palabras anteriormente establecidas, seleccionando 33 artículos relevantes.

Finalmente seleccionamos los artículos más relevantes de los motores de búsqueda, dos webinars, 8 artículos de Google Scholar, 20 Papers de Scopus y 33 tesis de los repositorios virtuales.

Figura 4

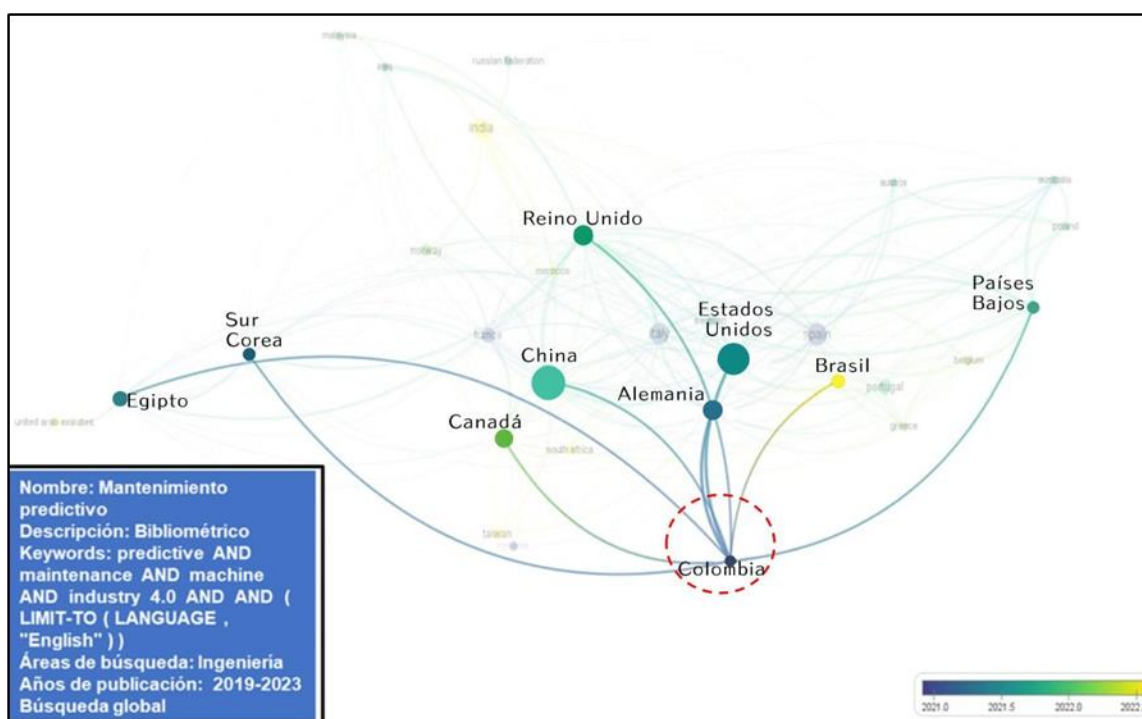
Diagrama de flujo para búsqueda bibliográfica.



La posición de Colombia frente al mantenimiento predictivo se observa mediante el mapa bibliométrico sobre el análisis de Scopus generado por VOSViewer (Figura 5) e ilustra las interacciones y colaboraciones entre Suiza, Brasil, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, China, Canadá, Corea del sur y Egipto, siendo estados unidos y china los países con más publicaciones y productos académicos sobre el tema del mantenimiento predictivo. Los artículos encontrados datan del año 2021 y 2022.

Figura 5

Mapa bibliométrico para el “mantenimiento predictivo”



Nota. (Generado por VOSviewer).

5.3 Definiciones

5.3.1 ISO 14224:2016

La ISO 14224 Es una norma internacional encargada de proporcionar directrices para la recopilación, el intercambio de datos fiables y el mantenimiento para gestionar los activos o las decisiones frente a equipos dinámicos de la industria del oil and gas, gas natural y petroquímica.

Esta norma especifica que el mantenimiento predictivo es una metodología que se implementa antes de que ocurra la falla del equipo como parte de la rama del mantenimiento preventivo y el mantenimiento basado en condición. Depende de un diagnóstico actual mediante pruebas de inspección y monitoreo de su condición para luego realizar un análisis y prevenir fallas o mal funcionamiento que afecte el presupuesto operacional de la empresa (ISO 14224, 2016, p. 42).

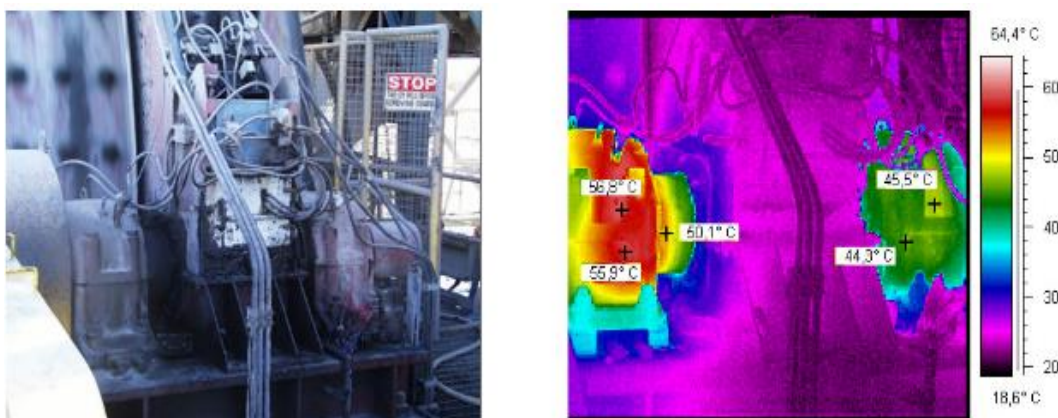
5.3.2 ISO 18434-1

Esta norma, correspondiente a la parte 1 del procedimiento general para la termografía, se enfoca en el monitoreo de la condición y el diagnóstico de máquinas (mecánico). La termografía infrarroja (IRT) es la técnica que mide la radiación térmica (calor) emitida desde la superficie de un cuerpo mediante una cámara termográfica. (ISO 18434-1, 2008, p.5). Este instrumento convierte las mediciones en un mapa termográfico que muestra las diferentes intensidades de radiación. El objetivo principal de esta técnica es identificar "puntos calientes", que generalmente aparecen en maquinaria en operación. La norma subraya que estos puntos calientes pueden deberse a fricción excesiva o pérdidas de energía.

El alcance de la norma, consignado en (ISO 18434-1, 2008, p.9), abarca la terminología, la descripción de procedimientos, el establecimiento de criterios de evaluación, y las acciones para compensar la temperatura aparente reflejada, la emisividad y los medios de atenuación.

Figura 6

Cojinetes de piñón y caja de engranajes del piñón de accionamiento del molino



Nota. Adaptado de (ISO 18434-1, 2008, p.21).

5.3.3 NETA ATS-2017

La norma International Electrical Testing Association inc ó NETA establece los procedimientos y especificaciones para las pruebas realizadas en los sistemas y equipos eléctricos verificando que sea funcional y operativo (NETA, 1995) consigna tablas guías con especificaciones para la aceptación o rechazo a todos los tipos de inspección eléctricas, también encontramos la inspección termográfica pero se abarca en mejor medida en la (ISO 18434-1, 2008, p.9).

Entre las pruebas críticas de diagnóstico, la resistencia de aislamiento en equipos de distribución eléctrica evalúa la integridad del aislamiento en equipos eléctricos, garantizando niveles seguros que prevengan fallos, la Tabla 3 presenta los valores de aceptación para estos ensayos en equipos rotativos, como motores eléctricos: se considera aceptable un valor mínimo de 100 MΩ. Resultados inferiores indican posibles fallas, requiriendo programar mantenimiento correctivo o preventivo. La tabla destaca que los resultados de la prueba dependen de la temperatura del material aislante y de la humedad del entorno.

Tabla 3

Aislamiento prueba valores de resistencia para maquinaria rotativa durante un minuto a 40°
(NETA, 1995) *Tabla 100.11.*

Tensión nominal de bobinado (V)	Tensión de prueba (DC)	Recomendado resistencia de aislamiento mínima (MΩ): Antes de bobinados 1970, campos bobinados, otro no enumerados en la tabla 100.11	Recomendado resistencia de aislamiento mínima(MΩ): armadura DC, AC bobinados	Recomendado mínimo de resistencia del aislamiento (MΩ): bobinado en 1KV
<1000	500	KV+1	100	5
1000 - 2500	500-1000	KV+1	100	-
2501-5000	1000-2500	KV+1	100	-
5001-12000	2500-5000	KV+1	100	-
>12000	5000-10000	KV+1	100	-

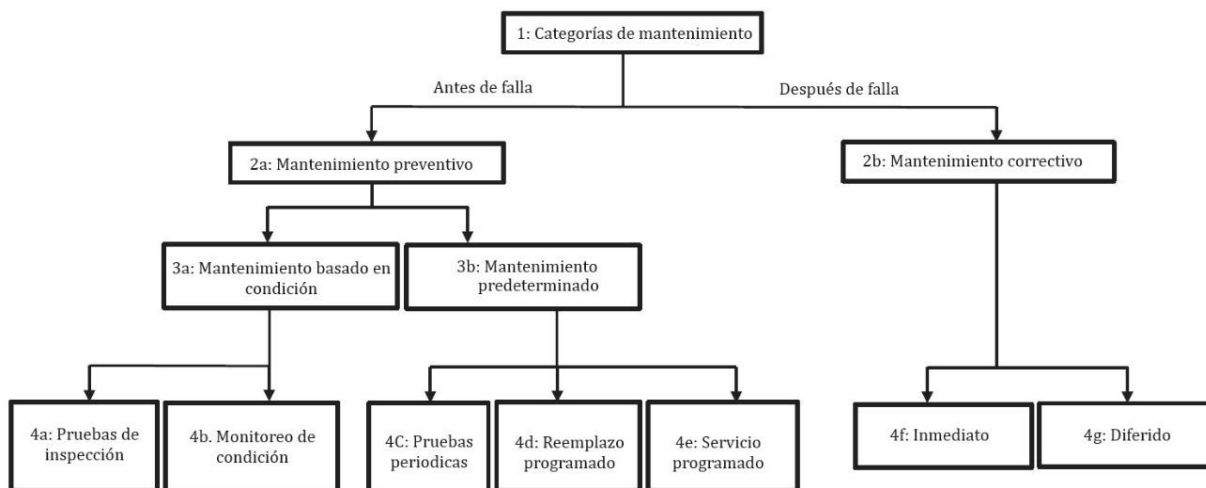
5.3.4 El mantenimiento

En la historia humana, el mantenimiento surgió inicialmente como una práctica reactiva: solo se intervenía cuando las herramientas fallaban por completo, intentando extender su utilidad. Con el tiempo, la creciente complejidad y costo de los equipos obligó a evolucionar hacia enfoques más estructurados. Este giro se aceleró durante la Revolución Industrial, cuando se formalizó el concepto bajo un principio clave: *“Realizar acciones técnicas premeditadas o inmediatas basadas en un análisis integral del activo, con el fin de maximizar su vida útil sin comprometer su funcionalidad esencial, optimizando así costos”* (Corporation, 2024).

A medida que pasa el tiempo se van optimizando las metodologías de mantenimiento, la norma (ISO 14224, 2016) certifica las prácticas de mantenimiento dependiendo si ésta es programada antes o después de la falla (Figura 7).

Figura 7

Categorías del mantenimiento



Nota. Adaptado de (ISO 14224, 2016, p.50).

5.3.5 Mantenimiento correctivo

Son las acciones que se realizan después de la falla del equipo para su corrección, esto significa que el equipo en cuestión queda en suspensión ocasionando costos y gastos (Pérez

Rondón, 2021). Cuando ocurre se trata de solucionar rápidamente y analizar la causa de la falla, pero también se puede tener un mantenimiento correctivo programado por ejemplo es aplicable a la industria oil and gas, en situaciones en que se haya detectado la falla a tuberías o equipos estáticos se programan paradas de planta y se aplica el mantenimiento correctivo correspondiente (Pérez Rondón, 2021).

5.3.6 Mantenimiento preventivo

Son las actividades que se programan antes un evento de posible falla ya detectada y que estaría afectando el rendimiento y confiabilidad de equipo. Para este propósito, se realiza un diagnóstico completo sobre la falla prevista y acciones para reducir su incidencia. Se aplican normalmente en cuatro fases; planificación, realizando un plan de mantenimiento completo; programación anticipada y clara; ejecución de las actividades; y, por último, control en campo al momento de aplicar el mantenimiento (León Rodríguez, 2017).

