

**PROYECTO NORIA FASE II: SIMPLIFICACIÓN DE LA TOMA DE
DECISIONES EN EL PROCESO DE MONITOREO DE CONDICIÓN.**

ELISEO ELIAS PEREZ ZULETA



**PRÁCTICAS PRESENTADA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2025**

**PROYECTO NORIA FASE II: SIMPLIFICACIÓN DE LA TOMA DE
DECISIONES EN EL PROCESO DE MONITOREO DE CONDICIÓN.**

ELISEO ELIAS PEREZ ZULETA

**PRÁCTICAS PRESENTADA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

DIRECTOR

SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUAREZ

MAGISTER EN INGENIERÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

A Dios le agradezco por nunca dejarme solo, incluso en los momentos que consideré difíciles. También a mi núcleo familiar, quienes siempre estuvieron a mi lado, brindándome su apoyo incondicional.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a mi madre, la mujer que me inspiró cada día a seguir luchando por esta meta. Ella siempre fue un pilar fundamental, colocándose como prioridad en su vida y brindándome el amor y la fuerza necesarios para seguir adelante. Mi madre, sin lugar a duda, ha sido mi mayor fuente de motivación.

A mi hermano, por su alegría contagiante y por ser una persona digna de admirar. Él estuvo a mi lado durante todo mi proceso formativo, siempre dispuesto a ofrecerme su apoyo y consejos, siendo una guía valiosa en los momentos de toma de decisiones importantes.

A mi novia, que, a pesar de la distancia, fue consciente de cada paso que di en este camino. Gracias por ver en mí cosas que nadie más fue capaz de ver, por tu amor, apoyo y comprensión. Eres una mujer admirable que me acompañó y me ayudó a lo largo de este proceso de formación profesional.

Finalmente, quiero agradecer a toda mi familia, que ha sido la base de los principios que guían mi vida. En especial, agradezco a un primo cercano, a quien considero mi ídolo, por haberme inspirado a elegir esta profesión. Gracias a todos mis seres queridos por apoyarme, por animarme a estudiar, por ayudarme a salir adelante y por acompañarme en esta aventura de explorar una nueva ciudad y cultura.

A todos ustedes, les debo este logro.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en el desarrollo de este proyecto y en mi formación profesional. Sin su apoyo y aliento, este logro no habría sido posible.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi madre, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por tu amor incondicional, por ser mi guía en cada etapa de este camino y por estar siempre a mi lado, brindándome el apoyo necesario para seguir adelante. Tu dedicación y sacrificio han sido clave para que hoy pueda alcanzar esta meta.

A mi hermano, quiero agradecerte por tu alegría y energía contagiante. Siempre has sido una persona admirable y una gran fuente de apoyo. Gracias por acompañarme en todo el proceso, por ser un pilar en los momentos de incertidumbre y por brindarme tu orientación en las decisiones más importantes.

A mi novia, gracias por tu apoyo constante, por ser consciente de cada paso que daba y por estar a mi lado, incluso a la distancia. Tu capacidad para ver en mí lo que otros no pueden ver, tu comprensión y amor incondicional, me han dado la fortaleza necesaria para continuar. Eres una persona increíble, y te agradezco profundamente por tu paciencia y por acompañarme en cada etapa de este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia, quienes siempre han sido el pilar sobre el que me he apoyado. Gracias por su amor, su apoyo incondicional y por haberme guiado con sus principios y valores, los cuales me han acompañado a lo largo de mi vida.

No puedo dejar de mencionar a la Universidad Pontificia Bolivariana, que ha sido la institución que me ha permitido crecer como profesional y como persona. Agradezco a todos los docentes, compañeros y personal administrativo por su compromiso, dedicación y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar mis objetivos. Gracias por ofrecerme una formación integral que ha sido fundamental para mi desarrollo académico y profesional.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por su apoyo incondicional y por estar siempre presentes en este proceso.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	12
II.	INFORMACIÓN SOBRE LA EMPRESA.....	13
	A. Generalidades de la empresa.....	13
	B. Actividad Económica, Productos y Servicios.....	13
	C. Organigrama Del Departamento De Mantenimiento	15
	D. Visión	15
	E. Misión	15
	F. Historia.....	15
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
IV.	JUSTIFICACIÓN	18
V.	OBJETIVOS	19
	A. OBJETIVO GENERAL.....	19
	B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
VI.	MARCO TEÓRICO.....	20
	A. Mantenimiento	20
	B. Mantenimiento Correctivo	20
	C. Mantenimiento Preventivo.....	20
	D. Mantenimiento Predictivo.....	20
	E. Importancia de la Lubricación	20
	F. Contaminación de Lubricantes	20
	G. Tecnologías de Monitoreo en la Minería	21
	H. Seguridad Operacional.....	21
	I. Gestión del Riesgo y Toma de Decisiones Basadas en Datos.....	21
	J. Noria Corporation	21
	K. AMT.....	21
	L. Modelado de Datos	22
	M. Viscosímetro	22
	N. Espectrómetro	22
	O. FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier).....	22
	P. Contador de Partículas	22

Q. Factores Principales	22
R. Equipos Mineros Evaluados	23
1) Equipos de Acarreo	23
2) Equipos de Cargue	24
3) Tractores de Orugas	25
4) Equipos de Soporte sobre Llantas.....	26
VII. METODOLOGÍA.....	28
A. Toma de Muestras	28
B. Análisis de muestras	29
C. Recopilación y organización de datos.....	30
D. Procesamiento y preparación de los datos en Excel	30
E. Desarrollo e implementación en Power BI.....	30
F. Aplicación de reglas de análisis.....	30
G. Capacitación y aprendizaje de procesos	31
H. Validación y evaluación de resultados	31
VIII. ACTIVIDADES.....	32
IX. DESARROLLO	33
A. Inducción al problema y contextualización	33
B. Unión de matrices en Excel	34
C. Bosquejo de tablero dinámico.....	35
1) Retroalimentación de Dashboard en Excel.....	38
D. Macro en VBA para combinaciones	39
E. Modelamiento de datos	43
1) Transformación de la matriz a datos procesables	44
2) Tablas de soporte.....	46
F. Montaje en Power BI	50
1) Nuevas columnas	51
G. Tablero o Dashboard.....	51
H. Validación de recomendaciones.....	58
1) Validación 1	58

2) Validación 2	60
3) Validación 3	61
X. CONCLUSIONES	64
XI. RECOMENDACIONES.....	65
REFERENCIAS.....	66

FIGURAS

Fig. 1. Puerto Bolívar Cerrejon.....	13
Fig. 2. Camión carbonero Cerrejon.....	14
Fig. 3. Organigrama del departamento de mantenimiento.....	15
Fig. 4. Operación minera Cerrejon	24
Fig. 5. Equipo de cargue	25
Fig. 6. Equipo cargador frontal	25
Fig. 7. Equipo auxiliar sobre llantas	26
Fig. 8. Tractor de llantas	27
Fig. 9. Hangares de talleres permanentes.....	28
Fig. 10. Toma de muestra de aceite en campo	29
Fig. 11. Matriz de combinaciones.....	33
Fig. 12. Condiciones de los elementos.....	34
Fig. 13. Unión de recomendaciones y combinaciones.....	35
Fig. 14. Filtro de modos de falla.....	36
Fig. 15. Filtro para elementos de salud.....	36
Fig. 16. Filtros para elementos de contaminación y desgaste.....	37
Fig. 17. Primer bosquejo de funcionamiento para dashboard.....	38
Fig. 18. Código de VBA	40
Fig. 19. Complemento de código VBA	42
Fig. 20. Combinación de matrices para modelamiento de datos	43
Fig. 21. Combinaciones.	44
Fig. 22. Total de combinaciones con su respectivo modo de falla.	45
Fig. 23. Tablas de soporte	47
Fig. 24. Tabla de recomendaciones.....	48
Fig. 25. Tabla de modos de falla	49
Fig. 26. Conexiones dentro de Power BI.....	50
Fig. 27. Soporte para las condiciones de los elementos.....	51
Fig. 28. Tablero completo	52
Fig. 29. Segmentador de Componentes	52
Fig. 30. Segmentador y contador de modos de fallas.	53
Fig. 31. Segmentador de elementos de salud.....	53
Fig. 32. Funcionamiento de segmentador	54
Fig. 33. selección de elemento y su condición.....	54
Fig. 34. Listado de modos de falla.....	55
Fig. 35. Modos de falla después de filtrar los elementos.....	56
Fig. 36. Recomendaciones según modo de falla.....	57
Fig. 37. Prueba de validación o comparación 1.....	58
Fig. 38. validación 1. Trujillo,G. (2017), p.194.....	59

Fig. 39. Prueba de validación o comparación 2.	60
Fig. 40. validación 2. Trujillo, G. (2017), p.185.	61
Fig. 41. Prueba de validación o comparación 3.	62
Fig. 42. validación 3. Trujillo, G. (2017), p.166.	63



RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: PROYECTO NORIA FASE II: SIMPLIFICACIÓN DE LA TOMA DE DECISIONES EN EL PROCESO DE MONITOREO DE CONDICIÓN.

AUTOR(ES): Eliseo Elias Perez Zuleta

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Sergio Andrés Gómez Suarez

RESUMEN

El Proyecto Noria aborda la necesidad de simplificar y estandarizar la toma de decisiones para los analistas encargados del monitoreo de aceites en equipos mineros, facilitando el análisis y ampliando el soporte en la identificación de problemas potenciales. Con este propósito, se desarrolló un modelo simplificado de matriz que organiza los datos de monitoreo y se presenta de manera visual e interactiva en Power BI. Para transformar y preparar los datos necesarios, se utilizó una macro en Excel que permitió realizar combinaciones específicas, pero sin formar parte del modelo final. El tablero resultante permite a los analistas seleccionar los elementos presentes en las muestras de aceite y, de manera dinámica, genera posibles modos de falla asociados y recomendaciones específicas a tomar en cuenta. Actualmente, esta herramienta se encuentra en fase de prueba con los analistas y se proyecta su implementación para otros miembros del personal de mantenimiento. Este enfoque busca optimizar el monitoreo, estandarizar las acciones correctivas y mejorar la confiabilidad de equipos mineros esenciales como camiones de acarreo, palas hidráulicas, tractores y motoniveladoras, prolongando su vida útil y reduciendo costos asociados al mantenimiento reactivo.

PALABRAS CLAVE:

Toma de decisiones, Monitoreo de aceites, Equipos mineros, Modos de falla, Power BI.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: NORIA PHASE II PROJECT: SIMPLIFICATION OF DECISION-MAKING DECISIONS IN THE CONDITION MONITORING PROCESS.

AUTHOR(S): Eliseo Elias Perez Zuleta

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Sergio Andrés Gómez Suarez

ABSTRACT

The Noria Project addresses the need to simplify and standardize decision-making for analysts responsible for oil condition monitoring in mining equipment, facilitating analysis and enhancing support in identifying potential issues. To achieve this, a simplified matrix model was developed to organize monitoring data and present it visually and interactively in Power BI. A macro in Excel was used to transform and prepare the necessary data by performing specific combinations, though it is not part of the final model. The resulting dashboard allows analysts to select the elements present in oil samples and dynamically generates associated potential failure modes and specific recommendations to consider. Currently, this tool is in the testing phase with analysts, and its implementation is projected to extend to other maintenance personnel. This approach aims to optimize monitoring, standardize corrective actions, and enhance the reliability of critical mining equipment such as haul trucks, hydraulic shovels, tractors, and motor graders, prolonging their lifespan and reducing costs associated with reactive maintenance.

KEYWORDS:

Decision-making, oil monitoring, mining equipment, failure modes, Power BI..

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

I. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo se ha convertido en una estrategia fundamental para garantizar la eficiencia y continuidad operativa en industrias intensivas en activos como la minería. En este contexto, el Proyecto NORIA de Cerrejón (empresa dedicada a la extracción de carbón a cielo abierto) ha sido pionero en la implementación de tecnologías de monitoreo de condición, cuyo principal objetivo es identificar y anticipar fallos en los equipos mineros críticos mediante el análisis de datos en tiempo real y el uso de inteligencia artificial (IA). La primera fase del proyecto se realizó en otra práctica empresarial y sentó las bases para la captura y procesamiento de datos, mejorando considerablemente la capacidad de diagnóstico de fallos potenciales.

En la Fase II del Proyecto NORIA, el enfoque se amplía hacia la simplificación de la toma de decisiones en los procesos de monitoreo de condición. Esta fase no solo busca reducir el tiempo que los analistas destinan a la gestión de los datos, sino también estandarizar y automatizar las tareas generadas a partir de las órdenes de trabajo (OT). El propósito es liberar tiempo valioso para actividades que requieran un mayor análisis técnico, a la vez que se asegura que las respuestas operativas frente a modos de fallos identificados sean uniformes y consistentes.

Esta práctica empresarial tiene como objetivo principal optimizar la toma de decisiones en el proceso de monitoreo de condición, simplificando las tareas de los analistas y mejorando la gestión de la ejecución a través de la estandarización de procedimientos. De este modo, se espera no solo reducir los tiempos de gestión, sino también garantizar una mayor precisión y consistencia en la respuesta operativa, contribuyendo a una operación más eficiente y con menos tiempo de inactividad.

II. INFORMACIÓN SOBRE LA EMPRESA

A. Generalidades de la empresa

Carbones del Cerrejón Limited es una de las operaciones mineras de exportación de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, un importante actor de la economía en Colombia y motor de La Guajira, región en la que concentra su actividad productiva. Esta empresa cuenta con tres sucursales o agencias las cuales se encuentran en Barranquilla cuya dirección es: Cra 53 # 106-280 Piso 11 y 12, la Mina (Albania -La Guajira). Las generalidades de la empresa están documentadas con la información suministrada por la misma (Cerrejón, 2024).

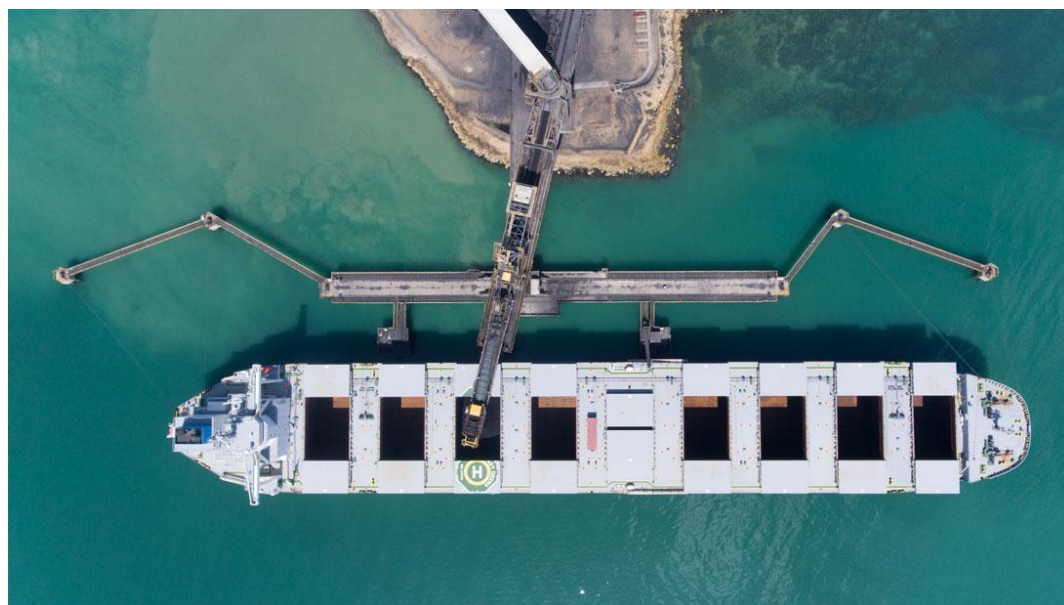


Fig. 1. Puerto Bolívar Cerrejon

B. Actividad Económica, Productos y Servicios

La principal actividad económica de Carbones de Cerrejón abarca todas las etapas del proceso del carbón, desde su exploración y extracción hasta su transporte, carga y exportación. Una gran parte del carbón producido se destina a la generación de energía eléctrica, mientras que un menor porcentaje se utiliza en procesos industriales y calefacción doméstica.

