



METODOLOGÍA GRÁFICA PARA PRIORIZAR ACTIVOS Y DEFINIR ESTRATEGIAS DE
MANTENIMIENTO ÓPTIMAS
CASO DE ESTUDIO: FLOTAS MINERAS

JUAN ESTEBAN TRUJILLO PEÑA

Trabajo de grado

Asesor

Ronald Mauricio Martinod Restrepo

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2025

“Ya hemos examinado la imaginación en el tratado sobre el alma, y allí hemos llegado a la conclusión de que todo pensamiento es imposible sin una imagen”.

Aristóteles

CONTENIDO

pág.

0. INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. JUSTIFICACIÓN	17
3. OBJETIVOS	18
3.1. GENERAL.....	18
3.2. ESPECÍFICOS.....	18
4. METODOLOGÍA	19
5. ANTECEDENTES.....	22
6. MARCO TEÓRICO.....	25
6.1. EL CICLO DE VIDA DE ACTIVOS	26
6.2. CONCEPTOS GENERALES DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	27
6.3. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO ALINEADA A LA GESTIÓN DE ACTIVOS.....	28
6.3.1. Fases del MGM	29
6.4. TOMA DE DECISIONES EN EL MGM.....	31
6.5. SELECCIÓN DE MÉTODOS.....	32
6.5.1. Criticidad total por riesgo.....	33
6.5.2. Diagrama de Jack-Knife.....	34
6.5.3. Diagrama de dispersión de costos	45
6.5.4. Cuadrícula de toma de decisiones	51
6.5.5. Comparación del JKD y la DMG	60
7. CASO DE ESTUDIO.....	62
7.1. PASO 1: RECOPIACIÓN DE DATOS	62
7.2. PASO 2: APLICACIÓN DE LA MATRIZ CTR.....	62
7.2.1. Contexto operativo de la flota FL-01	66
7.3. PASO 3: APLICACIÓN DEL JKD.....	66
7.3.1. JKD por equipos.....	67
7.3.2. Resultados JKD por equipos	68

7.3.3. JKD por sistemas.....	69
7.3.4. Resultados JKD por sistemas	71
7.4. PASO 4: APLICACIÓN DEL CSD	72
7.4.1. CSD por equipos	72
7.4.2. Resultados CSD por equipos.....	73
7.4.3. CSD por sistemas	74
7.4.4. Resultados CSD por sistemas.....	75
7.5. PASO 5: APLICACIÓN DE LA DMG.....	76
7.5.1. DMG por sistemas.....	76
7.5.2. Resultados DMG por sistemas	79
7.5.3. Resultados DMG 3 por sistemas	82
7.6. PASO 6: MEJORAS OBTENIDAS	85
8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	87
8.1. RESUMEN DE RESULTADOS.....	87
8.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	90
9. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES	92
9.1. CONCLUSIONES.....	92
9.2. LIMITACIONES.....	94
9.3. RECOMENDACIONES	94
REFERENCIAS.....	96
ANEXOS	105
Anexo A. Tablas de indicadores RAM.....	105

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1 Ponderación de criterios evaluados para CTR.....	63
Tabla 2 Resultados de aplicación matriz CTR.....	64
Tabla 3 Características de la flota de camiones	65
Tabla 4 Datos para análisis JKD por equipos	67
Tabla 5 Datos para análisis JKD por sistemas	70
Tabla 6 Datos para análisis CSD por equipos.....	72
Tabla 7 Datos para análisis CSD por sistemas.....	74
Tabla 8 Datos para DMG por sistemas	76
Tabla 9 Criterios de la DMG por sistemas.....	77
Tabla 10 Datos DMG 3 por sistemas.....	80
Tabla 11 DMG 3 por sistemas	81
Tabla 12 Comparación entre estrategias DMG y DMG 3	83
Tabla 13 Indicadores RAM por equipos	105
Tabla 14 Indicadores RAM por sistemas.....	106

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1 Metodología gráfica para priorizar activos y definir estrategias de mantenimiento.....	21
Figura 2 Modelo de seis bloques del IAM.....	26
Figura 3 Ejemplos de las etapas del ciclo de vida de los activos.....	27
Figura 4 MGM genérico.	29
Figura 5 Matriz de criticidad del modelo CTR.....	34
Figura 6 Diagrama de dispersión n vs. $MTTR$	37
Figura 7 Diagrama de dispersión logarítmica n vs. $MTTR$	38
Figura 8 JKD básico.....	40
Figura 9 Representación genérica del JKD.....	42
Figura 10 JKD cuadrante II crónico.....	43
Figura 11 JKD cuadrante III agudo.....	44
Figura 12 Estructura de costos globales específicos.....	46
Figura 13 Representación genérica del CSD.	50
Figura 14 Representación genérica del DMG.....	53
Figura 15 Representación de los diferentes MPP en la DMG.	54
Figura 16 Enfoque de mantenimiento RCM.....	56
Figura 17 Enfoque de mantenimiento TPM.....	56
Figura 18 Matriz CTR.....	64
Figura 19 Histórico de disponibilidad operativa flota FL-01.	66
Figura 20 Diagrama de Jack-Knife por equipos.	67
Figura 21 Diagrama de dispersión por equipos. Versión 3D.....	69
Figura 22 Diagrama de Jack-Knife por sistemas.	70
Figura 23 Diagrama de dispersión por sistemas. Versión 3D.....	71
Figura 24 CSD por equipos.....	73
Figura 25 CSD por sistemas.....	75
Figura 26 DMG por sistemas.	78
Figura 27 DMG 3 por sistemas.	81

Figura 28 Enfoque TPM. 84

Figura 29 Enfoque RCM..... 85

Figura 30 Tablero 1 para toma de decisiones. 87

Figura 31 Tablero 2 para toma de decisiones. 89

LISTA DE ECUACIONES

pág.

Ecuación 1 Fórmula general de criticidad total por riesgo	33
Ecuación 2 Consecuencias de la falla	33
Ecuación 3 Fórmula de criticidad total por riesgo (por factores)	33
Ecuación 4 Tiempo de inactividad o <i>Downtime</i>	36
Ecuación 5 Tiempo medio de reparación o Mean Time to Repair (MTTR).....	36
Ecuación 6 Logaritmo natural del MTTR.....	37
Ecuación 7 Tiempo medio entre fallas o Mean Time Between Failures (MTBF).....	38
Ecuación 8 Tasa de fallas por unidad de tiempo.....	38
Ecuación 9 Tasa de fallas en función del MTBF	39
Ecuación 10 Disponibilidad en función de Uptime y Downtime	39
Ecuación 11 Disponibilidad en función del MTBF y MTTR	39
Ecuación 12 Downtime.....	39
Ecuación 13 Número de fallas	39
Ecuación 14 Límite del número de fallas para JKD	40
Ecuación 15 Límite del MTTR para JKD.....	40
Ecuación 16 Fórmula general de indisponibilidad (U)	41
Ecuación 17 Indisponibilidad por falla	41
Ecuación 18 Indisponibilidad por falla en escala logarítmica	41
Ecuación 19 Promedio de la tasa de fallas.....	41
Ecuación 20 Promedio de los tiempos medios para reparar	41
Ecuación 21 Límite relativo de la tasa de fallas.....	42
Ecuación 22 Límite relativo del MTTR.....	42
Ecuación 23 Límite relativo de la indisponibilidad	42
Ecuación 24 Costo global específico	48
Ecuación 25 Fórmula general del costo global de mantenimiento por unidad de tiempo	49
Ecuación 26 Costo global de intervención por unidad de tiempo en función de λ y MTTR.....	49
Ecuación 27 Tasa de costos directos por unidad de tiempo.....	49

Ecuación 28 Costo de las pérdidas derivadas del <i>Downtime</i> por unidad de tiempo	49
Ecuación 29 Límite relativo del costo global específico	50
Ecuación 30 Límite de umbral del costo global.....	51
Ecuación 31 Diferencia entre el valor máximo y mínimo de frecuencia de fallas	57
Ecuación 32 Límite bajo/medio de la frecuencia de fallas	57
Ecuación 33 Límite medio/alto de la frecuencia de fallas	57
Ecuación 34 Diferencia entre los valores máximo y mínimo del tiempo de inactividad o <i>Downtime</i> ...	57
Ecuación 35 Límite bajo/medio para el tiempo de inactividad.....	57
Ecuación 36 Límite medio/alto para el tiempo de inactividad.....	57
Ecuación 37 Distancia euclidiana entre dos puntos	58
Ecuación 38 Disimilitudes de Canberra entre dos puntos.....	58
Ecuación 39 Intervalo constante de la frecuencia de fallas	58
Ecuación 40 Intervalo para la frecuencia de fallas (alta)	59
Ecuación 41 Intervalo para la frecuencia de fallas (media).....	59
Ecuación 42 Intervalo para la frecuencia de fallas (baja)	59
Ecuación 43 Intervalo constante del <i>Downtime</i>	59
Ecuación 44 Intervalo para el tiempo de inactividad o <i>Downtime</i> (alto).....	59
Ecuación 45 Intervalo para el tiempo de inactividad o <i>Downtime</i> (medio).....	59
Ecuación 46 Intervalo para el tiempo de inactividad o <i>Downtime</i> (bajo).....	60

LISTA DE SÍMBOLOS Y/O VARIABLES

<i>A</i>	Disponibilidad (<i>Availability</i>).
<i>AHP</i>	Analytic Hierarchy Process (proceso de jerarquía analítica).
<i>BSC</i>	Balanced Scorecard (cuadro de mando integral).
<i>C</i>	Consecuencias de las fallas.
<i>CM</i>	Factor costos de mantenimiento.
<i>CTR</i>	Criticidad total por riesgo.
<i>CSD</i>	Diagrama de dispersión de costos.
<i>D</i>	Downtime o tiempo de inactividad.
<i>DMG</i>	Cuadrícula de toma de decisiones.
<i>DMG 3</i>	Variante (versión 3) de la cuadrícula de toma de decisiones.
<i>FF</i>	Frecuencia de falla
<i>FO</i>	Factor de flexibilidad operacional.
<i>IAM</i>	Institute of Asset Management (Instituto de Gestión de Activos).
<i>IO</i>	Factor de impacto en la producción.
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización).
<i>JKD</i>	Diagrama de Jack-Knife.
<i>KPI</i>	Key Performance Indicators (indicadores clave de desempeño).
<i>MACBETH</i>	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique.
<i>MGM</i>	Modelo de gestión del mantenimiento.
<i>MDT</i>	Mean Down Time (tiempo medio de inactividad).
<i>MPP</i>	Mantenimiento preventivo planificado.
<i>MTBF</i>	Mean Time Between Failures (tiempo medio entre fallas).
<i>MTTR</i>	Mean Time To Repair (tiempo medio para reparar).
<i>n</i>	Número de ocurrencias o fallas.
<i>N</i>	Número total de fallas.
<i>PAS 55</i>	Publicly Available Specification 55.
<i>PRA/PRN</i>	Evaluación probabilística del riesgo/Índice de riesgo del activo.
<i>Q</i>	Número de equipos o sistemas.
<i>RAM</i>	Reliability, Availability, Maintainability.

RCFA Análisis de causa raíz de fallas.

RCM Reliability Centered Maintenance (mantenimiento centrado en confiabilidad).

SHA Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente.

SMRP Society for Maintenance and Reliability Professionals.

T Intervalo de tiempo analizado.

TTR Time To Repair (tiempo para reparar).

TPM Total Productive Maintenance (mantenimiento productivo total).

UNE-EN Norma Europea (prefijo usado en normas como UNE-EN-13306 y UNE-EN-16646).

U Unavailability (indisponibilidad) (Generalmente, definida como $U = 1 - A$).

λ Tasa de fallas.

Resumen

El propósito del presente trabajo es exponer una metodología integrada de soporte para la toma de decisiones estratégicas en la gestión del mantenimiento. Esta metodología se fundamenta en herramientas analíticas gráficas que utilizan como indicadores claves la tasa de fallas y el tiempo medio para reparar. Su enfoque principal es la identificación y priorización de activos críticos para, simultáneamente, definir las estrategias más adecuadas para su mantenimiento. Para ello, integra cuatro herramientas gráficas de análisis: primero, la matriz de Criticidad Total por Riesgo; segundo, el Diagrama Jack-Knife; tercero, el Diagrama de Dispersión de Costos, y cuarto, la Cuadrícula de Toma de Decisiones. El desarrollo de la metodología se ilustra por medio de un caso de estudio en cinco flotas de camiones que operan en una mina de carbón a cielo abierto en el norte de Colombia. Luego, la metodología prioriza una de las flotas conformada por nueve camiones cisterna para completar todos los pasos propuestos. Los resultados obtenidos permiten enfocar los esfuerzos de forma estratégica en equipos con alta criticidad y definir las estrategias de mantenimiento; de esta manera, se puede mejorar la disponibilidad operativa de la flota y reducir los costos asociados con las fallas. Este enfoque resalta la importancia de adaptar las estrategias de mantenimiento de acuerdo con la criticidad y comportamiento real de los activos, con miras a ofrecer una perspectiva práctica sobre la aplicación de herramientas gráficas de análisis en la gestión del mantenimiento industrial.

Palabras clave: Estrategias de mantenimiento, Herramientas gráficas, Priorización de activos, Toma de decisiones

Abstract

The purpose of this paper is to present an integrated methodology to support strategic decision-making in maintenance management. This methodology is based on graphical analytical tools that use failure rate and mean time to repair as key indicators. Its main focus is the identification and prioritization of critical assets to simultaneously define the most appropriate maintenance strategies. To this end, it integrates four graphical analysis tools: first, the Total Risk Criticality Matrix; second, the Jack-Knife Diagram; third, the Cost Scatter Diagram; and fourth, the Decision-Making Grid. The development of the methodology is illustrated through a case study of five truck fleets operating in an open-pit coal mine in northern Colombia. The methodology then prioritizes one fleet of nine tanker trucks to complete all proposed steps. The results obtained allow for strategic focus on highly critical equipment and definition of maintenance strategies, thereby improving fleet operational availability and reducing costs associated with failures. This approach highlights the importance of adapting maintenance strategies according to the criticality and actual behavior of assets, with a view to offering a practical perspective on the application of graphical analysis tools in industrial maintenance management.

Keywords: Asset prioritization, Decision making, Graphic tools, Maintenance strategies

0. INTRODUCCIÓN

Para garantizar la eficiencia operativa y la sostenibilidad empresarial en el largo plazo, es fundamental alinear la gestión del mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización y la gestión de activos. En este contexto, son varios los estudios que demuestran la aplicabilidad de herramientas gráficas de análisis para apoyar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de una forma práctica, ágil y simple.

Con base en lo expuesto, este trabajo busca responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo desarrollar una metodología fundamentada en herramientas gráficas de análisis, para priorizar activos y definir estrategias de mantenimiento óptimas en flotas mineras? Para darle respuesta, se propone una metodología que integra herramientas gráficas de análisis para priorizar activos de manera efectiva, facilitando así la definición de estrategias de mantenimiento y respaldando decisiones que en muchas ocasiones se basan en criterios subjetivos.

Los resultados obtenidos proporcionan no solo un marco metodológico práctico, sino que también soportan de manera efectiva la toma de decisiones con un alto impacto técnico-económico para la organización. Al integrar este enfoque analítico dentro de un modelo de gestión del mantenimiento que se encuentre alineado con los principios de gestión de activos, se establece una base sólida que permite a los tomadores de decisiones afrontar los desafíos operativos de manera más eficiente y estratégica.

Las herramientas gráficas de análisis utilizadas en este estudio incluyen la matriz de Criticidad Total por Riesgo (CTR), el Diagrama de Jack-Knife (JKD), el Diagrama de Dispersión de Costos (CSD) y la Cuadrícula de Toma de Decisiones (DMG). Cada una tiene un objetivo específico y, en conjunto, permiten evaluar de manera integral el comportamiento de los activos.

En este orden de ideas, la matriz CTR permite jerarquizar los activos según su criticidad, combinando la frecuencia de fallas y sus consecuencias. A través de una matriz gráfica, facilita la priorización de esfuerzos y recursos en aquellos activos considerados “críticos” y que tienen un impacto significativo en la operación.

Por su parte, el JKD ofrece un gráfico por cuadrantes según la tasa de fallas, el tiempo medio de reparación y su impacto en la disponibilidad de los activos. De esta manera, permite identificar aquellos equipos y sistemas que se consideran malos actores para la operación. Como una variante mejorada del JKD, se encuentra el CSD, que facilita la evaluación del impacto económico de las fallas considerando el impacto en la disponibilidad; además, prioriza aquellos activos con mayor impacto en costos de indisponibilidad por fallas.

Por último, está la DMG, una poderosa y práctica herramienta que se enfoca en evaluar los activos según la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad (*Downtime*). Su objetivo es clasificarlos y definirles estrategias de mantenimiento acordes con su comportamiento real en la operación, optimizando así los recursos y mejorando la eficiencia operativa.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Parra et al. [1] y Contreras [2], es fundamental alinear los objetivos de la gestión del mantenimiento con los objetivos estratégicos de la organización y la gestión de activos. Esta alineación es clave en una gestión eficiente del mantenimiento para alcanzar resultados sostenibles en el largo plazo. La no gestión a este nivel en flotas de activos del sector minero incentivará una problemática que puede conducir a elevados costos operativos y a una disminución en la disponibilidad operativa. Por lo tanto, identificar oportunidades de mejora y priorizar esfuerzos se convierte en un reto para las organizaciones, en especial, los departamentos de mantenimiento, quienes deben tomar decisiones rápidas y acertadas.

Dicho lo anterior, es necesario contar con herramientas de análisis fundamentadas, que realicen una evaluación integral de los activos. Esto permitirá priorizar los esfuerzos de mantenimiento teniendo en cuenta su comportamiento real y, a su vez, definir las estrategias de mantenimiento adecuadas según el caso. Muchas veces, las metodologías convencionales no son suficientes para abordar la complejidad de las operaciones mineras o, en su defecto, solo se desarrollan de forma teórica, con poco margen para su aplicabilidad en contextos reales.

2. JUSTIFICACIÓN

El sector minero enfrenta constantes desafíos en materia de optimización de costos, control de riesgos y mejora en el desempeño de sus activos. Sus operaciones, que pueden ser a cielo abierto o subterráneas, requieren maquinaria pesada y sistemas robustos expuestos a contextos operativos agresivos, donde el desgaste y las condiciones ambientales producen alta probabilidad de falla y, por consiguiente, afectaciones a la disponibilidad operativa.

Con el fin de enfrentar estos desafíos, este trabajo propone una metodología integrada con herramientas gráficas de análisis enfocadas en la priorización de activos y la definición de estrategias de mantenimiento óptimas. Partiendo de la necesidad identificada en una mina de carbón a cielo abierto en el norte de Colombia, se presenta un caso de estudio en el que se aplica la metodología a cinco flotas de camiones con diferentes funciones en la operación.

La metodología propuesta integra la matriz CTR, el JKD, el CSD y la DMG para determinar y evaluar de manera precisa los activos críticos. Esta integración permite una toma de decisiones objetiva y fundamentada que facilita la priorización y la definición efectiva de estrategias de mantenimiento. Al implementar esta metodología basada en representaciones gráficas, los tomadores de decisiones podrán identificar de manera precisa las áreas que requieren atención prioritaria, optimizar el proceso de mantenimiento y maximizar el rendimiento de los activos.

Diversos estudios en el mundo respaldan el uso de la matriz CTR, el JKD, el CSD y la DMG como herramientas de soporte para tomar decisiones en la gestión del mantenimiento. Entre estos, se destacan [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] y [10]. Por otro lado, en [11], [12], [13] y [14] se demuestra la vigencia de estas herramientas en la priorización de activos y la definición de estrategias de mantenimiento.

Por lo tanto, este trabajo ofrece un marco práctico y fundamentado que favorece el proceso de mejora continua y apoya la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de flotas mineras. Asimismo, se puede valorar en diferentes contextos operacionales con excelentes resultados, que alineen las mejores prácticas internacionales con las necesidades locales.

3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Desarrollar una metodología fundamentada en herramientas gráficas de análisis, para priorizar activos y definir estrategias de mantenimiento óptimas en flotas mineras.

3.2. ESPECÍFICOS

- Integrar las herramientas gráficas de análisis (CTR, JKD, CSD y DMG) en un modelo metodológico que permita evaluar de manera integral el comportamiento de los activos en flotas mineras.
- Aplicar la metodología propuesta a un caso de estudio real en una mina de carbón a cielo abierto en Colombia, con el fin de validar su aplicabilidad y efectividad en la toma de decisiones estratégicas.
- Determinar cuáles son los activos críticos en función de la tasa de fallas, impacto en la disponibilidad operativa y costos asociados, para enfocar los esfuerzos de mantenimiento de forma estratégica.
- Definir estrategias de mantenimiento adecuadas, con base en los resultados obtenidos a través de las herramientas gráficas de análisis con el propósito de mejorar la disponibilidad operativa y reducir los costos asociados a fallas.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo de la metodología sigue una estructura deductiva, ya que parte de principios generales relacionados con gestión de activos y mantenimiento para abordar problemas específicos mediante un caso de estudio real. En este sentido, se adoptó un enfoque que va de lo general a lo particular, iniciando con una revisión teórica sobre los siguientes aspectos:

- Conceptos generales de gestión de activos
- Ciclo de vida de los activos
- Conceptos generales de gestión del mantenimiento
- Gestión del mantenimiento alineada a la gestión de activos
- Toma de decisiones dentro de un modelo de gestión de mantenimiento
- Selección de métodos para la toma de decisiones

Esto permitió estructurar una metodología que integra cuatro herramientas gráficas: la Matriz de Criticidad Total por Riesgo (CTR), el Diagrama Jack-Knife (JKD), el Diagrama de Dispersión de Costos (CSD) y la Cuadrícula de Toma de Decisiones (DMG).

Esta metodología empleó un enfoque mixto, integrando análisis cuantitativo y cualitativo para respaldar las decisiones en el mantenimiento de flotas mineras. El componente cuantitativo se basó en la recopilación y procesamiento de datos numéricos, como tasa de fallas (λ), tiempo medio para reparar (MTTR), la disponibilidad operativa y los costos derivados de las fallas. Estos datos permitieron evaluar objetivamente la eficiencia de los activos y el impacto de las fallas en la operación.

En cuanto al componente cualitativo, cabe resaltar que fue fundamental para complementar los resultados obtenidos a partir de datos numéricos. Aspectos como la experiencia de los operadores, el conocimiento propio del personal de mantenimiento, las condiciones operativas específicas y las restricciones logísticas de la mina, fueron elementos clave que debieron ser tenidos en cuenta al momento de definir las consecuencias de las fallas.

Por otra parte, es importante señalar que este trabajo es de tipo aplicado, ya que tiene como objetivo generar conocimiento orientado a la solución de un problema específico del sector minero. Su nivel de profundidad es exploratorio, descriptivo y explicativo. La fase exploratoria permitió identificar patrones en los datos; la fase descriptiva caracterizó el comportamiento de las flotas; y la fase explicativa analizó las causas asociadas a la criticidad de los activos, apoyando decisiones fundamentadas.

Dado que no se manipularon variables, sino que se observaron tal como se presentaban en un contexto operativo real, el diseño del trabajo corresponde a un enfoque no experimental. Asimismo, considerando que el estudio se basó en datos históricos correspondientes a un periodo específico de la operación, se clasifica como una investigación de tipo transversal y retrospectiva.