5.3.7 Mantenimiento predictivo

Como presenta la Figura 7 las acciones realizadas antes de falla se consideran preventivas, pero difieren en tipos de metodologías, la más aplicable es el mantenimiento basado en condición y dentro de esta rama se encuentra el mantenimiento predictivo. Básicamente, el mantenimiento predictivo integra estrategias de monitoreo continuo de los activos con el fin de prevenir fallas y esto se hace mediante un análisis de fallas y recolección asertiva de datos en condiciones actuales. Una de las ventajas se ve reflejado en el ahorro que recibe la empresa en cuanto a cambios de piezas o paradas de plantas; sin embargo, es necesaria la inversión en sensores, instrumentaciones y técnicas de ensayos no destructivos aplicables como la termografía, vibraciones, boroscopías, ultrasonido etc (Pérez Rondón, 2021).

5.4 Algunas técnicas preventivas

Para desarrollar un análisis del comportamiento del equipo, se emplean diversas técnicas. La más fundamental consiste en mantener un control y registro detallado del comportamiento del

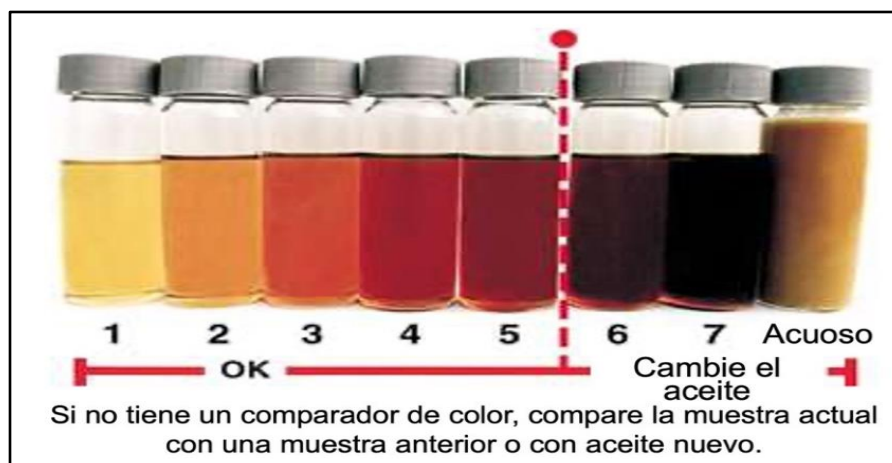
equipo durante su funcionamiento. Lo anterior incluye, en primer lugar, “obtener una perspectiva histórica de la relación entre la variable seleccionada. y la vida útil del componente” (León Rodríguez, 2017). Dicho análisis se complementa con inspecciones visuales y el registro meticuloso de datos provenientes de instrumentación. A continuación, se presentan algunas de las técnicas más empleadas alrededor del mantenimiento predictivo.

5.4.1 Análisis de aceite

Consiste en tomar una muestra de aceite del equipo para su posterior análisis fisicoquímico en laboratorio con el objetivo de conocer el estado operativo actual. (Olarte, 2010). El aceite tomado del equipo no debe presentar contaminación o degradación, de lo contrario empezará a perder las propiedades refrigerantes, lo que puede provocar fallas por desgaste de las piezas mecánicas. El grado de deterioro del fluido lubricante es perceptible a causa de reacciones químicas que alteran su color, tal como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Colorimetría del aceite hidráulico.



Nota. Adaptado de (Corporation, 2024)

5.4.2 Código ASME Section V (Ensayos no destructivos)

Son técnicas de inspección que no interfieren con los procesos ni necesita de modificaciones externas. El personal encargado de ejecutarlas debe estar certificados bajo la normativa, siendo la más usual es la SNT-TC-1^a. Dichas certificaciones se dividen en tres niveles por cada técnica (NIVEL I, II, III), un ejemplo de ello es el ensayo de partículas magnéticas.

5.4.3 Partículas magnéticas Article 7

Este ensayo es aplicable para materiales ferromagnéticos que requieran localizar indicaciones superficiales o sub-superficiales como grietas, poros y faltas de fusión, su principio es básico, magnetizar una zona metálica y localizar las indicaciones mediante polvos o soluciones acuosas con partículas magnéticas que se revelan a partir de las leyes del magnetismo en un eje perpendicular al flujo magnético (ASME, 2021, p.233). Se utiliza mayormente para piezas o soldadura que tienen recubrimiento o estén sujetas a tensiones mecánicas.

5.4.4 Ultrasonido para soldaduras Article 5

Un equipo de ultrasonido utiliza un transductor compuesto generalmente por cuarzo que convierte un impulso eléctrico en una onda mecánica. Esta onda se propaga a través del material inspeccionado, que puede ser metálico, compuesto o plástico. Al alcanzar un borde o una discontinuidad, la onda se refleja y retorna al transductor. El equipo entonces registra y analiza la velocidad y el tiempo de tránsito de la onda para detectar y caracterizar defectos. Esta técnica se basa en los principios de la velocidad del sonido específicos de cada material, y las mediciones se calibran en función de esta propiedad. Para facilitar la transmisión de la onda mecánica sin interferencias, se utiliza un medio acoplante por ejemplo el agua para que la onda mecánica viaje sin problemas. Las ondas ultrasónicas tienen frecuencias por encima de los 20000 Hertz (ASME, 2021, p.217).

5.4.5 Vibraciones mecánicas

Se utiliza mucho para equipos rotativos que estén sometidos a vibraciones por ejemplo motores. En estas técnicas, se instala un instrumento que recoge información y se realiza un

análisis del comportamiento vibratorio del equipo, los factores más relevantes son la frecuencia, desplazamiento, velocidad, la aceleración y la dirección. Un exceso de vibraciones puede significar fatiga de los materiales, pérdidas de energía y fallas (Nunes, Santos, & Rocha, 2022).

5.4.6 Termografía

El concepto básico de esta técnica se da en las diferencias de temperaturas y sus variaciones en un objeto bajo una situación de trabajo, vista a través de un termograma generado a partir de un equipo termográfico. Para nuestro caso es aplicable realizar una termografía pasiva consistiendo en observar el comportamiento del equipo durante su funcionamiento en su entorno y midiendo cuantitativamente la radiación infrarroja generada.

El termograma se diferencia la intensidad de la radiación infrarroja mediante colores que va desde tonos oscuros por la baja radiación hasta los colores amarillos y blancos, sinónimo de una mayor intensidad de radiación, que se asocia a elevadas temperaturas. También depende de la configuración del equipo a utilizar.

Ventajas

- Obtención de un contraste térmico cuantitativo en tiempo real
- No se requiere contacto directo, toma máxima de dos metros de distancia.
- Identificación de puntos calientes

Desventajas

- Debemos tener pleno conocimiento de todos los componentes y características de ellos que puedan perjudicar el análisis termográfico.
- Alquilar o comprar una cámara termográfica, el valor puede ser elevado.
- La cámara termográfica debe utilizarla un inspector certificado bajo norma NTC-TC-1ª de ensayos no destructivos en termografía, no se limita a ser un nivel 1 o 2.

6. Planificación de actividades

Una planificación adecuada permite un control riguroso de las actividades propuestas para alcanzar resultados positivos, optimizando costos y tiempos en la ejecución del proyecto. Al elaborar un plan de mantenimiento de cualquier tipo, es fundamental resaltar la importancia de obtener datos fiables. Esto implica establecer metodologías eficaces para la recolección de información, seleccionando datos esenciales y relevantes que estén alineados con nuestros objetivos y metas. Esta estrategia se aplica tanto en el análisis de activos individuales como en sistemas y proyectos integrales.

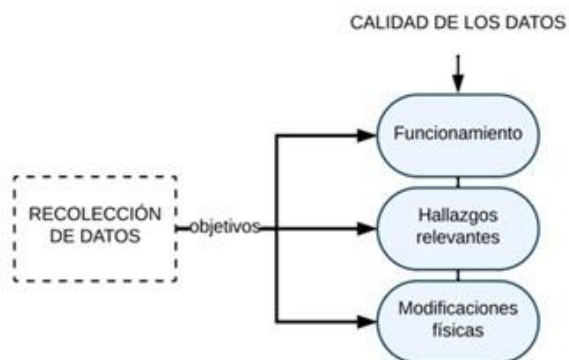
Uno de los factores clave que se consideraron fue que el equipo se encuentra en las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en su sede de Tunja. Por ello, es esencial gestionar el acceso con suficiente antelación para obtener los permisos necesarios y las firmas del director de la escuela y del laboratorista. Las fechas para el registro se establecieron cuidadosamente para cumplir con estos requisitos.

6.1 Objetivos de la recolección de datos

La recolección de datos se realizó de manera focalizada para asegurar la calidad y confiabilidad necesarias. Para ello, se establecieron tres objetivos principales Figura 9. El primero consistió en verificar que el equipo funcionara correctamente, lo que implicó encenderlo y someterlo a pruebas que se presentan en el ítem 8.1.

Figura 9

Calidad de los datos.

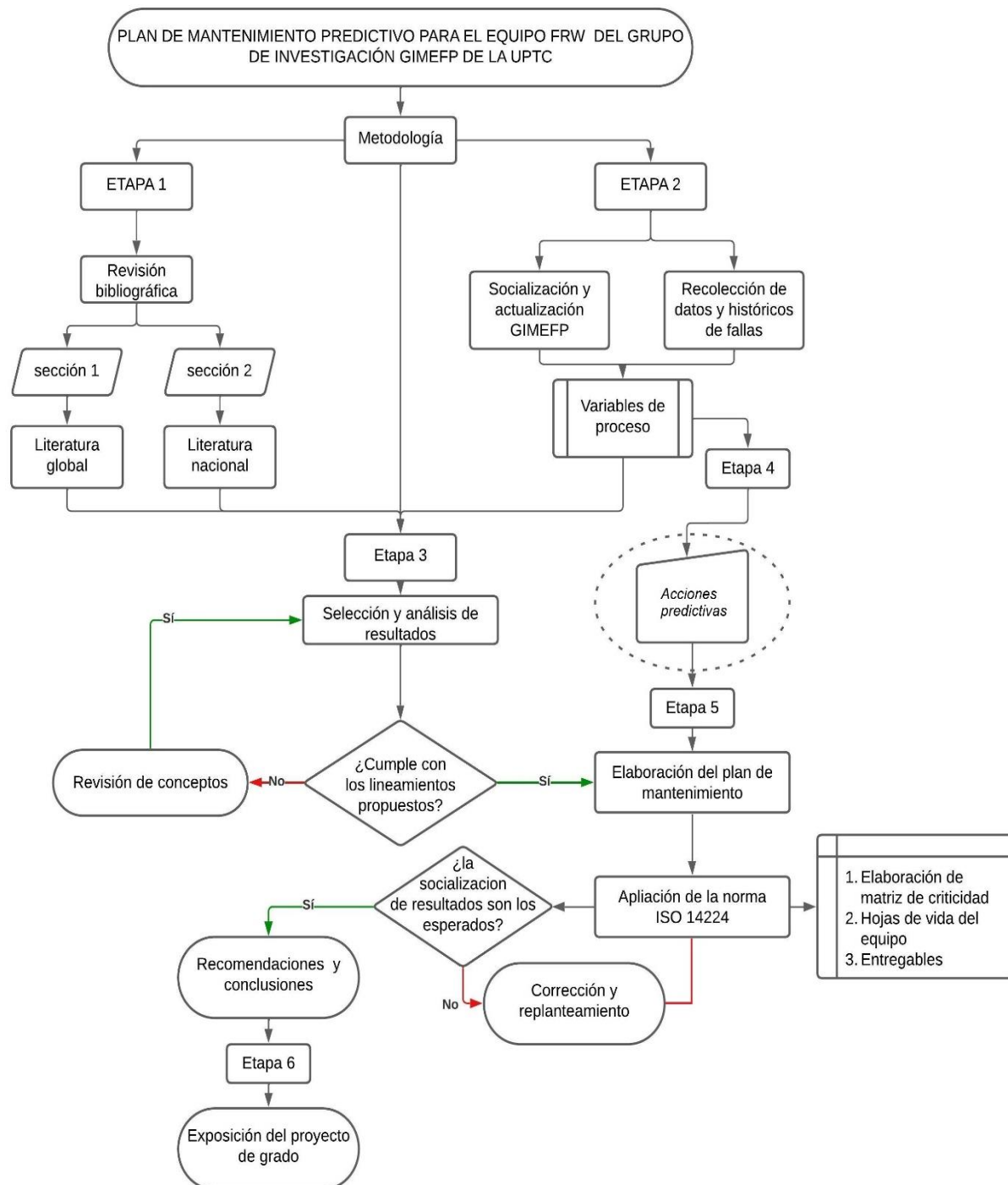


El segundo objetivo fue identificar si existían anomalías significativas, como fugas o cortocircuitos. Finalmente, se evaluó si se habían realizado modificaciones físicas en los sistemas del equipo que pudieran estar afectando su funcionalidad.