Aproximadamente el 60% del carbón extraído se tritura y se transporta en tren hacia sistemas de cargue directo, que depositan el mineral directamente en los buques carboneros para su envío a distintos destinos. El 40% restante es almacenado siguiendo criterios de calidad, como el poder calorífico, para ser procesado posteriormente y ajustado a las especificaciones requeridas por los clientes. Gracias al cumplimiento en los tiempos de entrega y la calidad del producto, Cerrejón se ha consolidado como un proveedor confiable, manteniendo una cartera sólida de clientes por más de dos décadas. Antes de cargar el carbón en los trenes, se realizan análisis en laboratorio

para verificar que cumpla con los estándares exigidos, y en el transporte se compacta y humedece el material para minimizar la dispersión de partículas al ambiente, contribuyendo así a la protección medioambiental.



Fig. 2. Camión carbonero Cerrejon

C. Organigrama Del Departamento De Mantenimiento

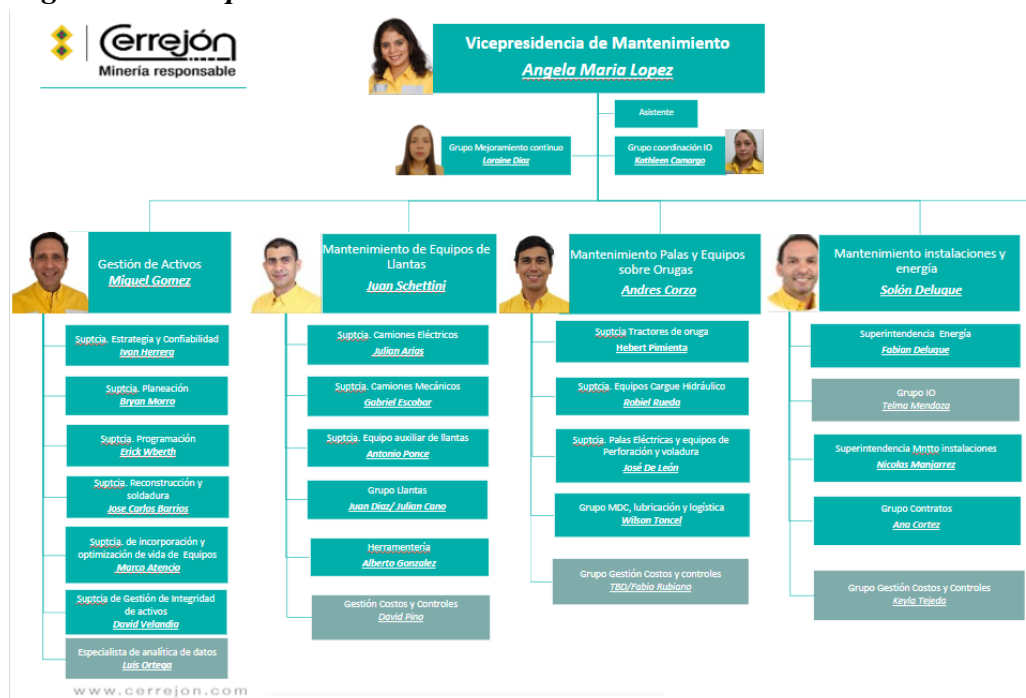


Fig. 3. Organigrama del departamento de mantenimiento

D. Visión

“Ser un productor y exportador de carbón referente a nivel mundial y un aliado clave para el progreso y desarrollo sostenible de La Guajira” (Cerrejón, 2024, párr. 1).

E. Misión

“Nuestra misión es producir y exportar carbón de manera eficiente, confiable y rentable mientras nos esforzamos por cumplir con los más altos estándares en seguridad, salud, medio ambiente y ética corporativa y contribuir al progreso de nuestra gente, nuestras comunidades vecinas y La Guajira” (Cerrejón, 2024, párr. 1).

F. Historia

Según Historia Cerrejón (2024) en:

- 2024 se plantaron 3,4 millones de árboles nativos y se rehabilitaron más de 5.000 hectáreas de terreno. Estas acciones contribuyeron a la creación de un corredor de biodiversidad que abarca más de 25.000 hectáreas, conectando la Sierra Nevada de Santa Marta con la Serranía del Perijá
- 2023 se entregaron 300 millones de litros de agua a 164 comunidades en La Guajira mediante la iniciativa conocida como el "Tren del Agua".
- 2022 Glencore completó la adquisición de Cerrejón.

- 2021 desde el inicio del programa en 2014, se alcanzó la entrega acumulada de 200 millones de litros de agua potable a las comunidades cercanas a las operaciones mineras.
- 2020 Claudia Bejarano asumió como la primera mujer en ocupar la presidencia de la empresa, y casi el 50% del Comité Directivo estaba compuesto por mujeres.
- 2019 en colaboración con el Instituto Alexander von Humboldt, se estableció el primer laboratorio de bosque seco tropical en el Caribe colombiano, que incluye una megaparcela de 10 hectáreas para monitorear este ecosistema.
- 2014 se inauguró el segundo cargador de buques en Puerto Bolívar, mientras que Bahía Portete fue declarada Parque Nacional Natural.
- 2002 Intercor se fusionó con Carbones del Cerrejón S.A., lo que dio lugar al cambio de razón social a Carbones del Cerrejón LLC, ahora conocido como Carbones del Cerrejón Limited
- 1990 se implementó un programa de rehabilitación de tierras impactadas por la minería, antes de que esta práctica fuera exigida por ley en el país.
- 1985 se introdujo un sistema de cargue directo de carbón mediante bandas en Puerto Bolívar, incluso antes de que esta medida fuera obligatoria por la legislación colombiana.
- 1984 el tren recorrió por primera vez 150 kilómetros, transportando 8.500 toneladas de carbón desde La Mina hasta Puerto Bolívar.
- 1976 se firmó un contrato de asociación con una vigencia inicial de 33 años entre Carbones Colombianos S.A., CARBOCOL e INTERCOR, para explotar la Zona Norte de El Cerrejón.
- 1975 el Gobierno colombiano abrió una licitación internacional para la explotación de 32.000 hectáreas carboníferas, adjudicándola a INTERCOR, filial de Exxon Corporation, actualmente Exxon Mobil.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Cerrejón, el uso eficiente de los aceites lubricantes es crítico para mantener el rendimiento óptimo de los equipos y reducir fallos inesperados. Adicionalmente, la falla en la toma de decisiones sobre variaciones en las características de los aceites, como su viscosidad, degradación o niveles de contaminación, puede llevar a acciones incorrectas o tardías en el mantenimiento preventivo. Esto impacta directamente en la disponibilidad de los equipos y aumenta los costos operativos. Actualmente, los analistas carecen de una base de datos que consolide reglas y recomendaciones específicas para cada equipo y/o componente, dificultando el monitoreo y la evaluación de los aceites. La falta de una estructura organizada para la gestión de esta información genera un riesgo elevado de no identificar a tiempo posibles fallos en los sistemas, lo cual puede resultar en un aumento en el tiempo de inactividad, costos de mantenimiento no planificados, reducción en la vida útil de los equipos, y una disminución general en la eficiencia operativa. Esto, a su vez, afecta la producción de Cerrejón, incrementando costos operativos y afectando la competitividad de la empresa. La carencia de un sistema eficiente para gestionar la condición del aceite y su relación con los modos de falla en los equipos representa un obstáculo significativo para la optimización de los procesos de mantenimiento, además de limitar la capacidad de los analistas para tomar decisiones informadas y oportunas que garanticen el funcionamiento continuo de los equipos.

IV. JUSTIFICACIÓN

Implementar una metodología basada en la metodología NORIA permitirá a Cerrejón contar con una base de datos integrada que regule el uso de aceites, facilitando a los analistas la toma de decisiones, estandarizando las recomendaciones que permitan llevar a condiciones aceptables los aceites en cada tipo de equipo. Esto no solo optimizará el rendimiento de los equipos, sino que también reducirá costos relacionados con reparaciones imprevistas, mejorando a la vez la confiabilidad operativa en su conjunto.

V. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Simplificar la toma de decisiones de los analistas, reducir el tiempo de gestión de los analistas liberando tiempo para otras actividades que requieren mayor análisis. Estandariza las tareas requeridas en las OT. Mejora la gestión de la ejecución al asegurar que las tareas siempre sean las mismas por modo de falla identificados en el monitoreo de condición.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reducir los tiempos de respuesta ante la detección de anomalías mediante la implementación de análisis predictivo y mantenimiento basado en condición, disminuyendo la ocurrencia de fallas inesperadas y mejorando la disponibilidad de los equipos.
- Mejorar la precisión en la toma de decisiones mediante la simplificación de los flujos de información y la reducción de la complejidad en los procesos de análisis de datos, asegurando que las decisiones sean informadas y basadas en datos actualizados y confiables

VI. MARCO TEÓRICO

A. Mantenimiento

Es el conjunto de actividades y procedimientos destinados a preservar o restaurar un equipo o sistema a su estado de funcionamiento óptimo. Su objetivo principal es asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los activos físicos, minimizando las interrupciones y costos operativos (Smith, 2018).

B. Mantenimiento Correctivo

Se refiere a las acciones que se llevan a cabo para reparar un equipo o sistema una vez que ha fallado. Este tipo de mantenimiento se caracteriza por ser reactivo, ya que actúa después de la ocurrencia de una falla, lo que puede resultar en tiempos de inactividad prolongados y costos elevados (Smith, 2018).

C. Mantenimiento Preventivo

Consiste en la realización de tareas de mantenimiento planificadas y programadas para evitar la ocurrencia de fallas en los equipos. Este tipo de mantenimiento se basa en la frecuencia de uso o tiempo de operación, y busca prevenir problemas mediante la inspección, lubricación, ajuste y reemplazo de partes antes de que ocurran fallas (Smith, 2018).

D. Mantenimiento Predictivo

Es un enfoque basado en la condición real de los equipos, utilizando datos de sensores, monitoreo en tiempo real y análisis predictivo para anticipar fallas antes de que ocurran. Su objetivo es optimizar los intervalos de mantenimiento y reducir los costos asociados a paradas no planificadas, mejorando la eficiencia operativa y la vida útil de los activos (Mobley, 2002).

E. Importancia de la Lubricación

La lubricación es un aspecto crítico del mantenimiento de equipos, ya que reduce la fricción y el desgaste entre las partes móviles, mejorando la eficiencia y la vida útil de los componentes. Un sistema de lubricación adecuado contribuye significativamente al rendimiento y la fiabilidad de los equipos (Noria Corporation, n.d.).

F. Contaminación de Lubricantes

La contaminación de los lubricantes es una de las principales causas de fallas en los equipos. La presencia de partículas, agua o productos químicos en los lubricantes puede acelerar el desgaste de los componentes y provocar fallas prematuras. El monitoreo de la condición de los lubricantes, a través de análisis de aceite, es una parte esencial del mantenimiento predictivo, ya

que permite identificar problemas antes de que afecten el funcionamiento del equipo (Noria Corporation, n.d.).

G. Tecnologías de Monitoreo en la Minería

La integración de tecnologías de monitoreo de condición, como sensores de vibración, temperatura y análisis de lubricantes, es cada vez más común en la minería moderna. Estas tecnologías permiten a las empresas mineras como Cerrejón no solo mantener sus equipos en óptimas condiciones, sino también optimizar el uso de recursos y minimizar el impacto ambiental (Cerrejón, n.d.).

H. Seguridad Operacional

La seguridad es una prioridad en la minería. La capacidad de predecir fallas y planificar el mantenimiento adecuadamente no solo mejora la eficiencia, sino que también reduce los riesgos de accidentes y fallas catastróficas (Cerrejón, n.d.).

I. Gestión del Riesgo y Toma de Decisiones Basadas en Datos

En un entorno minero, la gestión del riesgo es esencial. La toma de decisiones basada en datos permite identificar y mitigar riesgos antes de que se conviertan en problemas graves, lo cual es un objetivo central del proyecto Noria (Cerrejón, n.d.).

J. Noria Corporation

Es una compañía establecida en 1997 con el propósito exclusivo de apoyar a las organizaciones de usuarios en el fortalecimiento de la confiabilidad de sus máquinas, mediante la adopción de prácticas optimizadas en lubricación y análisis de aceite. A lo largo de más de dos décadas, su enfoque ha transformado la manera en que las organizaciones gestionan y supervisan los lubricantes, promoviendo niveles superiores de confiabilidad y seguridad (Noria Corporation, n.d.).

K. AMT

Es una herramienta de gestión de activos, un software sofisticado diseñado para la gestión de activos, especialmente en la industria minera. Este software se utiliza en la industria minera por empresas como Caterpillar, Komatsu y Hitachi para supervisar flotas de equipos de minería en diversos sitios globales. AMT está diseñado con tecnologías avanzadas para evolucionar desde un sistema de gestión de mantenimiento computarizado (CMMS) a una herramienta de soporte de decisiones para la gestión de activos que integra las últimas metodologías (RPM Global, n.d.).

L. Modelado de Datos

Es un proceso fundamental en la gestión y análisis de información, que consiste en estructurar, organizar y representar datos de manera lógica y significativa. Su propósito principal es establecer cómo se relacionan los datos entre sí y cómo serán almacenados y gestionados en un sistema informático, lo que permite una gestión eficiente y una mejor toma de decisiones basada en datos precisos (Kimball & Ross, 2013).

M. Viscosímetro

Es un instrumento utilizado para medir la viscosidad de un fluido, es decir, su resistencia al flujo bajo una fuerza aplicada. Su propósito es determinar la capacidad de un líquido para moverse dentro de un sistema, lo que es crucial en procesos industriales donde se requiere controlar la calidad y consistencia de materiales como aceites, combustibles, lubricantes y productos químicos (ASTM International, n.d.).

N. Espectrómetro

Es un dispositivo que mide la interacción de la luz con la materia, separando las distintas longitudes de onda que componen un espectro electromagnético. Se utiliza para analizar la composición química y física de muestras en campos como la química, la física y la investigación científica (Thermo Fisher Scientific, n.d.).

O. FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier)

La espectroscopía FTIR es una técnica analítica utilizada para identificar y analizar compuestos químicos mediante la absorción de radiación infrarroja. El espectrómetro FTIR mide cómo una muestra absorbe distintas frecuencias de luz infrarroja, generando un espectro único que actúa como una "huella digital" del material (PerkinElmer, n.d.).

P. Contador de Partículas

Es un dispositivo utilizado para medir la cantidad y el tamaño de partículas suspendidas en un gas o líquido. Es fundamental en industrias como la farmacéutica, electrónica y automotriz, donde se requiere controlar la contaminación y asegurar la calidad de los productos (ISO, 2015).

Q. Factores Principales

En el marco del monitoreo de la condición del aceite, se consideran tres aspectos fundamentales para una evaluación integral de su desempeño: la salud del aceite, su condición y el desgaste asociado.