La metodología se aplicó mediante un estudio de caso en cinco flotas de camiones que operan en una mina de carbón en el norte Colombia, con operación a cielo abierto. El proceso siguió los pasos descritos a continuación:

Paso 1: Recolectar los datos necesarios para el análisis

Paso 2: Jerarquizar las flotas aplicando la matriz CTR

Paso 3: Priorizar los activos de la flota aplicando el JKD

Paso 4: Priorizar los activos de la flota aplicando el CSD

Paso 5: Definir estrategias de mantenimiento aplicando la DMG

Paso 6: Comparar mejoras obtenidas

Teniendo en cuenta la naturaleza de los datos usados en el estudio, estos fueron de tipo observacional y se encontraban previamente procesados en formato numérico y fueron extraídos directamente del software para la gestión de mantenimiento de las flotas.

Cada uno de los pasos de la metodología se realizaron de forma secuencial y estructurados por procesos, de la siguiente manera (fig. 1):

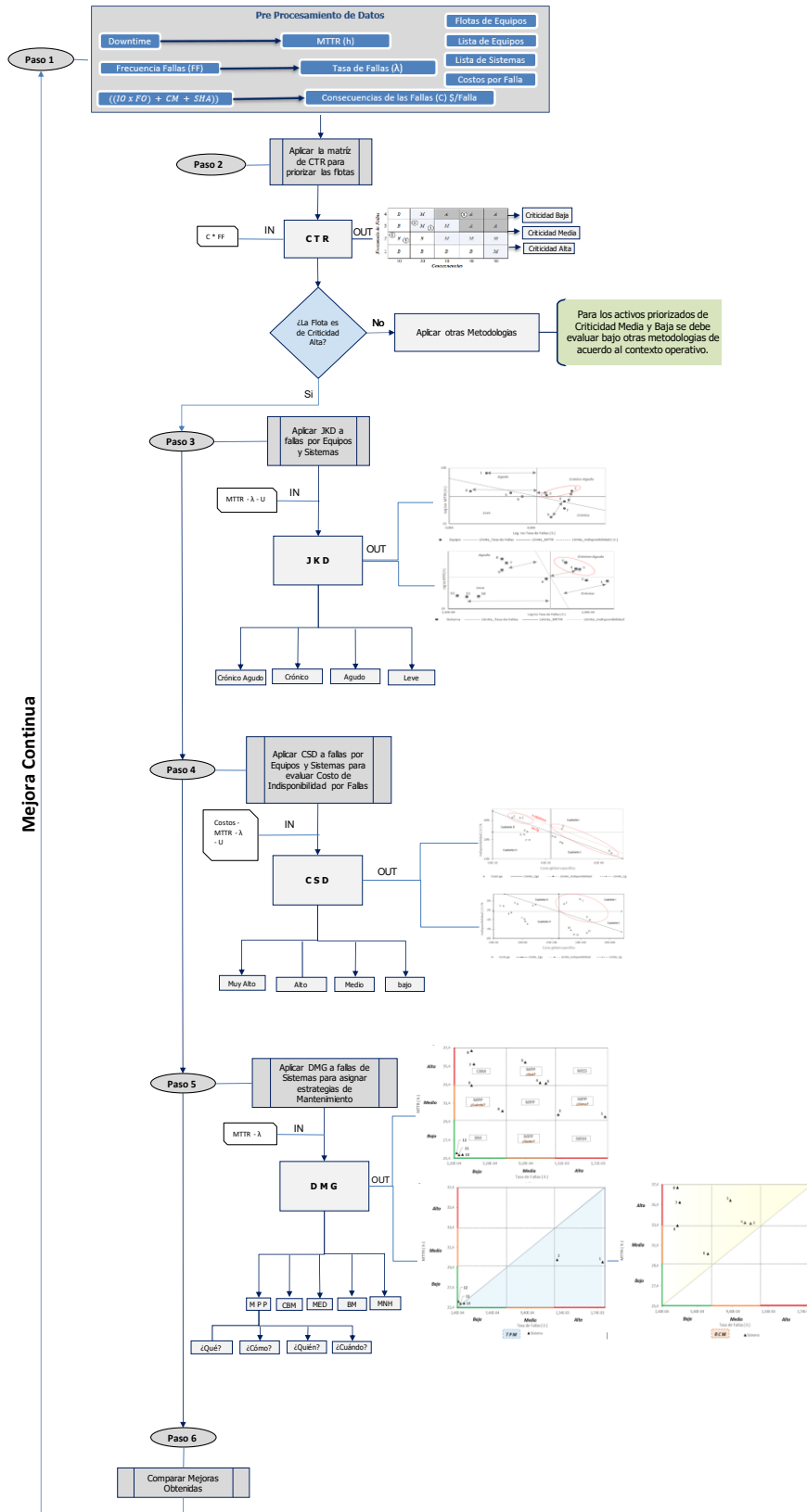


Fig. 1. Metodología gráfica para priorizar activos y definir estrategias de mantenimiento.
 Fuente: Elaboración propia. Visualización por procesos.

5. ANTECEDENTES

Entre los métodos tradicionales que se emplean para tomar decisiones en la gestión del mantenimiento, se encuentra el análisis de Pareto. Su objetivo es identificar los componentes críticos de un equipo o sistema. Su enfoque es cuantitativo y se basa en la regla 80/20, que indica que el 80 % de los problemas los ocasiona el 20 % de causas [15]. Consiste, además, en recolectar y analizar datos para priorizar equipos o sistemas a partir de algún criterio definido: disponibilidad, fallas, tiempo de reparación, costos, etc. Una de sus ventajas es que permite identificar rápidamente los problemas más significativos; no obstante, tiene una limitación: requiere un único criterio para establecer prioridades, lo que puede limitar su efectividad al no considerar múltiples factores simultáneamente [4].

Por otro lado, en una revisión de la literatura llevada a cabo por [16] , [17], se concluyó que, entre los métodos cuantitativos y semicuantitativos de apoyo en la toma de decisiones se encuentran los siguientes:

La frontera de Pareto: este método se usa para encontrar soluciones adecuadas a problemas con varios objetivos, en los cuales no es posible mejorar un criterio sin afectar otro. Es útil cuando se deben tomar decisiones complejas que implican varios factores al mismo tiempo y ayuda a visualizar diferentes opciones viables [18]. Aunque este método presenta como ventaja su flexibilidad para adaptarse a distintos contextos, también tiene desventajas como la complejidad computacional, requiere gran volumen de datos para el análisis y depende directamente de modelos complejos para representar los criterios evaluados.

Proceso de análisis jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP): esta metodología se utiliza para tomar decisiones complejas, que se organizan en una jerarquía de criterios y alternativas. Su objetivo principal es evaluar y priorizar diferentes opciones teniendo en cuenta múltiples factores, que se comparan de manera simultánea y asignando pesos a cada criterio según su importancia relativa [19]. Entre sus ventajas, están la facilidad para la toma de decisiones complejas y la posibilidad de incorporar la opinión de expertos. Entre sus desventajas, están la subjetividad en las comparaciones y la dificultad para manejar grandes cantidades de criterios al mismo tiempo.

Método *elimination et choix traduisant la réalité (Electre)*: este método ha sido empleado para la toma de decisiones multicriterio y contribuye a seleccionar alternativas por medio de la eliminación de aquellas que no cumplen con los criterios establecidos [20]. Consiste en la comparación de diferentes opciones, luego asigna pesos a cada criterio, para, finalmente, filtrar las mejores alternativas. Entre sus ventajas, está la capacidad de manejar datos cualitativos y cuantitativos; no obstante, como desventaja está su subjetividad en la asignación de pesos y umbrales.

Teoría de utilidad multiatributo (MAUT): esta teoría, considerada un método, se utiliza para evaluar alternativas a partir de varios criterios, y asigna una “utilidad” a cada opción, ponderando su desempeño en cada atributo [21]. Su objetivo principal es facilitar la toma de decisiones complejas y proporcionar una medida cuantitativa de preferencia. Aunque permite incorporar múltiples criterios de forma estructurada, una de sus desventajas es la dificultad para definir “utilidades” precisas, ya que requiere un conocimiento detallado de la importancia de cada atributo.

Métodos de organización de clases por preferencias (Promethee): este método de toma de decisiones multicriterio se utiliza para clasificar y ordenar alternativas basadas en preferencias. Su objetivo principal es comparar opciones a partir de diferentes criterios y generar un *ranking* que refleje la preferencia general [22]. Su enfoque consiste en calcular la diferencia de preferencia entre las alternativas para cada criterio y luego combinar estos resultados para generar una clasificación final. Entre sus ventajas están su simplicidad y flexibilidad, así como la capacidad de manejar datos cuantitativos y cualitativos. Una gran desventaja es la sensibilidad a la elección de los parámetros de decisión.

Sin embargo, así como se menciona en [17] y [23], estos métodos presentan desafíos y limitaciones adicionales, ya que han sido predominantemente teóricos, lo cual puede restringir su aplicabilidad en contextos reales donde se requiere tomar decisiones de forma práctica, ágil y simple. En la literatura revisada, se encontró un modelo semicuantitativo, práctico y sencillo, denominado criticidad total por riesgo (CTR). Este modelo se basa en la estimación del factor riesgo, evaluando la frecuencia de fallas y sus consecuencias [1]. De forma gráfica, permite jerarquizar los activos y clasificarlos en tres grupos: críticos, de criticidad media y no críticos. Esta priorización ha sido ampliamente usada en diferentes sectores de la industria, incluido el sector minero.

Igualmente, con base en métodos gráficos, se encuentra el diagrama de Jack-Knife (JKD, por sus siglas en inglés) para priorizar los tiempos de inactividad de activos ocasionados por fallas. Este diagrama permite identificar los activos que requieren prioridad de atención basándose en la tasa de fallas y sus tiempos de reparación [24]. Posteriormente, en [4] se presentó una mejora a la técnica original del JKD para incluir los efectos económicos de la indisponibilidad ocasionada por fallas. Para ello, se desarrolló un nuevo diagrama de dispersión de costos (CSD, por sus siglas en inglés).

Por otra parte, en [25] se propuso una interesante cuadrícula para toma de decisiones, denominada (DMG, por sus siglas en inglés). Esta herramienta de análisis gráfico es un híbrido del enfoque basado en reglas y el proceso de jerarquía analítica para tomar decisiones con criterios múltiples (AHP, por sus siglas en inglés). La DMG facilita la toma de decisiones clasificando los activos según su prioridad y asignando estrategias de mantenimiento según la frecuencia de fallas y duración del tiempo de inactividad.

Sumado a lo anterior, para la toma de decisiones, Carnero y Gómez [26] propusieron una herramienta de análisis multicriterio basada en cadenas de Markov, denominada Macbeth. Esta metodología permite calcular la disponibilidad media esperada en diversos sistemas y ofrece una clasificación de políticas y acciones de mantenimiento por categorías mediante un enfoque basado en la comparación de alternativas. Además, combinando criterios semicuantitativos, se convierte en una herramienta útil cuando los criterios no pueden evaluarse en términos absolutos. Sin embargo, esto se convierte al mismo tiempo en una desventaja, ya que requiere una evaluación rigurosa y muy estructurada.

Como se puede evidenciar, han sido constantes los esfuerzos por crear herramientas que permitan tomar decisiones acertadas en la gestión del mantenimiento. La incertidumbre que siempre está presente al momento de tomar decisiones en esta área incentiva la investigación sobre el tema.

6. MARCO TEÓRICO

Desde mediados de los noventa, la gestión de activos ha sido reconocida como una disciplina en sí misma. Esta gestión integra técnicas y conceptos de finanzas, tecnología, ingeniería e incluso de operaciones [1]. Según el Instituto de Gestión de Activos (IAM, por sus siglas en inglés), la gestión de activos hace referencia a la combinación de arte y ciencia para tomar decisiones correctas que permitan generar valor durante el proceso de selección, operación, mantenimiento y renovación, incluyendo responsabilidades posteriores a la renovación del activo [27].

Posteriormente, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) propuso un estándar para la gestión de activos con base en la PAS 55:2008 [28], reconocido actualmente como el conjunto de normas ISO 55000, siendo la norma ISO 55001 la que establece los requisitos de certificación. Como se puede observar, la gestión de activos, como disciplina, ha sufrido diferentes transformaciones en pro de la mejora continua.

En el constante esfuerzo realizado por el IAM para transmitir conocimiento relacionado con la gestión de activos —y quizá evitar confusiones—, ha publicado diferentes versiones de la denominada anatomía de la gestión de activos. Estos documentos han sido creados con el fin de proporcionar una apreciación de diferentes conceptos: qué es, qué no es, qué se puede lograr con la gestión de activos, cuál es el alcance de la disciplina y una descripción de los conceptos subyacentes y su filosofía. Estos han sido ampliamente utilizados por diferentes empresas, académicos, organizaciones y gobiernos alrededor del mundo [29].

En su más reciente publicación de la anatomía de la gestión de activos, IAM [29] utiliza una analogía médica para ilustrarla: al igual que los médicos necesitan conocer la anatomía básica y luego profundizar en su especialidad, en la gestión de activos es esencial tener una comprensión general de todos los temas. Esta analogía resalta la importancia de tener dicha comprensión de lo que es la gestión de activos, antes de especializarse en áreas concretas. En este contexto, los temas relevantes se organizan en un modelo de seis bloques (fig. 2).



Fig. 2. Modelo de seis bloques del IAM.

Fuente: Adaptado de [29].

Sin embargo, el nivel de conocimiento especializado y experiencia requeridos en cada una de estas áreas o bloques varía según el rol específico de cada colaborador dentro de la organización. De manera similar a cómo el cuerpo humano es un sistema complejo integrado por diferentes órganos que funcionan en conjunto, una organización también opera como un sistema complejo.

En esta última versión del documento, IAM [29] resalta que la gestión de activos trasciende más allá de los propios activos, ya que en realidad abarca todas las actividades y comportamientos de una organización. Así, la define de forma sencilla como la actividad orientada a maximizar el valor de los activos de forma coordinada. Además, recalca que la cultura y el liderazgo de la organización, así como el compromiso de sus socios y partes interesadas son factores críticos para el éxito en la gestión de activos. La creación de una “cultura adecuada” y la gestión de percepciones son desafíos significativos para alcanzar el valor de los activos en el largo plazo.

6.1. EL CICLO DE VIDA DE ACTIVOS

Como se observó en la Figura 2, una parte de la gestión de activos corresponde al ciclo de vida de estos. Lo que se denomina *actividades del ciclo de vida* es fácil de comprender a nivel de componentes de un

equipo físico, sin embargo, como se mencionó anteriormente, los activos por lo general aportan valor como parte de un sistema. Aunque las descripciones de las fases o etapas del ciclo de vida dependen del sector industrial, el principio común es que este ciclo abarca desde la concepción inicial hasta la disposición final del activo.

La Figura 3 muestra tres ejemplos de variaciones en la descripción de las etapas del ciclo de vida de los activos:



Fig. 3. Ejemplos de las etapas del ciclo de vida de los activos.

Fuente: Adaptado de [29].

De esta manera, el IAM [29] enfatiza que implementar gestión de activos no se limita a un proyecto o a la adopción de nuevas herramientas y técnicas, sino que implica una transformación organizacional profunda y holística. Este cambio afecta la forma en que la organización opera y se relaciona con sus activos. Recalca, además, que gestionar los activos de manera adecuada es fundamental para el éxito de una organización, bien sea (grande, pequeña, privada, pública, gubernamental o sin fines de lucro) e involucra a todos los colaboradores de la organización, así como a las empresas subcontratistas o asociadas.

6.2. CONCEPTOS GENERALES DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Una vez establecido el concepto de *gestión de activos* con base en [29], es necesario reconocer que este y la gestión del mantenimiento son dos disciplinas distintas. Sin embargo, existe una conexión significativa entre ambas, ya que es clave que el departamento de mantenimiento trabaje en consonancia con los objetivos generales de la organización para lograr un rendimiento óptimo y sostenible de los activos [2].

Entendiendo que parte de la gestión de activos se enfoca en el ciclo de vida completo de estos, como se observó en las Figuras 2 y 3, una de las actividades o etapas de este ciclo de vida es el “mantenimiento” de los activos físicos. La norma UNE-EN-13306:2018 [30], que hace referencia a la terminología del mantenimiento, lo define de forma general como una combinación de acciones técnicas, administrativas y de gestión que se realizan durante todo el ciclo de vida de un activo, destinadas a conservarlo o restaurarlo a un estado en el que pueda cumplir con la función para la cual se adquirió.

La misma norma también se refiere la *gestión del mantenimiento* como el proceso mediante el cual se establecen los objetivos, las estrategias, los roles, y se implementan por medio de la planificación, programación, el control, la mejora y los aspectos económicos relacionados. Por lo tanto, el mantenimiento de un activo como tal, implica acciones técnicas, mientras que su gestión involucra decisiones de corte administrativo destinadas a optimizar el rendimiento de estos.

Desde hace aproximadamente tres décadas, las organizaciones han reconocido la necesidad de integrar el mantenimiento y la confiabilidad en su esquema general, buscando incorporarlos en el sistema de gestión de activos para tratarlos como una función integral de la organización. Para este desafío, Parra et al. [1] propusieron un modelo de gestión de mantenimiento genérico, práctico y sencillo, con el objetivo de alinear la gestión del mantenimiento a los objetivos de la gestión de activos y, a su vez, facilitar a los gestores de mantenimiento la aplicación de los conceptos mencionados anteriormente.

6.3. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO ALINEADA A LA GESTIÓN DE ACTIVOS

Las normas ISO 55000 Gestión de Activos y UNE-EN 16646:2015 Mantenimiento en la Gestión de Activos Físicos [31] establecen que las organizaciones deben maximizar el valor de sus activos a lo largo de su vida útil, lo que implica no solo la incorporación de nuevos activos, sino también su operación y mantenimiento. A medida que las empresas y la tecnología cambian, los requerimientos de mantenimiento también deben adaptarse. Por lo cual, es fundamental la revisión periódica de las metas y estrategias de mantenimiento, con el fin de optimizar su rendimiento y reducir el riesgo asociado a las fallas [32].

Las áreas de mantenimiento son conscientes del reto que implica desarrollar un modelo para gestionar el mantenimiento alineado con los principios de la gestión de activos. Además, cabe mencionar que no existen reglas estrictas o universales que se apliquen a todos los activos existentes en la industria. En este contexto, Viveros et al. [33] propusieron un Modelo de Gestión de Mantenimiento que en [1] se denominó MGM. Este modelo es un marco integral que abarca ocho fases claves para optimizar el desempeño de los activos durante todo su ciclo de vida.

En la Figura 4, se muestra el MGM propuesto por los autores:

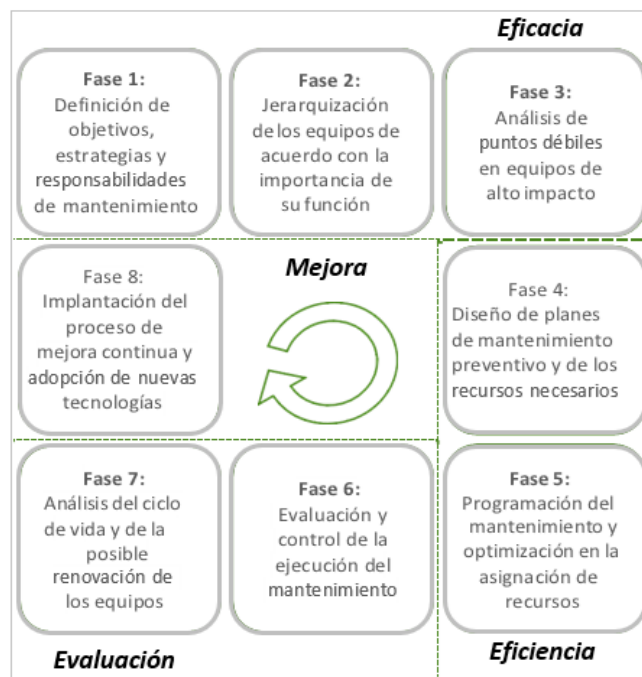


Fig. 4. MGM genérico.

Fuente: Tomado de [1].

6.3.1. Fases del MGM. A continuación, se presenta una breve descripción de las ocho fases que conforman el MGM de la Figura 4.

Fase 1. Para garantizar coherencia entre los objetivos de mantenimiento y los del negocio, se pueden implementar técnicas como el cuadro de mando integral en el área de mantenimiento (BSC, por sus siglas en inglés). El BSC, personalizado para cada organización, permite crear indicadores claves de desempeño (KPI's, por sus siglas en inglés), que miden el desempeño de la gestión del mantenimiento, alineados con los objetivos estratégicos de la empresa [1].

Fase 2. Luego de haber definido los objetivos de mantenimiento, es necesario clasificar los activos de forma sistemática de acuerdo con su importancia para los objetivos del negocio. Algunas técnicas comúnmente usadas se basan en la evaluación probabilística del riesgo y la obtención del índice de riesgo del activo (PRA/PRN) [1]. Existen otros métodos de priorización como el diagrama de Jack-knife JKD, que está basado en indicadores de confiabilidad y mantenibilidad [33].

Fase 3. Antes de elaborar los planes de mantenimiento, se recomienda identificar y eliminar posibles fallas recurrentes y crónicas. Esta identificación permite optimizar desde un principio los planes de mantenimiento. Existen varios métodos para realizar este tipo de análisis, uno de los más conocidos es el análisis de causa raíz de fallas (RCFA, por sus siglas en inglés). Al abordar estas fallas, se optimiza tiempo y recursos en las fases posteriores del modelo.

Fase 4. Para la creación de un plan de mantenimiento preventivo efectivo, es necesario, en primer lugar, identificar las funciones del sistema y los modos en que dichas funciones pueden dejar de cumplirse. Posteriormente, se deben establecer tareas de mantenimiento para evitar la pérdida de la función. La elección de una estrategia o un enfoque adecuado implica un análisis apropiado. Para apoyar estas decisiones, existen diferentes herramientas. La metodología RCM es una de ellas. Pero también existe una herramienta gráfica basada en indicadores de confiabilidad y mantenibilidad denominada DMG, la cual aporta gran valor en esta fase del modelo.

Fase 5. En esta fase, se deben revisar todas las actividades de mantenimiento, considerando las necesidades específicas de producción y el costo de oportunidad para el negocio mientras se ejecutan las tareas de los planes de mantenimiento. En esta fase lo que se busca es optimizar la asignación de recursos humanos y materiales, y minimizar el impacto en la producción. Por lo tanto, la planificación del mantenimiento debe abarcar diferentes horizontes temporales: corto plazo (menos de un año), mediano plazo (de uno a cinco años) y largo plazo (más de cinco años). Esta estructura permite una gestión más efectiva de las actividades y asegura la alineación con los objetivos estratégicos de la organización.

Fase 6. Luego de elaborar los planes, planificar y programar las actividades, estas deben ser monitoreadas constantemente. El control de la ejecución permite retroalimentar y optimizar el diseño de los planes de mantenimiento para mejorar su efectividad y eficiencia. Este proceso busca perseguir los objetivos del negocio y mantener los valores establecidos para los indicadores claves de desempeño (KPI).

Fase 7. En esta fase lo que se pretende es estimar los costos reales de un activo a lo largo de su ciclo de vida. Este análisis del costo del ciclo de vida conocido como (LCCA, por sus siglas en inglés) permite determinar los gastos de un activo durante su vida útil, incluyendo los costos de planificación, investigación y desarrollo, producción, operación, mantenimiento y retiro del equipo. Otra de las herramientas de apoyo que se emplea para la toma de decisiones en esta fase es el CSD. Este diagrama de dispersión permite visualizar los costos ocasionados por las fallas, en relación con los costos globales y el impacto en la disponibilidad operativa de los activos.