7. Metodología

Para el desarrollo del plan de mantenimiento se establecen 6 etapas descritas a continuación y que se esquematizan en la Figura 10.

- Etapa 1: La Figura 4 ilustra en resumen el desarrollo de esta etapa. Principalmente se realizó una revisión bibliográfica dividida en dos partes. La primera se da mediante las bases de datos de literatura especializada Scopus, Google Scholar y webinars para generar un análisis global del tema central. Como palabras claves se consideraron: “Plan de mantenimiento predictivo”, “Equipos rotativos”, “Industria 4.0” y la segunda sección se buscan tesis, artículos, o libros en los repositorios virtuales de las universidades reconocidas como alta calidad en Colombia 2024.
- Etapa 2: Recopilación de la información del estado actual del equipo con base al registro de los últimos dos años de operación.
- Etapa 3: Taxonomía del equipo (FRW) para analizar su criticidad y establecer los modos de falla basados en la norma ISO 14224 del 2016.
- Etapa 4: A partir de la información procesada se determinan las actividades de mantenimiento predictivo adecuadas definiendo pros y contras en función de los resultados obtenidos en el análisis de criticidad.
- Etapa 5: El plan de mantenimiento propuesto incluye la integración de acciones de mejora, la definición de la periodicidad de mantenimiento y la formulación de recomendaciones pertinentes.
- Etapa 6: Finalmente se expondrán los resultados a los jurados evaluadores del proyecto de grado.

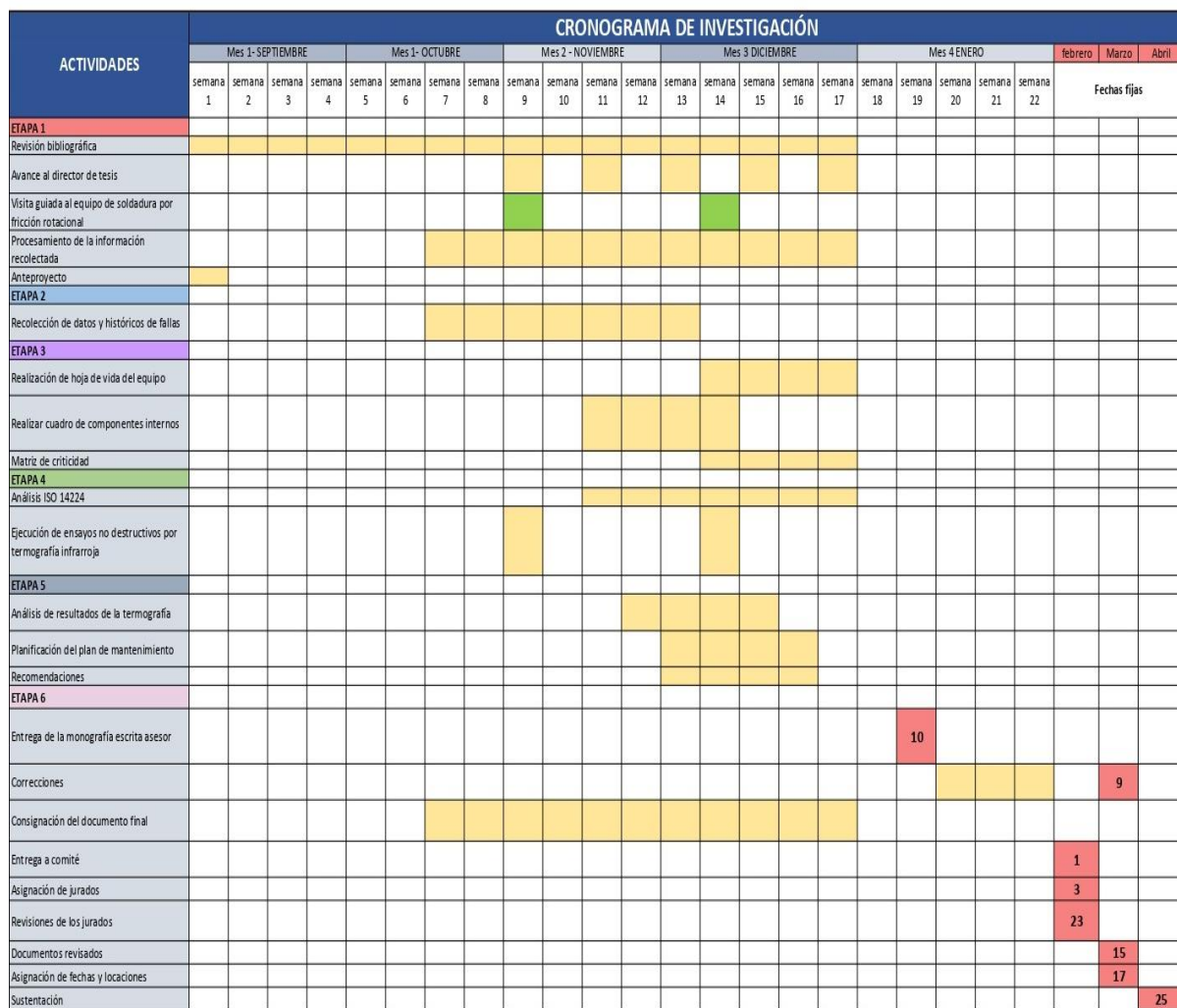
Figura 10*Diagrama de flujo para el desarrollo de la metodología.*

7.1 Cronograma

Se presenta a continuación el cronograma ejecutado durante la monografía desde septiembre del 2024 hasta enero del 2025 para un total de 5 meses, se resaltan en verde las actividades de visita y obtención de datos dentro de los laboratorios de metalurgia y las fechas en rojo son importantes para la entrega de actividades. Se enfatiza la asignación de fechas según las diferentes etapas dentro de la metodología.

Figura 11

Cronograma de actividades.



7.2 Resultados

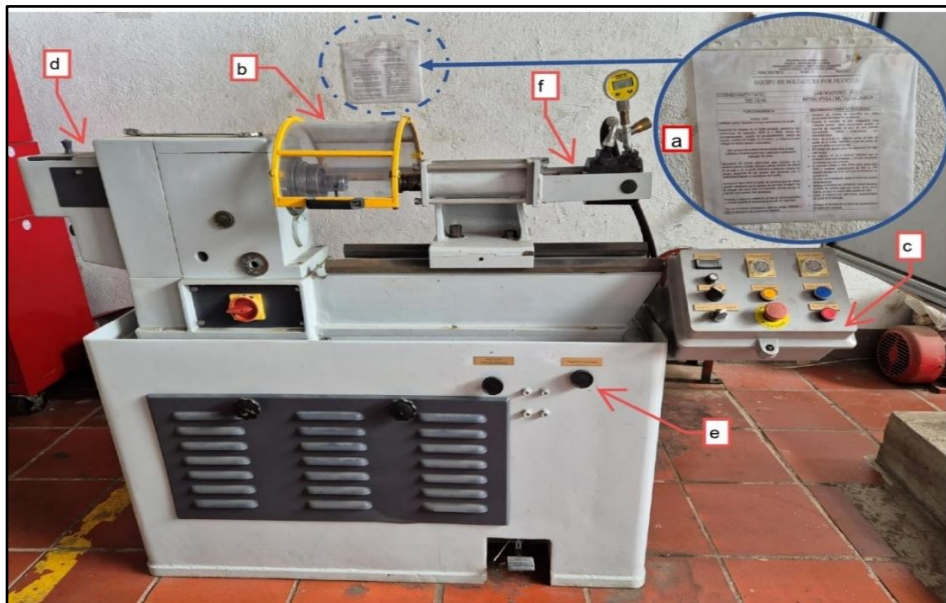
El desarrollo del plan de mantenimiento predictivo se lleva a cabo a través de las siguientes actividades propuestas.

7.2.1 Inspección visual y hallazgos de la etapa 2

El equipo de soldadura por fricción rotacional está ubicado en el laboratorio de ingeniería metalúrgica en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia junto a los tornos y el equipo de ensayo Charpy, en el sitio se encuentra el formato de señalización de equipos la cual contiene una breve descripción de su funcionamiento y las recomendaciones de seguridad (Figura 12). Este formato hace parte del macroproceso administrativo para la gestión de laboratorios (Figura 13). En el caso de fricción rotativa, a éste aún no se le ha asignado un código de inventario, por lo que, hasta la fecha, se le está haciendo seguimiento para incluirlo en el control y mantenimiento de los equipos del laboratorio.

Figura 12

Panorámica del equipo de soldadura por fricción. a. Formato de señalización. b. protección contra golpes. c. consola de mando. d. caja de poleas. e. Perillas de forjado. f. cilindro hidráulico.



Desde la fecha de su construcción y puesta en marcha, el equipo aun no cuenta con un plan de mantenimiento, por ende, no se tiene registro de mantenimientos realizados. Actualmente, solo se realiza cambio de aceite una vez cada semestre. Por si fuera poco, el equipo no cuenta con un control de registros operacionales. A pesar de esta situación, el equipo ha estado en funcionamiento en actividades académicas de la materia Electiva II. También ha sido utilizado por estudiantes de últimos semestres para el desarrollo de sus proyectos de grado.

Figura 13

Recomendaciones de seguridad.

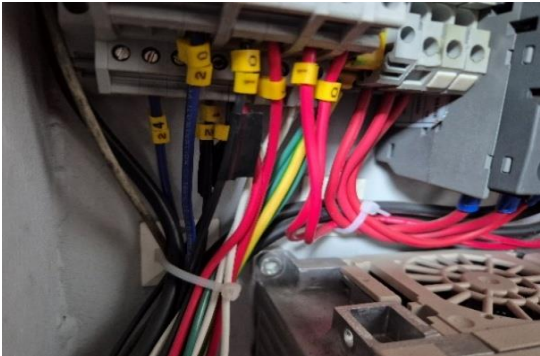
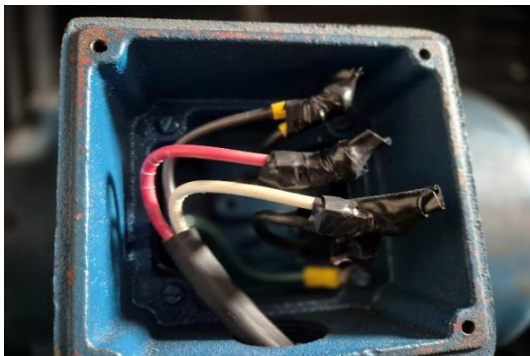
MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: CONTROL Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS FORMATO: ETIQUETA SEÑALIZACIÓN DE EQUIPOS Código: A-GL-P94-F13 Versión: 01 Página 1 de 1	
EQUIPO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN	
CODIGO INVENTARIO: NO TIENE	LABORATORIO / ÁREA METALURGIA / METALMECANICA
FUNCIONAMIENTO Voltaje: 220V Verifique que la máquina no tenga vaciamientos de aceite. Encienda la máquina en el botón principal, seleccione las condiciones de operación: RPM (0 a 4500), tiempo de precalentamiento, presión de precalentamiento, tiempo de forjado, presión de forjado (10-70 MPa). La máquina puede trabajar en modo manual o automático. Sólo cambie las condiciones de presión de la unidad hidráulica cuando autorizado, pues esto modificará la velocidad del pistón. Seleccione las pinzas adecuadas para sujeción de la muestra que va a soldar. Siempre coloque primero las pinzas en el uso y en el pistón hidráulico y después coloque las piezas, asegúrese de que queden bien apretadas (use el pedal para bloquear el movimiento del husillo). Acerque el carro móvil al husillo de tal forma que las piezas queden separadas por el espesor de una hoja de papel. Fije la posición del carro móvil a la bancada con las tuercas de sujeción (que queden bien apretadas). Proceda a realizar la soldadura, ya sea de forma automática o manual, bajando el sistema de protección de seguridad. Una vez terminada la soldadura, retire las piezas soldadas y deje la máquina en las condiciones iniciales.	RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD • Respetar las señales de seguridad que están demarcadas alrededor de la máquina. • Cuando la máquina se está preparando para cualquier prueba, debe mantenerse puesto el sistema de seguridad el cual es una pantalla transparente contra proyecciones con microinterruptor. • Antes de prender la máquina revise el nivel de aceite de la unidad hidráulica y que las pinzas de sujeción estén en buen estado. • No golpee las pinzas contra la máquina ni las deje caer al piso. • La máquina no va a arrancar mientras que el protector facial esté levantado, o el botón de parada de emergencia esté activado. • Si necesita trabajar a altas RPM, suba hasta 2000 RPM y aumente gradualmente de 500 en 500 dejando tiempos de 5min para que la lubricación se acondicione. • En caso de emergencia, active el botón de parada de emergencia. • Siempre al finalizar una jornada de trabajo devuelva el pistón de presión para que quede dentro de la botella, es decir la presión debe quedar en cero. • Limpie la máquina con una brocha, especialmente las guías de la bancada. • Coloque el candado en el botón de accionamiento principal de la máquina.