- La salud del aceite se refiere a la integridad química y física del lubricante. Incluye la evaluación de parámetros como la viscosidad, el índice de acidez y la presencia de contaminantes, que pueden comprometer las propiedades del aceite. Un análisis detallado de la salud del aceite permite identificar cambios que podrían indicar la degradación prematura del lubricante, facilitando decisiones informadas sobre su reemplazo o tratamiento (Mobley, 2002).
- La contaminación del aceite se refiere a la presencia de partículas y sustancias externas que pueden afectar negativamente su rendimiento. Esto incluye agua, polvo, productos de combustión y otros contaminantes que ingresan al sistema. Un monitoreo constante de estos elementos es crucial para garantizar la pureza del lubricante y su capacidad de proteger los componentes internos. La contaminación puede acelerar el desgaste y disminuir la eficiencia de la lubricación, por lo que es fundamental mantenerla bajo control para prolongar la vida útil de los equipos y optimizar su funcionamiento (Noria Corporation, n.d.).
- El desgaste se refiere al deterioro de los componentes del equipo causado por fricción y otros factores mecánicos. El monitoreo del desgaste permite identificar patrones que podrían ser indicativos de problemas inminentes, lo que podría llevar a fallas catastróficas si no se aborda a tiempo. Analizar el desgaste en relación con la salud y condición del aceite proporciona una visión más completa del estado del sistema (ASTM International, n.d.).

La combinación de estos tres factores permite un análisis más profundo y contextualizado del estado del aceite y de los componentes del sistema. Al interrelacionar la salud, la condición y el desgaste, se puede establecer un modelo predictivo que no solo evalúe el estado actual del lubricante, sino que también anticipe posibles fallos o deterioros futuros. Este enfoque integral es fundamental para optimizar los programas de mantenimiento y garantizar la eficiencia operativa, contribuyendo a la prolongación de la vida útil de los equipos y a la reducción de costos asociados a reparaciones y paradas no planificadas (Smith, 2018).

R. Equipos Mineros Evaluados

El análisis de la condición del aceite, junto con los factores asociados a la salud, condición y desgaste, es aplicable a una variedad de equipos mineros que desempeñan un papel crítico en las operaciones del sector. Este enfoque se puede implementar en equipos involucrados en la extracción y transporte de minerales, tales como:

1) Equipos de Acarreo

Estos vehículos son fundamentales para el transporte de material mineral desde el punto de extracción hasta las instalaciones de procesamiento. Su operación en condiciones severas, como terrenos irregulares y sobrecargas, puede impactar significativamente el rendimiento del aceite lubricante, justificando la necesidad de un análisis constante (Cerrejón, n.d.).



Fig. 4. Operación minera Cerrejon

2) *Equipos de Cargue*

Los equipos de cargue frontal y palas, utilizados en la minería para cargar materiales en camiones o cintas transportadoras, operan en ciclos de trabajo exigentes y bajo condiciones ambientales adversas. El monitoreo de la condición del aceite en estos equipos es fundamental para identificar posibles fallas o anomalías, que pueden surgir debido al intenso esfuerzo mecánico y a la abrasividad del material manipulado. Este monitoreo permite anticipar problemas y realizar mantenimientos preventivos, asegurando así la eficiencia y confiabilidad de los equipos en el proceso de extracción y cargue de material (Cerrejón, n.d.; Noria

Corporation,n.d.).



Fig. 5. Equipo de cargue



Fig. 6. Equipo cargador frontal

3) *Tractores de Orugas*

Los tractores de orugas son esenciales en la minería por su capacidad para operar en terrenos difíciles. Sin embargo, su diseño los expone a condiciones que pueden afectar la

integridad del aceite lubricante, haciendo vital el análisis de su estado para garantizar la eficiencia operativa (Cerrejón, n.d.; Noria Corporation, n.d.).

4) Equipos de Soporte sobre Llantas

Los equipos auxiliares sobre llantas, como motoniveladoras y traíllas, también están expuestos a condiciones adversas durante su operación en terrenos rústicos. Estas condiciones pueden afectar negativamente el rendimiento y las propiedades del aceite utilizado en estos equipos, lo que resalta la necesidad de un monitoreo constante y sistemático. Mantener un control adecuado de los lubricantes es fundamental para garantizar la eficiencia operativa y la longevidad de los componentes de estas máquinas en condiciones exigentes (Cerrejón, n.d.; Noria Corporation, n.d.).



Fig. 7. Equipo auxiliar sobre llantas



Fig. 8. Tractor de llantas

VII. METODOLOGÍA

A. Toma de Muestras

En la fase inicial del proyecto Noria, se establece un enfoque centrado en el monitoreo de la condición del aceite, lo que implica una colaboración estrecha con el laboratorio de la empresa. Este vínculo es fundamental para asegurar la calidad y fiabilidad de los análisis realizados sobre los aceites utilizados en los equipos. Se llevan a cabo muestreos de aceite con una frecuencia específica, determinada según criterios de operación y mantenimiento. Esta metodología permite una evaluación continua del estado del lubricante y, por ende, del desempeño del equipo.

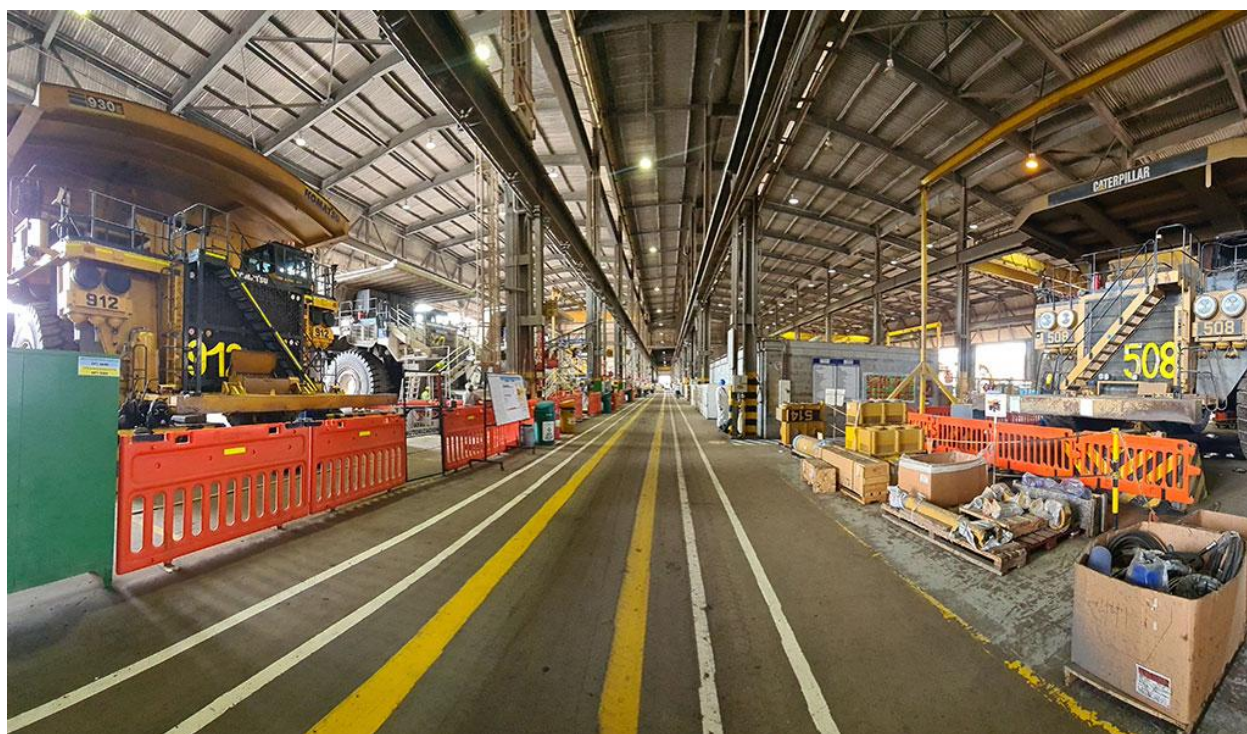


Fig. 9. Hangares de talleres permanentes

Es crucial considerar que el proceso de toma de muestras de aceite es susceptible a variaciones que podrían comprometer la calidad de los resultados. Una mala práctica en este procedimiento puede llevar a diagnósticos erróneos sobre el estado del lubricante, con consecuencias negativas para el rendimiento del equipo y la planificación del mantenimiento. Por ello, es vital implementar protocolos rigurosos para la recolección de muestras, garantizando que estas sean representativas del estado real del aceite en operación.

El monitoreo efectivo de la condición del aceite contribuye a la detección temprana de problemas mecánicos y juega un papel clave en la optimización del ciclo de vida del lubricante.

Esto se traduce en una reducción de costos operativos y en la mejora de la eficiencia general del equipo, lo que resulta esencial para el éxito a largo plazo del proyecto.



Fig. 10. Toma de muestra de aceite en campo

B. Análisis de muestras

Este proceso implica la extracción controlada de muestras de lubricante directamente desde los equipos, siguiendo protocolos estandarizados que aseguren la representatividad y precisión de los datos obtenidos.

Una vez recolectadas, las muestras de aceite son transportadas al laboratorio de análisis, donde se someterán a una serie de pruebas especializadas para determinar sus propiedades fisicoquímicas y evaluar posibles signos de desgaste, contaminación o degradación.

Una vez finalizados todos los análisis de laboratorio, los resultados obtenidos se cargan en la aplicación Trakka, una plataforma utilizada por los analistas para la gestión del mantenimiento basado en condición. Trakka permite consolidar la información en un entorno centralizado, facilitando el seguimiento histórico de los datos y la generación de informes técnicos detallados.

Los analistas de monitoreo de condición son los responsables de interpretar los resultados mediante criterios predefinidos y modelos predictivos. A partir de esta interpretación, se emite un

veredicto técnico sobre el estado del equipo, indicando si es necesario realizar intervenciones preventivas, correctivas o continuar con el monitoreo habitual. Esto permite tomar decisiones informadas, mejorando la eficiencia operativa, reduciendo costos asociados a paradas no programadas y prolongando la vida útil de los activos industriales.

C. Recopilación y organización de datos

Se recopilarán las bases de datos existentes de la empresa que contienen información de monitoreo continuo de los equipos. Estos datos serán organizados y estructurados inicialmente en hojas de cálculo (Excel) para facilitar su procesamiento previo. Este paso incluye la consolidación de información de diferentes fuentes para asegurar que los datos estén completos, actualizados y listos para ser importados a Power BI.

D. Procesamiento y preparación de los datos en Excel

Antes de cargar los datos a Power BI, se realizará un procesamiento en Excel para estructurar y depurar la información. Durante este proceso, se aplicarán fórmulas, macros y transformaciones que permitan organizar y clasificar los datos según los criterios de los analistas. En esta fase, se generarán columnas de información clave, como los modos de falla, las recomendaciones asociadas y las condiciones de los elementos monitoreados. Este procesamiento previo facilita una transición más fluida y eficiente al entorno de Power BI.

E. Desarrollo e implementación en Power BI

Los datos procesados en Excel se importarán a Power BI, donde se desarrollarán dashboards interactivos y visualizaciones dinámicas. Power BI será la plataforma principal para la presentación de los datos, permitiendo realizar análisis de tendencias, relaciones y patrones entre los diferentes componentes y modos de falla. Se utilizarán segmentadores, filtros y visualizaciones personalizadas para facilitar la interacción del analista con los datos, mejorando la toma de decisiones.

F. Aplicación de reglas de análisis

En Power BI, se implementarán fórmulas y medidas utilizando DAX (Data Analysis Expressions) para automatizar el análisis de los datos. Estas reglas incluirán la identificación de condiciones anómalas, tendencias o modos de falla específicos, generando alertas visuales o recomendaciones automáticas. Además, se mantendrán reglas de evaluación basadas en los estándares predefinidos por la empresa, permitiendo a los analistas realizar evaluaciones de calidad y riesgo de manera eficiente.

G. Capacitación y aprendizaje de procesos

Durante el desarrollo del proyecto, se llevará a cabo un proceso de aprendizaje continuo y capacitación para los analistas sobre el uso de las herramientas en Power BI, así como sobre los criterios de monitoreo y evaluación establecidos por la empresa. Esta capacitación garantizará que los usuarios puedan interpretar correctamente las visualizaciones y tomar decisiones fundamentadas utilizando las herramientas de análisis avanzadas.

H. Validación y evaluación de resultados

Los resultados generados por Power BI serán validados comparándolos con los estándares existentes y los datos históricos para asegurar que las decisiones tomadas sean precisas y efectivas. Además, se evaluará el impacto de la implementación de Power BI en la mejora de la eficiencia del análisis, la reducción de tiempos de gestión y la mejora en la calidad de las decisiones tomadas por los analistas. También se medirá la efectividad del sistema para identificar de manera precisa los modos de falla y ofrecer recomendaciones adecuadas.

VIII. ACTIVIDADES

- Acompañamiento al equipo de laboratorio para toma de muestras de aceites.
- Revisión de la documentación existente
- Generación de ordenes de trabajo
- Actualización de tablero LEAN
- Entrevistas con usuarios finales
- Desarrollo de prototipos para el tablero
- Establecimiento de prioridades
- Pruebas de usuario
- Capacitación y soporte sobre el uso del tablero
- Retroalimentación

0	Identificar lubricante correcto
1	Incrementa
2	Disminuye
3	Incrementa o Disminuye
4	Se mantiene

Fig. 12. Condiciones de los elementos

B. Unión de matrices en Excel

En cumplimiento con los criterios establecidos por el tutor, se optó por generar una combinación de las matrices de combinaciones y recomendaciones, con el objetivo de consolidar toda la información en una única página. Esto permitiría que la visualización del contenido fuera más accesible y clara, evitando la dispersión de los datos en múltiples documentos. Como resultado, se generarán principalmente cuatro hojas de Excel, las cuales contendrán los datos relacionados con Motor CI, Transmisión, Hidráulico y Engranajes.

Posteriormente, se implementó una tabla dinámica que proporciona el dinamismo necesario para organizar y manipular la matriz de forma eficiente, integrando las recomendaciones correspondientes a cada componente. Es importante señalar que cada modo de falla está asociado con tres recomendaciones específicas, por lo que, al combinar las matrices, se deberá tener en cuenta este detalle al definir los rangos dentro de las tablas. Esto asegurará que la información se agrupe correctamente y se mantenga la coherencia entre las combinaciones y sus respectivas recomendaciones.

Este enfoque permitirá una mejor gestión de los datos y facilitará el análisis posterior, optimizando la presentación de la información en un solo documento y asegurando la integridad de los valores relacionados con cada uno de los componentes mencionados.

La Fig. 13 muestra el resultado de la unión de las matrices en Excel, logrando tener las combinaciones y las recomendaciones en una misma página.

Filtración (Suif)	Excesivo (FTIR)	Desgaste (FTIR)	Cinc (Zn)	Fósforo (P)	Casio (Ca)	Aluminio (Al)	Silicio (Si)	Boro (B)	Titanio (Ti)	Plomo (Pb)	Cromo (Cr)	Hierro (Fe)	Cobalto (Co)	Cromo (Cr)	Plomo (Pb)	Estadío (Sn)	Níquel (Ni)	Antimonio (Sb)	Fluoruro (F)	Tendencia	Descripción del modo de falla	Causa raíz
																				Normal - estable	Condiciones normales de operación	
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal ESTABLE	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, calentamiento, ajustes, ensamble incorrecto, bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable ajuste o ensamble incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Moderada	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, calentamiento, ajustes, ensamble incorrecto, bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable ajuste o ensamble incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Rápida	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, calentamiento, ajustes, ensamble incorrecto, bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable ajuste o ensamble incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal ESTABLE	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluyen la presencia de contaminantes en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o vencido, mantenimiento inadecuado, sobrecarga o mal uso del motor, y la calidad del combustible utilizado.
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Moderada	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluyen la presencia de contaminantes en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o vencido, mantenimiento inadecuado, sobrecarga o mal uso del motor, y la calidad del combustible utilizado.
									1			1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Rápida	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluyen la presencia de contaminantes en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o vencido, mantenimiento inadecuado, sobrecarga o mal uso del motor, y la calidad del combustible utilizado.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal ESTABLE	Selección incorrecta de lubricante	Falta de conocimiento, problemas de diseño y deficiencias en el mantenimiento y actualización de la información sobre la selección adecuada del lubricante.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Moderada	Selección incorrecta de lubricante	Cambios en las condiciones de operación, falta de mantenimiento de la información y deficiencias en la capacitación y procedimientos del personal encargado de la selección del lubricante.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	Anormal Variación Rápida	Selección incorrecta de lubricante	Cambios bruscos en las condiciones de operación del equipo, como incrementos repentinos en las cargas, velocidades, temperaturas, lo que puede resultar en problemas de desgaste, contaminación y fallas prematuras en el equipo a corto plazo.
																						Comun cuando se ha instalado un enfriador nuevo

Fig. 13. Unión de recomendaciones y combinaciones

C. Bosquejo de tablero dinámico

Se llevó a cabo la proyección de un tablero dinámico en Excel, diseñado específicamente para que los analistas pudieran interactuar con él y proporcionar retroalimentación. Este tablero fue ajustado de manera estratégica para facilitar una visualización clara y comprensible, con el objetivo de generar una idea preliminar de los resultados que se esperaban obtener.