Fase 8. Finalmente, se habla de la mejora continua en la gestión del mantenimiento mediante la implementación de técnicas y tecnologías emergentes, que identifiquen áreas de alto impacto a partir de estudios previos. Un concepto relevante en esta fase es el *e-maintenance*, que forma parte del *e-manufacturing* y utiliza tecnologías de la información y la comunicación para crear entornos colaborativos. Adicionalmente, la participación del área de mantenimiento y operaciones es fundamental para el éxito en la mejora continua.

Como se puede observar, el MGM propuesto por Parra et al. [1], se presenta como una herramienta práctica, ágil y sencilla fundamentada en procesos, que puede funcionar como una guía efectiva para implementar una gestión de mantenimiento adecuada y alineada con los principios de gestión de activos.

Entre las organizaciones que han adoptado total o parcialmente el MGM descrito, se encuentran: Iberdrola, Abengoa, Viesgo y Heineken, de España; Gerdau, Pemex y Nestlé, de México; TGI, Monómeros y Ecopetrol, de Colombia; Southern, Minera Yanacocha, Pluspetrol, de Perú; entre otras. Estos casos demuestran que el MGM de Parra et al. [1] ha sido ampliamente reconocido y adoptado en diversas industrias del mundo, lo cual resalta su relevancia y efectividad en la gestión del mantenimiento de activos físicos.

6.4. TOMA DE DECISIONES EN EL MGM

La identificación de oportunidades de mejora juega un rol fundamental en la gestión estratégica del mantenimiento y la confiabilidad de activos. Optimizar el uso de recursos y maximizar la disponibilidad operativa de los activos son objetivos claves que deben guiar los esfuerzos de mejora continua. Debido a que no todos los equipos o modos de falla tienen la misma criticidad para la operación, es necesario

aplicar herramientas específicas que sean prácticas, probadas y ayuden a identificar aquellos activos que requieren atención prioritaria.

Una vez se ha realizado una priorización efectiva de los activos considerando diversos factores claves (como, por ejemplo, el riesgo, la tasa de fallos, los tiempos de reparación, los costos, la productividad, entre otros), el siguiente paso es definir e implementar estrategias de mantenimiento apropiadas. Estas estrategias deben diseñarse específicamente para mitigar el impacto negativo que la indisponibilidad puede tener sobre la operación y los objetivos del negocio.

Como se pudo observar, existen diversos métodos cuantitativos y cualitativos relacionados con la ingeniería de mantenimiento y confiabilidad que respaldan la toma de decisiones en cada una de las ocho fases del MGM. La integración de herramientas cuantitativas y modelos de optimización, junto con enfoques cualitativos que consideran la experiencia y el criterio de expertos, proporciona un marco robusto para la toma de decisiones informadas en el área de mantenimiento. Este tipo de herramientas soportan la toma de decisiones, con lo cual es posible enfocar los esfuerzos de mantenimiento hacia aquellos activos considerados críticos para la operación y sobre los cuales es recomendable destinar recursos.

6.5. SELECCIÓN DE MÉTODOS

La representación visual de datos a través de gráficos, imágenes y diagramas puede mejorar significativamente la comprensión de la información, lo cual, además, facilita la toma de decisiones y contribuye a la comunicación de la información. La finalidad de los métodos gráficos es ofrecer una representación visual que integra dos o más criterios, de ahí el término *criterios múltiples*.

Este enfoque posibilita abordar de manera efectiva las necesidades en el proceso de toma de decisiones estratégicas en mantenimiento y ayuda a una evaluación más clara y estructurada entre las opciones disponibles.

A continuación, se exploran en profundidad cuatro de las herramientas revisadas en la literatura: CTR y JKD (fases 2 y 3 del MGM), DMG (fase 4) y CSD (fase 7). El objetivo es profundizar en las bases teóricas que las respaldan y aplicarlas de forma práctica a través del caso de estudio desarrollado en este trabajo de investigación.

La selección de estas cuatro herramientas se fundamentó en la necesidad y practicidad identificadas para el contexto operacional específico. Si bien estas herramientas ofrecen un enfoque riguroso y estructurado para la toma de decisiones en mantenimiento, es importante considerar también las características únicas de cada contexto operacional al momento de implementarlas.

6.5.1. Criticidad total por riesgo. Este modelo es un proceso de análisis semicuantitativo, práctico y sencillo, basado en la estimación del factor riesgo, el cual combina el factor fiabilidad (frecuencia de falla) y la consecuencia/severidad de la falla (impacto en seguridad, ambiente, producción, etc.) [1]. La CTR se define así:

$$CTR = FF * C \quad (1)$$

Donde:

FF = Frecuencia de falla (fallas en un tiempo determinado —fallas/año—)

C = Consecuencias de las fallas

Las consecuencias de las fallas (C) están determinadas por la siguiente ecuación:

$$C = (IO * FO) + CM + SHA \quad (2)$$

Donde:

IO = Factor de impacto en la producción

FO = Factor de flexibilidad operacional

CM = Factor de costos de mantenimiento

SHA = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

Teniendo en cuenta las ecuaciones 1 y 2, la CTR se define de esta manera:

$$CTR = FF x ((IO x FO) + CM + SHA) \quad (3)$$

Los criterios de ponderación en cada uno de los factores de la ecuación 3 se realizan teniendo en cuenta criterios cualitativos de conocedores del contexto operacional de los activos: el área de operaciones, mantenimiento, confiabilidad, procesos, seguridad, riesgos y ambiental. Esta ponderación puede variar de acuerdo con las necesidades específicas de la empresa y las consideraciones de la instalación [1].

El resultado de un análisis de CTR es una matriz de criticidad que permite jerarquizar los activos en tres niveles: críticos (C), media criticidad (MC) y no críticos (NC). En el ejemplo de la figura 5, la frecuencia de fallas se representa en el eje vertical, mientras que el eje horizontal muestra el valor correspondiente a las consecuencias de estas fallas.

Frecuencia de Fallas (F F)	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		Consecuencias (C)				

Fig. 5. Matriz de criticidad del modelo CTR.

Fuente: Adaptado de [1].

Aunque estas matrices de riesgo han sido utilizadas por consultoras y adaptadas a diferentes industrias para jerarquizar activos [1], [34], [35], también han sido cuestionadas conceptualmente por sus diversas limitaciones [11], [36], [37]. Estas limitaciones sugieren que las matrices de riesgo deben emplearse con cautela y solo con explicaciones cuidadosas de los criterios ponderados [36].

6.5.2. Diagrama de Jack-Knife.

6.5.2.1. Revisión de la literatura. La aplicación del JKD inició cuando Knights [3] usó los datos operativos de una flota conformada por trece palas de cable con operación en una mina de cobre a cielo abierto ubicada al norte de Chile, para priorizar los tiempos de inactividad ocasionados por fallas eléctricas. En estos estudios, el autor concluyó que el JKD supera muchas de las deficiencias de los diagramas de Pareto al momento de priorizar activos con base en múltiples criterios. Aunque especifica que no pretende reemplazar las técnicas de análisis de Pareto tradicionales, pues las dos técnicas pueden utilizarse beneficiosamente en paralelo.

El autor resalta que el JKD identifica fácilmente problemas en la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad del sistema en una misma herramienta gráfica. Además, utiliza un límite en forma de V invertida para delimitar prioridades. Debido a esta característica visual, el autor usó el término *jack-knife* haciendo alusión a una navaja plegable [3].

Cabe resaltar que en la literatura consultada sobre el JKD planteado por Knights [3] no se encontró ninguna relación directa entre este y el método para la reducción del sesgo en la estimación paramétrica abordado por Miller [38] y Wang et al. [39], el cual J. W. Tukey denominó “método jackknife”. Aunque ambos comparten un nombre similar, parecen ser herramientas distintas.

Diversos estudios en la literatura han demostrado la aplicabilidad del JKD para priorizar y clasificar los activos, considerando su comportamiento real en operación. En un artículo publicado en la International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Wijaya et al. [40] presentaron un caso de estudio utilizando el JKD con datos de una flota de máquinas de escalado en el sector minero. En este, los autores propusieron una forma de visualizar el tiempo de inactividad por intervalos de tiempo y los factores que influyen en este (frecuencia de falla y tiempo medio para reparar). Esta investigación fue incluida más tarde en la tesis doctoral de Wijaya [40].

En [6], los autores presentan un estudio de caso en el que usaron datos de una flota compuesta por catorce activos móviles en una mina subterránea. En este, utilizaron el JKD para analizar la frecuencia de fallas, el tiempo de inactividad por falla y los costos asociados con todos los componentes. Gracias a esta priorización estratégica de activos, se identificaron edades óptimas de reemplazo preventivo para piezas claves de los activos, junto con ahorro de costos asociados en comparación con las prácticas que tenía la empresa. Este ahorro de costos varió entre un 10 % y un 20 %, según los autores.

Por su parte, en [41] se propuso un modelo para diagnosticar la gestión del mantenimiento de una planta manufacturera en Lima, Perú, en el cual el autor aplicó el JKD a los datos de fallas mecánicas y eléctricas de siete líneas de producción para evaluar el comportamiento de estas en relación con la tasa de fallas y el *Downtime*. También en Perú, en [9], se aplicó el JKD y el análisis de causa raíz, con el objetivo de identificar y corregir los problemas relacionados con fallas en una flota de palas electromecánicas con operación en el sector minero.

En otra parte de Latinoamérica, Durán et al. [12] realizaron un estudio de caso en el cual aplicaron el JKD para definir los activos críticos en relación con la frecuencia de fallas y tiempo de inactividad, con el fin de proponer diferentes estrategias de mantenimiento en una planta desalinizadora ubicada en el norte de Chile.

6.5.2.2. *Método*. El JKD es una herramienta de análisis cuantitativo multicriterio que permite visualizar simultáneamente los problemas de *confiabilidad (MTBF)*, *mantenibilidad (MTTR)* y *disponibilidad* de activos (A), en relación con las fallas. De esta manera, ayuda a identificar los activos que requieren prioridad de atención [4].

A continuación, se abordan las variables empleadas en el JKD, que explican su uso y relevancia en el análisis. Asimismo, se detallan los cálculos necesarios para su determinación, así como los procedimientos utilizados para graficar los resultados obtenidos.

6.5.2.3. *Tiempo de inactividad o Downtime*. El tiempo de inactividad durante un intervalo determinado T , debido a la falla de un sistema determinado j , se denomina $Downtime_j$. Esta inactividad resulta del producto del número de ocurrencias de la falla j , (n_j), por el tiempo medio de reparación de la falla (Mean Time To Repair), $MTTR_j$, expresado así:

$$Downtime_j(T) = n_j(T) \cdot MTTR_j(T) \quad (4)$$

El $MTTR_j$ se determina a partir de la ecuación 5:

$$MTTR_j = \frac{\sum TTR_j}{n_j} \quad (5)$$

Donde:

$\sum TTR_j$ = Sumatoria de tiempos para reparar la falla j (Time to Repair)

n_j = Número de ocurrencias de la falla j

Sin embargo, debido a que normalmente los TTR son de naturaleza probabilística y, por lo general, no son datos homogéneos, en algunos casos se recomienda utilizar la media geométrica para calcular la

tendencia de estos tiempos [40]. Si todas las fallas por sistemas se muestran en un diagrama de dispersión representado por las variables n vs. $MTTR$ (como el ejemplo de la Figura 6), entonces es posible identificar aquellos activos que causan mayor tiempo de inactividad. Asimismo, es posible analizar si los tiempos de inactividad están relacionados con la frecuencia de fallas o el tiempo medio de reparación ($MTTR$).

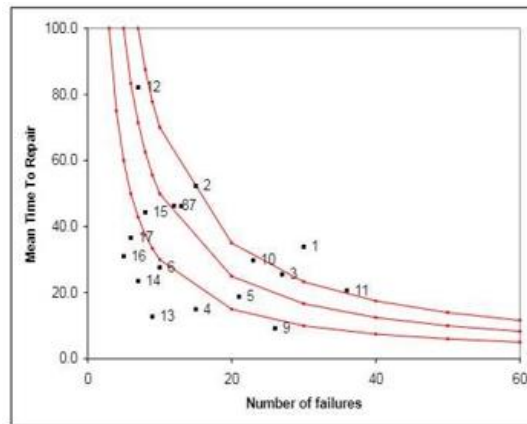


Fig. 6. Diagrama de dispersión n vs. $MTTR$.

Fuente: Tomado de [3].

Debido a que las curvas de tiempo de inactividad o *iso-Downtime* de la Figura 6 son hipérbolas y pueden ser difíciles de trazar, Knights [3] propuso aplicar el logaritmo natural (\log) a la ecuación 4 para solucionar esta desventaja, como se describe en la ecuación 6:

$$\log (Downtime_j (T)) = \log (n_j (T)) + \log (Downtime_j (T)) \quad (6)$$

De esta manera, se logra que las curvas *iso-Downtime* se conviertan en líneas rectas con un gradiente negativo, lo que facilita la identificación por medio de en un diagrama de dispersión logarítmico, como se observa en el ejemplo de la Figura 7:

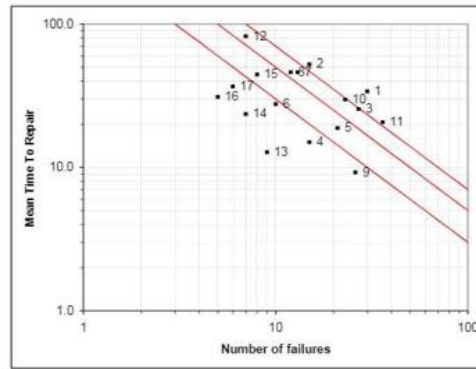


Fig. 7. Diagrama de dispersión logarítmica n vs. $MTTR$.

Fuente: Tomado de [3].

6.5.2.4. *MTBF*. Comúnmente, se suele usar el *MTBF* (Mean Time Between Failures) como medida o indicador de fiabilidad en diferentes industrias. El tiempo medio entre fallas de un equipo en un intervalo de tiempo se define en [3] con la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{T}{n_T} \quad (7)$$

Donde:

$MTBF$ = Tiempo medio entre fallas

T = Intervalo de tiempo analizado

n_T = Número de fallas en intervalo de tiempo T

En el presente documento no se discute la definición de *MTBF*. Para ampliar el concepto, consultar [42] y [43].

6.5.2.5. *Tasa de fallas*. La tasa de fallas (λ) de un sistema o componente mide el número de fallas (n) que este experimenta durante un periodo de tiempo específico (T) [42]. Se expresa, generalmente, en fallas por unidad de tiempo, así:

$$\lambda = \frac{n}{T} \quad (8)$$

Según Yuan y Lu [42], la tasa de fallas (λ) acumulada también se puede expresar en función del MTBF y está determinada por la ecuación 9:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad (9)$$

6.5.2.6. *Disponibilidad*. Según Mora [44] y Senalp [45], la disponibilidad (A) en función del tiempo de actividad (*Uptime*) y de inactividad (*Downtime*) se define así:

$$A = \frac{Uptime}{Uptime + Downtime} \quad (10)$$

En términos de *MTBF* y *MTTR*, y bajo ciertas consideraciones, los mismos autores especifican que la disponibilidad (A) también se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (11)$$

En este documento no se profundiza en los diferentes tipos de disponibilidad existentes ni en sus consideraciones. Para ampliar el concepto, consultar [44] y [45].

6.5.2.7. *Límites de las variables en el JKD*. Los límites de las variables (n_j) y ($MTTR_j$) pueden ser valores fijos o relativos. Los fijos se establecen por políticas empresariales y los relativos dependen de los datos disponibles para el análisis. Por lo tanto, Knights [3] propone utilizar promedios para determinar los límites relativos en un JKD. El *Downtime* (D) y el número de fallas total (N), están determinados por la ecuación 12 y 13, respectivamente.

$$D = \sum_j Downtime_j \quad (12)$$

$$N = \sum_j n_j \quad (13)$$

Usando las ecuaciones 12 y 13, los límites del número de fallas n y el tiempo de reparación $MTTR$ se determinan por las ecuaciones 14 y 15, así:

$$\text{Límite}_n = \frac{N}{Q} \quad (14)$$

$$\text{Límite}_{MTTR} = \frac{D}{N} \quad (15)$$

Donde:

N = Número total de fallas

Q = Número de equipos o sistemas

D = Tiempo total de inactividad por fallas

De acuerdo con las ecuaciones 14 y 15, se obtiene un diagrama de dispersión logarítmico formado por cuatro cuadrantes, como se observa en el ejemplo de la Figura 8.

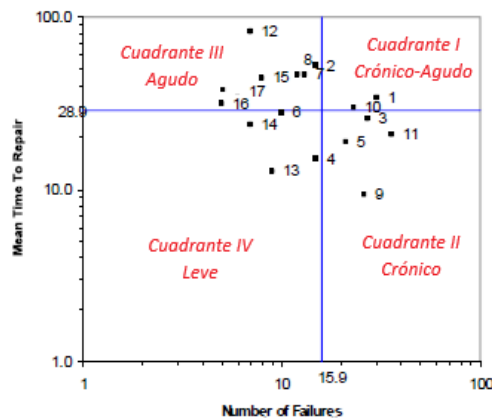


Fig. 8. JKD básico.

Fuente: Adaptado de [3].

Posteriormente, Pascual et al. [4] introducen al JKD el criterio de indisponibilidad (U) para comparar el rendimiento de un equipo en dos intervalos de tiempo diferentes o en distintos equipos en el mismo intervalo de tiempo. La indisponibilidad (U) es el complemento de la disponibilidad (A). Matemáticamente, se expresa así:

$$U \approx 1 - A \quad (16)$$

La indisponibilidad (U) ocasionada por una falla j es producto de la tasa de fallas λ_j , por el tiempo medio de reparación de la falla $MTTR_j$. Este último se entiende como el tiempo total de inactividad o *Downtime*, y está determinado por la ecuación 17:

$$U_j = \lambda_j \cdot MTTR_j \quad (17)$$

En algunos contextos y bajo ciertas condiciones, la métrica MDT (Mean Down Time) se utiliza de manera intercambiable con el MTTR (Mean Time To Repair). Para ampliar el concepto, consultar [44] y [46]. Por lo tanto, la ecuación en escala logarítmica es la siguiente:

$$\log (U_j) = \log (\lambda_j) + \log (MTTR_j) \quad (18)$$

De acuerdo con las variables de la ecuación 18, a continuación, se determinan los límites relativos de estas: Sean $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ las tasas de falla de diferentes equipos o sistemas j , el promedio de estas se determina por la siguiente ecuación:

$$\bar{\lambda}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (19)$$

Donde:

$\bar{\lambda}_j$ = Promedio de la tasa de fallas j

$\sum_{i=1}^n \lambda_i$ = Sumatoria de λ desde $i=1$ hasta n

n = Número total de equipos o sistemas

Sean $MTTR_1, MTTR_2, MTTR_3, \dots, MTTR_n$ los tiempos medios para reparar las fallas de diferentes equipos o sistemas j , $MTTR_j$, entonces, el promedio del MTTR es:

$$\overline{MTTR}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MTTR_i \quad (20)$$

Donde:

\overline{MTTR}_j = Promedio de los $MTTR_j$

$\sum_{j=1}^n MTTR_i$ = Sumatoria de los $MTTR$ desde $i = 1$ hasta n

n = Número total de equipos o sistemas

De acuerdo con las ecuaciones 19 y 20, los límites relativos de λ y $MTTR$ se determinan de la siguiente manera:

$$\text{Límite}_{\lambda} = \bar{\lambda}_j \quad (21)$$

$$\text{Límite}_{MTTR} = \overline{MTTR}_j \quad (22)$$

Los límites o metas de indisponibilidad (U_j) son, generalmente, definidos por políticas empresariales fijas, de acuerdo con los requerimientos del contexto operativo. Sin embargo, se puede definir un límite relativo de la variable (U_j) a partir de la ecuación 23.

$$\text{Límite}_{U_j} = \bar{\lambda}_j \cdot \overline{MTTR}_j \quad (23)$$

Con base en las ecuaciones 21, 22 y 23, se obtiene un diagrama de dispersión logarítmico compuesto por cuatro cuadrantes, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 9:

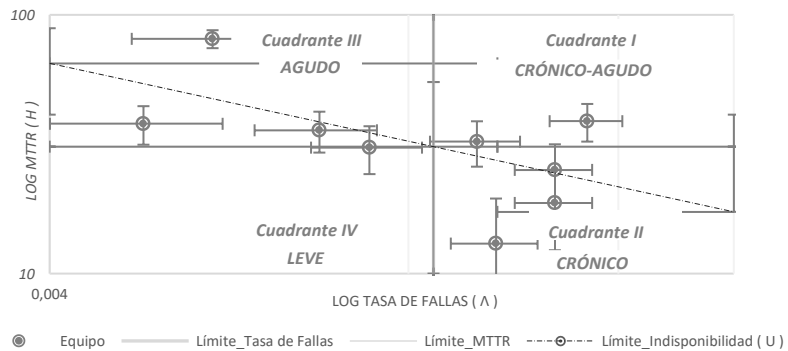


Fig. 9. Representación genérica del JKD.

Fuente: Elaboración propia.

Cada cuadrante en el JKD refleja el comportamiento de los activos o las fallas a partir de las variables evaluadas. De acuerdo con Seecharan et al. [8], se recomienda priorizar bajo criterios diferentes según la distancia entre estos y los umbrales establecidos, que se clasifican de la siguiente manera:

6.5.2.8. Cuadrante I crónico-agudo. En este cuadrante se clasifican los activos con fallas recurrentes (crónicas), cuyo tiempo medio de reparación MTTR es alto (agudas). La indisponibilidad (U), tasa de fallas (λ) y tiempo medio para reparar (MTTR) superan los límites de cada una de estas variables. Son los denominados “malos actores” en el proceso de análisis del JKD.

6.5.2.9. Cuadrante II crónico. En este cuadrante se clasifican los activos con λ superior al límite definido para esta variable y MTTR inferior al límite establecido para la misma. Se interpreta como aquellas fallas recurrentes (crónicas) pero con MTTR bajo. En otras palabras; equipos que fallan mucho, pero se reparan de forma rápida.

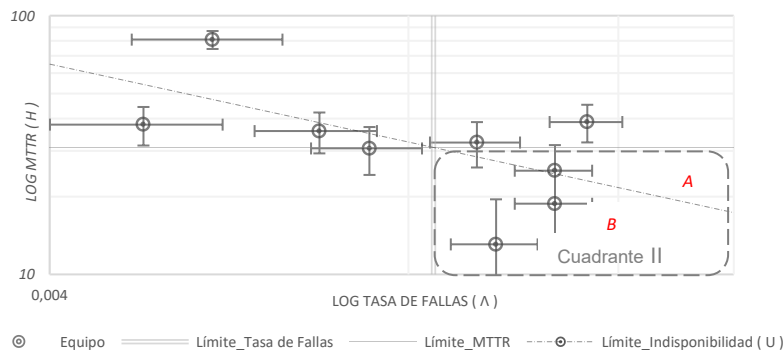


Fig. 10. JKD cuadrante II crónico.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 10, las fallas pueden presentar comportamientos diferentes en relación con el límite de la indisponibilidad: pueden estar por encima (A) o por debajo (B) del umbral establecido para la variable U . Por lo cual se recomienda priorizar bajo criterios diferentes según la distancia entre estas y los umbrales establecidos.

6.5.2.10. Cuadrante III agudo. En este cuadrante se clasifican los activos con λ inferior al límite definido para esta variable y MTTR superior al límite establecido para la misma. Se interpreta como aquellos equipos que no presentan fallas recurrentes, pero cuando fallan, su reparación tarda mucho tiempo.