Según la planificación de actividades de la Tabla 4, las fechas asignadas permitieron la recolección asertiva de información sobre el estado actual, obteniendo los siguientes hallazgos relevantes:

- Falta de limpieza y aseo: El equipo se encuentra cubierto por una capa de polvo y grasa proveniente de los equipos aledaños o del aceite lubricante del mismo (Tabla 4 ítem a).

- Malas condiciones del aceite hidráulico: Se observa almacenamiento del aceite hidráulico en un corte de caneca al costado del equipo, el aceite hidráulico presenta una coloración oscura y viscosa (Tabla 4 ítem b).
- Fugas: La caja del motor hidráulico presenta fuga del aceite hidráulico en la zona del indicador de nivel (Tabla 4 ítem c).
- Polo a tierra: El enchufe del equipo presenta conexión irregular del polo a tierra mediante cinta aislante, además de la ausencia de la protección externa del tomacorriente (Tabla 4 ítem d).
- Conexionado eléctrico: Se encuentra en buenas condiciones (Tabla 4 ítem e).
- Caja de conexiones del motor: La inspección visual del motor permitió observar que las conexiones de las terminales del motor se encuentran en regulares condiciones, se observa presencia excesiva de cinta negra aislante en las conexiones y falta de los puentes de conexión (Tabla 4 ítem f).
- Prueba funcional: Con ayuda de una pinza amperimétrica se realizó la verificación del conexionado mediante pruebas de aislamiento y contacto a las terminales del motor, arrojando resultados positivos conforme a los valores mínimos aceptables Tabla 3 los resultados se presentan en el ítem 8.1.
- Encendido: Arranque satisfactorio del motor.

Tabla 4*Resultados de la inspección visual.*

a. Panorámica lateral, orden y aseo	b. Aceite hidráulico quemado
	
c. Fuga de nivel	d. Cinta aislante en conexionado de polo a tierra
	
e. Marquillado de botoneras	f. Conexionado del motor
	

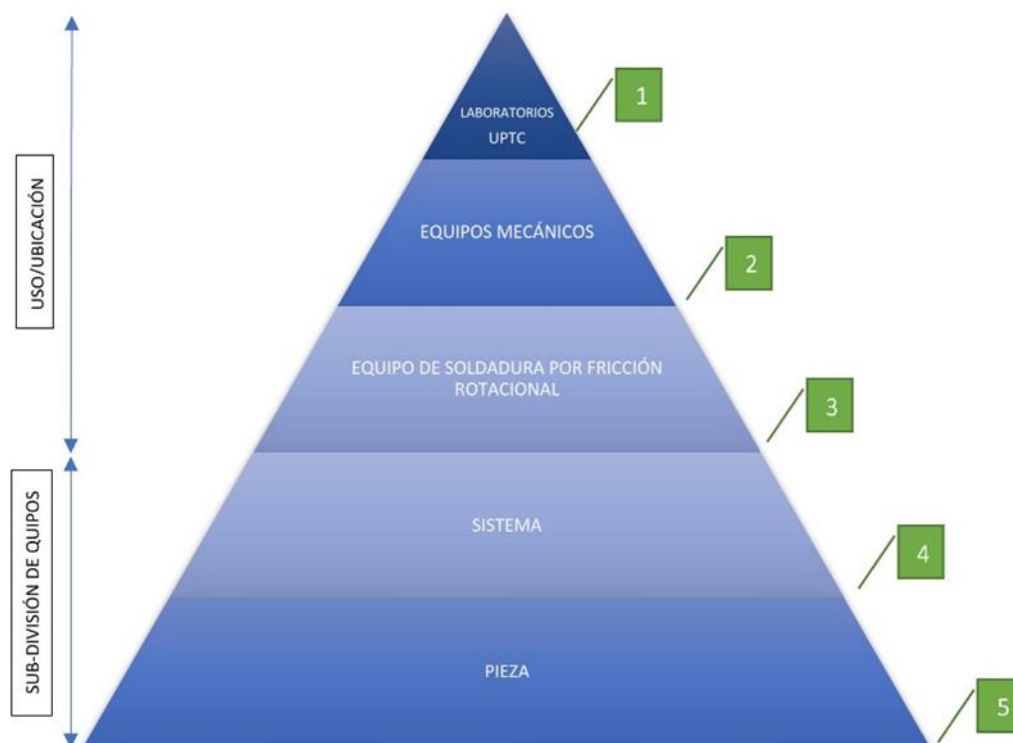
7.2.2 Análisis Taxonómico de la etapa 3

Una adecuada clasificación, organización y estandarización de la información de los activos en una organización facilita la gestión del mantenimiento de los equipos funcionales, permitiendo reportar datos de manera más clara y ordenada. Esto garantiza que todos los interesados tengan acceso a información precisa para la toma de decisiones.

En este contexto, la taxonomía del equipo de soldadura por fricción rotacional es fundamental para estructurar el plan de mantenimiento, optimizando su administración y asegurando un control eficiente de sus intervenciones. La Figura 14 representa mediante una pirámide, las jerarquías de clasificación del equipo de soldadura por fricción rotacional.

Figura 14

Taxonomía del FRW.



7.3 Taxonomía

Nuestro equipo comparte características con respecto a los demás activos de la escuela de ingeniería metalúrgica de la UPTC, actualmente se maneja una clasificación básica. Para el desarrollo de nuestra taxonomía, dividimos en cinco jerarquías. Según su ubicación y uso, la primera jerarquización lo compone el conjunto de laboratorios de la universidad pedagógica de Colombia sede Tunja, (como los laboratorios de química, física, mecánicos, civil y de metalurgia).

La segunda involucra todos los activos que componen el laboratorio de metalurgia (como tornos, muflas, hornos, fresadoras etc.), la tercera nos centramos en el equipo de soldadura por fricción rotacional.

En esta subdivisión, se establece la cuarta jerarquía que comprende los sistemas, permitiendo así implementar un control riguroso en la quinta jerarquía para cada pieza. Los ítems mantenibles se identifican mediante un TAG o código de seguimiento. Esta información debe estar registrada en las correspondientes jerarquías.

También se pueden representar las jerarquías taxonómicas, como se muestra en la Tabla 5, donde se distinguen claramente los datos de uso o ubicación de los sistemas asociados y su nivel taxonómico. Esta representación facilita la identificación de fallas, la planificación de intervenciones y la organización eficiente de la información. Generalmente, estos datos se registran en matrices, tal como se ilustra en la Tabla 11.

Tabla 5

Categorización de la taxonomía del FRW.

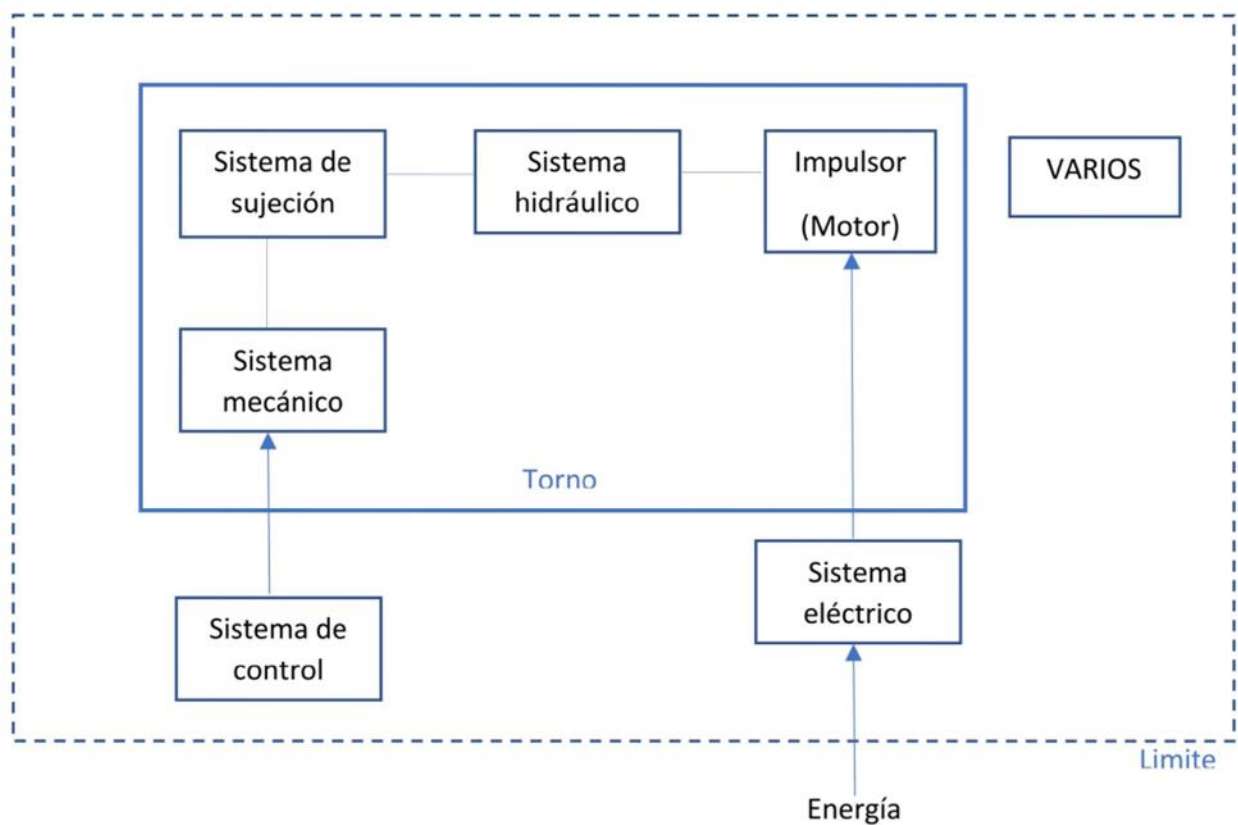
Categoría principal	Nivel taxonómico	Jerarquía de taxonomía		Definición
Datos de uso/ Ubicación	1	Industria	Académica	Laboratorios de metalurgia
	2	Categoría	Equipos mecánicos	Equipos rotatorios
	3	Unidad	Tornos	Equipo de soldadura por fricción rotacional (FRW)
Subdivisión de equipos	4	Sistema	Subsistemas asociados al FRW	
	5	Pieza		

7.4 Límites del equipo

El seguimiento de los ítems mantenibles se da gracias al establecimiento de límites según su función y proceso a ejecutar, la Figura 14 representa un diagrama de límites aplicables para nuestro equipo de soldadura por fricción rotacional y permite clarificar qué datos son importantes para recolectar y analizar. Fuera del límite encontramos la energía necesaria para poner en funcionamiento el equipo, distribuido a través del sistema eléctrico. Al interior del límite encontramos elementos adicionales que no interfieren en el proceso como las protecciones contra golpes etc. Otro límite se da dentro del esqueleto del torno que se conecta intrínsecamente con el suministro de energía en conexión con los motores eléctricos e hidráulicos asociados con el sistema hidráulico y el sistema de sujeción. Finalmente, el sistema mecánico depende del sistema de control programado.

Figura 15

Límites del equipo FRW.



7.4.1 Codificación de activos

La codificación de los activos del laboratorio de metalurgia se asigna conforme al inventario oficial existente. Sin embargo, dado que el equipo de soldadura por fricción rotacional (FRW) aún no ha sido incluido oficialmente en dicho inventario, se propone una codificación provisional para su identificación.

La estructura de esta codificación comienza con las siglas UPTC y se divide en cuatro partes, en primera posición La abreviatura del equipo de soldadura por fricción rotacional (FRW), seguida del número asignado al sistema correspondiente. Por último, El código que identifica el sistema al que pertenece y El número del ítem específico asignado. Ejemplo:

- Codificación oficial UPTC/Equipo/ número del sistema/ Sistema/ ítem
- FRW- TT-SISTXXX-NN

En la Tabla 6 se establecen el número de sistemas del equipo y su código asignado, por ejemplo, para incluir al variador de frecuencia la codificación seria: UPTC-FRW-1-SISTELC-002.

Tabla 6

Codificación de los sistemas del equipo FRW.