Cabe destacar que, aunque se realizaron modificaciones en el tablero para optimizar su presentación y usabilidad, el producto final permaneció como una maqueta conceptual. Esta maqueta no reflejaba los resultados definitivos, sino que servía como una representación inicial de lo que se pretendía desarrollar. De esta manera, su propósito fue proporcionar una visión general del diseño y funcionamiento del tablero, permitiendo a los usuarios evaluar y contribuir con sugerencias que enriquecieran el desarrollo final del proyecto.

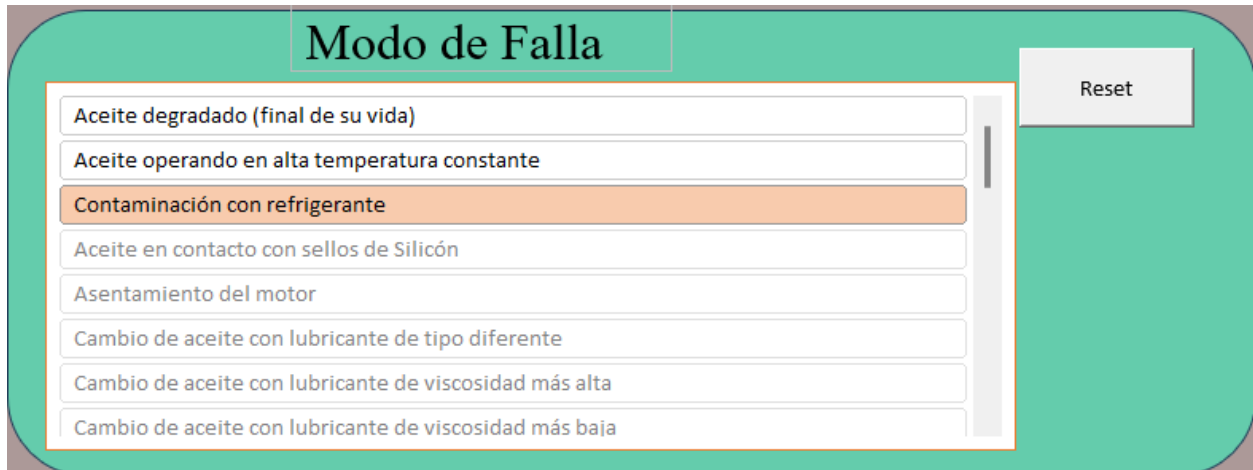


Fig. 14. Filtro de modos de falla

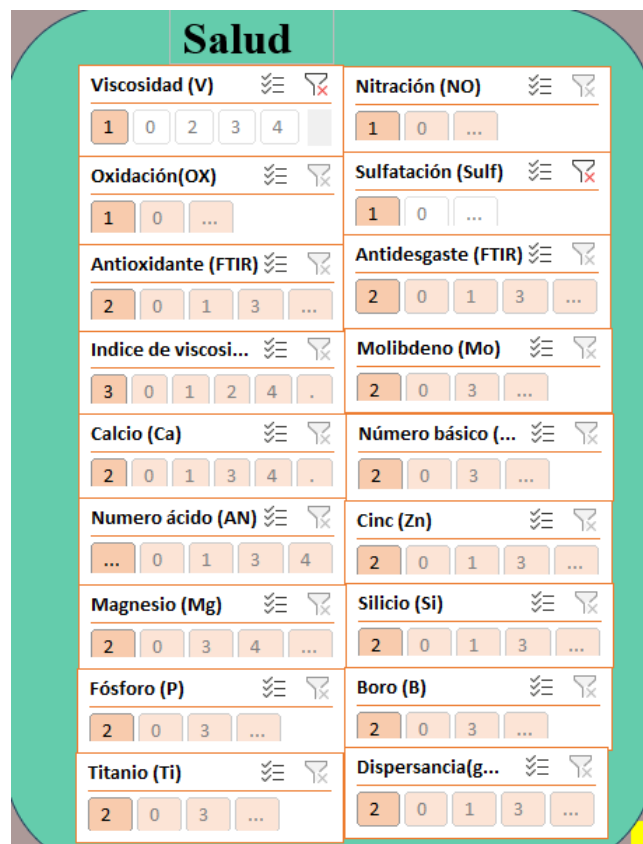


Fig. 15. Filtro para elementos de salud

Contaminantes

Conteo de par... ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="3"/> <input type="text" value="(e..."/>	Agua ☰ ☒ <input type="text" value="(e..."/> <input type="text" value="1"/>
Potasio (K) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(e..."/>	Sodio (Na) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(e..."/>
Boro (B)2 ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(e..."/>	Refrigerante (...) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value=".."/>
Hollín (Soot) ☰ ☒ <input type="text" value="(e..."/> <input type="text" value="1"/>	Combustible (...) ☰ ☒ <input type="text" value="(e..."/> <input type="text" value="1"/>
Aluminio (Al) ☰ ☒ <input type="text" value=".."/> <input type="text" value="1"/>	Silicio (Si)2 ☰ ☒ <input type="text" value="(e..."/> <input type="text" value="1"/>

Desgaste

Aluminio (Al)2 ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>	Hierro (Fe) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>
Estaño (Sn) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>	Cobre (Cu) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>
Molibdeno (...) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>	Cromo (Cr) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>
Densidad ferr... ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="..."/>	Plomo (Pb) ☰ ☒ <input type="text" value="1"/> <input type="text" value="(..."/>

Fig. 16. Filtros para elementos de contaminación y desgaste

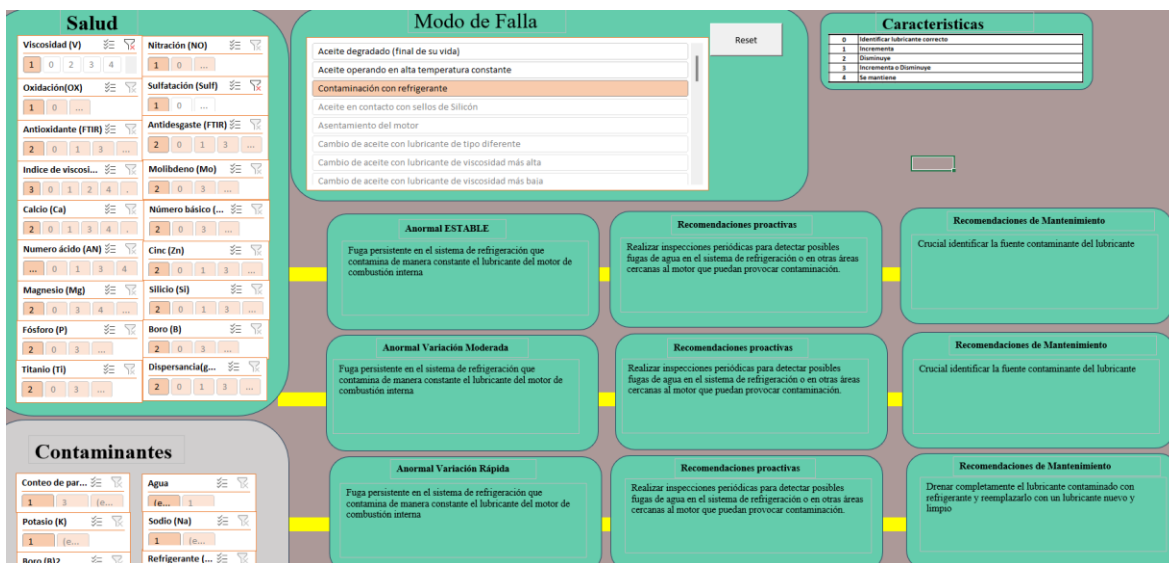


Fig. 17. Primer bosquejo de funcionamiento para dashboard

Se generaron cuatro bloques de *slicers* en el tablero dinámico, tal como se puede apreciar en las imágenes de la 14 a la 17, cada uno con un propósito específico para filtrar y organizar la información de manera eficiente. El primer bloque correspondió a los modos de falla (Fig. 14), permitiendo al usuario seleccionar el tipo de fallo que deseaba analizar. El segundo bloque estuvo destinado a los elementos de salud (Fig. 15), los cuales permitieron evaluar el estado general de los componentes del equipo. El tercer bloque estuvo compuesto por los elementos de contaminación (Fig. 16), que permitieron identificar los factores que podían estar afectando la pureza o calidad de los sistemas. Finalmente, el cuarto bloque incluyó los elementos de desgaste (Fig. 17), facilitando la selección de aquellos componentes que habían experimentado deterioro por uso.

El funcionamiento del tablero se basó en la selección de los elementos que se consideraron como factores que podrían estar afectando al equipo. Mediante estas selecciones, se generaron las combinaciones correspondientes, lo que resultó en la identificación del modo de falla y las recomendaciones asociadas a dicho modo. Este enfoque dinámico permitió a los usuarios obtener un análisis detallado y específico de las posibles causas de fallo y sus respectivas soluciones, facilitando la toma de decisiones y la prevención de fallos en los equipos.

1) *Retroalimentación de Dashboard en Excel*

Debido a las exigencias planteadas por la empresa y con el objetivo de mejorar la experiencia de los analistas, se decidió prescindir del uso de Excel, ya que esta herramienta no

ofrecía una visualización y usabilidad tan amigables para los usuarios como lo haría una plataforma más avanzada. En este sentido, se optó por realizar el cambio a Power BI, dado que esta herramienta proporcionaba una interfaz más intuitiva, dinámicas interactivas y capacidades de visualización más sofisticadas, lo que facilitaba la interacción y el análisis de los datos de manera más eficiente y atractiva. Esta transición a Power BI se consideró la mejor opción para optimizar el proceso y cumplir con los requerimientos establecidos por los usuarios.

D. Macro en VBA para combinaciones

Se implementa el uso de una macro en Excel con el fin de generar las combinaciones de los elementos en una tabla sencilla y legible para su posterior integración en Power BI. Esta macro permite calcular los valores iniciales y finales para cada una de las variables clave, como Salud, Contaminación y Desgaste, de manera que, al recorrer diferentes trazos o escenarios, se evite la generación de permutaciones innecesarias. Las permutaciones, de no ser controladas, podrían resultar en una cantidad excesiva de datos, lo que dificultaría su procesamiento y análisis eficiente. Para optimizar este proceso, se establece un punto de inicio específico para la lectura de la macro, asegurando que la ejecución sea precisa y no se produzcan combinaciones redundantes que sobrecarguen el sistema de análisis. En la Fig. 18 se puede apreciar la macro a detalle para analizar todo su código.

```

'Definicion de parametros de datos
TablaCombinacion = "Tabla Combinaciones"
TablaDatos = "T Matrices"
vSi = 7 'Posicion inicial de salud
vSf = vSi + 18 'Posicion final de salud
vCi = vSf + 1 'Posicion inicial de Contaminacion
vCf = vCi + 10 'Posicion final de Contaminacion
vDi = vCf + 1 'Posicion inicial de Desgaste
vDf = vDi + 7 'Posicion final de Desgaste
z = 2 'Posicion inicial datos de salida
y = 2 ' Posicion inicial datos de entrada

Sheets(TablaCombinacion).Select
Range("A2").Select
Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
Selection.ClearContents
Range("A2").Select

Sheets(TablaDatos).Select

'Bucle para recorrido de las celdas

While (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 6).Text <> "")
    s = False
    c = False
    d = False

    For i = vSi To vSf
        If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, i).Text <> "") Then
            s = True
            For j = vCi To vCf
                If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, j).Text <> "") Then
                    c = True
                    For k = vDi To vDf
                        If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text <> "") Then
                            d = True
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 1).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 46).Text
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 2).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, i).Text
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 3).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, i).Text

                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 4).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, j).Text
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 5).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, j).Text

                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 6).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, k).Text
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 7).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text

                            ' Añadir el nombre del componente
                            Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 8).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 45).Text

                            z = z + 1
                        End If
                    Next k
                End If
            Next j
        End If
    Next i
End While

```

Fig. 18. Código de VBA

El código comienza con un bucle While que recorre las filas de la hoja "TablaDatos". Este bucle sigue ejecutándose mientras la celda en la columna 6 de la fila actual no esté vacía, lo que significa que solo se procesarán las filas que contienen datos relevantes.

Dentro del bucle While, se inicializan tres variables: s, c y d, las cuales se usan para controlar si las celdas correspondientes a las variables de Salud, Contaminación y Desgaste contienen datos. Si todas estas variables están en True, significa que hay datos válidos en las tres secciones y se puede generar una combinación.

Luego, el código entra en tres bucles For anidados, cada uno correspondiente a un conjunto de columnas en la hoja "TablaDatos". El primer bucle recorre las columnas de Salud

(desde vSi hasta vSf), el segundo bucle recorre las columnas de Contaminación (desde vCi hasta vCf), y el tercer bucle recorre las columnas de Desgaste (desde vDi hasta vDf).

En cada uno de estos bucles, se verifica si las celdas correspondientes no están vacías. Si una celda contiene un valor, se marca la variable respectiva como True, lo que indica que hay un valor válido y se puede generar la combinación.

Cuando todos los bucles encuentran celdas no vacías, el código entonces toma los valores de esas celdas y los copia a la hoja "TablaCombinacion" en el formato adecuado. Los valores se organizan de manera estructurada, con la siguiente disposición:

En la columna 1 se coloca el valor de la celda en la fila y y columna 46 de la hoja "TablaDatos".

En la columna 2 se coloca el valor del encabezado de la columna correspondiente a Salud (fila 1, columna i).

En la columna 3 se coloca el valor de la celda correspondiente a Salud (fila y, columna i).

En la columna 4 se coloca el encabezado de la columna correspondiente a Contaminación (fila 1, columna j).

En la columna 5 se coloca el valor de la celda correspondiente a Contaminación (fila y, columna j).

En la columna 6 se coloca el encabezado de la columna correspondiente a Desgaste (fila 1, columna k).

En la columna 7 se coloca el valor de la celda correspondiente a Desgaste (fila y, columna k).

En la columna 8 se coloca el nombre del componente (valor de la celda en la fila y, columna 45).

Después de generar una combinación, el índice de fila en "TablaCombinacion" (representado por z) se incrementa para que la siguiente combinación se agregue en la siguiente fila.