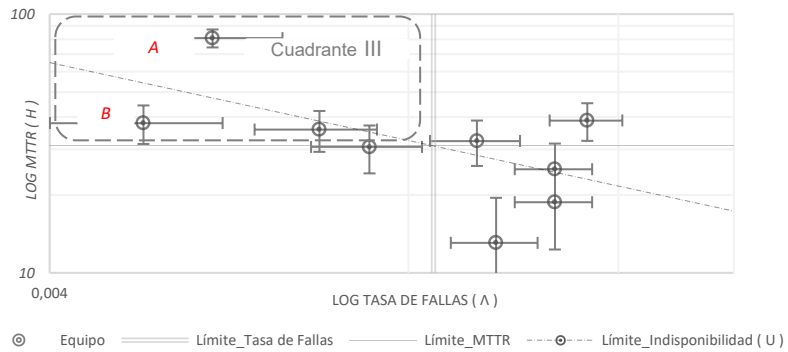


Fig. 11. JKD cuadrante III agudo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 11, las fallas pueden presentar comportamientos diferentes en relación con la indisponibilidad: pueden estar por encima (A) o por debajo (B) del límite establecido para la variable U . Por lo cual se recomienda priorizar bajo criterios diferentes [8].

6.5.2.11. Cuadrante IV leve. En este cuadrante se clasifican las fallas con comportamiento inferior a los límites de cada una de las variables analizadas. Seecharan et al. [8] definen este cuadrante como “no clasificado”; Vélchez et al. [10], como “zona inerte” o “no significativos”, y Pardus Consulting [47], como “zona ideal”, y enfatiza que es donde se considera tolerable que se encuentre el comportamiento de un equipo. En el presente estudio se define este cuadrante como “leve”, según el término empleado por Viña [9].

6.5.2.12. Acciones derivadas del JKD. El JKD no recomienda específicamente qué estrategias aplicar a las fallas en cada uno de los cuadrantes, pues las acciones que se tomen pueden direccionarse bien, sea a mejorar la confiabilidad, producto de la recurrencia de fallas, o hacia mejoras de la mantenibilidad del activo, relacionadas con los tiempos de reparación luego de una falla.

Sin embargo, cuando ya se ha identificado una lista de fallas clasificadas y priorizadas por sistemas o modos de falla, es posible plantear soluciones a la posible causa (o causas) de las fallas, para lo cual es necesario conformar equipos naturales de trabajo donde se tomen decisiones y se tenga en cuenta el criterio de expertos en mantenimiento del activo, ingenieros de confiabilidad, operaciones, etc. [3].

Según lo propuesto por Moore [48], citado por Knights [3], se recomienda identificar las causas de la indisponibilidad ocasionada por fallas en alguna de las siguientes categorías:

Diseño, compra y almacenamiento de equipos: deficiencias en el diseño original que conducen a fallas prematuras, selección inadecuada de equipos para la aplicación y daños durante el transporte, manejo o almacenamiento.

Instalación y puesta en marcha: errores en la instalación que causan problemas desde la entrada del activo a operación (mortalidad infantil), falta de capacitación adecuada para la puesta en marcha de los equipos, falta de protocolos de instalación, pruebas y puesta en marcha.

Operación de los equipos: uso incorrecto o abuso de los equipos por parte de los operadores, falta de capacitación y experiencia de estos y sobrecarga o condiciones de operación fuera de los límites de diseño.

Mantenimiento de los equipos: problemas en la planificación y programación del mantenimiento (rutinas de mantenimiento no ejecutadas a tiempo), falta de disponibilidad de recursos (mano de obra, herramientas, equipos de diagnóstico, repuestos), prácticas inadecuadas de inspección o mantenimiento preventivo/correctivo (error en la selección de estrategias de mantenimiento), baja calidad en la ejecución de las tareas de mantenimiento (error humano-confiabilidad humana, falta de procedimientos).

En cada una de estas categorías mencionadas, se pueden encontrar diversas causas derivadas que contribuyen a la indisponibilidad de los activos. Identificar y abordar estas causas de forma integral es fundamental para minimizar de manera efectiva los tiempos de inactividad.

6.5.3. Diagrama de dispersión de costos.

6.5.3.1. Revisión de la literatura. El CSD es una herramienta gráfica de priorización desarrollada por Pascual et al. [4]. Estos autores ampliaron la técnica original del JKD de Knights [3] para incluir los efectos económicos de la indisponibilidad. Usando datos de Knights [3], correspondientes a las fallas eléctricas de una flota de trece palas con operación en una mina de cobre a cielo abierto al norte de Chile,

los autores demostraron la aplicabilidad del CSD y adicionaron costos ficticios que, aunque no representaban el caso real, fueron útiles para su demostración.

El propósito de la evaluación a través del CSD es identificar los activos que impactan de manera significativa en los costos operativos, especialmente aquellos que presentan una baja disponibilidad. Esta identificación prioriza esfuerzos en la optimización y gestión de dichos activos y contribuye a una mayor eficiencia y reducción de gastos.

Cabe aclarar que en este documento no se discute el concepto de los términos *costo* y *gasto de mantenimiento*. Se usa la palabra *costo* de acuerdo con lo definido en Pascual et al. [4]. El método propuesto establece una estructura integral de costos, tal como lo sugieren los mismos autores [4]. Esta estructura se compone de cuatro elementos claves: costos de intervención, costos por tenencia de inventarios, inversiones relacionadas con la confiabilidad y costos por sanciones, que en conjunto se conocen como costos globales específicos C_{ge} .

Estos factores son esenciales para comprender el impacto económico de la indisponibilidad de los activos y se ilustran en la Figura 12.



Fig. 12. Estructura de costos globales específicos.

Fuente: Adaptado de [4].

Los costos de intervención incluyen tanto el valor de los repuestos utilizados como el valor de la mano de obra involucrada en el proceso (ingeniería, planificación, programación, etc.). Los costos de tenencia de inventarios reflejan el costo financiero necesario para mantener repuestos disponibles en el lugar de trabajo (amortizaciones, depreciación, almacén, logística, etc.). El concepto de *inversiones en fiabilidad*

abarca todas las compras realizadas para mitigar el impacto de las fallas, tales como equipos redundantes y *stand-by*, equipos en existencias, pólizas de seguro, herramientas de monitoreo, etc.

Por otro lado, los costos asociados a sanciones se refieren a los gastos generados por el tiempo de inactividad de los activos (pérdidas de producción, lucro cesante, multas, penalizaciones etc.). Diferentes estudios demuestran la aplicabilidad del CSD como herramienta de apoyo para la toma de decisiones relacionadas con costos por indisponibilidad de activos.

Se expone el caso de Rivera [7], quien presentó un modelo para la toma de decisiones de mantenimiento, diseñado para evaluar los impactos en disponibilidad, mantenibilidad, confiabilidad y costos derivados por fallas de una flota de ocho cargadores LHD Caterpillar R1700G con operación en una mina de cobre subterránea en Chile, pertenecientes a Codelco División Andina. En el modelo presentado, el autor integró diferentes técnicas para la toma de decisiones, entre estas, el CSD para modelar los costos. El objetivo principal del modelo desarrollado fue proporcionar elementos de juicio técnico y económico, con el fin de optimizar las decisiones de mantenimiento sobre la flota de manera efectiva para maximizar la disponibilidad operativa y minimizar los costos.

En otro proyecto, aplicado al proceso de chancado primario de una planta concentradora en una mina ubicada en el sur del Perú, Escalante [49] utilizó el CSD para la toma de decisiones mediante el historial de fallas. Al respecto, determinó la criticidad de estas en el proceso de chancado primario. Este análisis reveló que había siete fallas críticas en los equipos principales, los cuales tenían un impacto significativo en la disponibilidad y generaban mayores costos debido a la pérdida de producción.

También en Perú, Vílchez et al. [10] aplicaron el CSD para realizar la priorización de componentes críticos pertenecientes a seis palas hidráulicas EX5500 con operación en una mina a tajo abierto. Gracias a este estudio, se logró priorizar la lista de componentes proporcionada por el proveedor de las palas, pasando de 25 a 14 tipos de componentes. También se pudo desarrollar una estructura de costos práctica basada en datos reales, lo que superó el enfoque meramente teórico. Este enfoque permitió una gestión eficiente del *stock* de componentes críticos reparables y, a su vez, condujo a una significativa optimización de los costos. Con esto se demostró que no todos los componentes valorados como “críticos” por el proveedor se comportaban como tal, principalmente por las diferentes condiciones de operación que existen en las minas.

Siguiendo esta línea de estudios, en una investigación desarrollada con el apoyo de una importante empresa de minería subterránea en Chile, Velásquez [13] puso a prueba la hipótesis de que la implementación de técnicas de minería de procesos (subdisciplina de las ciencias de datos) en los ciclos de mantenimiento de equipos mineros (*Load Haul Dump*, LHD) optimiza el flujo de trabajo. Entre las herramientas que empleó el autor, estuvo el CSD para modelar los costos globales con base en las fallas ocasionadas por diferentes equipos durante los años 2018 y 2019.

Por último, y no menos importante, está Allauca [50], quien desarrolló en Ecuador un modelo de mantenimiento para un banco de molienda basado en la combinación del JKD y el CSD. En su proyecto técnico se priorizaron las fallas del equipo teniendo en cuenta la frecuencia y tiempos de reparación. Igualmente, se determinó el impacto en los costos por pérdidas de producción derivados de la indisponibilidad del activo. También en este país, Aulestia y Guerrero [51] desarrollaron una herramienta informática basada en el JKD y el CSD para el análisis de fallas y costos en una flota de transporte de maquinaria pesada conformada por cinco activos.

6.5.3.2. *Método.* La ecuación 24 determina el costo global específico C_{ge} de una intervención j por unidad de tiempo, así:

$$C_{gej} = C_{dj} + C_{pj} + C_{icj} + C_{ij} \quad (24)$$

Donde:

C_{dj} = Costo directo

C_{pj} = Costo del *Downtime*

C_{icj} = Costo inversiones en confiabilidad

C_{ij} = Costo de tenencia de inventarios

El costo global de mantenimiento por unidad de tiempo C_g se calcula multiplicando los costos globales específicos C_{ge} (asociados con las diferentes intervenciones j) por la indisponibilidad (U) generada por estas, así:

$$C_g = \sum_{j=1}^n C_{gej} \cdot U_j \quad (25)$$

De acuerdo con la ecuación 17, U_j es el producto de la tasa de fallas λ_j por el tiempo medio de reparación de la falla $MTTR_j$. Entonces, la ecuación 26 determina el C_g de una intervención j por unidad de tiempo, en función de λ y $MTTR$.

$$C_{g_j} = \sum_{j=1}^n (C_{gej}) \lambda_j \cdot MTTR_j \quad (26)$$

Por otra parte, la tasa de costos directos C_{d_j} puede interpretarse como un factor de ponderación para cada caso de indisponibilidad. Como $MTTR_j$ hace referencia a todo el tiempo *down* de la intervención j , entonces:

$$C_{d_j} = \hat{c}_{d,j} \cdot MTTR_j \quad (27)$$

Donde:

C_{d_j} = Costo directo promedio por intervención j (costo/intervención)

$\hat{c}_{d,j}$ = Costo de intervención por unidad de tiempo (costo/unidad de tiempo)

$MTTR_j$ = Tiempo medio de reparación de la intervención j

La ecuación 28 determina el costo de las pérdidas derivadas del *Downtime* C_{p_j} por unidad de tiempo:

$$C_{p_j} = \alpha \cdot C_{p_j} \quad (28)$$

Donde α es un valor entre 0 y 1, que depende de factores que mitiguen el impacto de la indisponibilidad. Por ejemplo, el equipo A puede fallar, pero si tiene en paralelo un equipo B que asume la función del A, las pérdidas por *Downtime* serán mínimas.

Los costos de inversiones en confiabilidad C_{ic_j} y tenencia de inventarios C_{i_j} se relacionan con inversiones. Para analizar cada uno de estos términos en un periodo de tiempo determinado, es necesario interpretarlos de dos maneras: primero, como una inversión que se distribuye de manera uniforme a lo largo del tiempo, y segundo, como un costo financiero. Esto permite entender mejor su impacto y relevancia en el análisis de costos por indisponibilidad de los activos.

Los términos de la ecuación 25 se pueden agregar a un JKD estándar para analizar cómo el costo global afecta la priorización de activos en relación con la indisponibilidad, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 13:

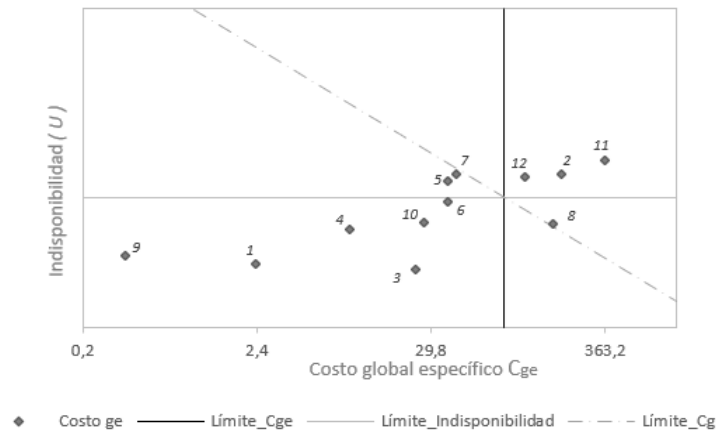


Fig. 13. Representación genérica del CSD.

Fuente: Elaboración propia. Vista costo global específico C_{ge} vs. indisponibilidad (U).

Un enfoque para determinar los límites relativos de umbral del C_{ge_j} , U_j y C_{g_j} es usando los promedios de estas variables, de la siguiente manera:

$$\text{Límite } C_{ge_j} = \overline{C_{ge_j}} \quad (29)$$

La ecuación 23 determina el límite de umbral de la indisponibilidad U_j :

De acuerdo con las ecuaciones 23 y 29, el límite de umbral del costo global C_g ocasionado por la indisponibilidad j , está determinado por la ecuación 30:

$$\text{Límite } C_{g_j} = \overline{C_{ge_j}} \cdot \bar{U}_j \quad (30)$$

6.5.4. Cuadrícula de toma de decisiones.

6.5.4.1. Revisión de la literatura. La DMG inició con Labib [25], y consiste en un híbrido del enfoque basado en reglas y el AHP para la toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM) [52]. La DMG es un método de análisis gráfico que facilita la toma de decisiones al clasificar los activos según su prioridad y definirles estrategias de mantenimiento adecuadas teniendo en cuenta dos criterios: frecuencia de falla y duración del tiempo de inactividad (*Downtime*).

La frecuencia de fallas la asocia con el tiempo medio entre fallas (MTBF), mientras que el tiempo de inactividad lo relaciona comúnmente con el MTTR [8], [11]. Diferentes estudios demuestran la aplicabilidad de la DMG como herramienta de apoyo para la toma de decisiones relacionadas con la definición de estrategias de mantenimiento de activos:

En Reino Unido, se identificaron dos estudios de casos en la industria del transporte. En el primer caso, Labib [25] usó los datos operativos de diferentes máquinas para demostrar la aplicación de la DMG y su efecto en el rendimiento del mantenimiento de una empresa de diseño y fabricación de sistemas automotrices. La empresa implementó la DMG para definir estrategias de mantenimiento, y logró reducir el tiempo de inactividad total de 800 horas al mes a menos de 100 horas al mes. En el segundo caso, Aslam-Zainudeen y Labib [52] demostraron la aplicación de la DMG con datos operativos de una flota de trenes Clase 319 pertenecientes a la compañía operadora de trenes First Capital Connect (FCC) para definir estrategias de mantenimiento con base en la tasa de fallas y el tiempo de inactividad de los activos.

En Asia, se encontraron tres estudios de casos en diferentes sectores de la industria. En el primer caso, Burhanuddin et al. [53] demostraron la aplicación de la DMG con datos operativos pertenecientes a las máquinas de SMI, una de las empresas procesadoras de alimentos más importantes del oeste de Malasia. En el segundo caso, Shahin et al. [54] demostraron la aplicabilidad de la DMG con datos de ocho equipos pertenecientes a la unidad de fundición de la empresa siderúrgica Mobarakeh Steel Company, ubicada en Irán. En el tercer caso de estudio, Hartini y Subekti [55] demostraron la aplicación de la DMG para definir estrategias de mantenimiento a 19 sistemas/componentes de un reactor, en una investigación financiada por el Centro de Tecnología y Seguridad de Reactores Nucleares (PTKRN), en Indonesia.

Por otra parte, con datos de una planta de proceso de cemento ubicada en el norte de Nigeria, Yunusa-Kaltungo y Labib [11] demostraron la aplicabilidad de la DMG por medio de un estudio de caso industrial real. Como novedad, los autores compararon los resultados usando dos enfoques: DMG 1 y DMG 2, para determinar los límites alto/medio/bajo a partir de las combinaciones de frecuencia de fallas y tiempo de inactividad. Los autores llegaron a la conclusión de que los dos enfoques pueden coexistir y no se excluyen mutuamente. Cada enfoque es aplicable de acuerdo con el objetivo específico del análisis y de las características de los datos disponibles, lo que permite una mayor flexibilidad en su implementación.

En América del Sur, se registraron dos estudios de casos en diferentes sectores de la industria. En el primer caso, Okamura et al. [14] presentan la aplicación de la DMG para apoyar la toma de decisiones en la estrategia de mantenimiento de una pequeña central hidroeléctrica ubicada en la región interior del estado de Paraná, al sur de Brasil. En el segundo caso, Ponce [56] aborda de forma general la DMG para soportar la decisión de rediseñar el sistema electrónico de una máquina descargadora de carbón en la mina de carbón a cielo abierto Drummond Ltd., ubicada en el norte de Colombia.

En todos los estudios mencionados, se concluye que la DMG es una herramienta útil y práctica para la toma de decisiones al momento de definir estrategias de mantenimiento de activos. Su uso y adaptación depende de diferentes criterios, tales como los objetivos del negocio, la complejidad en los sistemas, el nivel de riesgo, el contexto operativo, entre otros. Es importante mencionar que la DMG también se ha utilizado en combinación con otros métodos y sirve como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la definición de estrategias de mantenimiento. Algunos de estos casos son [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65].

6.5.4.2. Método. La clasificación y priorización en una DMG se visualiza en una cuadrícula o matriz 3 x 3 que ubica los equipos de acuerdo con los criterios evaluados, como se observa en el ejemplo de la Figura 14:

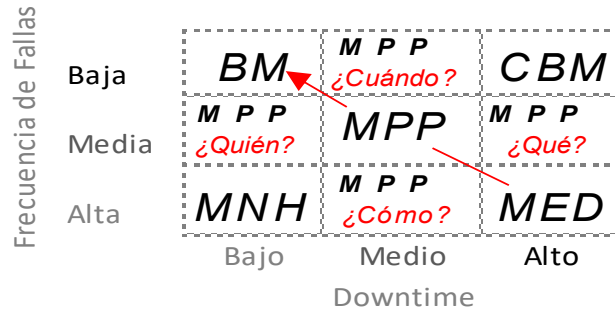


Fig. 14. Representación genérica del DMG.

Fuente: Adaptado de [66].

Cada sección de la Figura 14 tiene representación de una de las siguientes estrategias de mantenimiento propuestas por el método original:

- Mantenimiento de averías (BM)
- Mantenimiento preventivo planificado (MPP)
- Mantenimiento basado en condición (CBM)
- Mejora del nivel de habilidades (MNH)
- Mantenimiento eliminado por diseño (MED)

A continuación, se describen de forma general cada una de las estrategias abordadas y sugeridas por la DMG para los activos.

6.5.4.3. Mantenimiento de averías. La estrategia de mantenimiento de averías o Breakdown Maintenance (BM) se recomienda para los activos con baja frecuencia de fallas y bajo tiempo de inactividad. Son los activos que se encuentran en la sección superior izquierda de la cuadrícula. Este se considera un estado óptimo y optimizado de rendimiento, al cual deben orientarse los activos. De acuerdo con Yunusa-Kaltungo y Labib [11], esta estrategia sustenta la efectiva combinación de prácticas en la gestión del mantenimiento.

Según los mismos autores [11], la estrategia BM no implica ignorar el activo, sino más bien indica que la estrategia aplicada a los activos está dando resultados y lo que se debe es auditar la sostenibilidad de esta. El BM propiamente dicho no debe confundirse con la estrategia de correr hasta la falla (Run To Failure, RTF). Para entender las diferencias, consultar en [67].

6.5.4.4. *Mantenimiento preventivo planificado*. El MPP se define como el conjunto de tareas preventivas que se realizan de forma regular por (kilometraje, número de operaciones, producción) o periodos fijos en el calendario (semanal, mes, año) [11]. Los diferentes MPP sugeridos en la DMG de la Figura 15 indican lo que se debe revisar y ajustar en estas estrategias:

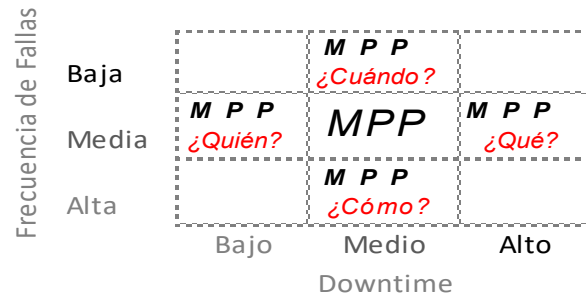


Fig. 15. Representación de los diferentes MPP en la DMG.

Fuente: Adaptado de [66].

En los planes de mantenimiento preventivo, las tareas se pueden considerar MPP “fáciles”, donde se debe revisar “quién” y “cuándo” están ejecutando la tarea, y “difíciles”, donde es necesario investigar “qué” y “cómo” la están ejecutando. Si los activos se clasifican en la sección de frecuencia de falla y tiempo de inactividad medio, entonces se recomienda continuar con los MPP sin realizar ajustes. Los interrogantes que pueden ser relativamente “difíciles” de responder requieren una experiencia más avanzada por parte de quién elabora las estrategias. Por consiguiente, el direccionamiento del MPP se relaciona con la posición del activo en la DMG.

En conclusión, se pretende en cada uno de los MPP propuestos identificar las oportunidades de mejora y optimizar los planes de mantenimiento preventivo planificado. Para ampliar este concepto, consultar en [68].

6.5.4.5. *Mantenimiento basado en condición*. Para los activos con baja frecuencia de fallas, pero que ocasionan alto tiempo *down* cuando fallan, se recomienda el CBM. Estos activos pueden experimentar pocas fallas, pero de alto impacto o incluso que sean catastróficas. Estas fallas ocasionan periodos prolongados de inactividad. A estos activos o modos de falla los denominan *show stoppers* [11].

Algunas de las técnicas comúnmente usadas en CBM son la termográfica, el análisis de vibraciones, ultrasonido, análisis de aceite, entre otras. Estas se aplican con el fin de anticiparse a las fallas del activo y proponer medidas proactivas para evitar impacto en la operación. Para una ampliación de la estrategia CBM, consultar [69] y [70].

6.5.4.6. Mejora del nivel de habilidades. Labib et al. [25] recomiendan aplicar la estrategia de MNH, también conocida como Skills Level Upgrade (SLU), para aquellos activos que presentan alta frecuencia de fallas que se pueden solucionar rápidamente.