Equipo		Tipo de equipo	
Descripción	Código	Descripción	Código
Equipo de soldadura por fricción rotacional	FRW	Sistema de sujeción	SISTSJ
		Sistema hidráulico	SISTHC
		Sistema mecánico	SISTMC
		Sistema eléctrico	SISTELC
		Sistema de control	SISTCT

7.5 Análisis de falla

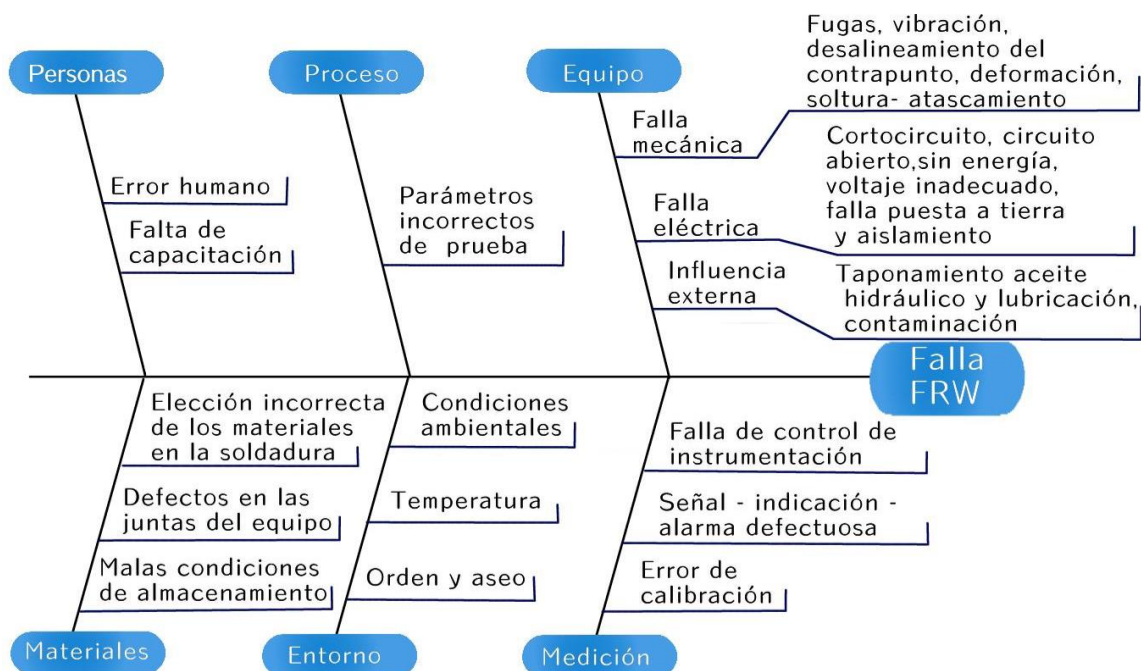
Cada pieza o ítem mantenible está sujeto a una o varias probabilidades de falla por diferentes factores de su ecosistema. Al no contar con un histórico de fallas, se realiza un diagnóstico de los modos de falla y los mecanismos de falla. Para este propósito, se tiene en cuenta

los criterios de la Tabla 8. El mecanismo de falla del equipo de soldadura por fricción rotacional está asociado a:

- Fallas mecánicas: Puede deberse a la vibración sometida durante el proceso de soldadura, deformación en las probetas o al desalineamiento del contrapunto.
- *Fallas de material*: Debido al desgaste de los elementos de sujeción, desgaste de las poleas (superior y inferior) o a la fatiga de estos.
- Fallas de instrumentación: Pueden presentarse en los manómetros digitales, cronómetros del tiempo de precalentado-forjado y en el medidor de velocidad.
- Fallas eléctricas: En el caso del sistema eléctrico puede ocurrir un corto circuito, circuito abierto en la caja de control o en la desconexión de la puesta a tierra.
- Influencia externa: puede darse por la mala disposición del aceite lubricante e hidráulico, o taponamientos internos.

El modo de falla se puede visualizar mediante un diagrama de causa raíz (Figura 16) y está intrínsecamente asociado a la funcionalidad del equipo y su degradación en el ciclo de vida de equipos rotatorios contiguo a la seguridad y control. Las categorías del diagrama de causa raíz se dividen en:

- Personas: principalmente puede presentarse error humano al momento de la manipulación del equipo o falta de capacitación.
- Proceso: los parámetros de prueba son importantes en el desempeño de soldadura, si no se hace adecuadamente se puede descalibrar el equipo.
- Equipo: aquí este consignado parte de los mecanismos de falla, principalmente su parte mecánica, eléctrica y influencias externas.
- Materiales: el equipo está compuesto en la base de láminas de acero y fundición en la parte superior, debido a las vibraciones, las juntas soldadas pueden presentar grietas y corrosión por el mal almacenamiento.
- Entorno: la temperatura nominal de Tunja es de 21°, si se trabaja en entornos más calurosos los ítems como los motores pueden presentar deficiencias etc.
- Medición: Este ítem va integrado la parte de instrumentación, y puede darse anomalías como la descalibración de instrumentos, retrasos en la transmisión de señales y falla en los sistemas de control.

Figura 16*Diagrama de causa Raíz.*

Resumiendo, podemos ver los resultados de los mecanismos y modos de falla que aplican para el equipo en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7*Mecanismos y modos de falla según la tabla B.2 y B.3 de la ISO 14224.*

Sistemas	Mecanismos de falla (tabla B.2) ISO 14224	Modos de falla (tabla B.3) ISO 14224
Sistema de sujeción	- Falla mecánica por atascamiento, deformación, alineamiento. - Falla por influencia externa. - Por falla de material en corrosión, rotura, fatiga, sobrecalentamiento.	- Diseño o configuración inapropiada del equipo (forma, tamaño, tecnología, configuración, operabilidad, mantenibilidad, etc.), pero no se conocen mayores detalles. - Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante la operación.

Tabla 7*Continuación*

Sistema hidráulico	• Falla mecánica por fuga, vibración, atascamiento. • Falla por influencia externa. • Por falla de material en corrosión, rotura, fatiga, sobrecalentamiento, estallido.	• Falla relacionada a la fabricación o instalación, pero no se conocen mayores detalles. • Falla de instalación o montaje (no incluye montaje después de mantenimiento)
Sistema mecánico	• Falla mecánica por vibración, deformación, soltura, atascamiento, alineamiento. • Falla por influencia externa. • Por falla de material en corrosión, rotura, fatiga, sobrecalentamiento.	• Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante la operación. • Falla de fabricación o procesamiento. • Falla de instalación o montaje (no incluye montaje después de mantenimiento) • Condiciones de servicio imprevistas o no diseñadas
Sistema eléctrico	• Falla eléctrica por corto circuito, circuito abierto y falla de puesta a tierra- aislamiento, sobrecalentamiento.	• Falla de instalación o montaje (no incluye montaje después de mantenimiento) • Condiciones de servicio imprevistas o no diseñadas
Sistema de control	• Falla de instrumentos por falla de control, indicación de alarma defectuosa, desajuste. • Falla eléctrica por corto circuito, circuito abierto y falla de puesta a tierra- aislamiento, sobrecalentamiento.	• Error humano: Error, mal uso, negligencia, descuido, etc. durante la operación. • Condiciones de servicio imprevistas o no diseñadas

7.6 Matriz de criticidad

Se elaboró una matriz de control para priorizar los ítems más críticos, aquellos cuya falla podría generar mayores costos y afectar la operación del equipo. Esta herramienta permite optimizar las estrategias de mantenimiento, enfocando los recursos en los componentes de mayor impacto. La matriz, presentada en la Tabla 11, incluye 70 ítems mantenibles, debidamente codificados según la designación explicada previamente.

Su estructura está conformada por siete columnas: Tag, Descripción, Valor A, Valor B, Valor C, CE y Nivel de Criticidad. Adicionalmente cada ítem fue consignado y evaluado según el

riesgo asociado a una posible falla, ya sea catastrófica o leve, de acuerdo con los siguientes criterios:

Tabla 8

Valor A

Valor columna A	
Importancia del equipo dentro del sistema	
1	Puede causar riesgos, problemas ambientales o legales.
2	Puede causar pérdidas significativas.
3	Puede reducir la producción, o la calidad de la producción con alguna pérdida.
4	Puede aumentar la demanda o aumentar el personal, no produce riesgo, no afecta la economía ni el medioambiente.
5	No es importante con respecto a la seguridad, al medioambiente o la economía y no produce efecto sobre la demanda o el personal

Tabla 9

Valor B

Valor columna B	
Confiabilidad del equipo	
1	Alta confiabilidad. normalmente no tiene partes en movimiento y trabajo liviano
2	Muy confiable. pocas partes en movimiento y trabajo normal.
3	Normalmente confiable. partes en movimiento que se pueden fatigar y condiciones de trabajo severas.
4	Algo confiable. sistema complejo, condiciones de trabajo muy severas y sobrecargado.
5	No ofrece ninguna confiabilidad.

Tabla 10

Valor C

Valor columna C	
Impacto del equipo dentro del sistema	
1	causa parada del sistema.
2	produce gran disminución en la capacidad del sistema. no tiene equipo de stand by y el tiempo de reparación o cambio es significativo.
3	produce mediana disminución en la capacidad del sistema. tiene equipo de stand by y el tiempo de reparación es corto.
4	puede operarse en manual o salir de línea y produce una pequeña disminución en la capacidad del sistema. no se requiere todo el tiempo.
5	no produce efecto sobre la capacidad del sistema.

Dependiendo del valor que le hemos asignado se calcula el valor de la criticidad con la siguiente formula (Pedraza Pardo, A. F. (2024). Gestión de activos [Diapositivas de PowerPoint]. Universidad Santo Tomás):

$$CE = 0.275 \times (11.2 - \text{Sys}^{1.5}) \times \sqrt{\text{Rel}^{1.1} + (6 - \text{Imp})^{1.2}}$$

Donde:

- CE: Clasificación del Equipo.
- Sys: Importancia del Sistema (A)
- Rel: Confiabilidad del Equipo. (B)
- Imp: Impacto del Equipo dentro del Sistema (C)

Por ejemplo, para el variador de frecuencia se le ha asignado un valor A de 2 dentro de la escala de 1 a 5 según las especificaciones de la Tabla 9, la asignación del valor B corresponde a 2 dentro de la misma escala de la Tabla 10 y para el valor C se asigna un valor de 1 de la Tabla 11. La ecuación resultante es la siguiente:

$$CE = 0.275 \times (11.2 - (2^{1.5}) \times \text{raíz}(2^{1.1} + (6-1)^{1.2}))$$

CE=6.922 (Alta criticidad)

Finalmente, con este valor obtenido se le asigna una categoría de criticidad de acuerdo con:

$R \geq 6$: Alta criticidad

$5.9 \leq R < 4$: media criticidad

$R \leq 3.9$: baja criticidad

Tabla 11*Matriz de seguimiento del equipo FRW.*

TAG	DESCRIPCIÓN	VALOR A	VALOR B	VALOR C	CE	EVALUACIÓN
UPTC-FRW-1-SISTELC-1	variador de frecuencia	2	2	1	6,92271888	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-2	guardamotor 1	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-3	interruptor termomagnetico	1	2	2	7,6415421	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-4	guardamotor 2	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-5	borneras de conexión 1	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-6	borneras de conexión 2	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-7	borneras de conexión 3	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-8	cable 1	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-9	cable 2	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-10	cable 3	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-11	cable 4	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-12	cable 5	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-13	cable 6	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-14	cable 7	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-15	cable 8	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-16	cable 9	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-17	cable 10	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-18	cable 11	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-19	cable 12	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-20	cable 13	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-21	cable 14	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-22	cable 15	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-23	cable 16	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-24	cable 17	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-25	cable 18	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-26	cable 19	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-27	cable 20	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-28	cable 21	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-29	cable 22	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-30	cable 23	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-31	cable 24	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-32	reles	2	2	2	6,2717379	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-33	caja de control	1	2	1	8,4347032	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-34	sensor hall	3	2	3	4,00385491	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-35	cronometro	2	1	4	4,18047236	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-36	cronometro	2	1	4	4,18047236	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-37	botoneras 1	4	3	4	2,09095226	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-38	cable 25	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-39	cable 26	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-40	cable 27	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-41	cable 28	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-42	cable 29	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-43	cable 30	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-44	cable 31	5	2	4	0,01139348	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-45	polea del husillo	1	2	1	8,4347032	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-46	polea del motor	1	2	1	8,4347032	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-47	correa 1	1	2	1	8,4347032	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-48	correa 2	1	2	1	8,4347032	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-49	motor	1	4	1	9,50950508	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-50	protector	1	1	5	3,96686904	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-51	pedal	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-52	pinzas de sujecion	2	3	3	6,12811516	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-53	mandrill	4	3	4	2,09095226	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-54	porta brocas	4	3	4	2,09095226	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-55	eje	2	3	2	6,7616795	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-56	rodamientos	2	3	2	6,7616795	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-57	caja de rodamientos	2	3	2	6,7616795	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-58	aceite lubricante	4	2	3	2,13402082	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-59	filtro	3	2	4	3,47936494	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-60	contrapunto	2	3	1	7,36950812	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-61	pernos	5	2	3	0,01311097	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-62	medidor de presion digital	3	3	2	4,84927906	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-63	botella hidraulica	2	2	1	6,92271888	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-64	porta pinzas	2	3	2	6,7616795	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-65	valvula reguladora	3	2	4	3,47936494	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-66	manguera	5	1	5	0,00764599	BAJA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-67	motor	1	4	1	9,50950508	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-68	valvula solenoide	3	3	3	4,39490522	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-69	manometro	3	4	3	4,7658089	MEDIANA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-70	perilla de ajuste	3	1	4	2,99811269	BAJA CRITICIDAD