Este proceso se repite para todas las combinaciones posibles de las celdas no vacías dentro de los rangos definidos para las variables de Salud, Contaminación y Desgaste. De esta forma, el código genera todas las combinaciones posibles sin incluir combinaciones con celdas vacías, asegurando que se procesen solo los datos relevantes.

```

'No tengo indicadores de salud, pero tengo Cont y Desgaste
If Not (s) Then
  For j = vCi To vCf
    If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, j).Text <> "") Then
      c = True
      For k = vDi To vDf
        If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text <> "") Then
          d = True
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 1).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 46).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 2).Formula = ""
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 3).Formula = ""

          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 4).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, j).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 5).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, j).Text

          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 6).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, k).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 7).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text

          ' Añadir el nombre del componente
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 8).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 45).Text

          z = z + 1
        End If
      Next k
    End If
  Next j
End If
'No tengo indicadores de salud, pero tengo Cont y Desgaste
If Not (c) Then
  For i = vSi To vSf
    If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, i).Text <> "") Then
      s = True
      For k = vDi To vDf
        If (Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text <> "") Then
          d = True
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 1).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, 46).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 2).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, i).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 3).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, i).Text

          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 4).Formula = ""
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 5).Formula = ""

          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 6).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(1, k).Text
          Worksheets(TablaCombinacion).Cells(z, 7).Formula = Worksheets(TablaDatos).Cells(y, k).Text
        End If
      Next k
    End If
  Next i
End If

```

Fig. 19. Complemento de código VBA

En esta sección del código se implementan diversas excepciones para evitar la generación de datos redundantes o innecesarios. Si no se aplicaran estas excepciones, el código imprimiría información relacionada con el elemento examinado, incluso si dicho elemento no contiene una variable de condición válida. Estas excepciones garantizan que únicamente se procesen y registren los datos relevantes, optimizando así el rendimiento del sistema y evitando la sobreabundancia de información no significativa.

1) Transformación de la matriz a datos procesables

ID	Salud elemento	Salud Condicion	Contaminacion Elemento	Contaminacion Condicion	Desgaste elemento	Desgaste condicion	Componente
2			Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
2			Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI
					Densidad ferrosa		
2			Conteo de partículas		1 (PQ - DRF)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
3			Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI
					Densidad ferrosa		
3			Conteo de partículas		1 (PQ - DRF)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI
					Densidad ferrosa		
4	Viscosidad (V)	0	Conteo de partículas		1 (PQ - DRF)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI
					Densidad ferrosa		
4	Indice de viscosidad (IV)	0	Conteo de partículas		1 (PQ - DRF)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI
					Densidad ferrosa		
4	Numero ácido (AN)	0	Conteo de partículas		1 (PQ - DRF)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Aluminio (Al)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Hierro (Fe)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Cobre (Cu)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Cromo (Cr)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Plomo (Pb)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Estaño (Sn)		1 Motor CI
4	Número básico (BN)	0	Conteo de partículas		1 Molibdeno (Mo)		1 Motor CI

Fig. 21. Combinaciones.

Mediante el uso de una macro desarrollada en Excel, se genera un conjunto de combinaciones para cada modo de falla como se puede apreciar en la Fig. 21, lo que permite cubrir todas las posibles variaciones que los analistas puedan requerir. En este proceso, se asegura que se consideren todas las combinaciones relevantes y se presenten de manera estructurada.

En la primera columna se encuentra el identificador único (ID) de cada modo de falla. Es importante destacar que un mismo modo de falla puede tener un número variable de

combinaciones, lo cual depende de la cantidad de elementos asociados a dicho modo de falla, permitiendo así una cobertura completa de las posibles situaciones.

Las siguientes seis columnas están organizadas en pares, donde en una columna se especifica el 'Elemento' y en la columna adyacente se describe la 'Condición' correspondiente a ese elemento. Este formato permite representar de manera precisa la variabilidad de cada elemento bajo el modo de falla, cubriendo las situaciones en las que el elemento podría experimentar un aumento, una disminución o mantenerse igual en relación con el modo de falla.

Finalmente, en la última columna se indica el 'Componente' al cual pertenece el modo de falla. Esta organización facilita la agrupación de los modos de falla por componente, lo que simplifica y optimiza el proceso de búsqueda y análisis por parte de los analistas, permitiendo un acceso más eficiente y una interpretación más clara de los datos."

5985	108	Viscosidad (V)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5986	108	Indice de viscosidad (IV)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5987	108	Numero ácido (AN)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5988	108	Antioxidante (FTIR)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5989	108	Antidesgaste (FTIR)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5990	108	Fósforo (P)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5991	108	Molibdeno (Mo)	1	Conteo de partículas	1	Engranajes
5992	108	Silicio (Si)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
5993	108	Boro (B)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
5994	25	Viscosidad (V)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
5995	25	Indice de viscosidad (IV)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
5996	25	Numero ácido (AN)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
5997	25	Número básico (BN)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
5998	25	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
5999	25	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6000	25	Cinc (Zn)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6001	25	Fósforo (P)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6002	25	Calcio (Ca)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6003	25	Magnesio (Mg)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6004	25	Molibdeno (Mo)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6005	25	Titanio (Ti)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
		Dispersancia				
6006	25	(gota de aceite)	2	Conteo de partículas	1	Motor CI
6007	54	Viscosidad (V)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6008	54	Indice de viscosidad (IV)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6009	54	Numero ácido (AN)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6010	54	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6011	54	Cinc (Zn)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6012	54	Fósforo (P)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6013	54	Calcio (Ca)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6014	54	Magnesio (Mg)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6015	54	Molibdeno (Mo)	2	Conteo de partículas	1	Transmisión
6016	81	Viscosidad (V)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6017	81	Indice de viscosidad (IV)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6018	81	Numero ácido (AN)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6019	81	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6020	81	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6021	81	Cinc (Zn)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6022	81	Fósforo (P)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6023	81	Calcio (Ca)	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6024	81	RULER	2	Conteo de partículas	1	Hidráulico
6025	108	Viscosidad (V)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6026	108	Indice de viscosidad (IV)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6027	108	Numero ácido (AN)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6028	108	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6029	108	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6030	108	Fósforo (P)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes
6031	108	Molibdeno (Mo)	2	Conteo de partículas	1	Engranajes

Fig. 22. Total de combinaciones con su respectivo modo de falla.

En total, como se logra ver en la Fig. 22 se han identificado 6031 combinaciones posibles correspondientes a los 112 modos de falla, los cuales se distribuyen en cuatro componentes principales de la empresa: Motor CI, Transmisión, Hidráulico y Engranajes. Esta distribución permite abarcar una variedad completa de situaciones que pueden surgir dentro de cada componente, asegurando que todos los posibles modos de falla sean considerados en el análisis.

Como parte de la optimización del proceso de análisis, se decidió modificar la representación de la variable 3, la cual hace referencia a la variabilidad de los elementos (es decir, si el elemento puede experimentar un aumento o una disminución). Para evitar confusiones al realizar las búsquedas, esta variable fue reemplazada por los valores numéricos 1 y 2, donde cada número corresponde a una condición específica (por ejemplo, 1 para aumento y 2 para disminución). Esta modificación facilita la interpretación de los datos y mejora la eficiencia en el proceso de búsqueda y análisis.

2) Tablas de soporte

Estas tablas fueron generadas con el objetivo de establecer una relación de tipo "uno a muchos" en Power BI, lo cual fue esencial para garantizar el correcto funcionamiento y rendimiento del modelo de datos. Al crear estas relaciones, se optimizó la estructura del análisis, permitiendo que los datos se integraran de manera eficiente y que las consultas realizadas en el navegador se ejecutaran de forma precisa y fluida. Este enfoque aseguró que las interacciones entre las diferentes tablas y componentes del modelo fueran coherentes y que los usuarios

pudieran navegar y obtener insights de manera efectiva.

Componentes	Elementos de desgaste	Elementos de Contaminación	Elementos de salud	Condicion	Valor
Motor CI	Hierro (Fe)	Conteo de partículas	Viscosidad (V)	Aumenta	1
Transmisión	Cobre (Cu)	Agua	Indice de viscosidad (IV)	Disminuye	2
Hidráulico	Cromo (Cr)	Combustible (Fuel)	Numero ácido (AN)	Igual	4
Engranajes	Plomo (Pb)	Refrigerante (Gly)	Número básico (BN)		
	Estaño (Sn)	Hollín (Soot)	Oxidación(OX)		
	Molibdeno (Mo)	Potasio (K)	Nitración (NO)		
	Densidad ferrosa(PQ - DRF)	Boro (B)	Sulfatación (Sulf)		
		Sodio (Na)	Antioxidante (FTIR)		
		Aluminio (Al)	Antidesgaste (FTIR)		
		Silicio (Si)	Cinc (Zn)		
		Potencial de barniz (PBA)	Fósforo (P)		
			Calcio (Ca)		
			Magnesio (Mg)		
			Molibdeno (Mo)		
			Silicio (Si)		
			Boro (B)		
			Titanio (Ti)		
		Dispersancia(gota de aceite)			
		RULER			

Fig. 23. Tablas de soporte

Como se puede apreciar en la Fig. 23 se incluye la tabla de 'Componentes', la cual identifica los componentes principales que son analizados y que tienen una relevancia significativa para los analistas. Estos componentes incluyen el Motor CI, la Transmisión, el sistema Hidráulico y los Engranajes, los cuales son esenciales para el análisis de los modos de falla en el contexto de la empresa.

Las tres tablas siguientes que se encuentran en la Fig. 23 corresponden a la identificación de todos los elementos, organizados de manera agrupada según sus características presentes en el aceite. Es importante destacar que algunos elementos pueden repetirse, debido a que ciertos componentes actúan tanto como aditivos como contaminantes. Un ejemplo claro de esto es el Silicio, que puede encontrarse en ambos contextos.

Finalmente, en la Fig. 23, se presenta la tabla de 'Condición y Valor'. Esta tabla ha sido creada con el propósito de facilitar la identificación y el reemplazo de los valores numéricos 1, 2 y 4 por sus correspondientes descripciones: 'Aumenta', 'Disminuye' e 'Igual', respectivamente. Esta modificación permite a los analistas evitar la necesidad de interpretar los valores numéricos y, en su lugar, guiarse de manera más intuitiva por la lógica asociada a cada condición.

Tendencia	Descripción del modo de falla	Causa raíz	Recomendaciones preventivas	Recomendaciones de mantenimiento	Recomendaciones para el fabricante	Próximas acciones	Componente	
Normal/Estable	Condición normal de operación						Motor CI	1
Anormal/Estable	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, contaminación, quemado, desgaste incorrecto bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable quemado o desgaste incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.	La condición normal presentada con respecto a la muestra anterior. Reportar si las recomendaciones han sido efectuadas.	Verificar las condiciones de operación, carga, temperatura. Verificar nivel y presión de aceite. Reportar mantenimiento efectuado.	Ninguna.	Tomar muestra en el intervalo normal.	Motor CI	2
Anormal/Variable/Inestable	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, contaminación, quemado, desgaste incorrecto bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable quemado o desgaste incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.	La condición normal presenta un incremento moderado con respecto a la muestra anterior. Identificar la causa del problema para reportar al motor o condición normal.	Aumentar e informar si se ha efectuado un mantenimiento reciente. Verificar las condiciones de operación, carga, temperatura. Verificar nivel y presión de aceite.	Ninguna.	Tomar muestra a la mitad del intervalo cotidian.	Motor CI	2
Anormal/Variable/Inestable	Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, contaminación, quemado, desgaste incorrecto bajo nivel de aceite.	Probable condición de operación fuera de parámetros (carga, régimen o temperatura). Probable quemado o desgaste incorrecto de componentes. Posible nivel bajo de aceite.	La condición normal presenta un comportamiento crítico. Urgente diagnosticar la causa del problema para evitar daños irreversibles.	Aumentar e informar si se ha efectuado un mantenimiento reciente. Comprobar si existen condiciones de operación severas fuera del rango de operación (temperatura, carga). Verificar que nivel y presión de aceite es.	Inspeccionar filtro de aceite para identificar rebabas secundarias. Inspeccionar el aceite dividido para identificar partículas grandes.	Tomar muestra en todo el intervalo cotidian.	Motor CI	2
Anormal/Estable	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluye la presencia de contaminación en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o variedad, mantenimiento inadecuado.	Fundamentalmente monitorear y mantener limpio los filtros de aceite para evitar la acumulación de contaminantes que puedan afectar la lubricación y el rendimiento del motor a lo largo del tiempo.	Mantener limpio los componentes, como los pistones, bielas y árbol de levas para evitar la acumulación de residuos que pueden afectar su funcionamiento.	Ninguna.	Ninguna.	Motor CI	3
Anormal/Variable/Inestable	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluye la presencia de contaminación en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o variedad, mantenimiento inadecuado.	Fundamentalmente monitorear y mantener limpio los filtros de aceite para evitar la acumulación de contaminantes que puedan afectar la lubricación y el rendimiento del motor a lo largo del tiempo.	Utilizar lubricantes de alta calidad y que cumpla con las especificaciones recomendadas por el fabricante del motor.	Ninguna.	Ninguna.	Motor CI	3
Anormal/Variable/Inestable	Final de la vida del componente	Desgaste en el motor incluye la presencia de contaminación en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o variedad, mantenimiento inadecuado.	Fundamentalmente monitorear y mantener limpio los filtros de aceite para evitar la acumulación de contaminantes que puedan afectar la lubricación y el rendimiento del motor a lo largo del tiempo.	Utilizar lubricantes de alta calidad y que cumpla con las especificaciones recomendadas por el fabricante del motor.	Ninguna.	Ninguna.	Motor CI	3
Anormal/Estable	Solación incorrecta de lubricante	Falta de conocimiento, problemas de calidad y deficiencias en el mantenimiento y verificación de la información sobre la selección adecuada del lubricante.	Capacitar al personal de mantenimiento sobre la importancia de utilizar el lubricante correcto y los procedimientos para su selección.	Verificar por completo el nivel del motor para eliminar el lubricante inadecuado y entrar lo correcto con el aceite correcto.	Ninguna.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	4
Anormal/Variable/Inestable	Solación incorrecta de lubricante	Cambio en las condiciones de operación, falta de mantenimiento de la información y deficiencias en la capacitación y procedimientos del personal encargado de la selección del lubricante.	Monitorear regularmente las propiedades del aceite en uso a través de análisis de laboratorio, para detectar a tiempo cualquier cambio que indique un problema.	Verificar por completo el nivel del motor para eliminar el lubricante inadecuado y entrar lo correcto con el aceite correcto.	Ninguna.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	4
Anormal/Variable/Inestable	Solación incorrecta de lubricante	Cambio brusco en las condiciones de operación del equipo, como incrementar repentinamente la carga, revoluciones, temperatura, lo que puede resultar en problemas de desgaste, contaminación y fallas.	Seguir los intervalos de cambio de aceite recomendados por el fabricante para mantener las propiedades del lubricante dentro de los límites adecuados.	Verificar por completo el nivel del motor para eliminar el lubricante inadecuado y entrar lo correcto con el aceite correcto.	Ninguna.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	4
Anormal/Estable	Patrón de aceite (resaca del aceite)	Como cuando se ha instalado un refrigerador nuevo.	Esperar que el equipo llegue a PPM para revisar copistas, bielas, colector de aceite, varillas de empuje, que se de rebabas y bridas de biela.	Realizar inspecciones periódicas del sistema de enfriamiento para detectar posibles problemas.	Cambio de lubricante.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	5
Anormal/Variable/Inestable	Patrón de aceite (resaca del aceite)	Como cuando se ha instalado un refrigerador nuevo.	Dar un periodo de equipo para revisar copistas, bielas, colector de aceite, varillas de empuje, que se de rebabas y bridas de biela.	Verificar regularmente el estado del refrigerador y asegurarse de que se haya desconectado que pueda afectar su funcionamiento.	Cambio de lubricante.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	5
Anormal/Variable/Inestable	Patrón de aceite (resaca del aceite)	Como cuando se ha instalado un refrigerador nuevo.	Para evitar inadvertidamente para hacer cambio de aceite, verificar el nivel de aceite, varillas de empuje, que se de rebabas y bridas de biela.	Controlar la temperatura del motor para detectar posibles problemas de contaminación que puedan ser resaca de aceite con un mal funcionamiento del refrigerador.	Cambio de lubricante.	Revisar el lubricante correcto para el componente.	Motor CI	5
Anormal/Estable	Asentamiento del motor	Problema en desgaste gradual de los componentes internos del motor, lo que se refleja en un asentamiento constante y creciente a lo largo del tiempo.	Utilizar lubricantes de alta resistencia al motor lo posible del área alternativa y del sistema de válvulas, pre cargar los filtros de aceite y bombas lubricantes en el circuito con una bomba de succión adecuada.	Utilizar lubricante de alta resistencia al motor lo posible del área alternativa y del sistema de válvulas.	Ninguna.	Realizar análisis de aceite a las 500 horas del equipo.	Motor CI	6
Anormal/Variable/Inestable	Asentamiento del motor	Problema en desgaste progresivo de los componentes internos del motor, lo que se refleja en un asentamiento constante y creciente a lo largo del tiempo.	Verificar el nivel del lubricante, el nivel de refrigerante, los conexiones eléctricas y mecánicas, y seguir un procedimiento específico de arranque y operación del motor durante el proceso de asentamiento.	Pre cargar los filtros de aceite y bombas lubricantes en el circuito antes del primer arranque.	Ninguna.	Realizar análisis de aceite a las 9000 horas del equipo.	Motor CI	6
Anormal/Variable/Inestable	Asentamiento del motor	Esta relacionado con cambios bruscos en las condiciones de operación del motor, como un aumento repentino en la carga, revoluciones o temperatura que genera un desgaste acelerado de los componentes.	Utilizar lubricantes de alta resistencia al motor lo posible del área alternativa y del sistema de válvulas, pre cargar los filtros de aceite y bombas lubricantes en el circuito con una bomba de succión adecuada.	Utilizar un lubricante de alta resistencia al motor lo posible del área alternativa y del sistema de válvulas.	Ninguna.	Realizar análisis de aceite a las 500 horas del equipo.	Motor CI	6
Anormal/Estable	Contaminación residual con partículas sólidas	Principio de corrosión de partículas sólidas (finas) en el sistema, producto de una contaminación de lubricante relacionado con la contaminación del aceite, el desgaste de los componentes y la corrosión.	Prevenir el uso de combustible sucio, limpio y adecuado, así como la adopción de prácticas de selección adecuadas para minimizar la generación de partículas sólidas y otros contaminantes.	Realizar una limpieza profunda del sistema de recolección de combustible, limpiando los depósitos, para eliminar cualquier depósito o contaminación.	Ninguna.	Tomar muestra al intervalo normal.	Motor CI	7
Anormal/Variable/Inestable	Contaminación residual con partículas sólidas	Cambio en las condiciones operativas, desgaste gradual de los componentes y mantenimiento inadecuado del sistema.	Prevenir el uso de combustible sucio, limpio y adecuado, así como la adopción de prácticas de selección adecuadas para minimizar la generación de partículas sólidas y otros contaminantes.	Realizar análisis de laboratorio del aceite del motor para evaluar el nivel de contaminación por partículas sólidas.	Ninguna.	Tomar muestra a la mitad de la frecuencia cotidiana.	Motor CI	7
Anormal/Variable/Inestable	Contaminación residual con partículas sólidas	Daños en desgaste acelerado de los componentes, problemas de funcionamiento y fallas prematuras en el sistema.	Prevenir el uso de combustible sucio, limpio y adecuado, así como la adopción de prácticas de selección adecuadas para minimizar la generación de partículas sólidas y otros contaminantes.	Realizar análisis de laboratorio del aceite del motor para evaluar el nivel de contaminación por partículas sólidas.	Ninguna.	Tomar muestra a un tercio de la frecuencia cotidiana.	Motor CI	7
Anormal/Estable	Muestra contaminada al cotidian.	Asociado de procedimiento y punto de muestreo inadecuado para la obtención de una muestra representativa.	Se mantiene la condición normal. Implementar procedimientos de muestreo limpios y evitar puntos de muestreo inadecuados en el motor.	Ninguna.	Ninguna.	Tomar muestra al intervalo normal.	Motor CI	8