Seecharan et al. [8] denominan este comportamiento como “muerte por mil cortes”, porque si bien en un principio las fallas generan poco tiempo de inactividad, el no controlar este estado crónico de los activos puede conllevar problemas de alto tiempo de inactividad acumulada. Esta metáfora ilustra cómo pequeños problemas que no se abordan adecuadamente pueden acumularse y resultar en un impacto considerable en la operación.

La estrategia de MNH implica abordar algunos pilares del TPM (Total Productive Maintenance), como, por ejemplo, transferencia de tareas básicas de mantenimiento a los operadores de primera línea, mantenimiento de calidad, capacitación y formación del personal de operación y mantenimiento. De ahí el término “mantenimiento productivo total”.

6.5.4.7. Mantenimiento eliminado por diseño. En esta sección de la cuadrícula se encuentran ubicados los activos con peor rendimiento, debido a la alta frecuencia de fallas y tiempo de inactividad. Para un activo clasificado en esta sección, se recomienda evaluar su diseño con el fin de eliminar las constantes y prolongadas intervenciones por mantenimiento correctivo. Esta estrategia es también conocida como Design-Out Maintenance (DOM) [11].

Los activos a los cuales se recomienda aplicar la estrategia MED se consideran no aptos para el propósito que fueron adquiridos y, por lo tanto, son candidatos para renovación, *overhaul* o mantenimiento mayor. Para una ampliación de la estrategia MED, consultar en [71].

6.5.4.8. Enfoques de la DMG. El concepto original de la DMG determina cuándo aplicar enfoques basados en TPM o RCM, pero, en lugar de abordar RCM y TPM como dos metodologías opuestas, las

unifica en un solo modelo analítico. Este enfoque ayuda a los responsables de la gestión del mantenimiento a tomar decisiones informadas, primero, para planificar la implementación de estrategias apropiadas y, segundo, para monitorear su impacto en los activos [8], [11].

Para los activos clasificados en el triángulo superior derecho de la Figura 16, el enfoque está direccionado al RCM. Para ampliar el concepto de RCM, consultar en [72] y [73].

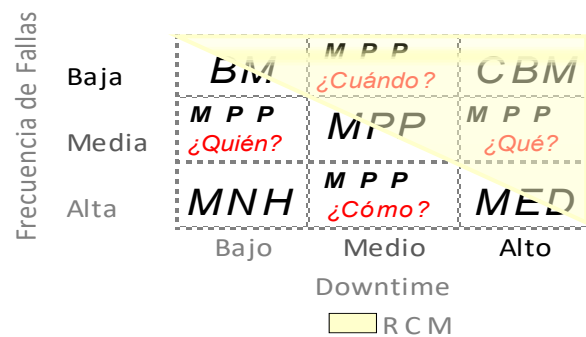


Fig. 16. Enfoque de mantenimiento RCM.

Fuente: Adaptado de [8].

Para los activos clasificados en el triángulo inferior izquierdo de la Figura 17, el método recomienda aplicar un enfoque de TPM. Para ampliar este concepto, consultar en [74] y [75].

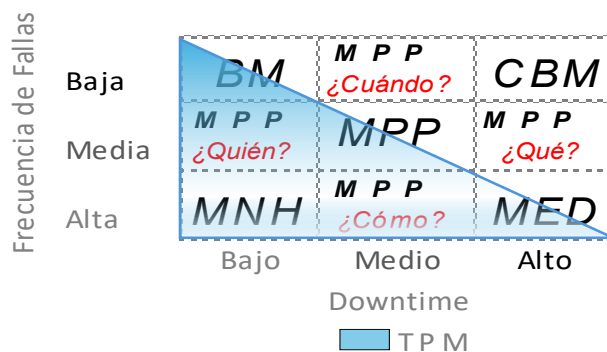


Fig. 17. Enfoque de mantenimiento TPM.

Fuente: Adaptado de [8].

6.5.4.9. *Determinación de límites.* En una DMG típica, hay tres enfoques básicos para determinar los límites de umbral bajo/medio y medio/alto a partir de las combinaciones de tiempo de inactividad y frecuencia de fallas.

Enfoque 1. El primer enfoque asume que los datos son homogéneos, y se fundamenta en calcular la diferencia (δ) entre los valores máximo (*máx.*) y mínimo (*mín.*) de la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad, respectivamente [76]. A este enfoque Yunusa-Kaltungo y Labib [11] lo denominan DMG 1.

Suponiendo que el valor máximo y mínimo para la frecuencia de fallas se identifica por las variables ($x_{máx}$) y ($x_{mín}$), respectivamente, entonces:

$$\delta_x = x_{máx} - x_{mín} \quad (31)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 31, a continuación, se definen los límites bajo/medio y medio/alto de la frecuencia de fallas:

$$Bajo/Medio = \frac{(x_{máx} - x_{mín})}{3} = \frac{\delta_x}{3} \quad (32)$$

$$Medio/Alto = 2 \frac{(x_{máx} - x_{mín})}{3} = \frac{2\delta_x}{3} \quad (33)$$

Ahora, suponiendo que los valores máximo y mínimo para el tiempo de inactividad o *Downtime* se identifican por las variables ($y_{máx}$) y ($y_{mín}$), respectivamente, entonces:

$$\delta_y = y_{máx} - y_{mín} \quad (34)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 34, a continuación, se definen los límites bajo/medio y medio/alto para el tiempo de inactividad:

$$Bajo/Medio = \frac{(y_{máx} - y_{mín})}{3} = \frac{\delta_y}{3} \quad (35)$$

$$Medio/Alto = 2 \frac{(y_{máx} - y_{mín})}{3} = \frac{2\delta_y}{3} \quad (36)$$

Enfoque 2. Debido a que normalmente es imposible garantizar la homogeneidad de los datos de fallas y tiempos de inactividad, Tahir et al. [77] argumentaron que el resultado de enfoques anteriores inducía al error, y los intervalos de los límites no eran siempre correctos. Como solución a esta limitación, propusieron un segundo enfoque basado en el análisis de distancia euclidiano para mostrar las variaciones entre los intervalos alto/medio/bajo, y emplearon la distancia euclidiana y de Canberra para calcular la medida de diferencias entre variables, de la siguiente forma:

Sea x_{ij} el valor observado de la j -ésima variable para el i -ésimo individuo, donde $i = 1, \dots, n$, y $j = 1, \dots, p$, entonces, la distancia euclidiana entre estos dos puntos $d(s, t)$ en un espacio de p dimensiones, se define así:

$$d(s, t) = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{sj} - x_{tj})^2} \quad (37)$$

Ahora, sea x_{ij} el valor observado de la j -ésima variable para el i -ésimo individuo, donde $i = 1, \dots, n$, y $j = 1, \dots, p$, entonces, las disimilitudes de Canberra entre estos dos puntos $\partial(s, t)$ en un espacio de p dimensiones, se definen así:

$$\partial(s, t) = \sum_{j=1}^p \frac{|x_{sj} - x_{tj}|}{|x_{sj} + x_{tj}|} \quad (38)$$

En este segundo enfoque, primero, se organizan los datos de la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad en orden descendente; luego, se definen los límites en el punto de máxima variación entre los valores consecutivos de la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad. A este enfoque Yunusa-Kaltungo y Labib [11] lo denominaron DMG 2.

Asumiendo que los valores máximo y mínimo para la frecuencia de fallas se identifican por las variables $(x_{m\acute{a}x})$ y $(x_{m\acute{i}n})$, respectivamente, entonces:

$$IC_F = \frac{(x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n})}{3} \quad (39)$$

Donde:

IC_F = Intervalo constante de la frecuencia de fallas

Teniendo en cuenta la ecuación 39, se definen los intervalos para la frecuencia de fallas (FF) de la siguiente manera:

$$FF_{Alta} = [(x_{m\acute{a}x}), (x_{m\acute{a}x} - IC_F)] \quad (40)$$

$$FF_{Media} = [(x_{m\acute{a}x} - IC_F), (x_{m\acute{a}x} - 2IC_F)] \quad (41)$$

$$FF_{Baja} = [(x_{m\acute{a}x} - 2IC_F), (x_{m\acute{m}n})] \quad (42)$$

Ahora, asumiendo que los valores máximo y mínimo para el tiempo de inactividad o *Downtime* se identifican por las variables ($y_{m\acute{a}x}$) y ($y_{m\acute{m}n}$), respectivamente, entonces:

$$IC_D = \frac{(y_{m\acute{a}x} - y_{m\acute{m}n})}{3} \quad (43)$$

Donde:

IC_D = Intervalo constante del *Downtime*

Teniendo en cuenta la ecuación 43, se definen los intervalos para el *Downtime* (D) de la siguiente manera:

$$D_{Alto} = [(y_{m\acute{a}x}), (y_{m\acute{a}x} - IC_D)] \quad (44)$$

$$D_{Medio} = [(y_{m\acute{a}x} - IC_D), (y_{m\acute{a}x} - 2IC_D)] \quad (45)$$

$$D_{Bajo} = [(y_{m\acute{a}x} - 2IC_D), (y_{m\acute{i}n})] \quad (46)$$

Enfoque 3. El tercer enfoque utiliza la lógica difusa para establecer funciones de pertenencia que delimiten las regiones baja, media y alta de la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad [78]. Este enfoque se basa en la percepción subjetiva del responsable de mantenimiento expresada en forma matemática, y no es parte del alcance de este documento. Para ampliar el concepto de lógica difusa en la selección de estrategias de mantenimiento, consultar en [79] y [80].

Debido a la subjetividad que a menudo acompaña la identificación de los aspectos más relevantes para el negocio, los enfoques 1 y 2 son los más empleados para definir los límites en el método DMG [11]. Al-Najjar y Alsyouf [79] afirman que la lógica difusa es un concepto muy intuitivo y fácil de comprender, que está en creciente auge debido a diversos factores claves, como su flexibilidad para adaptarse a diferentes contextos operacionales y su tolerancia a datos imprecisos. Esto es frecuente en contextos reales, en su uso del lenguaje natural para describir situaciones, entre otros.

6.5.5. Comparación del JKD y la DMG. En un interesante artículo, Seecharan et al. [8] comparan el JKD y la DMG considerando la frecuencia de fallas y el tiempo de inactividad de diferentes activos y en diferentes contextos.

Para llevar a cabo el análisis, los autores se basaron en datos de dos investigaciones previas realizadas por Knights et al. [24] y Aslam-Zainudeen y Labib [52]. Además, incorporaron una tercera fuente de datos recopilados en 2007, correspondientes a las fallas registradas en una planta de geomembrana, lo que enriqueció significativamente la base de datos y contribuyó a una evaluación más completa y precisa.

Los autores señalaron que el JKD presenta la ventaja de sus límites de umbral móviles, los cuales permiten medir la ubicación de los activos en relación con estos. Además, facilita la comparación entre el estado de los activos antes y después de un cambio en las estrategias de mantenimiento. Se diferencia de la DMG en que esta es “casi binaria” y no muestra la distancia a los límites sin métodos adicionales. En cambio, el JKD sí incluye un mecanismo para determinar los límites de umbral.

También indicaron los autores cómo el JKD posibilita la implementación de estrategias de mantenimiento, utilizando la DMG como referencia. Aunque no se considera una desventaja, en algunos casos, la ubicación de los activos en el JKD es similar a la DMG. La principal diferencia indicada por los autores es que el JKD tiene cuatro secciones para la definición de estrategias de mantenimiento, aunque propiamente no las especifica. En cambio, la DMG cuenta con nueve secciones y puede definir hasta cinco estrategias diferentes.

Los hallazgos del estudio sugieren que tanto el JKD como la DMG son herramientas de soporte adecuadas para la toma de decisiones en la priorización y definición de estrategias de mantenimiento a partir de la frecuencia de fallas y duración del tiempo de inactividad de los activos. Finalmente, los autores concluyeron que ambas herramientas presentan ventajas y desventajas, lo que da a entender que no se puede determinar cuál de las dos es más adecuada en todos los casos. En lugar de ello, la elección de su implementación o combinación en un contexto operativo real dependerá de las circunstancias específicas y de los objetivos del análisis.

7. CASO DE ESTUDIO

A continuación, se aplica la metodología de seis pasos propuesta en este estudio a cinco flotas de camiones identificadas como FL-01, FL-02, FL-03, FL-04 y FL-05.

7.1. PASO 1: RECOPIACIÓN DE DATOS

El primer paso en el análisis de las flotas consistió en la recopilación detallada de información sobre las intervenciones por fallas y mantenimiento correctivo no programado a lo largo de un periodo operativo de 8760 horas, es decir, un año completo de funcionamiento continuo. Estos datos se obtuvieron a través del sistema de gestión de mantenimiento propio de la empresa, el cual registra todas las órdenes de trabajo (OT) generadas por fallas y reparaciones. La OT permite el seguimiento de cada intervención y facilita la identificación del tipo y frecuencia de falla, el sistema afectado, el tiempo de inactividad del equipo y los recursos empleados para cada reparación (costos y mano de obra).

Posteriormente, se realizó un filtrado de datos para seleccionar aquellos que podían emplearse en el estudio, teniendo en cuenta su calidad. Con esta información, y aplicando las fórmulas correspondientes, se construyeron cada una de las tablas de datos descritas en los siguientes pasos.

7.2. PASO 2: APLICACIÓN DE LA MATRIZ CTR

Se aplicó la matriz de CTR a las cinco flotas mencionadas, con el objetivo de determinar la criticidad total por riesgo de cada una, de acuerdo con lo enunciado en la sección 6.5.1 de este documento. En la Tabla 1 se presentan los factores de ponderación de cada uno de los criterios evaluados teniendo en cuenta los factores de la ecuación 3:

Tabla 1. Ponderación de criterios evaluados para CTR

Criterio	Escala	Descripción
Frecuencia de fallas (FF)	1 a 4	1: Menos de 100 fallas/año
		2: Entre 100 y 200 fallas/año
		3: Entre 200 y 300 fallas/año
		4: Más de 300 fallas/año
Impacto operacional (IO)	1 a 10	1: Pérdidas de producción menores al 20 %
		3: Pérdidas de producción entre el 20 % y el 40 %
		5: Pérdidas de producción entre el 40 % y el 60 %
		7: Pérdidas de producción entre el 60 % y el 80 %
		10: Pérdidas de producción superiores al 80 %
Impacto por flexibilidad operacional (FO)	1 a 4	1: Equipos de reserva en línea, tiempos pequeños de reparación y logística
		2: Equipos de reserva que cubren de forma parcial el impacto de producción y tiempos de reparación intermedios
		4: No se cuenta con equipos de reserva para cubrir la producción y tiempos de reparación y logística muy grandes
Impacto en costes de mantenimiento (CM)	1 a 2	1: Costos de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 200.000 dólares
		2: Costos de reparación, materiales y mano de obra superiores a 200.000 dólares
Impacto en seguridad, higiene y ambiente (SHA)	1 a 8	1: No existe riesgo de pérdida de vida, afección a la salud ni daños ambientales
		3: Riesgo bajo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en corto plazo) y/o incidente ambiental menor
		6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud y/o incidente ambiental de difícil restauración
		8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud y/o incidente ambiental mayor (catastrófico)

Fuente: Elaboración propia

Luego de aplicar la ecuación 3 para determinar la criticidad total por riesgo de cada flota, se obtuvo la jerarquización mostrada en la matriz de la Figura 20:

Frecuencia de Fallas	4	B	M	A	① A	A
	3	B	② M ③	M	A	A
	2	④ B ⑤	B	M	M	M
	1	B	B	B	B	M
		10	20	30	40	50
		<i>Consecuencias</i>				

Fig. 18. Matriz CTR.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

A = Criticidad alta

M = Criticidad media

B = Criticidad baja

En la Tabla 2 se muestra el resumen de la jerarquización realizada por flotas:

Tabla 2. Resultados de aplicación matriz CTR

Flota	FF	IO	FO	CM	SHA	C	CTR	Criterio
FL-01	4	8	4	2	8	42	168	Criticidad alta (A)
FL-02	3	6	2	2	6	20	60	Criticidad media (M)
FL-03	3	4	2	2	5	15	45	Criticidad media (M)
FL-04	2	3	2	1	6	13	26	Criticidad baja (B)
FL-05	2	4	2	2	5	15	30	Criticidad baja (B)

Fuente: Elaboración propia

Los resultados evidenciaron diferentes priorizaciones entre flotas con criticidad alta, media y baja. A partir de esta jerarquización, se seleccionó la flota FL-01 priorizada con criticidad alta (A) para continuar con la aplicación de la metodología propuesta.

La flota (FL-01) está conformada por nueve camiones cisterna (carrotanques) que comparten el mismo contexto operativo. Los camiones están clasificados dentro de las configuraciones mencionadas anteriormente en la Tabla 1. Las referencias de los equipos son A, B y C (no se especifican marcas ni líneas comerciales).

En la Tabla 3, se presenta el resumen de las características generales de la flota de camiones seleccionada para el estudio:

Tabla 3. Características de la flota de camiones

Flota	Equipo	Referencia	Configuración	Año modelo	Edad (años)
FL-01	1	A	C3(Normal)	2016	8
FL-01	2	B	C2	2010	14
FL-01	3	C	C3(Normal)	2011	13
FL-01	4	B	C2	2012	12
FL-01	5	B	C2	2012	12
FL-01	6	A	C3(Normal)	2016	8
FL-01	7	B	C2	2012	12
FL-01	8	B	C2	2012	12
FL-01	9	C	C3(Normal)	2011	13

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21, se muestra el comportamiento general de la disponibilidad operativa de la flota FL-01 durante el periodo de tiempo analizado:

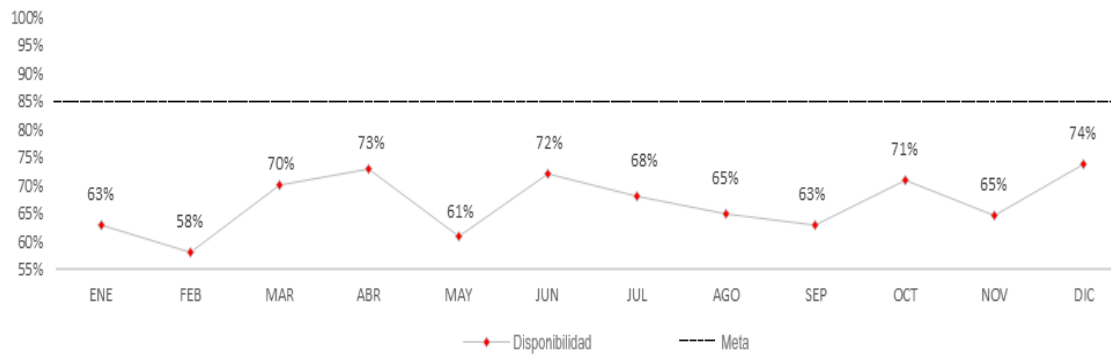


Fig. 19. Histórico de disponibilidad operativa flota FL-01.

Fuente: Elaboración propia. Periodo de enero a diciembre de 2024.

7.2.1. Contexto operativo de la flota FL-01. La función principal de esta flota es transportar carga líquida (no especificada), operando continuamente las 24 horas del día, los 7 días de la semana, durante todo el año. La flota opera en una mina de carbón a cielo abierto ubicada en el norte de Colombia. El entorno presenta un clima variable, con distintas temporadas de lluvia y sequía a lo largo del año. Las temperaturas oscilan entre los 25 °C y los 45 °C con vientos que varían entre 4 Km/h y 30 Km/h y una humedad relativa que fluctúa entre el 55 % y el 85 %.

Además, el ambiente es salino y corrosivo, con presencia de contaminación atmosférica que incluye polvo, partículas y óxidos en suspensión. Los camiones de la flota enfrentan extensas áreas de trabajo caracterizadas por terrenos irregulares, pendientes y rocosos.

7.3. PASO 3: APLICACIÓN DEL JKD

A continuación, se mencionan las variables y fuentes empleadas para la elaboración del JKD por equipos y sistemas:

- Equipos y sistemas: base de datos propia
- Número de fallas (n): base de datos propia
- Tiempo para reparar TTR : base de datos propia
- Tiempo medio entre fallas $MTBF$: ecuación 7
- Tasa de fallas (λ): ecuación 9
- Tiempo medio para reparar $MTTR$: ecuación 5

- Indisponibilidad por fallas (U): ecuación 17.

7.3.1. JKD por equipos. La Tabla 4 resume los datos necesarios para el análisis por equipos:

Tabla 4. Datos para análisis JKD por equipos

Equipo	n	TTR (h)	MTBF (h)	(λ)	MTTR (h)	% U
1	48	3878	183	5,48E-03	80,8	44,3 %
2	99	3842	88	1,13E-02	38,8	43,9 %
3	80	2587	110	9,13E-03	32,3	29,5 %
4	93	2340	94	1,06E-02	25,2	26,7 %
5	59	2112	148	6,74E-03	35,8	24,1 %
6	65	1994	135	7,42E-03	30,7	22,8 %
7	93	1744	94	1,06E-02	18,8	19,9 %
8	42	1593	209	4,79E-03	37,9	18,2 %
9	83	1084	106	9,47E-03	13,1	12,4 %
			Promedio	8,40E-03	30,95	26 %

Fuente: Elaboración propia

Luego de aplicar el método descrito en la sección 6.5.2 para la elaboración del JKD por equipos, se obtuvo el diagrama presentado en la Figura 22.

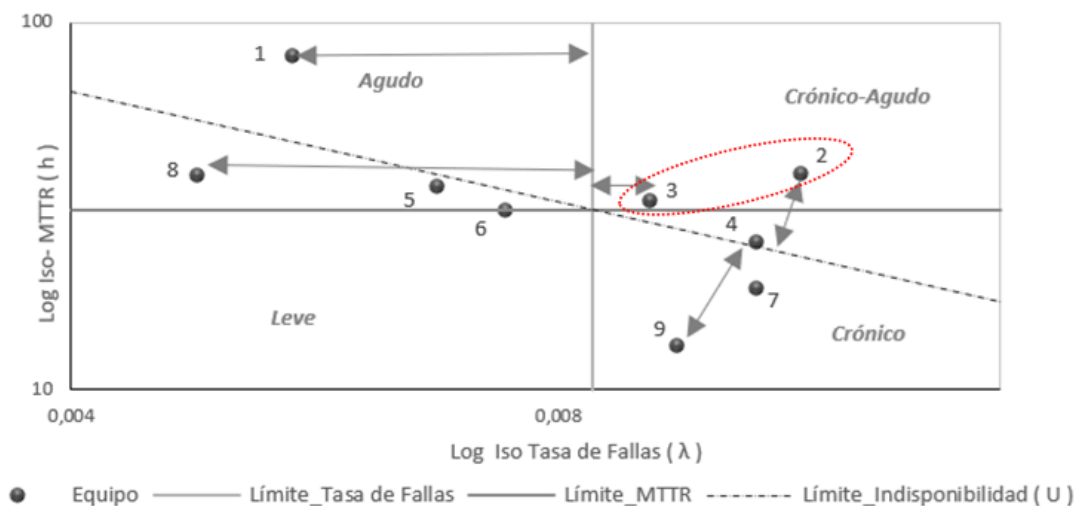


Fig. 20. Diagrama de Jack-Knife por equipos.

Fuente: Elaboración propia.

Los límites de las variables λ , $MTTR$ y U por equipos se calcularon a partir de las ecuaciones 21, 22 y 23, respectivamente.

7.3.2. Resultados JKD por equipos. La evaluación por medio del JKD se centró en determinar cuáles eran los equipos “malos actores” y aquellos con menor impacto en la disponibilidad general de la flota analizada. Esto facilitó la identificación de oportunidades de mejora y la toma de decisiones.