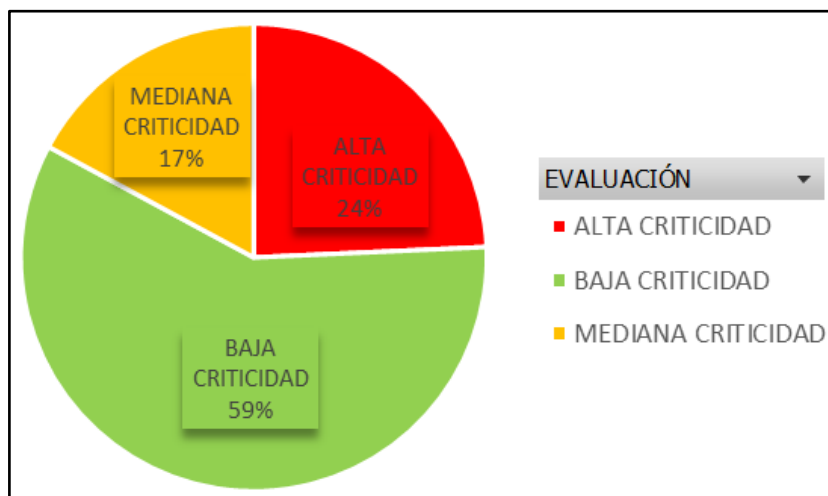
8. Análisis de resultados

El equipo de soldadura por fricción rotacional presenta una distribución equilibrada entre ítems evaluados de alta y media criticidad ilustrado en la Figura 17, globalmente el 59% de ítems son de baja criticidad, lo que significa que en caso de fallo tenemos repuestos disponibles para su cambio. Una de las ventajas de los componentes con baja criticidad (cables, botoneras, aceite hidráulico etc.) es su fácil disponibilidad y precio en el mercado.

Por otro lado, los ítems de media criticidad representan precios un poco más altos al momento de cambio y tienen la factibilidad de conseguirlos, pero acarrear costos de transporte a otro municipio para comprarlos y por defecto se tendrá que entrar en suspensión. Finalmente, las piezas más críticas comprenden 17 elementos que representan un 24% del total. Estos componentes son bastante delicados y de baja disponibilidad en el país, por lo que, si el equipo llegara a entrar en suspensión, su mantenimiento podría tomar semanas. Lo anterior incluyendo costos por mano de obra especializada y repuestos internacionales.

Figura 17

Distribución de la evaluación con respecto a la criticidad.

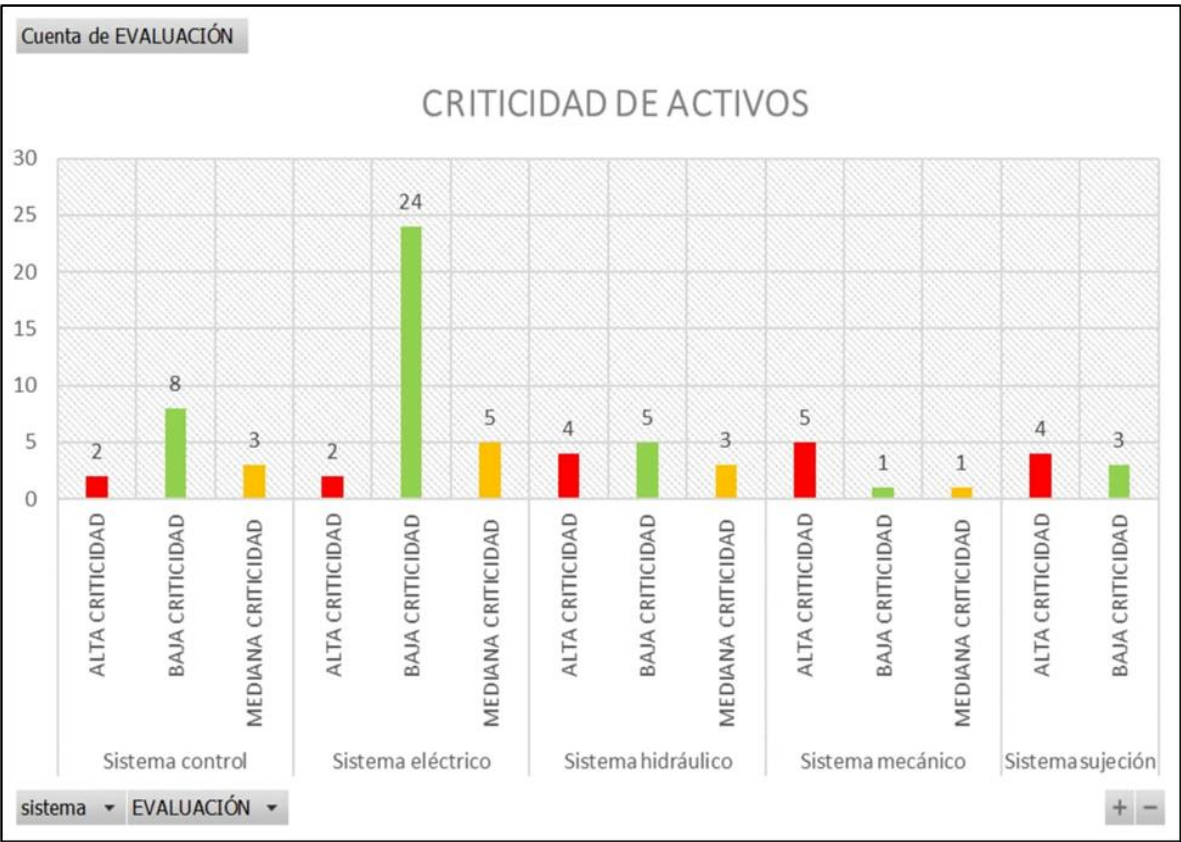


La Figura 17 ilustra un análisis más detallado mostrando el número total de ítems de cada sistema entre las clasificaciones de alta, media y baja criticidad. Se observa que los ítems de alta criticidad están presentes en todos los sistemas siendo el sistema hidráulico el más predominante

y critico a la hora de programar mantenimiento. El sistema mecánico lo compone mayormente ítems críticos. Esto quiere decir que también es importante hacerle un detallado seguimiento. Le sigue el sistema eléctrico que, a pesar de tener la mayoría clasificados de baja criticad, puede ocasionar interrupciones no programadas en la operación. Por último, para el sistema de control y de sujeción representa un riesgo operacional menor y confiable.

Figura 18

Grafica de resultados con respecto a la criticidad de activos.



8.1 Acciones predictivas de la etapa 4

La matriz de criticidad ha identificado 17 activos primordiales (Tabla 12) que podrían comprometer la funcionalidad del equipo. Estos activos se caracterizan principalmente por la necesidad de obtener repuestos mediante pedidos internacionales, lo que implica tiempos de espera prolongados y requieren mano de obra especializada para su instalación, lo que incrementa significativamente los costos asociados. Por otro lado, algunos fueron evaluados según su importancia operacional. Por ejemplo, el juego de pinzas de sujeción fue importado desde China, mientras que el contrapunto, en caso de fractura, requeriría ser enviado a una fundidora para su fabricación, destacando así su importancia operacional. Por lo tanto, hemos seleccionado las técnicas predictivas más adecuadas para establecer el plan de mantenimiento.

Tabla 12

Activos de alta criticidad.

TAG	DESCRIPCIÓN	EVALUACIÓN
UPTC-FRW-1-SISTELC-1	Variador de frecuencia	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-1-SISTELC-3	Interruptor termomagnético	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-32	Relés	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-2-SISTCT-33	Caja de control	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-45	Polea del husillo	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-46	Polea del motor	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-47	Correa 1	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-48	Correa 2	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-3-SISTMC-49	Motor	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-52	Pinzas de sujeción	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-55	Eje	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-56	Rodamientos	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-4-SISTSJ-57	Caja de rodamientos	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-60	Contrapunto	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-63	Botella hidráulica	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-64	Porta pinzas	ALTA CRITICIDAD
UPTC-FRW-5-SISTHC-67	Motor	ALTA CRITICIDAD

8.2 Inspección del motor

El éxito de la soldadura por fricción rotacional (FRW) depende de diversos parámetros operacionales, como la longitud y diámetro de las probetas, el tiempo de soldadura, la presión de calentamiento y forja, y la velocidad tangencial. Esta última está directamente influenciada por el estado del motor del equipo. Durante las pruebas, se observó que el motor arrancó de manera adecuada, lo que indica que se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento. Sin embargo, este resultado no garantiza que opere al 100% de su capacidad.

Para complementar esta evaluación, se realizó una inspección visual junto con dos pruebas sencillas al motor. El objetivo principal de estas pruebas fue determinar si el motor mantiene condiciones similares a las que tenía en el momento de su entrega, permitiendo así una valoración preliminar de su estado actual.

Para ello elegimos nuestra herramienta de medición que para efectos de la prueba fue un multímetro. Las especificaciones del multímetro dependen de las capacidades físicas del motor, así que contamos con un motor de inducción trifásica modelo B112Ma2-EC marca VOGES con fecha del 2012 (Anexo A) la intensidad nominal a 220 V para corriente continua es de (15.3 A) y para corriente alterna es de (133 A), el rendimiento máximo alcanzado para 50% es de 83, para 75% es de 85 y para el 100% es de 85.5.

El multímetro debe estar sobre la capacidad de medición máximo (133 A), por ello se seleccionó el multímetro UNI-T 200A +, con capacidad de medición a corriente alterna de 400 A y 600 voltios en AC/AC cumpliendo con lo requerido.

Las pruebas se realizan con el motor apagado para evitar accidentes y medir los valores básicos de continuidad y resistencia.

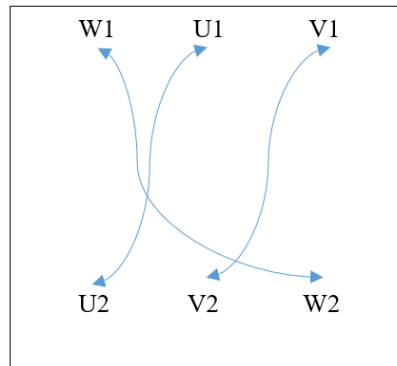
8.2.1 Prueba de continuidad

El motor trifásico inspeccionado posee 6 fases dispuestas en el inicio de una bobina con respecto al final. Verificamos que tenga continuidad conforme a la Tabla 3. Para ello se realizan seis mediciones por cada fase y se deja el menor valor medido, los resultados dependen tanto de la temperatura del material aislante como de la humedad del ambiente. El aislamiento eléctrico se va degradando en el tiempo. Pueden ser consultados los valores aceptables de resistencia para

maquinaria rotativa durante un minuto a 40C° grados centígrados (NETA, 1995, Tabla 100.11), si se llega a tener indicios de una anomalía activa, se verifica cualquier anomalía entre los conductores de la misma fase y los conductores de distintas fases (Tabla 3).

Figura 19

Diagrama de fases del motor instalado



Nota. Adaptado de (Nunes, Santos, & Rocha, 2022)

Resultado de continuidad entre:

U1-U2: OK

V1-V2: OK

W1-W2: OK

8.2.2 Pruebas de aislamiento con respecto a tierra

Para las pruebas de resistencia de aislamiento, se comparan los valores mínimos obtenidos con la tabla 100.11 de la NETA. (Tabla 3). La prueba consiste en la medición entre la carcasa del motor sin recubrimiento entre fases con el objetivo de observar si hay fugas de corriente en las fases.

Resultados a 600 V:

(Rojo -Tierra) L1-T: 110 MΩ: Aceptado

(Blanco- tierra) L2-T: 145 MΩ: Aceptado

(Negro -tierra) L3-T: 186 MΩ: Aceptado

8.2.3 Medición de resistencia entre fases

Finalmente chequeamos el estado de los devanados mediante la medición de la resistencia entre fases para saber si el motor tiene desbalance Figura 20. Deben ser similares máximo 5%-valores típicos: 01 a 10 Ω .

Rojo – blanco L1-L2: 2.1 Ω : Aceptado

Blanco- negro L2-L3: 2.5 Ω : Aceptado

Negro- rojo L3-L1: 2.8 Ω : Aceptado

Figura 20

Medición de resistencia entre fases.