Fig. 24. Tabla de recomendaciones

Asimismo, es necesario consolidar la tabla de 'Recomendaciones' en un único conjunto de datos, con el fin de facilitar su análisis posterior. Una vez unificada, esta tabla representada en la Fig. 24 podrá ser filtrada eficientemente mediante los identificadores (ID) y/o los componentes, permitiendo así un acceso más ágil y preciso a la información relevante. Este enfoque optimiza la búsqueda y la gestión de las recomendaciones, asegurando que los analistas puedan realizar consultas específicas según el ID o el componente asociado.

Componentes	Id	Descripción del modo de falla
Motor CI	1	Condiciones normales de operación
		Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, calentamiento, ajustes, ensamble incorrecto,
Motor CI	2	bajo nivel de aceite
Motor CI	3	Final de la vida del componente
Motor CI	4	Selección incorrecta de lubricante
Motor CI	5	Pasivación de enfriador (reacción del aceite)
Motor CI	6	Asentamiento del motor
Motor CI	7	Contaminación reciente con partículas sólidas
Motor CI	8	Muestra contaminada al extraerla
Motor CI	9	Aceite en contacto con sellos de Silicón
Motor CI	10	Ingreso de partículas sólidas
		Falla de filtro de aceite, Filtro de aceite saturado en
Motor CI	11	derivación
Motor CI	12	Relleno con aceite contaminado con partículas
Motor CI	13	Contaminación reciente con agua
Motor CI	14	Contaminación reciente con combustible diésel
Motor CI	15	Contaminación reciente con anticongelante
Motor CI	16	Hollín no disperso (reciente)
Motor CI	17	Relleno o paso de aceite de tipo y viscosidad diferente
Motor CI	18	Aceite degradado (final de su vida)
Motor CI	19	Cambio de aceite con lubricante de viscosidad más baja
Motor CI	20	Aceite operando en alta temperatura constante
Motor CI	21	Cambio de aceite con lubricante de viscosidad más alta
Motor CI	22	Cambio de formulación del lubricante
Motor CI	23	Inicio de oxidación del aceite
Motor CI	24	Degradación térmica del aceite
Motor CI	25	Lubricante de otra marca o nivel de desempeño diferente
Motor CI	26	Contaminación con agua
Motor CI	27	Contaminación con combustible diésel
Motor CI	28	Contaminación con refrigerante
Motor CI	29	Relleno con lubricante incorrecto
Motor CI	30	Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente
Motor CI	31	Excesivo hollín
Transmisión	32	Condiciones normales de operación
		Desgaste relacionado con condiciones de operación, sobrecarga, calentamiento, ajustes, ensamble incorrecto,
Transmisión	33	bajo nivel de aceite
Transmisión	34	Final de la vida del componente
Transmisión	35	Selección incorrecta de lubricante
Transmisión	36	Pasivación de enfriador (reacción del aceite)
Transmisión	37	Asentamiento de la transmisión
Transmisión	38	Contaminación reciente con partículas sólidas
Transmisión	39	Muestra contaminada al extraerla
Transmisión	40	Aceite en contacto con sellos de Silicón
Transmisión	41	Ingreso de partículas sólidas

Fig. 25. Tabla de modos de falla

Finalmente, en la Fig. 25, se dispone de una tabla que contiene todos los modos de falla identificados, cada uno asociado con su correspondiente ID y agrupado por componente. Esta estructura permite, en primer lugar, realizar combinaciones de elementos y buscar el modo de falla y su recomendación a través del ID. Además, si se selecciona un modo de falla, es posible visualizar no solo sus recomendaciones, sino también los posibles elementos que lo componen. Debido a la necesidad de facilitar este proceso de interconexión y optimizar la navegación entre los diferentes conjuntos de datos, se decidió trasladar toda esta información a Power BI.

Esta plataforma permite establecer relaciones entre las tablas y garantiza una correcta visualización de las recomendaciones. Además, Power BI ofrece una conectividad eficiente con los usuarios y una presentación más armónica y dinámica de los datos, lo que lo convierte en una herramienta ideal para la creación y presentación de este dashboard.

F. Montaje en Power BI

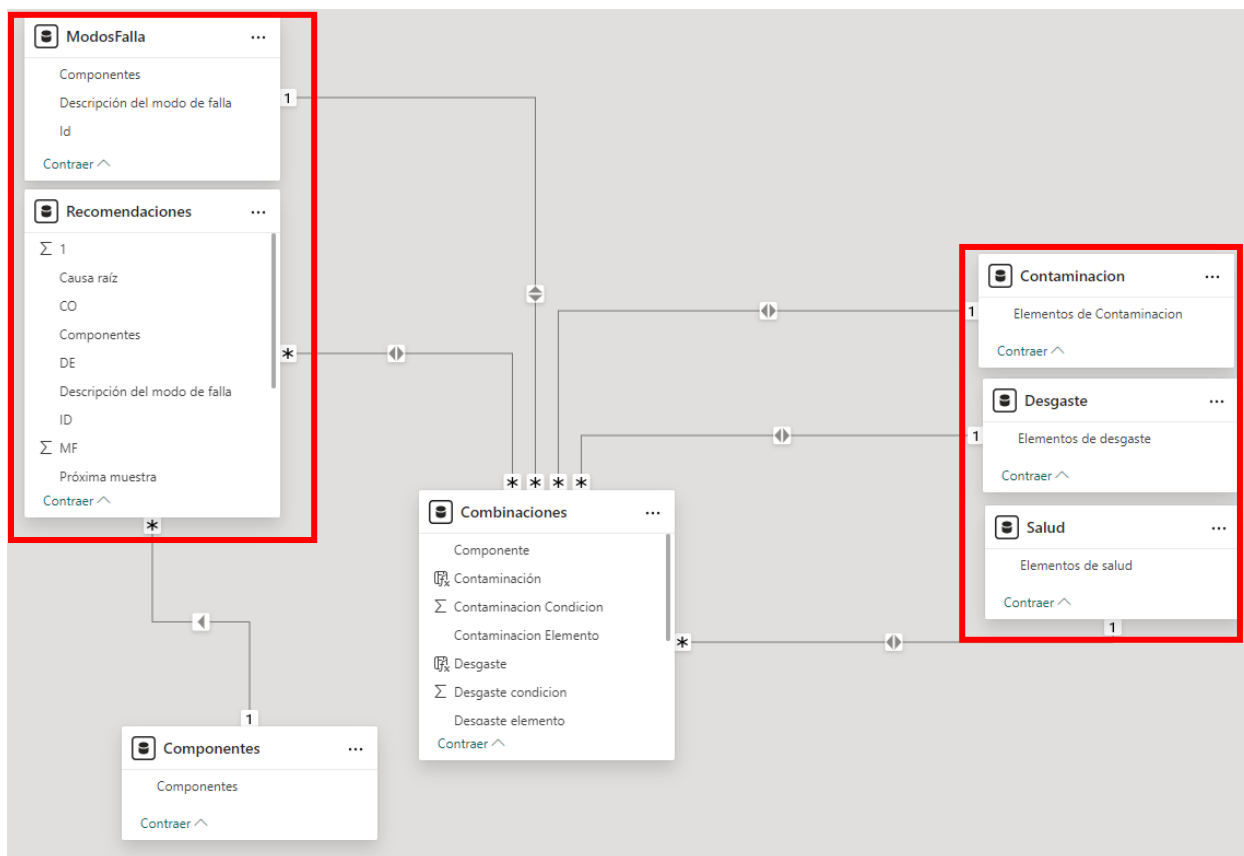


Fig. 26. Conexiones dentro de Power BI

En la parte lateral derecha de la Fig. 26 se encuentran integradas tres tablas que corresponden a los elementos clasificados según el grupo al que pertenecen. En este caso, siguiendo la metodología Noria, los grupos son: Contaminación, Desgaste y Salud. Estas tablas están diseñadas para filtrar los datos en ambas direcciones, estableciendo una conexión bidireccional con la tabla de combinaciones. De esta manera, se crea una relación de tipo 'uno a muchos', lo que facilita la navegación y la interacción con el modelo de datos, mejorando la gestión y el análisis de la información dentro del sistema.

Las tablas 'ModosFalla' (Fig. 25) y 'Recomendaciones' (Fig. 24) se vinculan a través de su identificador único (ID) con la tabla de combinaciones (imágenes 21 y 22). Esta conexión permite establecer una relación coherente entre los modos de falla, sus respectivas recomendaciones y las combinaciones de elementos, facilitando el análisis y la consulta de datos de manera eficiente dentro del modelo de datos. Finalmente, se cuenta con la tabla 'Componentes' que se encuentra en la Fig. 23, que establece una relación de tipo 'uno a muchos' con la tabla de 'Recomendaciones' (Fig. 24). Esta conexión permite que un componente esté asociado con múltiples recomendaciones, facilitando la consulta y el análisis de las recomendaciones específicas para cada componente dentro del modelo de datos.

1) Nuevas columnas

The screenshot shows a DAX formula editor with the following formula:

```

1 Salud = IF(
2     ISBLANK(LOOKUPVALUE(Condicion[Condicion], Condicion[Valor], Combinaciones[Salud Condicion ])),
3     "N/A",
4     LOOKUPVALUE(Condicion[Condicion], Condicion[Valor], Combinaciones[Salud Condicion ]
5 )

```

The table below displays the data for the 'Salud' column, with the formula editor's output visible in the background:

ID	Salud elemento	Salud Condicion	Contaminacion Elemento	Contaminacion Condicion	Desgaste elemento	Desgaste condicion	Componente	Contaminación	Desgaste	Salud
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Aluminio (Al)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Hierro (Fe)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Cobre (Cu)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Cromo (Cr)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Plomo (Pb)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Estaño (Sn)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Molibdeno (Mo)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antioxidante (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Densidad ferrosa (PQ - DRF)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Aluminio (Al)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Hierro (Fe)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Cobre (Cu)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Cromo (Cr)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Plomo (Pb)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye
29	Antidesgaste (FTIR)	2	Conteo de partículas	1	Estaño (Sn)	1	Motor CI	Aumenta	Aumenta	Disminuye

Fig. 27. Soporte para las condiciones de los elementos.

Como se puede observar en la Fig. 27 se generan tres columnas, cada una correspondiente a las condiciones de los elementos de cada fila. Para ello, se emplea una fórmula en lenguaje DAX que utiliza las funciones IF y LOOKUPVALUE. Esta fórmula permite buscar y reemplazar los datos de manera automática, facilitando la interpretación de estos. De esta manera, los analistas pueden realizar búsquedas utilizando las condiciones 'Aumenta', 'Disminuye' o 'Igual', lo que optimiza el proceso de identificación y análisis de los modos de falla.