Como se puede observar en la Figura 22, los equipos 2 y 3 son los más críticos en base al JKD, ya que presentan un comportamiento de fallas crónico-agudo. Adicional a esto, estos equipos junto con el 1 y 4 se consideran “malos actores”, debido al impacto negativo en la disponibilidad general de la flota analizada. Los equipos 8 y 9 presentan el menor impacto en la disponibilidad general de la misma. Los equipos más confiables son el 1 y 8, mientras que los menos confiables son el 2, 4 y 7. En el caso del equipo 1, considerado un “mal actor”, se evidencia que, aunque sea confiable, las fallas pueden tener un alto impacto en la disponibilidad operativa, ya que pueden ser fallas de difícil reparación.

Por otro lado, se observó que un equipo con baja confiabilidad no necesariamente tiene un alto impacto en la disponibilidad; por ejemplo, el equipo 7, que es considerado de los menos confiables en el JKD puede fallar con frecuencia, pero sus reparaciones son rápidas. De ahí la importancia del JKD, que permite identificar de forma visual, fácil y práctica las causas de la baja disponibilidad de un equipo, ya sea por una alta tasa de fallas, un alto tiempo de reparación o ambos. Con base en los resultados del JKD de la Figura 19, en la Tabla 13 del Anexo A se presenta un análisis detallado por equipos mediante indicadores RAM.

En la Figura 23, se muestra un diagrama de dispersión λ vs. $MTTR$ vs. U , que permite visualizar de forma general los equipos denominados “malos actores”.

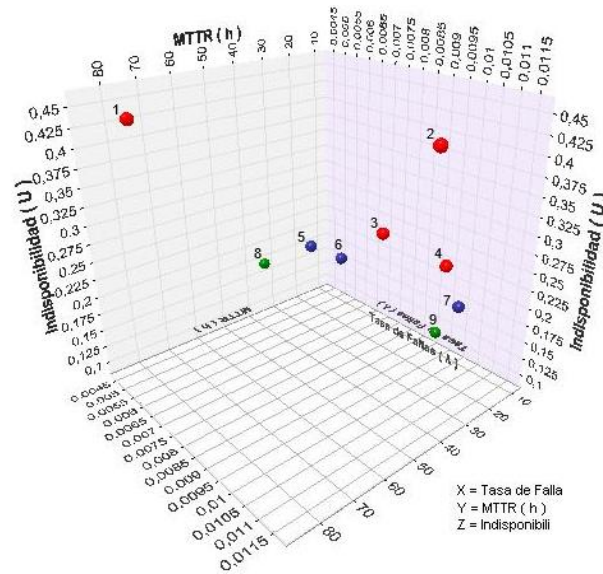


Fig. 21. Diagrama de dispersión por equipos. Versión 3D.

Fuente: Elaboración propia. En rojo, los “malos actores”; en verde, los de menor impacto.

A partir de la ecuación 16, se determinó que el promedio de disponibilidad general de la flota fue del 74 %. En este análisis, no se tuvieron en cuenta las intervenciones por mantenimiento preventivo. De acuerdo con los objetivos y necesidades de la operación, la disponibilidad de la flota FL-01 debería ser ≥ 85 %, incluyendo mantenimiento preventivo y correctivo. Lo anterior indica un comportamiento cuestionable según los criterios del JKD, dado que la disponibilidad actual se encuentra muy por debajo de las metas establecidas. Esto sugiere que todos los equipos presentan un nivel de impacto que requiere atención y análisis adicional.

Para este análisis adicional, se evaluó el comportamiento de las fallas por sistemas por medio de un JKD, con el fin de identificar cómo se distribuye este 26 % de indisponibilidad de la flota. A continuación, se presentan los resultados.

7.3.3. JKD por sistemas. Con base en el resultado de la indisponibilidad (U) atribuible a las fallas de los nueve equipos estudiados, la Tabla 5 resume la distribución de este 26 % de indisponibilidad entre los diferentes sistemas que conforman los camiones.

Tabla 5. Datos para análisis JKD por sistemas

T (Hr)	8760							
Ítem	Sistema	<i>n</i>	<i>TTR (h)</i>	<i>MTBF (h)</i>	<i>MTBF (h)</i>	(λ)	<i>MTTR (h)</i>	<i>(U)</i>
1	Equipo auxiliar	142	4250	555	62	1,80E-03	29,9	5,4 %
2	Llantas + ruedas	101	3045	781	87	1,28E-03	30,1	3,9 %
3	Eléctrico	90	3019	876	97	1,14E-03	33,5	3,8 %
4	Motor - potencia	85	2858	928	103	1,08E-03	33,6	3,6 %
5	Frenos	72	2579	1095	122	9,13E-04	35,8	3,3 %
6	Aire acondicionado	52	1589	1516	168	6,60E-04	30,6	2,0 %
7	Chasis	27	962	2920	324	3,42E-04	35,6	1,2 %
8	Transmisión	25	927	3154	350	3,17E-04	37,1	1,2 %
9	Suspensión	25	833	3154	350	3,17E-04	33,3	1,1 %
10	Hidráulico	17	439	4638	515	2,16E-04	25,8	0,56 %
11	Dirección	14	361	5631	626	1,78E-04	25,8	0,46 %
12	Diferencial	12	312	6570	730	1,52E-04	26,0	0,4 %
					Promedio	7,00E-04	31,2	2,2 %
					(U) Total			26,9 %

Fuente: Elaboración propia

Luego de aplicar el método descrito en la sección 6.5.2 para la elaboración del JKD por sistemas, se obtuvo el diagrama presentado en la Figura 24.

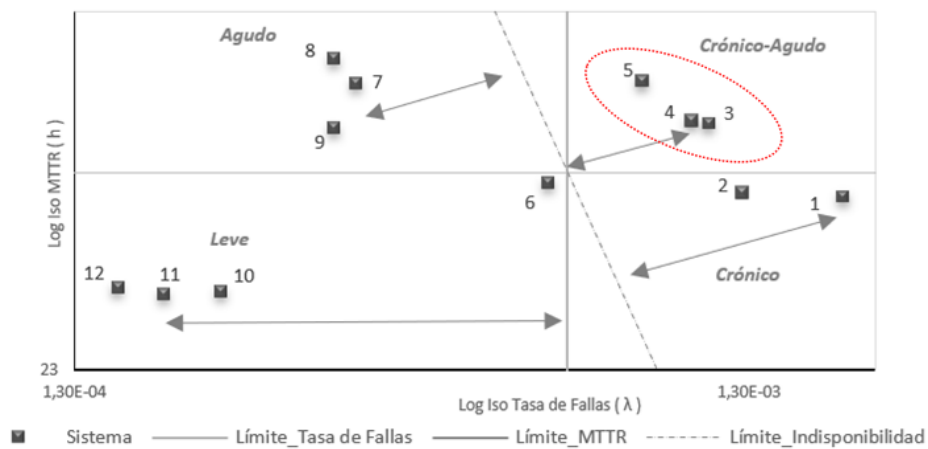


Fig. 22. Diagrama de Jack-Knife por sistemas.

Fuente: Elaboración propia.

Los límites de las variables λ , *MTTR* y *U* por sistemas se calcularon a partir de las ecuaciones 21, 22 y 23, respectivamente.

7.3.4. Resultados JKD por sistemas. Como se puede observar en la Figura 23, los sistemas 3, 4 y 5 son los más críticos en base al JKD, ya que presentan un comportamiento de fallas crónico-agudo. Además, estos sistemas junto con el 1 y 2 se consideran “malos actores”, debido al impacto negativo en la disponibilidad general de la flota analizada. Del 26 % de indisponibilidad, estos cinco sistemas aportan el 20 %.

La identificación de estos “malos actores” no solo ayuda a priorizar los esfuerzos de mantenimiento y mejora, sino que también proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la gestión de la flota. Por otro lado, los sistemas 10, 11 y 12 son los más confiables y mantenibles, por lo cual el impacto en la indisponibilidad general de la flota es mínimo.

Con base en los resultados del JKD de la Figura 21, en la Tabla 14 del Anexo A se presenta un análisis detallado por sistemas mediante indicadores RAM. En la Figura 25 se muestra un diagrama de dispersión λ vs. *MTTR* vs. *U* que permite visualizar de forma general los sistemas denominados “malos actores”. Los puntos marcados en rojo son los sistemas más críticos para la disponibilidad de la flota.

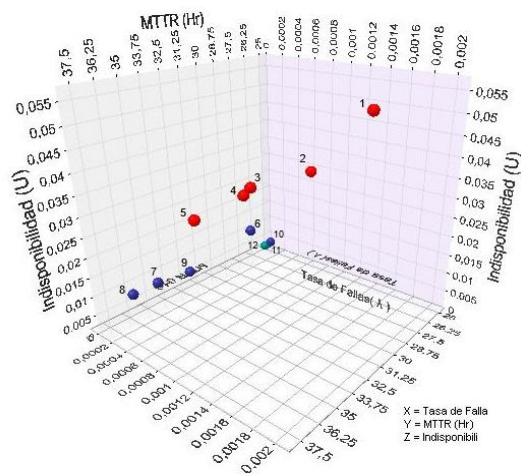


Fig. 23. Diagrama de dispersión por sistemas. Versión 3D.

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que el sistema denominado equipo auxiliar (1) ha sido priorizado como el más crítico de la flota, es fundamental evaluar los diferentes subsistemas que lo componen. Dado que se trata de un camión

cisterna (carrotanque), este sistema auxiliar incluye varios subsistemas que requieren un estudio más exhaustivo para encontrar la causa raíz de los problemas de fiabilidad y mantenibilidad. Debido a que las fallas afectan significativamente los costos operativos de cualquier flota, es fundamental realizar una evaluación del impacto económico de dichas fallas. Para realizar esta evaluación, se usó el CSD.

7.4. PASO 4: APLICACIÓN DEL CSD

A continuación, se mencionan las variables y fuentes empleadas para los cálculos y aplicación del CSD por equipos y sistemas:

- Costo total por fallas: base de datos propia
- Tasa de fallas (λ): ecuación 9
- Tiempo medio para reparar $MTTR$: ecuación 5
- Costo global específico C_{ge} : ecuación 24
- Indisponibilidad por fallas (U): ecuación 17
- Costo global C_g : ecuación 25

7.4.1. CSD por equipos. La Tabla 6 muestra el resumen de los datos empleados para el CSD por equipos:

Tabla 6. Datos para análisis CSD por equipos

T =	8760					
Equipo	Costo total (USD/año)	Tasa de fallas (λ)	MTTR (h)	Cge (USD/h) fuera de servicio	Indisponibilidad (U)	Cg (USD/hora)
1	50,022	5,48E-03	80,8	12,9	44,3 %	5,71
2	54,964	1,13E-02	38,8	14,3	43,9 %	6,27
3	64,270	9,13E-03	32,3	24,8	29,5 %	7,34
4	36,744	1,06E-02	25,2	15,7	26,7 %	4,19
5	31,872	6,74E-03	35,8	15,1	24,1 %	3,64
6	43,700	7,42E-03	30,7	21,9	22,8 %	4,99
7	28,240	1,06E-02	18,8	16,2	19,9 %	3,22
8	38,586	4,79E-03	37,9	24,2	18,2 %	4,40
9	51,352	9,47E-03	13,1	47,4	12,4 %	5,86
TOTAL	399.750					

Fuente: Elaboración propia.

Luego de aplicar el método descrito en la sección 6.5.3 para la elaboración del CSD por equipos, se obtuvo el diagrama presentado en la Figura 26:

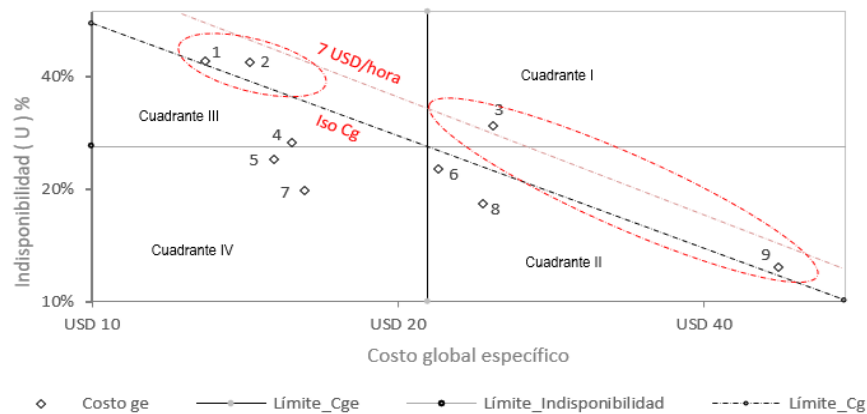


Fig. 24. CSD por equipos.

Fuente: Elaboración propia.

Los límites de las variables U , C_{ge} y C_g por equipos fueron calculados a partir de las ecuaciones 23, 29 y 30, respectivamente.

7.4.2. Resultados CSD por equipos. El CSD de la Figura 26 revela que los equipos más críticos para el negocio son el 1, 2, 3 y 9. Entre estos, el equipo 3 es el más crítico en términos de costo global C_g , por fallas. Esta identificación prioriza las acciones de mantenimiento y optimiza los recursos para minimizar el impacto de las fallas de este equipo en los costos globales de mantenimiento.

Se observa que el equipo 9 tiene un alto costo global específico C_{ge} , lo que indica que su reparación es la más costosa de todos los equipos de la flota, aunque la indisponibilidad causada por fallas es baja. Por lo tanto, el impacto en el negocio puede considerarse de menor prioridad en comparación con los equipos 2 y 3. También se puede notar que los equipos 6 y 8 presentan un costo global específico C_{ge} que supera el límite del umbral definido para esta variable, lo que indica que su reparación también es costosa. Sin embargo, debido a que la indisponibilidad causada por las fallas es baja, no impacta de forma considerable el costo global por unidad de tiempo. Finalmente, los equipos 5 y 7 se destacan por tener el menor impacto en términos de costos globales y específicos dentro de la flota. Esto significa que, en comparación con los demás equipos, estos presentan menores costos globales asociados con fallas y reparaciones, lo que los convierte en los menos críticos desde el punto de vista económico.

Con el objetivo de identificar cómo están distribuidos los costos por fallas entre los diferentes sistemas, a continuación, se desarrolló un CSD por sistemas.

7.4.3. CSD por sistemas. La Tabla 7 muestra el resumen de los datos empleados para el CSD por sistemas:

Tabla 7. Datos para análisis CSD por sistemas

T=	8760					
Ítem	Costo total (USD/año)	Tasa de fallas (λ)	MTTR (h)	Cge (USD/h) fuera de servicio	(U)	Cg (USD/hora)
1	148,543	1,80E-03	29,9	314,6	5,4 %	17,0
2	73,210	1,28E-03	30,1	216,4	3,9 %	8,36
3	23,787	1,14E-03	33,5	70,9	3,8 %	2,72
4	34,632	1,08E-03	33,6	109,1	3,6 %	3,95
5	14,523	9,13E-04	35,8	50,7	3,3 %	1,66
6	10,811	6,60E-04	30,6	61,2	2,0 %	1,23
7	8,955	3,42E-04	35,6	83,8	1,2 %	1,02
8	40,774	3,17E-04	37,1	395,9	1,2 %	4,65
9	7,854	3,17E-04	33,3	84,9	1,1 %	0,90
10	12,322	2,16E-04	25,8	252,6	0,6 %	1,41
11	14,917	1,78E-04	25,8	371,9	0,5 %	1,70
12	9,421	1,52E-04	26,0	271,8	0,4 %	1,08
TOTAL	399,750					

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas descritos en la Tabla 7 son: equipo auxiliar (1), llantas + ruedas (2), eléctrico (3), motor – potencia (4), frenos (5), aire acondicionado (6), chasis (7), transmisión (8), suspensión (9), hidráulico (10), dirección (11) y diferencial (12).

Luego de aplicar el método descrito en la sección 6.5.3 para la elaboración del CSD por sistemas, se obtuvo el diagrama presentado en la Figura 27:

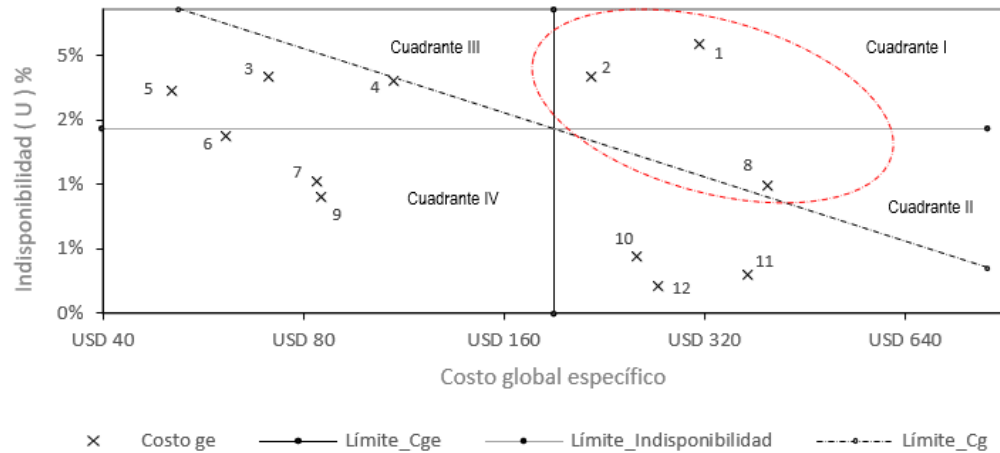


Fig. 25. CSD por sistemas.

Fuente: Elaboración propia.

Los límites de las variables U , C_{ge} y C_g por sistemas se calcularon a partir de las ecuaciones 23, 29 y 30, respectivamente.

7.4.4. Resultados CSD por sistemas. El CSD de la Figura 27 revela que los sistemas más críticos para el negocio son el 1, 2, y 8 (destacados en rojo). Entre estos, los sistemas 1 y 2 son los más críticos en términos de costo global C_g , por fallas.

Se observa que el sistema 8 tiene un alto costo global específico C_{ge} , lo que indica que su reparación es la más costosa de todos los sistemas de la flota, aunque la indisponibilidad causada por fallas es baja. Por lo tanto, el impacto en el negocio puede considerarse de menor prioridad en comparación con los sistemas 1 y 2. También se puede notar que los sistemas 10, 11 y 12 presentan un costo global específico C_{ge} que supera el límite del umbral definido para esta variable, lo que indica que su reparación es costosa. Sin embargo, debido a que la indisponibilidad causada por las fallas es baja, no impacta de forma considerable el costo global por unidad de tiempo. Finalmente, los sistemas 5, 6, 7 y 9 se destacan por tener el menor impacto en términos de costos, pero con comportamientos diferentes. Los sistemas 5 y 6 presentan el menor C_{ge} por fallas de toda la flota; no obstante, debido a que el impacto es mayor en la indisponibilidad, el C_g por unidad de tiempo es mayor. Mientras que los sistemas 7 y 9 presentan un mayor C_{ge} por fallas, debido a que el impacto es menor en la indisponibilidad, el C_g por unidad de tiempo es menor.

Lo anterior significa que, en comparación con los demás sistemas, 7 y 9 presentan menores costos globales asociados con fallas y reparaciones, lo que los convierte en los menos críticos desde el punto de vista económico.

Luego de priorizar los activos teniendo en cuenta la tasa de fallas y el tiempo medio para reparar, es necesario definir estrategias de mantenimiento utilizando la cuadrícula de toma de decisiones DMG como guía para la selección de dichas estrategias, con el fin de mejorar la disponibilidad operativa y reducir los costos asociados.

7.5. PASO 5: APLICACIÓN DE LA DMG

Teniendo en cuenta el contexto específico de la flota FL-01 y el modelo actual de estrategias de mantenimiento en la organización, no se contempló la aplicación de la DMG por equipos. Esto se debe a que la información proporcionada por la DMG sobre las diferentes metodologías aplicables a los equipos sería demasiado general y no aportaría valor significativo para la toma de decisiones en este caso en particular. A continuación, se mencionan las variables y fuentes empleadas para los cálculos y aplicación de la DMG por sistemas:

- Sistemas: base de datos propia
- Frecuencia de fallas (n): base de datos propia
- Tiempo para reparar TTR (*Downtime*): base de datos propia

7.5.1. DMG por sistemas. La Tabla 8 muestra el resumen de los datos usados para la DMG:

Tabla 8. Datos para DMG por sistemas

Ítem	Sistema	n	TTR (h)
1	Equipo auxiliar	142	4250
2	Llantas + ruedas	101	3045
3	Eléctrico	90	3019
4	Motor - potencia	85	2858
5	Frenos	72	2579

Ítem	Sistema	<i>n</i>	<i>TTR (h)</i>
6	Aire acondicionado	52	1589
7	Chasis	27	962
8	Transmisión	25	927
9	Suspensión	25	833
10	Hidráulico	17	439
11	Dirección	14	361
12	Diferencial	12	312

Fuente: Elaboración propia

Se implementó el método descrito en la sección 6.5.4 para la definición de estrategias de mantenimiento a los diferentes sistemas de la flota analizada. Los rangos alto/medio/bajo de la frecuencia de fallas (*n*) fueron calculados a partir de las ecuaciones 40, 41 y 42. Los rangos alto/medio/bajo del *Downtime*, para este caso *TTR*, se calcularon a partir de las ecuaciones 44, 45 y 46, respectivamente.

Luego de calcular los rangos alto/medio/bajo de *n* y *TTR*, se obtuvo la Tabla 9:

Tabla 9. Criterios de la DMG por sistemas

Ítem	Sistema	<i>n</i>	<i>Criterio</i>	<i>TTR (h)</i>	<i>Criterio</i>	<i>Estrategia</i>
1	Equipo auxiliar	142	Alta	4250	Alto	MED
2	Llantas + ruedas	101	Alta	3045	Alto	MED
3	Eléctrico	90	Media	3019	Alto	MPP ¿Qué?
4	Motor - potencia	85	Media	2858	Medio	MPP
5	Frenos	72	Media	2579	Medio	MPP
6	Aire acondicionado	52	Baja	1589	Bajo	BM
7	Chasis	27	Baja	962	Bajo	BM
8	Transmisión	25	Baja	927	Bajo	BM
9	Suspensión	25	Baja	833	Bajo	BM
10	Hidráulico	17	Baja	439	Bajo	BM
11	Dirección	14	Baja	361	Bajo	BM
12	Diferencial	12	Baja	312	Bajo	BM

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el resultado de la Tabla 9, se ubicaron los sistemas en la DMG, que se representan en la Figura 26:

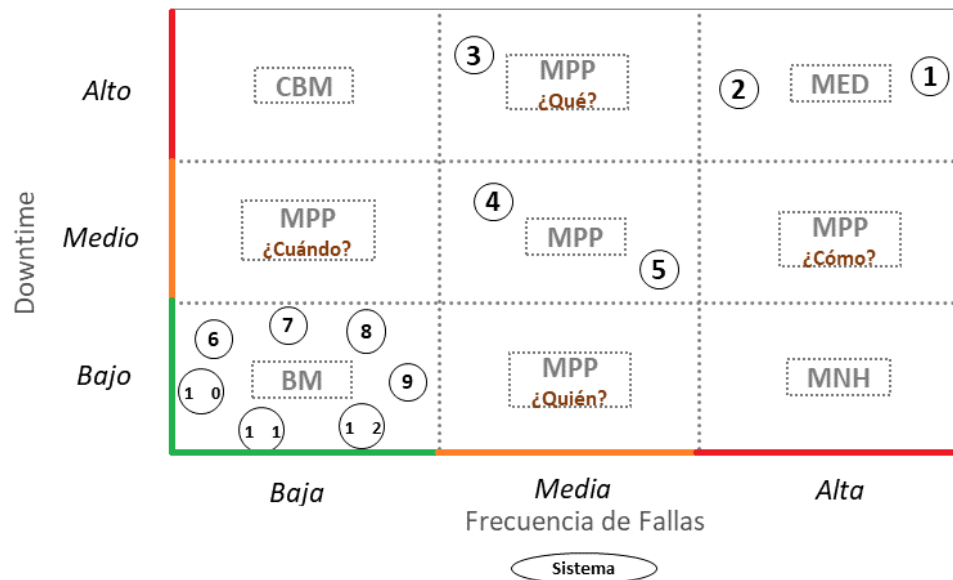


Fig. 26. DMG por sistemas.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

CBM = Mantenimiento basado en condición

MPP = Mantenimiento preventivo planificado

BM = Mantenimiento de averías

MED = Mantenimiento eliminado por diseño

MNH = Mejora del nivel de habilidades

Como se puede observar en la Figura 26, la frecuencia de fallas se ubicó en el eje horizontal, y el *Downtime*, en el eje vertical. Este ajuste se realizó respetando la posición de las estrategias sugeridas por el modelo original de Labib [25] y para mantener la misma estructura del JKD y CSD desarrollados en este documento.