8.3 Técnicas predictivas propuestas

Adicionalmente a estas pruebas realizadas, se requiere evaluar diferentes aspectos de los componentes críticos por ello las técnicas más adecuadas son las siguientes:

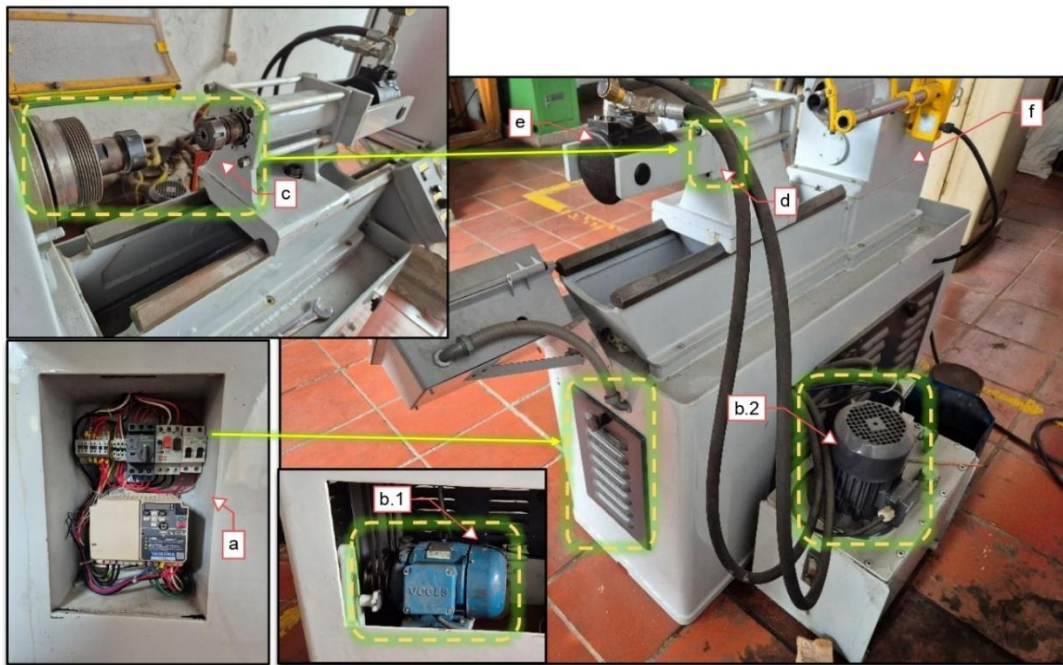
8.3.1 Inspección termográfica

La termografía nos permite realizar una evaluación para los sistemas eléctricos y mecánicos. En la Figura 21 definimos las zonas prioritarias para realizar la inspección. Para el

sistema eléctrico podemos verificar si existe fallos en los interruptores, conexiones o cortos correspondiente al ítem a y para el sistema mecánico podemos verificar si existe sobrecalentamiento del motor, del eje, las correas y poleas debido a que son componentes rotativos que están en constante fricción y sujetas a tensiones que ocasionan aumento de la temperatura.

Figura 21

Puntos de referencia para la inspección de termografía infrarroja.



Debemos tener presente la temperatura ambiente dentro de las instalaciones, la humedad relativa, la emisividad de los materiales del equipo y la distancia de la inspección porque nos podría variar los deltas de temperaturas y la medición.

8.3.2 Evaluación de Puntos a alta temperatura (puntos calientes)

Si se llega a presentar puntos calientes podemos valorar los resultados con respecto a los deltas de temperatura es decir que para el Sistema eléctrico nos remitimos la norma ANSI/NETA ATS-2017 Tabla 3, aquí se involucra los interruptores, barraje de conexión, contactores, relés, cables sensibles a presentar fallos por alta resistencia, cortocircuitos, circuitos abiertos o deterioro:

- Delta de temperatura entre 1 C° a 3 C°, posible deficiencia inspeccionar de nuevo.
- Delta de temperatura entre 4 C° y 15 C° es una deficiencia, se debe analizar y reparar en un tiempo prudente.
- Diferencia mayor de 16 C° se repara inmediatamente

Para la Programación de inspecciones se sigue las siguientes recomendaciones:

- Grado de severidad BAJO: Próxima inspección cada 6 meses
- Grado de severidad MEDIO: Próxima inspección cada 3 meses
- Grado de severidad ALTO: Próxima inspección cada mes
- Grado de severidad CRITICO: Corrección inmediata

Los sistemas mecánicos están conformados por componentes clave que garantizan su funcionalidad, tales como: motores eléctricos, válvulas de corte (integradas al sistema hidráulico), reductores de velocidad, poleas y correas de transmisión (Aldana Rodríguez D. , 2017), Estos elementos trabajan de manera coordinada para asegurar la eficiencia operativa del conjunto.

- 0 – 5 °C (Normal) Estado normal de operación.
- 6 – 15 °C Ligeramente (Severo) Anormalidad suave, la cual es necesaria monitorear para establecer su avance.
- 16 – 25 °C (Severo): Anormalidad que indica una falla en progreso para la cual es necesario programar una inspección.
- 26 – 35 °C (Crítico): Anormalidad que indica una falla presente y se debe realizar una jornada de
- mantenimiento correctivo programado.
- 36 o superior °C (Peligroso): Anormalidad que indica una falla presente y
- se debe realizar un correctivo inmediato.

8.3.3 Análisis de aceites

Aplicable para el sistema hidráulico, esta técnica nos ayuda a verificar si el aceite presenta contaminación o degradación. Dependiendo de su coloración, el aceite puede presentar partículas o sustancias extrañas que estén perjudicando la caja de engranajes o el sistema hidráulico. El aceite no puede contener agua, materias carbonosas, partículas metálicas u otros fluidos.

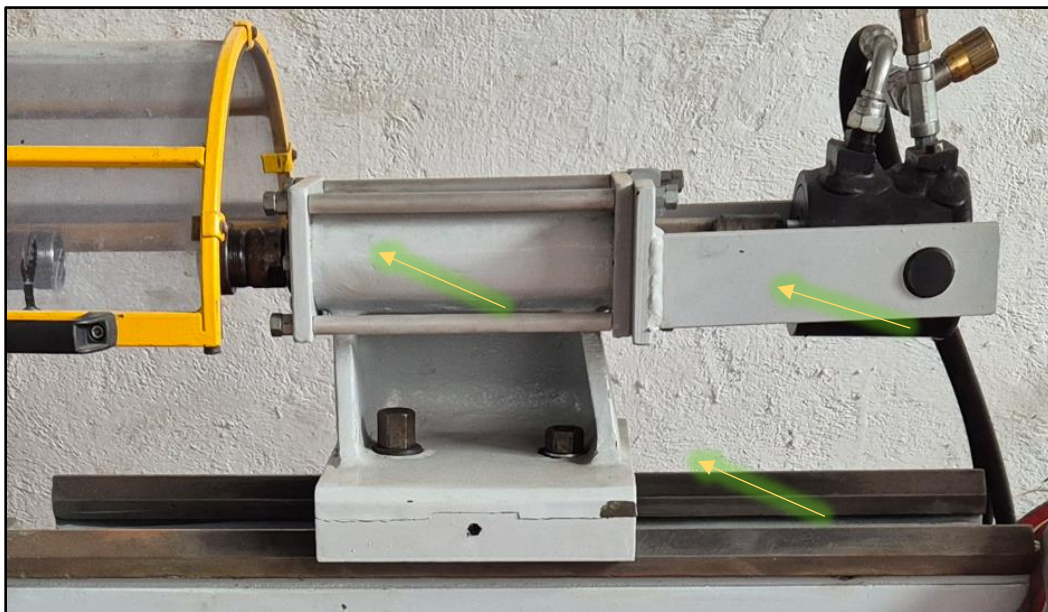
Se puede realizar una prueba sencilla que consiste en tomar una muestra del aceite en una probeta transparente y comparar por medio de la colorimetría como la mostrada en la Figura 8. A partir de esta verificación visual, se puede decidir si se debe reemplazar o no el aceite. En casos más críticos, se envía a un laboratorio una muestra para un análisis más completo del aceite hidráulico o lubricante.

8.3.4 Partículas magnéticas

La bancada es una pieza de función de carbón y está sujeta a tensiones por el sistema hidráulico, el ensayo de partículas magnéticas nos puede ayudar a verificar si existen grietas subsuperficiales bajo la capa del recubrimiento. La inspección se realizó en las uniones soldadas del contrapunto y en la base de la bancada, Figura 22.

Figura 22

Puntos de referencia para la inspección por partículas magnéticas.



8.4 Programación de mantenimiento

Se han programado dos tipos de mantenimiento. El mantenimiento correctivo se establece basándose en los hallazgos observados durante la visita al laboratorio. Por otro lado, el

mantenimiento predictivo se ha desarrollado a partir del análisis de las acciones predictivas anteriores.

Esta programación se especifica por sistemas y se busca llevar un orden en cuanto a los resultados de los mantenimientos, garantizando cubrir el 100% de los elementos críticos. La programación se ajusta en función de los resultados obtenidos en los mantenimientos correctivos (Figura 23). Se diseña un formato de inspección para consignar los resultados y llevar un registro documental para sus posteriores análisis Figura 24.

Figura 23

Programación del mantenimiento.

PROGRAMACIÓN -PLAN DE MANTENIMIENTO			
EQUIPO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL			
ACTIVIDADES	TIPO DE MANTENIMIENTO	FRECUENCIA	ACTIVIDAD
OTRO	CORRECTIVO	Inmediato	Limpieza y aseo
	PREVENTIVO	Semanal	Limpieza y aseo
	PREVENTIVO	;;;	Mantener un inventario de repuestos en el almacén para futuros reemplazos
SISTEMA MECÁNICO	CORRECTIVO	Inmediato	Ensayo termográfico para identificación de puntos calientes y estado actual
	PREVENTIVO	Cada 6 meses	Ensayo termográfico para monitoreo
	PREVENTIVO	Pendiente	Depende de la evaluación del mantenimiento correctivo
SISTEMA HIDRÁULICO	CORRECTIVO	Inmediato	Cambio y ajuste del indicador de nivel del aceite hidráulico por fugas encontradas en
	CORRECTIVO	Inmediato	Cambio de aceite hidráulico
	CORRECTIVO	Inmediato	Cambio del almacenamiento del aceite hidráulico
	PREVENTIVO	cada año	Análisis de aceite
	PREVENTIVO	cada 2000 horas	Cambio de aceite hidráulico
	CORRECTIVO	Inmediato	Ensayo termográfico para identificación de puntos calientes y estado actual
	PREVENTIVO	pendiente	Depende de la evaluación del mantenimiento correctivo
SISTEMA DE SUJECIÓN	CORRECTIVO	Inmediato	Ensayo termográfico para identificación de puntos calientes y estado actual
	PREVENTIVO	Pendiente	Depende de la evaluación del mantenimiento correctivo
	PREVENTIVO	Cada 6 meses	Ensayo de partículas magnéticas
SISTEMA ELÉCTRICO	CORRECTIVO	Inmediato	Reparación de la conexión a tierra del equipo desde el polo hasta el enchufe o toma
	CORRECTIVO	Inmediato	Reparación del conexionado del motor e instalación de puentes de conexión
	PREDICTIVO	Cada 6 meses	Prueba de resistencia y continuidad eléctrico al motor
	CORRECTIVO	Inmediato	Ensayo termográfico para identificación de puntos calientes y estado actual
	PREVENTIVO	Pendiente	Depende de la evaluación del mantenimiento correctivo
SISTEMA CONTROL	PREVENTIVO	Pendiente	Depende de la evaluación del mantenimiento correctivo
	CORRECTIVO	Inmediato	Ensayo termográfico para identificación de puntos calientes y estado actual

Figura 24

Formato de inspección. Figura elaborada por el autor (2025).

Sistema Integrado de Gestión				Fecha		
Inspección de Ensayos no Destructivos				Emisión		10-ene-25
Reporte de Resultados				Revisión		01
Lugar	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia					
Sede	Tunja					
Informe	01					
Datos del Equipo de Termografía Infrarroja						
Marca		Modelo		T° atm		
Serie		Parámetros				
Paleta		Delta T°				
Tipo de inspección		Evaluación				
Datos del Equipo de Partículas Magnéticas						
Yugo Electromagnético		Numero de serie		Técnica de magnetización		
Serie		Parámetros		Tipo de corriente		
Método Usado		Modelo		Iluminación		
Pruebas Eléctricas del motor						
Prueba de continuidad			Pruebas de aislamiento a tierra			
U1-U2		(Rojo-Tierra)L1-T				
V1-V2		(Blanco-Tierra)L2-T				
W1-W2		(Negro-Tierra)L3-T				
Medición de resistencia entre fases						
Rojo-Blanco L1-L2						
Blanco-Negro L2-L3						
Negro-Rojo L3-L1						
VT: Inspección visual IR: Termografía infrarroja ET: Pruebas eléctricas OA: Orden y aseo MC: Mantenimiento correctivo MP: Mantenimiento Predictivo						
VT	IR	ET	OA	MC	MP	Fecha
Registro Fotográfico						

9. Recomendaciones

La inspección visual que se realizó en el mes de noviembre del 2024 evidenció fallencias que fueron abordadas durante el desarrollo de la metodología de este proyecto. Se recomienda realizar los ajustes resaltados como mantenimientos correctivos en la Figura 23 y cumplir con la programación propuesta. Es primordial realizar una primera inspección termográfica como referencia y complementar el estado actual del equipo.