G. Tablero o Dashboard

Se presenta una visualización integral del tablero en la Fig. 28, seguida de una explicación detallada de cada uno de sus elementos. En esta sección, se procederá a describir minuciosamente las funcionalidades y características de cada ítem del tablero, asegurando que

los analistas comprendan su propósito y la manera en que interactúan entre sí para facilitar el análisis de los datos

SACODE: Análisis de aceite		
Componentes	112	Tendencia: Anormal estable
Todas	Modos de falla	
Salud		
Todas		
Contaminación		
Todas		
Desgaste		
Todas		
Modos de Falla		
Aceite contaminado con productos del proceso		
Aceite degradado (final de su vida)		
Aceite en contacto con sellos de Silicón		
Aceite operando en alta temperatura constante		
Asentamiento de la transmisión		
Asentamiento del motor		
Asentamiento del sistema hidráulico		
Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente		
Cambio de aceite con lubricante de viscosidad más alta		
Cambio de aceite con lubricante de viscosidad más		
Causa raíz		
Recomendaciones de mante		
La contaminación y altas temperaturas de operación pueden contribuir con la oxidación del aceite		
Verificar condiciones de operación, nivel de aceite de operación. Realizar mantenimiento adecuado		
Variación en las condiciones de operación del motor (velocidad, carga, temperatura), falla sistema de enfriamiento, alto/bajo nivel de aceite, aire atrapado y espuma, calidad del combustible.		
Verificar condiciones de operación, nivel de aceite de operación. Realizar mantenimiento adecuado		
Desgaste en el motor incluyen la presencia de contaminantes en el		
Mantener limpios los componentes, como los ni		
Tendencia: Anormal variación moderada		
Causa raíz		
Recomendaciones de mante		
Contaminación, altas temperaturas de operación, viscosidad inadecuada y falta de mantenimiento preventivo dan inicio moderadamente a la oxidación		
Ajustar parámetros de operación (velocidad, car		
Variación en las condiciones de operación del motor (velocidad, carga, temperatura), falla sistema de enfriamiento, alto/bajo nivel de aceite, aire atrapado y espuma, calidad del combustible.		
Ajustar parámetros de operación (velocidad, car		
Tendencia: Anormal variación rápida		
Causa raíz		
Recomendaciones de mante		
Contaminación, altas temperaturas de operación, viscosidad inadecuada y falta de mantenimiento preventivo dan inicio moderadamente a la oxidación		
Ajustar parámetros de operación (velocidad, car		
Variación en las condiciones de operación del motor (velocidad, carga, temperatura), falla sistema de enfriamiento, alto/bajo nivel de aceite, aire atrapado y espuma, calidad del combustible.		
Ajustar parámetros de operación (velocidad, car		

Fig. 28. Tablero completo

Componentes

Todas ^

- Engranajes
- Hidráulico
- Motor CI
- Transmisión

Fig. 29. Segmentador de Componentes

Se utiliza un segmentador de datos (Fig. 29) para aislar los modos de falla según el componente al que pertenecen. Esta herramienta permite filtrar y visualizar de manera independiente los modos de falla correspondientes a cada componente específico, optimizando

así el análisis y la interpretación de los datos al permitir a los analistas trabajar con información segmentada de forma clara y eficiente.

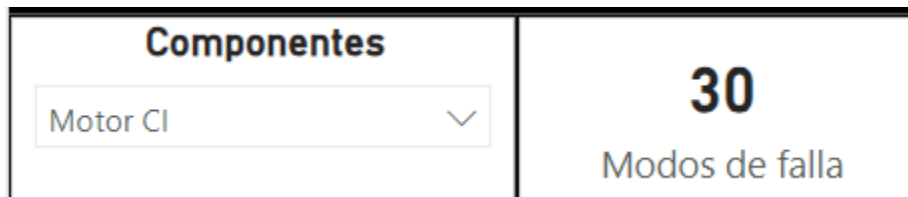


Fig. 30. Segmentador y contador de modos de fallas.

Junto al segmentador de componentes, se implementa un contador de modos de falla (Fig. 30), cuyo objetivo es informar al analista sobre la cantidad de modos de falla que coinciden con el perfil filtrado por componentes o elementos. De esta manera, a medida que se aplican filtros, el contador proporciona un dato dinámico que facilita la toma de decisiones al mostrar de manera inmediata cuántos modos de falla están disponibles según los criterios seleccionados, optimizando así el proceso de búsqueda y análisis.

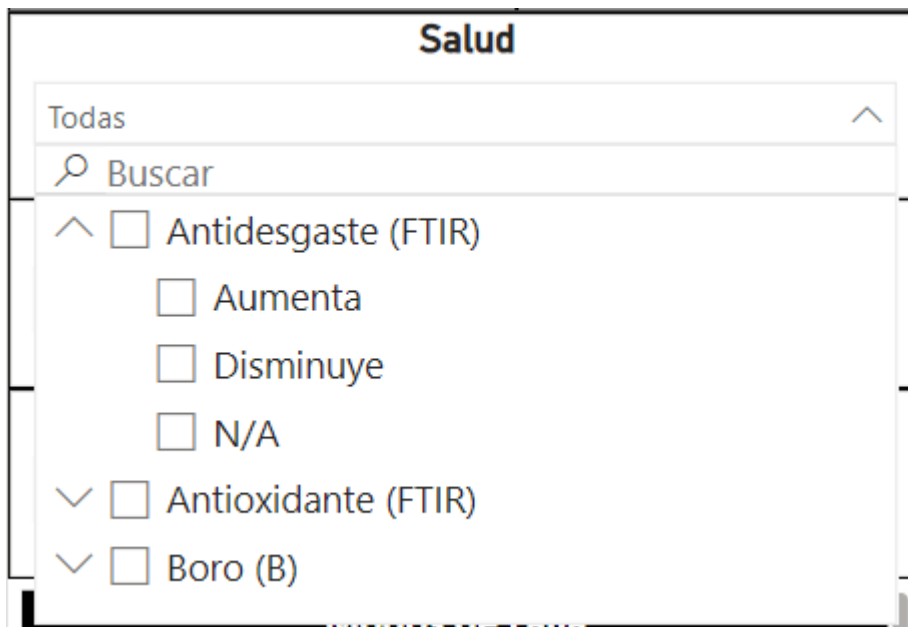


Fig. 31. Segmentador de elementos de salud

Debajo, se encuentran los segmentadores de elementos, que corresponden a las tres categorías principales: Salud, Contaminación y Desgaste (SACODE). Cada uno de estos segmentadores incluye una lista de los elementos asociados, junto con sus posibles variaciones (Aumenta o Disminuye). Además, se incorpora una barra de búsqueda que permite a los usuarios localizar rápidamente un elemento específico, facilitando así la navegación y mejorando la

experiencia del analista al interactuar con el tablero, optimizando el acceso a la información relevante, como se puede apreciar en la Fig. 32.



Fig. 32. Funcionamiento de segmentador

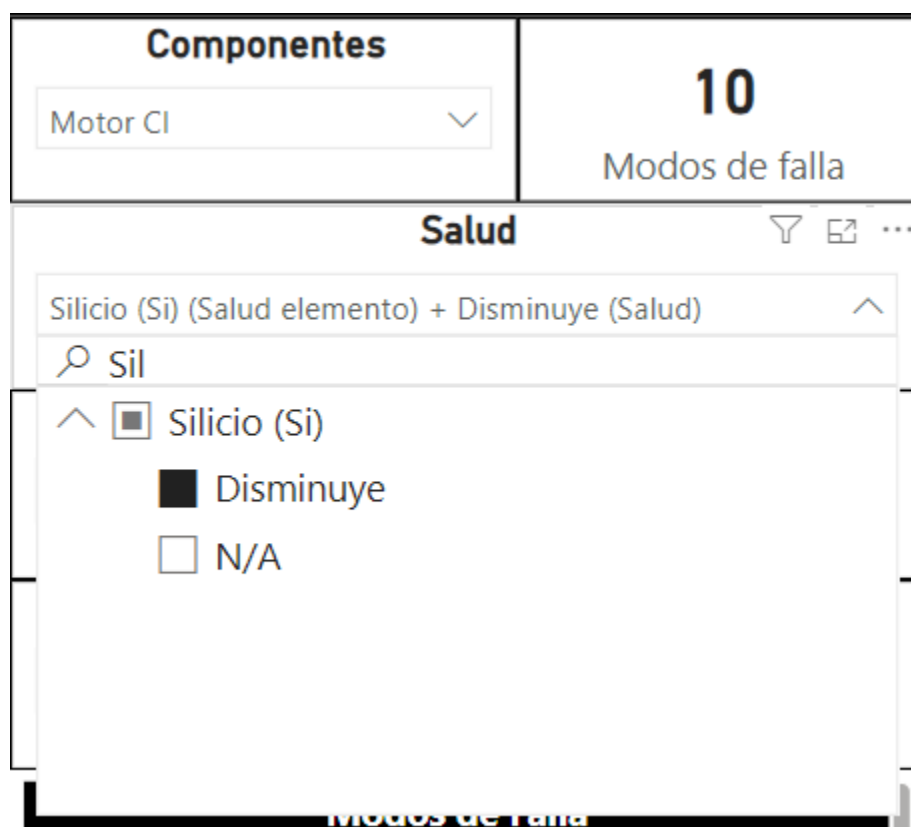


Fig. 33. selección de elemento y su condición.

Como ejemplo, se presenta el caso en el que el componente seleccionado es el Motor CI y se detecta un consumo del aditivo de silicio. En este escenario, el sistema muestra que existen

10 modos de falla que se ajustan a esta combinación específica de componente y elemento. Este ejemplo ilustra cómo el análisis de combinaciones de componentes y elementos permite identificar de manera precisa los modos de falla asociados a condiciones particulares.

Se considera que los analistas tendrán la capacidad de aplicar filtros adicionales para incluir otros elementos, los cuales pueden ser tanto contaminantes como de desgaste. Esta funcionalidad permite una mayor flexibilidad en el análisis, ya que los analistas podrán segmentar los datos según diversos factores, lo que facilita la identificación de modos de falla relacionados con diferentes condiciones de los componentes y elementos involucrados.

Se dispone de un recuadro donde se muestran los modos de falla que permanecen después de aplicar los filtros. Los modos de falla descartados ya no se visualizan, permitiendo a los analistas concentrarse únicamente en aquellos que cumplen con los criterios de filtrado establecidos, lo que optimiza la visualización y facilita el análisis de las combinaciones relevantes.

Modos de Falla
Aceite degradado (final de su vida)
Aceite operando en alta temperatura constante
Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente
Cambio de formulación del lubricante
Contaminación con agua
Contaminación con combustible diésel
Contaminación con refrigerante
Lubricante de otra marca o nivel de desempeño diferente
Relleno con lubricante incorrecto
Relleno o paso de aceite de tipo y viscosidad

Fig. 34. Listado de modos de falla

Al aplicar los filtros, en un ejemplo específico donde en la categoría de Salud se establece que el silicio disminuye y en Desgaste se presenta densidad ferrosa, el resultado muestra que permanecen 7 modos de falla (Fig. 34). El analista deberá evaluar estos modos de falla restantes

y determinar cuál de ellos se ajusta mejor a su caso particular, facilitando así una toma de decisiones más precisa y fundamentada.

Es importante destacar que, cuanto más específicos sean los elementos presentados en la muestra de aceite, más precisa podrá ser la respuesta o el proceso de filtrado de los modos de falla. La especificidad en los datos permite una mayor exactitud en la identificación de los modos de falla relevantes, optimizando así el análisis y mejorando la calidad de la información obtenida.

Componentes	7 Modos de falla
Motor CI	
Salud	
Silicio (Si) (Salud elemento) + Disminuye (Salud)	
Contaminación	
Todas	
Desgaste	
Densidad ferrosa (PQ - DRF)	
Modos de Falla	
Aceite degradado (final de su vida)	
Aceite operando en alta temperatura constante	
Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente	
Contaminación con agua	
Contaminación con combustible diésel	
Contaminación con refrigerante	
Relleno con lubricante incorrecto	

Fig. 35. Modos de falla después de filtrar los elementos

Una vez seleccionado el modo de falla, las recomendaciones asociadas se mostrarán en la parte derecha del tablero. Esta disposición facilita al analista acceder rápidamente a las acciones

sugeridas relacionadas con el modo de falla elegido, optimizando el flujo de trabajo y mejorando la eficiencia en el proceso de toma de decisiones.

Componentes		Tendencia: Anormal estable	
Motor CI	1 Modos de falla	Causa raíz	Recomendaciones de mante
Salud Silicio (Si) (Salud elemento) + Disminuye (Salud)		Incluye la fricción entre las piezas móviles, la presencia de contaminantes en el aceite, la falta de lubricación adecuada, el sobrecalentamiento, el uso de aceite de baja calidad o vencido, mantenimiento inadecuado, sobrecarga o mal uso del motor, y la calidad del combustible utilizado.	Ninguna.
Contaminación Todas		Tendencia: Anormal variacion moderada	
Desgaste Densidad ferrosa (PQ - DRF)		Causa raíz	Recomendaciones de mante
Modos de Falla Aceite degradado (final de su vida) Aceite operando en alta temperatura constante Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente Contaminación con agua Contaminación con combustible diésel Contaminación con refrigerante Relleno con lubricante incorrecto		El desgaste interno del motor puede deberse a varias causas, incluyendo contaminación, lubricación inadecuada, escombros dentro del motor, nivel excesivo o bajo de aceite, uso del grado incorrecto de aceite, y la ingestión de suciedad	Programar paro y reparación del motor.
		Tendencia: Anormal variacion rapida	
		Causa raíz	Recomendaciones de mante
		El desgaste interno del motor puede deberse a varias causas, incluyendo contaminación, lubricación inadecuada, escombros dentro del motor, nivel excesivo o bajo de aceite, uso del grado incorrecto de aceite, y la ingestión de suciedad	Programar paro y reparación del motor.

Fig. 36. Recomendaciones según modo de falla.

Cómo se puede apreciar en la Fig. 36 existen tres tipos de tendencias, las cuales son determinadas por los analistas en función de la variación observada en la muestra de aceite en comparación con la muestra anterior (detalles adicionales no pueden ser especificados debido a las normativas de la empresa). Es relevante señalar que, para cada tipo de tendencia, se visualizan cinco cuadros de texto, los cuales contienen información clave, como la posible causa raíz, las recomendaciones para el mantenimiento, las recomendaciones para el lubricante, las recomendaciones proactivas y las recomendaciones para la próxima muestra. Esta estructura proporciona una visión completa y detallada para la toma de decisiones y la planificación del mantenimiento.

H. Validación de recomendaciones

1) Validación 1

Componentes		Tendencia: Anormal estable	
Motor CI	1 Modos de falla	Causa raíz	Recomendaciones de manten
Salud		Relacion con averías en el sistema de enfriamiento, como grietas en la culata o una junta de culata defectuosa, que permiten la entrada de agua al sistema	
Oxidación(OX) (Salud elemento) + Aumenta (Salud)		Cambiar el aceite y filtro, utilizar un aceite de calidad aditivos, analizar el aceite y mantener el motor en	
Contaminación		Tendencia: Anormal variación moderada	
Agua		Causa raíz	Recomendaciones de manten
Desgaste		Relacion con la condensación de agua en el interior del motor debido a bajas temperaturas o a un motor frío, así como a un aumento de la presión en el cárter debido a un respiradero obstruido	
Todas		Cambiar el aceite y filtro, utilizar un aceite de calidad aditivos, analizar el aceite y mantener el motor en	
Modos de Falla		Tendencia: Anormal variación rápida	
Contaminación reciente con agua		Causa raíz	Recomendaciones de manten
		Relacion con la condensación de agua en el interior del motor debido a bajas temperaturas o a un motor frío, así como a un aumento de la presión en el cárter debido a un respiradero obstruido	
		Cambiar el aceite y filtro, utilizar un aceite de calidad aditivos, analizar el aceite y mantener el motor en	

Fig. 37. Prueba de validación o comparación 1.

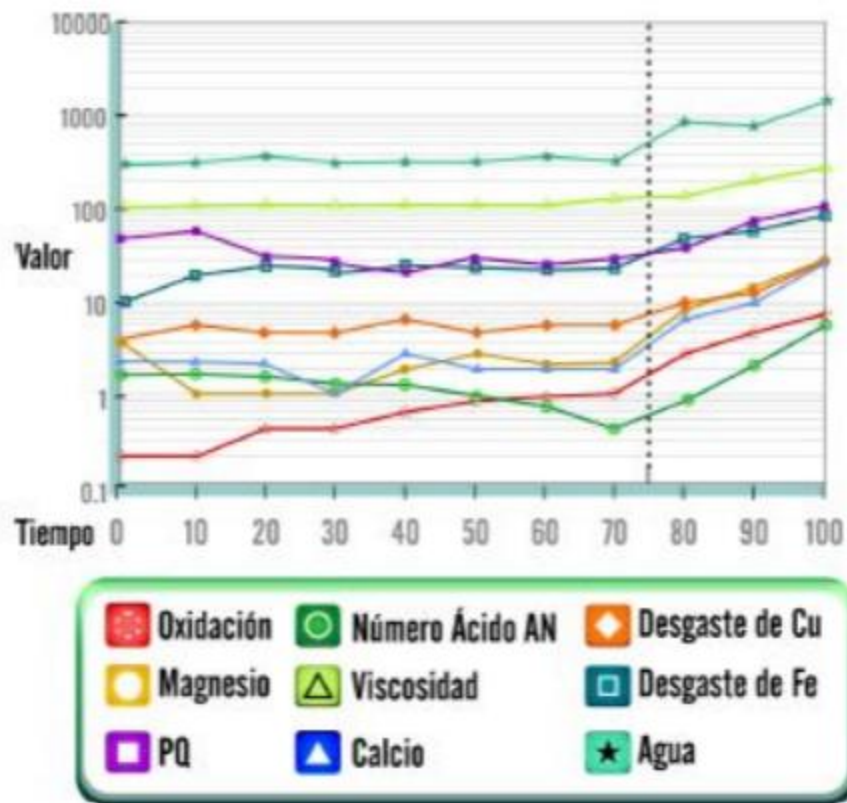


Fig. 38. validación 1. Trujillo,G. (2017), p.194.