7.5.2. Resultados DMG por sistemas. La DMG de la Figura 26 sugiere implementar la estrategia MED para los sistemas 1 y 2 (sistema auxiliar y sistema de llantas + ruedas, respectivamente). Para estos sistemas se recomienda evaluar su diseño, con el fin de eliminar las constantes y prolongadas intervenciones por mantenimiento correctivo.

Estos activos se consideran de bajo rendimiento, debido a la alta frecuencia de fallas y tiempo de inactividad. Por lo tanto, ya no son aptos para el propósito que fueron adquiridos, así que también son candidatos para renovación, *overhaul* o mantenimiento mayor. Para los sistemas 3, 4 y 5 (sistema eléctrico, motor-potencia y frenos, respectivamente), la DMG sugiere revisar las estrategias de MPP.

Como se puede observar en la Figura 26, la DMG recomienda diferentes MPP para los sistemas. Por ejemplo, para el sistema eléctrico (3), se debe responder a la pregunta: ¿“Qué” tareas de mantenimiento planificado se están ejecutando para prevenir las fallas de este sistema? Esto sugiere que es necesario identificar si las tareas actuales son adecuadas teniendo en cuenta el comportamiento de este sistema, ya que, aunque la frecuencia de fallas se encuentra en un rango medio, estas generan un alto tiempo de reparación.

Por el contrario, para los sistemas 4 y 5, la DMG indica que las tareas actuales de MPP son óptimas de acuerdo con el comportamiento de la frecuencia de fallas y el tiempo de reparación de estas (rango medio). Para los sistemas 6 al 12, la DMG recomienda la estrategia BM. Esto quiere decir que, para el aire acondicionado, chasis, transmisión, suspensión, hidráulico, dirección y diferencial, cuya frecuencia de fallas y tiempo de reparación es bajo, la estrategia o combinación de estrategias aplicadas actualmente están dando resultados, y lo que se debe es auditar la sostenibilidad de estas.

Como se puede evidenciar, la DMG hasta este punto es un método “casi binario” y no muestra la distancia de los sistemas a los límites establecidos sin métodos adicionales, tal como lo mencionan Seecharan et al. [8] en su estudio comparativo entre el JKD y la DMG. Una posible alternativa es construir la DMG utilizando un diagrama de dispersión de datos, tal como lo hicieron Yunusa-Kaltungo y Labib [11] y Okamura et al. [14], lo cual permite analizar la distancia de los sistemas a los límites establecidos para las variables.

Sumado a lo anterior, en este estudio se propone construir una DMG utilizando los mismos criterios de evaluación del JKD propuesto por Pascual et al. [4]: tasa de fallas (λ) y tiempo medio para reparar (MTTR), así como también lo han propuesto en estudios previos [8], [60] y [61].

Más que comparar los resultados obtenidos en la DMG de la Figura 26, o realizar un análisis exhaustivo para desarrollar nuevos modelos que a menudo se alejan de la realidad operativa, lo que se pretende es integrar las fortalezas colectivas del JKD y la DMG para mejorar la robustez de la metodología propuesta y facilitar la toma de decisiones. La Tabla 10 resume los datos utilizados para la cuadrícula que se denominará DMG 3:

Tabla 10. Datos DMG 3 por sistemas

Ítem	Sistema	(λ)	MTTR (h)
1	Equipo auxiliar	1,80E-03	29,9
2	Llantas + ruedas	1,28E-03	30,1
3	Eléctrico	1,14E-03	33,5
4	Motor - potencia	1,08E-03	33,6
5	Frenos	9,13E-04	35,8
6	Aire acondicionado	6,60E-04	30,6
7	Chasis	3,42E-04	35,6
8	Transmisión	3,17E-04	37,1
9	Suspensión	3,17E-04	33,3
10	Hidráulico	2,16E-04	25,8
11	Dirección	1,78E-04	25,8
12	Diferencial	1,52E-04	26,0

Fuente: Elaboración propia. λ y MTTR obtenidos de la Tabla 6.

La tasa de fallas (λ) fue relacionada con la frecuencia de fallas y los criterios alto/medio/bajo, calculados a partir de las ecuaciones 40, 41 y 42, respectivamente. El tiempo medio para reparar *MTTR* fue relacionado con el *Downtime* y los criterios alto/medio/bajo, calculados a partir de las ecuaciones 44, 45 y 46, respectivamente.

Luego de calcular los rangos alto/medio/bajo de λ y *MTTR*, se obtuvo la Tabla 11:

Tabla 11. DMG 3 por sistemas

Ítem	Sistema	(λ)	Criterio	MTTR (h)	Criterio	Estrategia
1	Equipo auxiliar	1,80E-03	Alta	29,93	Medio	MPP ¿Cómo?
2	Llantas + ruedas	1,28E-03	Alta	30,15	Medio	MPP ¿Cómo?
3	Eléctrico	1,14E-03	Media	33,54	Alto	MPP ¿Qué?
4	Motor - potencia	1,08E-03	Media	33,62	Alto	MPP ¿Qué?
5	Frenos	9,13E-04	Media	35,82	Alto	MPP ¿Qué?
6	Aire acondicionado	6,60E-04	Baja	30,56	Medio	MPP ¿Cuándo?
7	Chasis	3,42E-04	Baja	35,63	Alto	CBM
8	Transmisión	3,17E-04	Baja	37,08	Alto	CBM
9	Suspensión	3,17E-04	Baja	33,32	Alto	CBM
10	Hidráulico	2,16E-04	Baja	25,82	Bajo	BM
11	Dirección	1,78E-04	Baja	25,79	Bajo	BM
12	Diferencial	1,52E-04	Baja	26,00	Bajo	BM

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los datos de la Tabla 11, se construyó un diagrama de dispersión λ vs. $MTTR$ y se obtuvo la DMG 3 representada en la Figura 27.

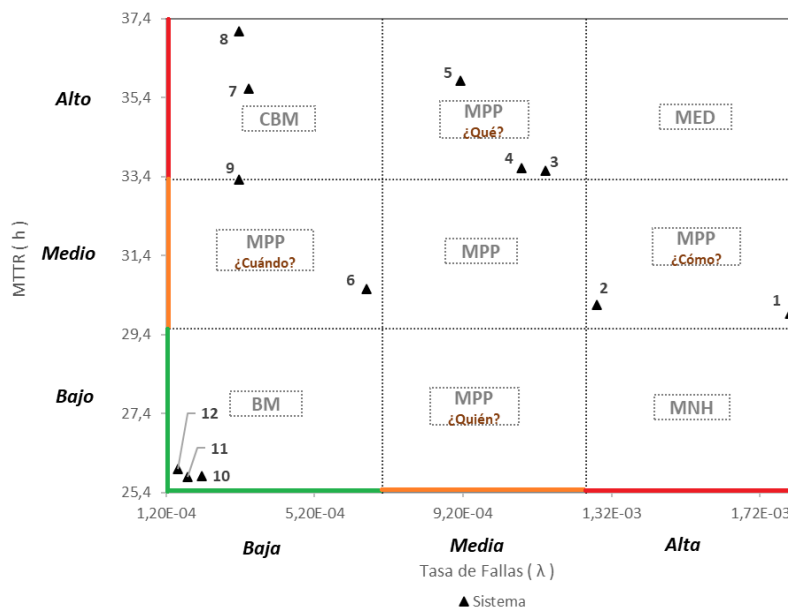


Fig. 27. DMG 3 por sistemas.

Fuente: Elaboración propia.

7.5.3. Resultados DMG 3 por sistemas. Para los sistemas 1 y 2 (equipo auxiliar y llantas + ruedas, respectivamente), la DMG 3 sugiere responder a la pregunta: ¿“Cómo” se están ejecutando las tareas de mantenimiento preventivo planificado de este sistema? Esta pregunta está direccionada a evaluar los procedimientos para ejecutar las tareas de MPP por parte del personal técnico, pues si bien el MTTR para este tipo de fallas se encuentra en un rango medio, la tasa de fallas es alta.

Adicional a lo anterior, por la posición de estos sistemas y la distancia al límite del umbral de la estrategia MNH, es recomendable evaluar una mejora en el nivel de habilidades del personal que ejecuta las tareas de MPP, en busca de mejorar la calidad de las intervenciones de MPP. Por ejemplo, el sistema auxiliar (1) está dividido en diferentes subsistemas, entre ellos, mecánicos, hidráulicos, electrónicos y eléctricos. Por lo tanto, es necesario que los procedimientos de ejecución se encuentren debidamente estandarizados y el personal ejecutor tenga conocimiento de “cómo” debe realizar estas tareas específicas definidas en el MPP.

Lo anterior aplica igualmente para las tareas de MPP del sistema de llantas + ruedas (2), el cual requiere que los procedimientos se encuentren bien definidos con las indicaciones de “cómo” el ejecutor debe realizar las tareas de mantenimiento y, además, que se encuentre capacitado y habilitado para ejecutar la actividad. Para los sistemas 3, 4 y 5 (sistema eléctrico, motor-potencia y frenos, respectivamente), se debe responder a la pregunta: ¿“Qué” tareas de mantenimiento planificado se están ejecutando para prevenir las fallas de estos sistemas? Esto sugiere la necesidad de identificar si las tareas actuales son adecuadas teniendo en cuenta el comportamiento de este sistema, ya que, aunque la tasa de fallas se encuentra en un rango medio, estas generan un alto tiempo de reparación.

Como se puede evidenciar, estos tres sistemas se consideran “complejos”, debido a que pueden presentar fallas ocultas. Sumado a lo anterior, el sistema de frenos es particularmente crítico, debido a las graves consecuencias derivadas de una falla. Por lo tanto, es esencial identificar “qué” tareas específicas deben ejecutarse en las rutinas de MPP para prevenirlas.

En cuanto a los sistemas 7, 8 y 9 (chasis, transmisión y suspensión), la DMG 3 sugiere implementar la estrategia de CBM. Lo que indica que estos sistemas requieren monitoreo de condición por medio de alguna técnica apropiada, ya que, aunque la tasa de fallas es baja, el tiempo medio de reparación es alto. Sin embargo, como se puede observar, por la ubicación del sistema 9 en la DMG 3, este se encuentra en

el borde del límite de umbral MPP, lo cual sugiere que se debe también responder a la pregunta: ¿“Cuándo” se están ejecutando las tareas de mantenimiento preventivo planificado de este sistema? Esto quiere decir que es necesario revisar la periodicidad o intervalos entre un MPP y otro, al igual que para el sistema de aire acondicionado (6).

Finalmente, para los sistemas 10, 11 y 12, la DMG 3 recomienda la estrategia BM; es decir que, para el hidráulico, dirección y diferencial, cuya frecuencia de fallas y tiempo de reparación es bajo, la estrategia o combinación de estrategias aplicadas actualmente están dando resultados, y lo que se debe es auditar la sostenibilidad de estas. En la Tabla 12 se presenta una comparación entre los resultados de la DMG y la DMG 3 propuesta:

Tabla 12. Comparación entre estrategias DMG y DMG 3

Ítem	Sistema	DMG	DMG 3
1	Equipo auxiliar	MED	MPP ¿Cómo?
2	Llantas + ruedas	MED	MPP ¿Cómo?
3	Eléctrico	MPP ¿Qué?	
4	Motor - potencia	MPP	MPP ¿Qué?
5	Frenos	MPP	MPP ¿Qué?
6	Aire acondicionado	BM	MPP ¿Cuándo?
7	Chasis	BM	CBM
8	Transmisión	BM	CBM
9	Suspensión	BM	CBM
10	Hidráulico	BM	
11	Dirección	BM	
12	Diferencial	BM	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 12, existen algunas diferencias y similitudes con respecto a la posición de los sistemas en la DMG y DMG 3, lo cual hace que se asignen estrategias diferentes en algunos casos. Esta discrepancia podría deberse a la naturaleza de los datos, ya que los rangos del *Downtime* suelen ser más amplios que los del MTTR, lo que probablemente influye en el intervalo de

límites de umbral para las variables. Estas diferencias no se discuten, ya que no hacen parte de los objetivos del presente estudio.

Para los sistemas 1, 2, 10, 11 y 12, la DMG 3 sugiere direccionar la gestión con un enfoque de TPM. Es necesario aclarar que se asignó el enfoque TPM a los sistemas 10, 11 y 12 por la proximidad al límite del umbral, como se observa a continuación en la Figura 28:

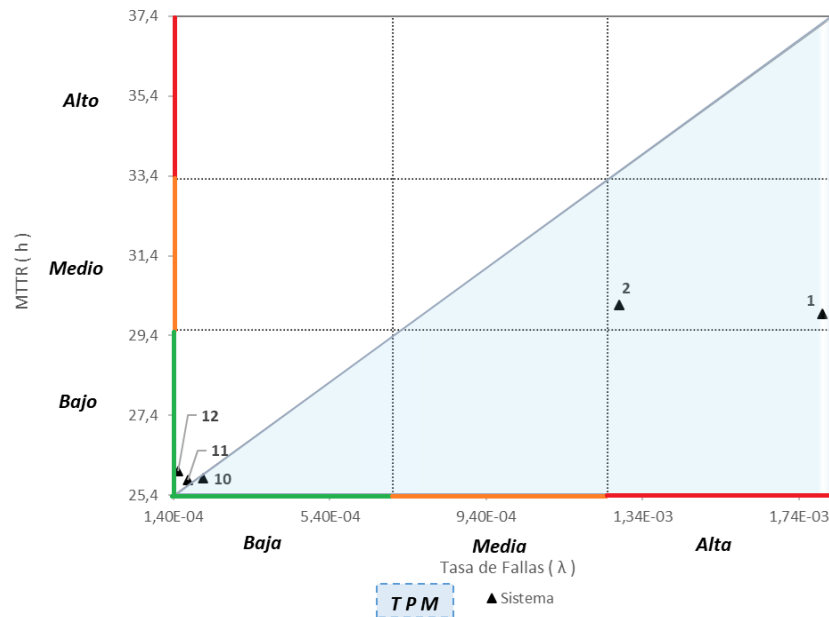


Fig. 28. Enfoque TPM.

Fuente: Elaboración propia.

Este enfoque busca maximizar la eficiencia y la disponibilidad de los sistemas mediante la participación y compromiso de todos los miembros del equipo, incluyendo ejecución, planeación, programación y operación. El TPM se centra en la prevención de fallas, el mantenimiento autónomo y la mejora continua, lo que permite reducir los tiempos de inactividad, mejorar la calidad de las intervenciones y disminuir los costos de mantenimiento en el largo plazo. Al implementar el TPM de forma total o parcial, se puede lograr una mayor confiabilidad y eficiencia en los sistemas críticos, que aseguren una operación más segura y rentable.

Para los sistemas del 3 al 9, la DMG 3 sugiere direccionar la gestión con un enfoque de RCM, como se observa en la Figura 29:

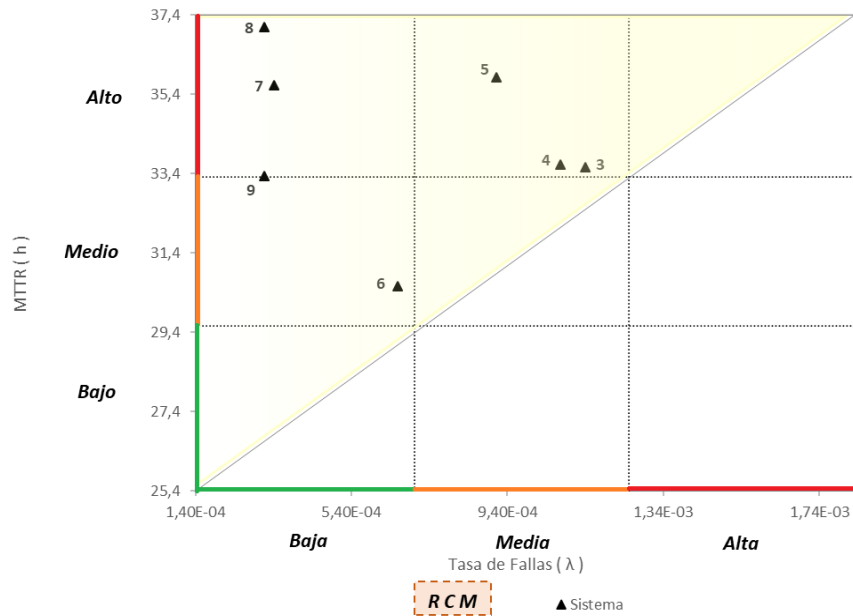


Fig. 29. Enfoque RCM.

Fuente: Elaboración propia.

El RCM se centra en identificar y mitigar las fallas potenciales que podrían afectar la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas. Este enfoque analiza con detalle los modos de falla, sus efectos y las tareas de mantenimiento necesarias para prevenir o minimizar dichas fallas. Al implementar el RCM, se puede mejorar significativamente la disponibilidad y la confiabilidad de los sistemas críticos, reducir los costos de mantenimiento no programados y optimizar los recursos de mantenimiento. Además, promueve una cultura de mantenimiento proactivo, lo que contribuye a una operación más segura y eficiente de la flota.

7.6. PASO 6: MEJORAS OBTENIDAS

Si bien aún no se han evaluado en detalle las mejoras obtenidas tras la aplicación de la metodología, esta permitirá realizar comparaciones futuras que evidencien su impacto positivo. Por el momento, la metodología propuesta ha dado lugar a la creación de dos tableros, que anteriormente no existían, para la toma de decisiones. Estos tableros han facilitado un análisis integral de las flotas de camiones y han dado como resultado las siguientes mejoras:

La matriz CTR permitió clasificar las flotas en niveles de criticidad (alta, media y baja) e identificar la flota FL-01 como la más crítica. Esto ha facilitado una priorización clara en la gestión del mantenimiento y ha enfocado los recursos en aquellos activos que tienen mayor riesgo para la operación.

A través del JKD, se identificó a los equipos 2 y 3 como los más críticos, debido a su comportamiento de fallas crónico-agudo. Esta identificación ha posibilitado enfocar esfuerzos en mejorar la disponibilidad de estos activos y contribuir a una gestión más efectiva.

El CSD identificó a los equipos 1, 2, 3 y 9 como los más críticos en términos de costos globales y específicos. Con esta información, se han priorizado acciones de mantenimiento que optimizan los recursos y reducen los costos operativos. Por ejemplo, en combinación con otras herramientas de toma de decisiones, se decidió renovar el equipo 3 y realizar un overhaul al equipo 2.

Por su parte, la DMG proporcionó una visualización detallada de las fallas, que permitió identificar oportunidades de mejora y definir estrategias adecuadas de mantenimiento para cada sistema. Esto ha facilitado una toma de decisiones más informada y basada en datos concretos.

Las recomendaciones derivadas del análisis han sugerido enfoques específicos como el RCM para ciertos sistemas y el TPM para otros. Estas estrategias están alineadas con las mejores prácticas internacionales y se espera que mejoren significativamente la disponibilidad operativa de la flota FL-01.

8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

8.1. RESUMEN DE RESULTADOS

En los tableros 1 y 2 de las Figuras 30 y 31, respectivamente, se compila la aplicación de una metodología fundamentada en herramientas gráficas de análisis, para priorizar activos y definir estrategias de mantenimiento óptimas en flotas mineras.

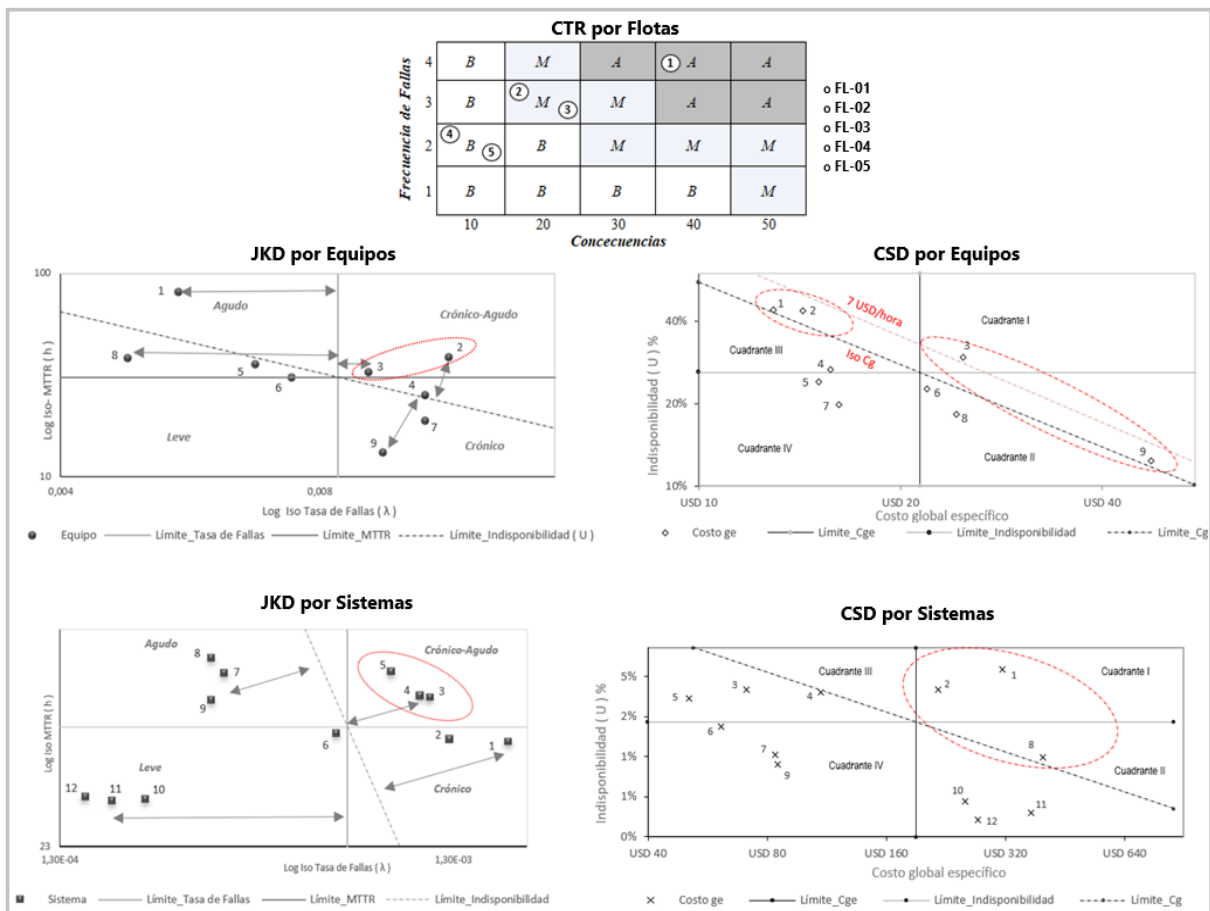


Fig. 30. Tablero 1 para toma de decisiones.