Es esencial que el personal responsable de ejecutar estas tareas reciba capacitaciones sobre la información asociada al equipo, se debe diligenciar completamente los formularios proporcionados, registrando las fechas y detalles de las actividades realizadas. Es fundamental iniciar el seguimiento y la documentación del historial del equipo para facilitar la planificación de futuras actividades de mantenimiento, si es posible, el personal puede especializarse en normas de ensayos no destructivos y de gestión de activos así se podría complementar y proponer acciones de mejora continua para este equipo o para otros dentro del laboratorio de metalurgia.

Se recomienda mantener un inventario de repuestos para los ítems de baja y media criticidad, con el fin de facilitar futuros reemplazos llevando un control documental y contactos para cuando se presente falla en los ítems de alta criticidad.

Si se planteara la adecuación o instalación de componentes externos para mejorar sus funciones se solicita añadirlo a la matriz de ítems y actualizar la información además de contemplar instalación de sensores o herramientas de recolección de datos en tiempo real tanto para mejorar los parámetros de las pruebas como en la recolección de datos para la programación de mantenimientos.

Este equipo se le puede realizar seguimiento de su desempeño a través de pruebas de soldadura con los mismos parámetros expuestos en la tesis y así, comparar sus resultados entre sí.

10. Conclusiones

En el presente trabajo, se demostró que la implementación de un plan de mantenimiento predictivo para el equipo de soldadura por fricción rotacional, fundamentado en la norma ISO 14224:2016 y complementado con técnicas de ensayos no destructivos, permite identificar de manera precisa los modos y mecanismos de falla en el proceso. La exhaustiva evaluación del estado operativo del equipo facilitó el desarrollo de una estrategia integral, orientada a optimizar su eficiencia y prolongar su vida útil, siguiendo los principios de la Industria 4.0.

Durante la inspección visual realizada en Tunja, se identificaron diversas irregularidades en el equipo, tales como la acumulación de polvo y grasa, almacenamiento inadecuado del aceite hidráulico, fugas en componentes críticos y deficiencias en el conexionado eléctrico. Estas observaciones fueron fundamentales para evidenciar la necesidad de un plan de mantenimiento predictivo, ya que permitieron detectar tempranamente condiciones que podían comprometer la operatividad y seguridad del equipo.

El análisis de la matriz demuestra que la mayoría de los ítems del equipo (59%) tienen baja criticidad, lo que facilita su mantenimiento. Sin embargo, un 24% son críticos, difíciles de conseguir y pueden causar paradas prolongadas.

El análisis taxonómico y la identificación de los límites del equipo permitieron desarrollar una matriz de criticidad que identificó los componentes críticos con mayor probabilidad de falla. Al enfocarnos en estos ítems es posible monitorearlos de manera eficiente y recopilar datos precisos para una mejor gestión del mantenimiento.

La aplicación de técnicas predictivas resulta práctica para la gestión moderna de activos, ya que permite anticipar fallas, optimizar recursos y mejorar la toma de decisiones. La implementación de estas metodologías no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que también fomenta una cultura proactiva en el mantenimiento, asegurando un alto nivel de confiabilidad y sustentabilidad en entornos industriales y académicos.

Referencias

- Akinlabi, E., & Mahamood, R. (2020). Solid-State Welding: Friction and Friction Stir Welding Processes (1st ed.). Springer Cham. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-37015-2>
- Aldana Rodríguez, D. (2017). Aplicación de la termografía infrarroja como método de inspección no destructivo para el mantenimiento predictivo del proceso de extrusión de tubería en PVC. [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60891>.
- American society of mechanical engineers (ASME) Section V:2021. Examen no destructivo (2021 ed.) <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-v-bpvc-section-v-nondestructive-examination/2021/print-book>.
- Corporation Noria (2024- 06-21). Utilizando el color como una prueba de campo. Análisis de aceite.<https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/utilizando-el-color-como-una-prueba-de-campo/>
- Faustino Molina, K. J. (2022). Diseño y puesta a punto de un equipo de soldadura por fricción rotacional. [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia sede Tunja]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/8854>
- González López, D. A. (2023). Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para los equipos de la línea LSB del centro de economía circular de la empresa SKF LATIN TRADE SAS. Bogotá. [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás] Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/11634/49250>
- International Organization for Standardization (ISO) 14224:2016. Petroleum, petrochemical and natural gas industries. International Organization for Standardization and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Third edition. <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- International Organization for Standardization (ISO) 18434-1:2008. Condition monitoring and diagnostics of machines "Thermography ". International Organization for Standardization and exchange of reliability and maintenance data for equipment. <https://www.iso.org/standard/41648.html>

- León Rodríguez, M. &. (2017). Diseño del programa de mantenimiento preventivo para las cajas laminadas del Tren 3 de laminación en la empresa Gerdau Diaco - Planta Tuta. [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia sede Tunja]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2226>
- National Electrical Testing Association. (ANSI/NETA ATS:2025). Especificaciones de Pruebas Aceptadas para Sistemas y Equipos de Distribución de Potencia eléctrica. (2025 ed.). <https://www.netaworld.org/standards/ansi-neta-ats>
- Nunes, P., Santos, J., & Rocha, E. (2023). Challenges in predictive maintenance A review of University of Aveiro. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 1(40). Pág. (53-67). www.elsevier.com/locate/cirpj
- Olarte C., W., Botero Arbeláez, M., & Cañon Zabaleta, B. (2010). Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. Scientia Et Technica, 2(45). <https://doi.org/10.22517/23447214.355>
- Pérez Rondón, F. A. (2021). Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial. (1a ed.). Ediciones USTA. <https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/f516cd17-2f00-48d9-b7aa-b49a3e72016a/content>

Anexos

Anexo A. Características del desempeño del motor de 6 Hp.

PERFORMANCE DATA / CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO

Power Potencia (HP)	(kW)	Frame Carcasa (IEC)	Speed Velocidad (rpm)	Current Intensidad Nominal				Torque Cupla			Efficiency Rendimiento η%			Power Factor Factor de Potencia cos φ			Service Factor Factor de Servicio	GD ² Rotor Del Rotor (Kgm ²)	Weight Peso (Kg)
				220 V		380 V		Cn (Kgm)	Cp/Cn (%)	Cmáx/Cn (%)	50%	75%	100%	50%	75%	100%			
				In (A)	Ia (A)	In (A)	Ia (A)												
2 POLES - 60 Hz / 2 POLOS - 60 Hz																			
1/6	0,12	56a	3370	0,75	2,9	0,43	1,7	0,036	310	240	44,0	53,0	58,0	0,57	0,67	0,74	1,15	0,0007	3,3
1/4	0,18	56b	3345	1,06	4,5	0,61	2,6	0,053	280	280	45,0	55,0	60,0	0,59	0,69	0,76	1,15	0,0007	3,4
1/3	0,25	63a	3360	1,14	5,3	0,66	3,1	0,07	270	245	62,0	69,0	71,0	0,57	0,71	0,80	1,15	0,0014	4,9
1/2	0,37	63b	3370	1,62	7,7	0,93	4,4	0,106	295	260	68,0	72,5	73,0	0,63	0,75	0,82	1,15	0,0014	4,9
3/4	0,55	71a	3410	2,31	12,2	1,33	7,0	0,16	270	250	64,0	73,0	75,0	0,62	0,75	0,84	1,15	0,0022	9,0
1	0,75	71b	3410	2,96	18,3	1,71	10,6	0,21	280	270	68,0	76,0	77,0	0,66	0,79	0,85	1,15	0,0025	10,0
1,5	1,1	80a	3430	4,33	28,2	2,50	16,3	0,31	280	270	73,0	78,0	78,5	0,67	0,79	0,86	1,15	0,0048	13,5
2	1,5	80b	3425	5,43	36,0	3,14	20,8	0,42	300	280	78,0	80,5	81,0	0,73	0,84	0,88	1,15	0,0056	15,0
3	2,2	90S	3480	8,29	62,4	4,79	36,0	0,62	310	300	75,0	79,5	81,5	0,68	0,80	0,86	1,15	0,0100	20,0
4	3	90L	3470	10,8	88,3	6,23	51,0	0,83	335	310	78,0	81,5	82,5	0,71	0,82	0,87	1,15	0,0120	23,5
5	3,7	100L	3470	13,0	104	7,52	60,0	1,03	300	300	81,5	84,0	84,5	0,75	0,84	0,88	1,15	0,0170	29,0
6	4,5	112Ma	3500	15,3	133	8,82	76,5	1,23	300	310	83,0	85,0	85,5	0,75	0,85	0,89	1,15	0,0320	40,0
7,5	5,5	112M	3500	19,4	142	11,7	82,2	1,53	310	320	84,0	86,5	86,5	0,74	0,83	0,87	1,15	0,0322	41,0
10	7,5	132S	3520	25,4	187	14,7	108	2,1	310	300	83,0	86,5	87,5	0,78	0,85	0,87	1,15	0,0640	54,0
12,5	9,2	132Ma	3500	31,0	243	17,3	140	2,6	300	270	83,0	87,0	88,0	0,80	0,87	0,89	1,15	0,0750	67,0
15	11	132M	3515	36,5	310	21,1	179	3	340	300	85,0	89,0	89,5	0,80	0,87	0,89	1,15	0,0836	71,0
20	15	160Ma	3550	48,9	400	28,2	231	4,1	320	300	85,5	88,0	89,0	0,84	0,88	0,89	1,15	0,1750	93,0
25	18,5	160M	3540	58,8	516	34,0	298	5	300	280	86,0	88,5	89,5	0,88	0,91	0,92	1,15	0,2360	107
30	22	160L	3540	68,7	587	39,7	339	6,1	310	300	87,0	89,0	89,5	0,90	0,91	0,92	1,15	0,3100	125
40	30	200M	3550	95,7	658	55,2	380	8,1	330	310	88,0	90,0	90,2	0,85	0,88	0,89	1,15	0,6500	208
50	37	200L	3550	117,6	856	67,9	494	10,1	340	315	89,0	90,8	91,5	0,86	0,89	0,90	1,15	0,7200	247
60	45	225S/M	3545	136,6	1140	78,8	658	12,1	280	240	87,0	91,2	92,5	0,84	0,87	0,88	1,0	1,060	270
75	55	225S/M	3545	173,9	1438	100,4	830	15,2	320	305	88,0	91,8	92,8	0,86	0,89	0,90	1,0	1,300	314
100	75	250S/M	3550	232,8	1625	134,4	938	20	205	270	90,4	92,5	93,5	0,86	0,88	0,89	1,0	1,950	420
125	90	280S/M	3550	290,3	2026	167,6	1170	25	220	270	90,5	93,0	93,7	0,82	0,87	0,89	1,0	2,800	540
150	110	280S/M	3550	347,3	2425	200,5	1400	30	200	230	90,7	93,3	94,0	0,83	0,87	0,89	1,0	3,400	576
175	132	315S/M	3570	405,1	3031	233,9	1750	35	210	240	91,7	93,5	94,0	0,84	0,88	0,89	1,0	5,100	703
200	150	315S/M	3570	456,9	3327	263,8	1921	40	205	230	92,0	93,5	94,2	0,86	0,89	0,90	1,0	6,100	800
250	185	315S/M	3570	576,9	4027	333,1	2325	50	210	230	92,4	93,7	94,3	0,85	0,88	0,89	1,0	7,100	900
300	220	355M/L	3575	694,5	5194	401,0	2999	60	205	220	91,0	93,3	94,0	0,86	0,88	0,89	1,0	7,500	1270
350	225	355M/L	3575	800,4	6386	462,2	3687	70	200	210	91,5	93,5	94,1	0,88	0,90	0,90	1,0	8,500	1390
400	295	355M/L	3580	912,9	7739	527,1	4468	80	210	220	91,5	93,5	94,3	0,89	0,90	0,90	1,0	10,000	1460
450	330	355M/L	3580	1022	8688	590	5016	90	220	230	92,0	94,0	94,5	0,89	0,90	0,90	1,0	11,000	1500

Anexo B. planos generales del equipo de soldadura por fricción rotacional (Faustino Molina , 2022, pág. 90).