Se realizó una validación basada en los comportamientos esperados en una muestra de aceite, seleccionando características clave que deben ser monitoreadas para la correcta identificación de modos de falla. Entre estas características, se incluyó el aumento de los niveles de oxidación y la presencia de agua en la muestra, dos indicadores cruciales de posibles fallos en los equipos. Al realizar este análisis, se observó que la combinación de un incremento en los niveles de oxidación y la aparición de agua en la muestra de aceite condujo a la identificación del modo de falla denominado "Contaminación reciente con agua". Este modo de falla se corresponde de manera exacta con las descripciones y criterios establecidos en el libro de Noria, lo que valida la precisión y fiabilidad del modelo utilizado por la herramienta. Este proceso de validación refuerza la capacidad de la herramienta para identificar de forma correcta y coherente los modos de falla, basándose en los comportamientos observados en las muestras de aceite, alineándose con los estándares de la industria.

2) Validación 2

Para la segunda validación, se seleccionó otro caso de ejemplo basado en los criterios descritos en el libro de Noria. En esta ocasión, se utilizó el contaminante silicio y se analizó un incremento en su concentración en la muestra de aceite. Además, se realizó una selección múltiple de elementos relacionados con el desgaste, específicamente aluminio y hierro, dos indicadores típicos de desgaste en componentes metálicos. Al procesar estos datos, la herramienta identificó el modo de falla correspondiente a "Ingreso de partículas sólidas", que coincide exactamente con la descripción proporcionada en el libro de Noria.

Este resultado se validó mediante una comparación con las gráficas de tendencias de partículas sólidas y contaminantes presentadas en el libro de Noria, que ilustran cómo la presencia y concentración de estos elementos afectan el desempeño y la vida útil de los equipos. El análisis de las tendencias gráficas permitió confirmar que el modo de falla identificado por la herramienta es consistente con las expectativas y los patrones establecidos en la referencia técnica, lo que refuerza la fiabilidad y exactitud del modelo utilizado en la herramienta para la identificación de modos de falla.

SACODE: Análisis de aceite

Componentes		Tendencia: Anormal estable	
Motor CI	1 Modos de falla	Causa raíz	Recomendaciones de mantenimiento
Salud		Contaminación del refrigerante al aceite, la presencia de partículas de polvo o la contaminación con combustible	
Todas			
Contaminación		Tendencia: Anormal variación moderada	
Silicio (Si) (Contaminación Elemento) + Aumenta (Conta...		Causa raíz	Recomendaciones de mantenimiento
Desgaste		Contaminación del refrigerante al aceite, la presencia de partículas de polvo o la contaminación con combustible	
Selección múltiple			
Modos de Falla		Tendencia: Anormal variación rápida	
Falla de filtro de aceite, Filtro de aceite saturado en derivación		Causa raíz	Recomendaciones de mantenimiento
Ingreso de partículas sólidas		Contaminación del refrigerante al aceite, la presencia de partículas de polvo o la contaminación con combustible	
Relleno con aceite contaminado con partículas			

Fig. 39. Prueba de validación o comparación 2.

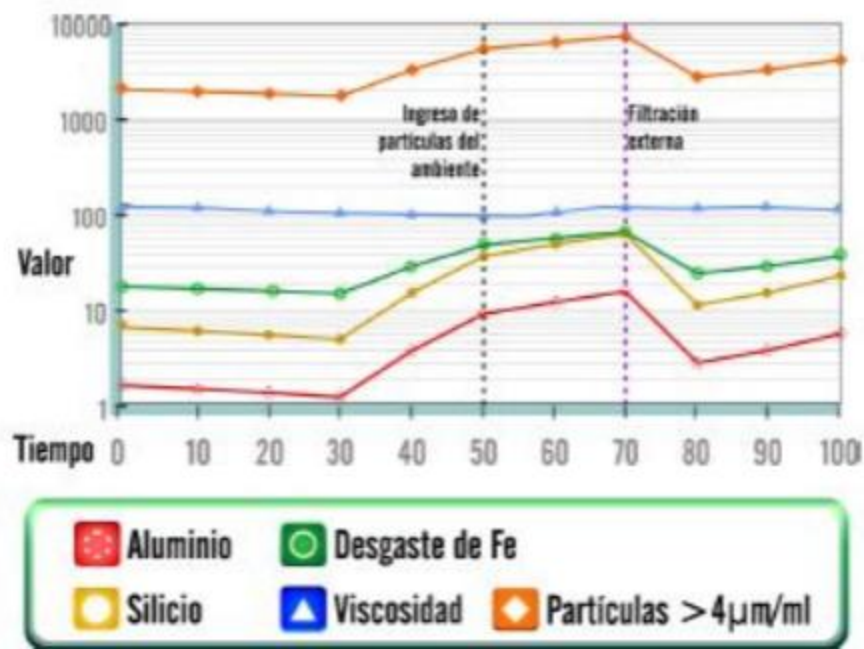


Fig. 40. validación 2. Trujillo, G. (2017), p.185.

3) Validación 3

En el tercer caso, el análisis presenta una mayor complejidad debido a la amplia variedad de opciones posibles para los elementos presentes en la muestra de aceite. En este escenario, el criterio y el conocimiento del analista juegan un papel crucial para determinar el modo de falla más adecuado, ya que la selección de múltiples elementos puede dar lugar a diversas combinaciones y, por ende, a varias posibles conclusiones. Sin embargo, con el objetivo de ilustrar esta variabilidad y la importancia de una selección precisa de los elementos en el proceso de análisis, se optó por no ser excesivamente específico en la selección inicial de los elementos, permitiendo así que el sistema ofreciera un rango más amplio de opciones.

Este enfoque permitió validar que, a medida que se aumente la especificidad en los elementos presentes en la muestra de aceite, las recomendaciones generadas por la herramienta serán más precisas y ajustadas a la realidad operativa del equipo. De esta manera, se demostró que la precisión en la identificación de los elementos, tales como los contaminantes y los signos

de desgaste, tiene un impacto directo en la exactitud de las recomendaciones, ya que reduce el margen de error y aumenta la confiabilidad del modo de falla identificado.

Como en los casos anteriores, el modo de falla identificado en este escenario fue el mismo que se indica en el libro de Noria, lo que valida aún más la eficacia de la herramienta en replicar las recomendaciones basadas en las mejores prácticas y estándares de la industria.

Componentes	1	Tendencia: Anormal estable	
Motor CI	Modos de falla	Causa raíz	Recomendaciones de manten
Salud		Ocurre debido a errores en la selección del lubricante, como el uso de un lubricante incompatible con las especificaciones del fabricante o la falta de claridad en los requisitos de lubricación	
Cinc (Zn) (Salud elemento) + Disminuye (Salud)		Identificar las especificaciones y recomendaciones en cuanto al tipo de lubricante adecuado	
Contaminación		Tendencia: Anormal variacion moderada	
Todas		Causa raíz	Recomendaciones de manten
Desgaste		En algunos casos, la baja calidad del aceite y la falta de estos aditivos pueden llevar a problemas como la formación de espuma y daños en los cojinetes debido a la falta de lubricación hidrodinámica	
Aluminio (Al)		Drenar completamente el aceite usado y reemplazarlo con uno nuevo que cumpla con las especificaciones del fabricante	
Modos de Falla		Tendencia: Anormal variacion rapida	
Aceite degradado (final de su vida)		Causa raíz	Recomendaciones de manten
Aceite operando en alta temperatura constante		En algunos casos, la baja calidad del aceite y la falta de estos aditivos pueden llevar a problemas como la formación de espuma y daños en los cojinetes debido a la falta de lubricación hidrodinámica	
Cambio de aceite con lubricante de tipo diferente		Drenar completamente el aceite usado y reemplazarlo con uno nuevo que cumpla con las especificaciones del fabricante	
Contaminación con agua			
Contaminación con combustible diésel			
Contaminación con refrigerante			
Relleno con lubricante incorrecto			

Fig. 41. Prueba de validación o comparación 3.

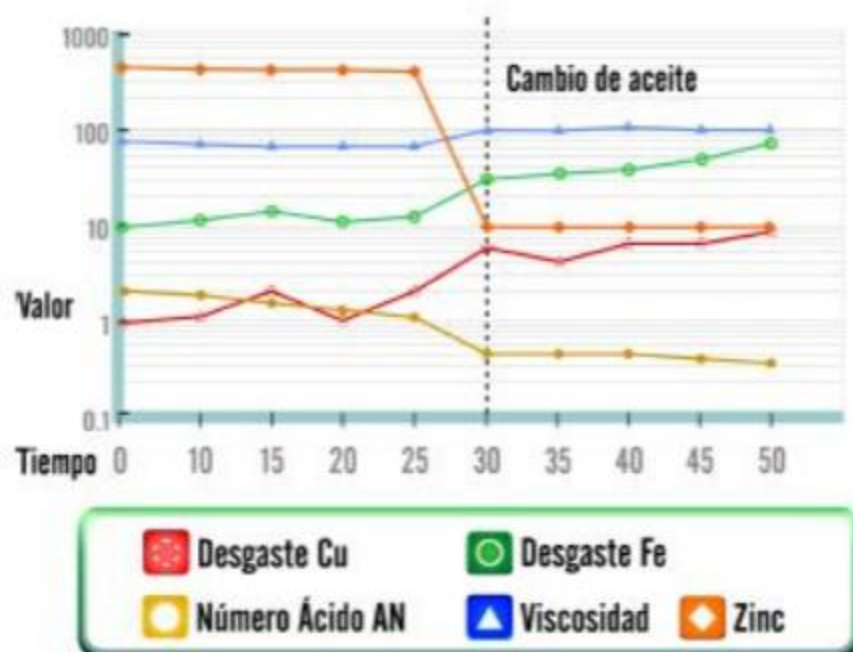


Fig. 42. validación 3. Trujillo, G. (2017), p.166.

X. CONCLUSIONES

La herramienta fue desarrollada en su totalidad como parte del presente proyecto, respondiendo a las necesidades específicas planteadas por los analistas de la empresa. Durante su diseño, se priorizó la usabilidad, precisión y alineación con los estándares de la industria. Su implementación ha sido ampliamente aceptada por los analistas, quienes han destacado su potencial para ser utilizada tanto en su área de especialización como por personas ajenas al tema o aquellas que necesiten evaluar muestras de aceite de manera independiente.

Además, las combinaciones generadas por la herramienta están basadas en similitudes identificadas en el libro de Noria, un referente reconocido en la industria de lubricación, lo que asegura que las recomendaciones emitidas se alineen con estándares confiables. Esto no solo ha fortalecido la confianza en los resultados obtenidos, sino que también ha garantizado la coherencia con las mejores prácticas en el monitoreo de condición.

Es importante señalar que la herramienta, si bien cumple su función de manera efectiva, no sustituye el juicio profesional de los analistas. En situaciones donde se seleccionan múltiples modos de falla o en casos específicos donde las recomendaciones puedan gestionarse de forma distinta dentro de la empresa, la experiencia del analista, su conocimiento del historial operativo y el contexto del equipo minero son fundamentales para la toma de decisiones adecuadas.

Finalmente, la herramienta desarrollada tiene el potencial de extender su alcance a otros sectores del área de mantenimiento, contribuyendo significativamente a la mejora de la eficiencia operativa. En el contexto de la empresa minera Cerrejón, conocida por sus altos estándares operativos y de seguridad, se espera que esta herramienta promueva el uso óptimo de los equipos mineros, extendiendo su vida útil y fortaleciendo los procesos de mantenimiento preventivo y predictivo. Esto, a su vez, garantizará la seguridad, el rendimiento óptimo y la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones.

XI. RECOMENDACIONES

La herramienta desarrollada está diseñada para ser utilizada por cualquier persona que requiera soporte en el análisis de muestras de aceite, ya que su ecosistema proporciona un entorno intuitivo y accesible para este fin. Sin embargo, es importante señalar que, aunque la herramienta facilita el análisis y la identificación de posibles modos de falla, la toma de decisiones críticas debe ser realizada exclusivamente por personal calificado. Este personal debe ser capaz de evaluar de manera precisa cuál es el modo de falla que mejor se ajusta a las condiciones operacionales específicas de los equipos o procesos, considerando el contexto de operación y las características particulares de cada situación.

Además, es fundamental que los usuarios sean capaces de verificar que las recomendaciones generadas por la herramienta cumplen con los estándares operacionales y de mantenimiento establecidos por la empresa. Dado que las recomendaciones pueden variar dependiendo del contexto y las condiciones de operación, es necesario que los analistas o responsables de la toma de decisiones validen que las sugerencias proporcionadas sean aplicables y alineadas con los procedimientos operativos de la empresa.

Finalmente, se recomienda que las personas que utilicen la herramienta tengan un conocimiento mínimo sobre los elementos que pueden ser detectados en una muestra de aceite, así como su comportamiento y las posibles implicaciones que estos tengan en la operación del equipo. Este conocimiento es crucial para interpretar adecuadamente los resultados y tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y las acciones preventivas a seguir.

REFERENCIAS

- [1] Cerrejón, 2024. Obtenido de: <https://www.cerrejon.com/nosotros>
- [2] Historia Cerrejón, 2024. Obtenido de: <https://www.cerrejon.com/nosotros/historia>
- [3] Trujillo, G. (2017). *Interpretación de análisis de lubricantes: Guía de diagnóstico y pronóstico para la toma de decisiones sustentadas*. Editorial [Noria Latin America].
- [4] Kramer, J., & Knaack, D. (Año). *Lubrication Fundamentals* (2ª ed.). CRC Press.
- [5] Lubrication Engineering. (2001). Estados Unidos: Society of Tribologists and Lubrication Engineers.
- [6] ASTM International. (n.d.). *Viscosity Measurement Standards*. Recuperado de <https://www.astm.org>
- [7] Cerrejón. (n.d.). *Nosotros*. Recuperado de <https://www.cerrejon.com/nosotros>
- [8] ISO 14644-1. (2015). *Cleanrooms and Associated Controlled Environments*. ISO.
- [9] Kimball, R., & Ross, M. (2013). *The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling*. Wiley.
- [10] Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- [11] Noria Corporation. (n.d.). *About Us*. Recuperado de <https://www.noria.com>
- [12] PerkinElmer. (n.d.). *FTIR Spectroscopy Applications*. Recuperado de <https://www.perkinelmer.com>
- [13] RPM Global. (n.d.). *AMT Asset Management Tool*. Recuperado de <https://www.rpmglobal.com>
- [14] Smith, J. (2018). *Maintenance Fundamentals*. McGraw-Hill.
- [15] Thermo Fisher Scientific. (n.d.). *Spectrometer Applications*. Recuperado de <https://www.thermofisher.com>
- [16] Cerrejón. (n.d.). *Nuestra operación*. Recuperado de <https://www.cerrejon.com>
- [17] Noria Corporation. (n.d.). *Oil Analysis and Lubrication Best Practices*. Recuperado de <https://www.noria.com>