Fuente: Elaboración propia.

La matriz de CTR combinó la frecuencia de fallas (FF) y las consecuencias de las fallas (C), lo que permitió evaluar integralmente el riesgo asociado a cada una de las cinco flotas de soporte. Esta ecuación incluyó factores como el impacto en la producción (IO), la flexibilidad operacional (FO), los costos de

mantenimiento (CM) y el impacto en seguridad, higiene y ambiente (SHA). Por su parte, el JKD identificó a los equipos 2 y 3 como los más críticos, debido a su comportamiento de fallas crónico-agudo. Adicional a esto, los equipos 1 y 4 también se consideraron “malos actores”, debido a su impacto negativo en la disponibilidad general de la flota.

El JKD aplicado a los sistemas, también identificó al 3, 4 y 5 como los sistemas más críticos, debido a su comportamiento de fallas crónico-agudo. Los sistemas 1 y 2 también se consideraron “malos actores”, debido a su impacto negativo en la disponibilidad general de la flota.

En cuanto al CSD, este permitió identificar que los equipos 1, 2, 3 y 9 son los más críticos en términos de costos globales y específicos. El equipo 3 fue el más crítico en términos de costo global por fallas. Sumado a esto, el CSD reveló que los sistemas 1, 2 y 8 son los más críticos en términos de costos por fallas con el sistema 8, teniendo un alto costo global específico, pero baja indisponibilidad. También se observó que los sistemas 10, 11 y 12 presentaron un costo global específico que supera el límite del umbral definido, pero debido a la baja indisponibilidad ocasionada, estos no afectan significativamente su costo global por fallas.

En resumen, la matriz de CTR permitió jerarquizar las diferentes flotas de soporte en tres niveles: criticidad alta (A), criticidad media (M) y criticidad baja (B). Esta jerarquización permitió determinar que la flota FL-01 era de alta criticidad en base al riesgo. Por su parte, el JKD permitió una visualización fácil y práctica de las causas de la baja disponibilidad, lo que facilita la toma de decisiones informadas. La ubicación de los activos en el diagrama de Jack-Knife ayudó a identificar oportunidades de mejora y priorizar esfuerzos en el mantenimiento.

Finalmente, mediante el CSD se identificaron los equipos y sistemas que tenían un mayor impacto en los costos operativos, lo que ayudó a priorizar las acciones de mantenimiento y optimizar los recursos. Luego de priorizar los activos con base en el tablero 1 para la toma de decisiones de la Figura 30, era necesario definir estrategias de mantenimiento adecuadas para la flota estudiada. Para este objetivo, a continuación, se presenta en la Figura 31 un tablero con las DMG obtenidas en el estudio de caso:

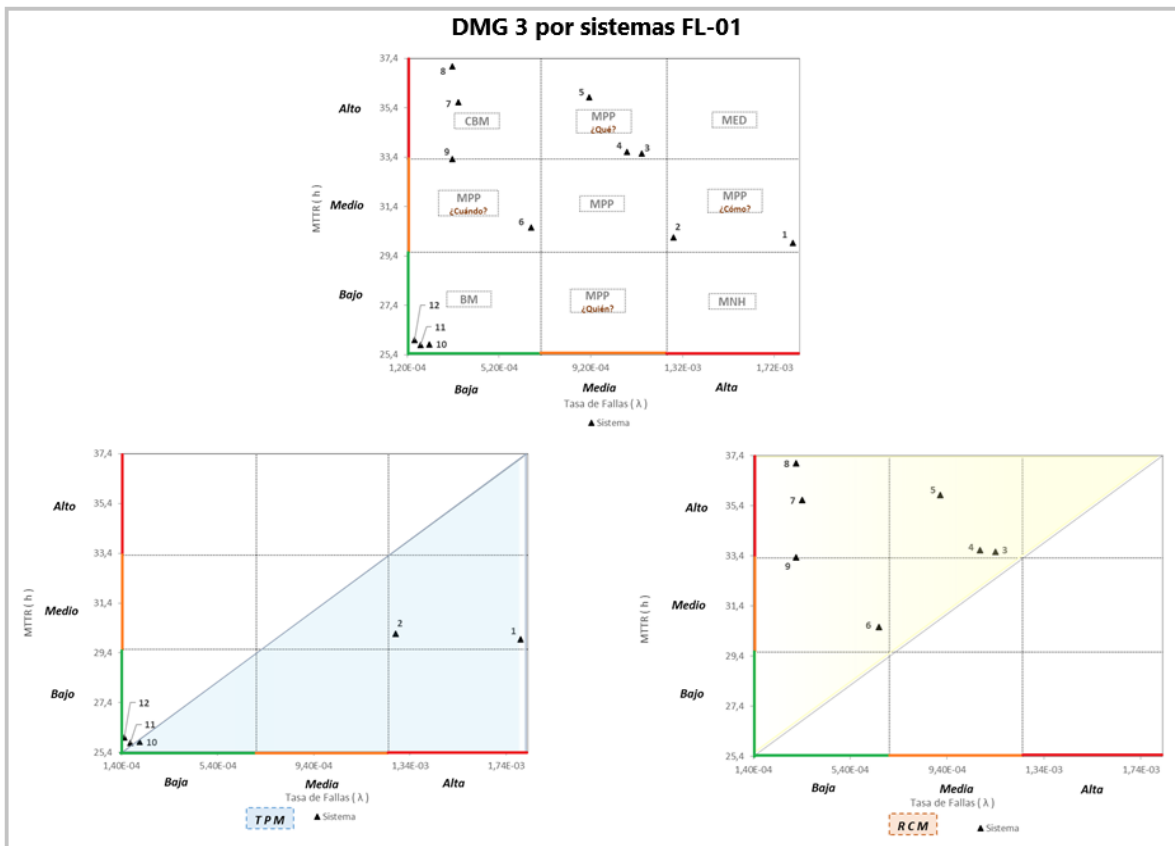


Fig. 31. Tablero 2 para toma de decisiones.

Fuente: Elaboración propia.

La DMG 3 sugirió revisar *cómo* se están ejecutando las tareas de MPP para los sistemas 1 y 2 (equipo auxiliar y llantas + ruedas, respectivamente), y *qué* tareas de MPP se están ejecutando para los sistemas 3, 4 y 5 (eléctrico, motor-potencia y frenos). Para los sistemas 7, 8 y 9 (chasis, transmisión y suspensión), se sugiere la estrategia CBM, y seguir con BM para los sistemas 10, 11 y 12 (hidráulico, dirección y diferencial).

La DMG 3, utilizando la tasa de fallas y el MTTR, también sugirió enfoques de TPM y RCM para los diferentes sistemas de la flota FL-01. Para los sistemas 1, 2, 10, 11 y 12, se recomienda un enfoque de TPM. Este enfoque busca maximizar la eficiencia y la disponibilidad de los sistemas mediante la participación y compromiso de todos los miembros del equipo.

Mientras que para los sistemas del 3 al 9 se sugiere un enfoque de RCM, el mantenimiento centrado en confiabilidad se enfoca en identificar los modos de falla, con el fin de mitigar los efectos potenciales de estas, las cuales podrían afectar la confiabilidad y el rendimiento de los sistemas analizados.

En resumen, la DMG 3 permitió una visualización más detallada de la distancia de los sistemas a los límites de umbral establecidos para las variables, lo cual facilitó la toma de decisiones para la definición adecuada de estrategias de mantenimiento para cada sistema. Además, la ubicación de los sistemas en la DMG 3 ayudó a identificar oportunidades de mejora y priorizar esfuerzos en el mantenimiento de la flota de camiones FL-01.

8.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Este caso de estudio demuestra qué herramientas gráficas para la toma de decisiones, tales como la CTR, el JKD, el CSD y la DMG son efectivas para la identificación de activos críticos y la definición de estrategias de mantenimiento en flotas de camiones del sector minero. Además, estas herramientas facilitan la comparación de los resultados obtenidos después de tomar decisiones de optimización, lo cual permite evaluar de manera efectiva la eficacia de las estrategias implementadas.

Estudios recientes como los de [1], [11], [12], [13], [14], [51], entre otros, demuestran la aplicabilidad y vigencia de estas herramientas en diferentes contextos industriales para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de activos.

Por otra parte, la visualización de la distancia de los datos a los límites establecidos para las variables en el JKD, el CSD y la DMG 3 representa una mejora significativa sobre los métodos tradicionales. Esto se ajusta con la literatura consultada, que destaca la importancia de la visualización mediante métodos gráficos, ya que estos permiten una comprensión más clara y rápida de los datos y facilitan la identificación de patrones y tendencias.

La información obtenida por medio de este estudio es fundamental para la planificación y asignación de recursos de mantenimiento en flotas de camiones del sector minero. Esto posibilita enfocar los esfuerzos en los equipos y sistemas que realmente requieren una atención prioritaria, debido a su impacto en la disponibilidad operativa y en los costos de mantenimiento de la flota.

Es evidente que el uso de estas herramientas gráficas facilita la identificación de las causas de la indisponibilidad en flotas de camiones del sector minero, así como el análisis del impacto de cada sistema en este aspecto, de una manera más visual y práctica que otras herramientas. Esta característica las convierte en herramientas valiosas para los tomadores de decisiones, ya que les permite evaluar de manera efectiva las oportunidades de mejora en la confiabilidad y mantenibilidad de los sistemas asociados a un activo, en este caso, una flota de camiones.

Cabe resaltar también, que entre los sistemas priorizados como “malos actores”, las llantas + ruedas (2) y los frenos (5) se consideran “críticos” por el Instituto de Seguros para la Seguridad en las Carreteras (IIHS) [81], debido a las consecuencias catastróficas que pueden resultar de su falla. Esta consideración resalta la importancia de realizar un estudio exhaustivo de estos sistemas y una adecuada definición de estrategias de mantenimiento basadas en riesgo, dado que su correcto funcionamiento es fundamental para la seguridad y la operatividad de los camiones.

Finalmente, se observó que en el contexto específico de una flota de camiones, es más apropiado utilizar las variables tasa de fallas (λ) y tiempo medio para reparar (MTTR) para construir la DMG y definir estrategias de mantenimiento a los diferentes sistemas. Sin embargo, los criterios de la decisión no se especifican, puesto que no son objeto de análisis ni de discusión en este estudio.

9. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

Este estudio aporta una perspectiva práctica sobre la aplicación de herramientas gráficas para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de flotas de camiones en la industria minera de carbón. Al respecto, se destaca la importancia de la integración de múltiples herramientas para una evaluación más completa y precisa. De igual forma, refuerza la utilidad de la DMG en la identificación de oportunidades de mejora en la confiabilidad y mantenibilidad de activos, por medio de la definición adecuada de estrategias de mantenimiento.

Los resultados obtenidos en este estudio se pueden utilizar por profesionales de mantenimiento para mejorar la gestión y la disponibilidad de los activos. Estas herramientas también pueden aplicarse en diversas industrias para optimizar el desempeño de los activos, identificar oportunidades de mejora y reducir los costos asociados a las fallas.

Se puede concluir que, para que las acciones y esfuerzos de mejora estén efectivamente dirigidos, es necesario enmarcarlos en un modelo de gestión de mantenimiento bien definido, claramente alineado con los objetivos de la gestión de activos y ajustado a las necesidades específicas de cada organización. Uno de estos modelos es el MGM propuesto por Parra et al. [1], citado permanentemente en este documento.

Se concluye también que es posible incluir enfoques como el TPM o RCM, incluso una combinación de estos y otros, dependiendo de las características y requisitos del negocio. Estos enfoques pueden mejorar significativamente la disponibilidad y la confiabilidad de los sistemas críticos, reducir los costos de mantenimiento no programados y optimizar los recursos de mantenimiento.

Por otra parte, es necesario entender que cada activo es diferente en términos de criticidad, complejidad, condición y modos de falla; de ahí que la clave esté en realizar un diagnóstico preciso de cada activo y recomendar la combinación óptima de estrategias de mantenimiento de manera similar a como un buen médico determina el tratamiento más adecuado para cada paciente.

Basado en lo anterior, es fundamental utilizar herramientas adecuadas para la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento, que sean prácticas, ágiles y simples. Esto facilita la compleja tarea de evaluación que debe llevar a cabo el tomador de decisiones. Como plantean Seecharan et al. [8] en una interesante analogía entre la medicina y el mantenimiento, en el campo de la medicina pueden darse dos extremos: recetar un sólo medicamento para todas las enfermedades, o recetar todos los medicamentos existentes para una sola enfermedad.

De manera similar, en el campo del mantenimiento, podría aplicarse una única estrategia para todas las fallas, o recomendar todas las estrategias disponibles para una sola falla. En ambos casos, esto generaría un gasto innecesario de recursos y podría incluso causar más problemas que soluciones. Así como un buen médico no receta el mismo medicamento para todos los pacientes ni tampoco recomienda todos los medicamentos a un solo paciente, se concluye que no es recomendable aplicar una única estrategia de mantenimiento a todos los activos ni todas las estrategias existentes a un solo activo.

9.2. LIMITACIONES

En muchos sectores de la industria, la falta de una cultura del dato implica que estos no se recopilan y registran de manera sistemática y precisa. Esto limita la disponibilidad de información confiable y detallada para el análisis, lo cual, en este caso de estudio, puede afectar la exactitud y la profundidad de los resultados obtenidos.

La ausencia de una cultura del dato, identificada en la recopilación de la información, significa que los análisis realizados pueden estar basados en datos incompletos o de baja calidad. Esto puede llevar a conclusiones y recomendaciones que no reflejan la realidad operativa, lo que reduce la efectividad de las estrategias de mantenimiento sugeridas.

Esta limitación puede dificultar la implementación de herramientas como las abordadas en este estudio, ya que los diferentes miembros del equipo de mantenimiento pueden no estar preparados o dispuestos a adaptarse a nuevas prácticas y procedimientos.

Por otro lado, la ausencia de una estructura adecuada de costos también impidió realizar un análisis completo y medir los resultados de mejora de manera más efectiva. Sin una estructura clara, es difícil definir y rastrear los costos asociados con las fallas y las intervenciones de mantenimiento, lo que reduce la capacidad de evaluar el impacto económico de las estrategias sugeridas en este estudio.

9.3. RECOMENDACIONES

En este estudio, se utilizó el tiempo para reparar (TTR) como medida del *Downtime*, pero no se pudo especificar exactamente qué proporción corresponde al denominado “llave en mano” (*wrench time*). Según la SMRP [46], esta métrica es una medida del tiempo que un trabajador dedica exactamente a la ejecución de las tareas de mantenimiento.

Para futuros estudios, se recomienda analizar el tiempo de reparación efectivo, específicamente el tiempo de “llave en mano”, con el fin de evaluar las diferencias que puedan surgir en la toma de decisiones. Esto permitirá una comprensión más detallada de la eficiencia en las tareas de mantenimiento y ayudará a

identificar áreas de mejora en la gestión del tiempo dedicado a la reparación de fallas en flotas de camiones del sector minero.

Se recomienda tener en cuenta que la selección y la efectividad de la metodología propuesta puede estar influenciada por varios factores que incluyen la disponibilidad y calidad de los datos, la complejidad de los procesos, las restricciones de recursos o la cultura organizacional.

Para investigaciones futuras, se recomienda comparar las mejoras obtenidas tras la implementación de dicha metodología, y proporcionar así una evaluación más completa de su efectividad y contribuir al avance en la gestión del mantenimiento de flotas de camiones en el sector minero.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Parra Márquez, y A. Crespo Márquez, *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*, 2da ed. Sevilla, España: INGEMAN, 2015.
- [2] J. Contreras Márquez, *Gestión de Activos y Mantenimiento*. Buenos Aires, Argentina: laimprentaya, 2023.
- [3] P. F. Knights, “Downtime priorities, Jack-knife diagrams and the business cycle”, *MJ Maint. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 15-22, jan., 2004. [online]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=c80269a1a9fb742cdb3e26bc95146b4c3a2bb39d#page=17>
- [4] R. Pascual, G. Del Castillo, D. Lout, y P. Knights, “Business-oriented prioritization: A novel graphical technique”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 94, no. 8, pp. 1308-1313, aug., 2009. [online]. doi: /10.1016/j.ress.2009.01.013
- [5] A. R. Wijaya, J. Lundberg, y U. Kumar, “Downtime analysis of a scaling machine”. *Int. J. Min. Reclam. Environ.*, vol. 26, no. 3, pp. 244–260, aug., 2011. [online]. doi: 10.1080/17480930.2011.603515
- [6] A.K.S Jardine, y A.H.C Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability - Theory and Applications*, 2nd Ed. Boca Raton, FL., EE.UU: CRC Press Taylor y Francis Group, 2013.
- [7] J. L. Rivera Estay, “Modelo de toma de decisiones de mantenimiento para evaluar impactos en disponibilidad, mantenibilidad, confiabilidad y costos”, Tesis de Mtr., Dep. Ingeniería Industrial, U. de Chile, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136233>
- [8] T. Seecharan, A. W. Labib, y A. Jardine, “Maintenance strategies: Decision Making Grid vs Jack-Knife Diagram”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 61-78, mar., 2018. [online]. doi: 10.1108/JQME-06-2016-0023
- [9] C. E. Viña Miranda, “Aplicación de Jack Knife y Análisis de Causa Raíz de una Flota de Palas Electromecánicas Modelo Caterpillar 7495hr de Capacidad 120 Ton”, Tesis de Gdo., Esc. de Ingeniería Mecánica, UCSM, Arequipa, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/3db85844-808f-4a29-89cd-527e0aa0fbca>
- [10] M. K. Vílchez, J. F. Oblitas, Y. L. Peláez, M. C. Villar, y S. R. Rojas, “Holistic Approach in the Prioritization of Critical Repairable Components”, in *18th LACCEI Int. Multi-Conf. for Eng., Educ., and Technol.*, jul. 27-30, 2020, pp. 1-6. [online]. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.123

- [11] A. Yunusa-Kaltungo, y A. Labib, “A Hybrid of Industrial Maintenance Decision Making Grid”, *Prod Plann & Control*, vol. 32, no. 5, pp. 397-414, mar., 2021. [online]. doi: /10.1080/09537287.2020.1741046
- [12] O. Durán, J. Aguilar, y A. Capaldo, “Evaluating maintenance strategies using a resilience index in a seawater desalination plant”, *Desalination*, vol. 500, no. 15, p. 11, mar., 2021. [online]. doi: 10.1016/j.desal.2020.114855
- [13] N. F. Velásquez Aedo, “Aplicación de minería de procesos y optimización del proceso de mantención de equipos LHD”, Tesis de Mtr., Esc. de Ingeniería, UC | Chile, Santiago de Chile, 2021. [En línea]. doi: 10.7764/tesisUC/ING/62946
- [14] F. T. Okamura, P. N. Alves Junior, J. C. Cruz Júnior, e I. Costa Melo, “Practical Application of the Decision-Making Grid (DMG) for Supporting Maintenance Strategy Decisions in a Small Hydroelectric Power Plant (SHPP)”, in *Handbook of Smart Energy Systems*, M. Fathi, E. Zio, and P. M. Pardalos, Eds., Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 2787- 2807. [online]. doi: 10.1007/978-3-030-97940-9_128
- [15] G. Morcoux Pareto, “Analysis for Multicriteria Optimization of Bridge Preservation Decisions”, *Transp. Res. Rec.*, vol. 1991, no. 1, pp. 62-68, jan., 2007. [online]. doi: 10.3141/1991-08
- [16] A. Teixeira, C. A. Virginio M. Hazin, R. J. Pires, A. Teixeira-Filho, and T. Vitelli, *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. Editorial Switzerland: Springer, 2015.
- [17] D. A. Castañeda Quesada, “Toma de decisiones en la gerencia de mantenimiento: un enfoque desde la analítica aplicada”, Tesis de Mtr., Facultad de Minas, U. Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/64154>
- [18] T. F. Fwa, W. T. Chan, and K. Z. Hoque, “Multiobjective Optimization for Pavement Maintenance Programming”, *J. Transp. Eng.*, vol. 126, no. 5, pp. 367-374, oct., 2000. [online]. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:5(367)
- [19] T. Gwo-Hshiung, S. Tzay-an, y L. Chien-Yuan, “Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan”, *Energy*, vol. 17, no. 10, pp. 983-992, oct., 1992. [online]. doi: 10.1016/0360-5442(92)90047-4
- [20] T. Thiel, and T. Mróz, “Application of Multi-Criterion Decision Aid Method in Designing Heating Systems for Museum Buildings”, *Informatica*, vol. 12, no. 1, pp. 133-146, jan., 2001. [online]. doi: doi.org/10.3233/INF-2001-12109

- [21] J. Pan, Y. Teklu, S. Rahman, y A. de Castro, “An interval-based MADM approach to the identification of candidate alternatives in strategic resource planning”, *IEEE transactions on power systems*, vol. 15, no. 4, pp. 1441-1446, nov., 2000. [online]. doi: 10.1109/59.898125
- [22] G. Kabir, y R. S. Sumi, “Power substation location selection using fuzzy analytic hierarchy process and PROMETHEE: A case study from Bangladesh”, *Energy*, vol. 72, no. 1, pp. 717-730, aug., 2014. [online]. doi: 10.1016/j.energy.2014.05.098
- [23] A. Garg y S. Deshmukh, “Maintenance management: literature review and directions”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 205-238, jul., 2006. [online]. doi:10.1108/13552510610685075
- [24] P. F. Knights, “Rethinking Pareto Analysis: Maintenance Applications of Logarithmic Scatterplots”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol 7, no.4, pp. 252-263, dec., 2001. [online]. doi: 10.1108/13552510110407041
- [25] A. W. Labib, “World-class maintenance using a computerised maintenance management system”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 66-75, mar., 1998. [online]. doi: 10.1108/13552519810207470
- [26] M. C. Carnero, y A. Gómez, “Maintenance strategy selection in electric power distribution systems”, *Energy*, vol. 129, no. 15, pp. 255-272, jun., 2017. [online]. doi: 10.1016/j.energy.2017.04.100
- [27] IAM. “What is Asset Management?”, The Institute of Asset Management 2024. IAM. Accessed: jan. 10, 2025. [online]. Available: <https://theiam.org/what-is-asset-management>
- [28] Asset Management, PAS 55-1:2008, British Standard, London, England, sept. 2019. [online]. Available: <https://www.irantpm.ir/wp-content/uploads/2014/01/pass55-2008.pdf>
- [29] IAM, *Asset Management – an Anatomy*. Bristol: The Institute of Asset Management, 2024. [online]. Available: <https://theiam.org/knowledge-library/asset-management-an-anatomy/>
- [30] *Mantenimiento, Terminología del mantenimiento*, UNE-EN 13306:2018, Asociación Española de Normalización, España, jul. 2018. [online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060338>
- [31] *Mantenimiento en la gestión de los activos físicos*, UNE-EN 16646:2015, Asociación Española de Normalización, España, jun.2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055155>
- [32] E. Fuenmayor, 2019, “Calculando la Frecuencia Óptima de Inspección. Considerando Costos, Riesgo y Desempeño”, LinkedIn. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/calculando-la-frecuencia-optima-de-inspecci%C3%B3n-costos-edgar/>

- [33] P. Viveros, R. Stegmaier, F. Kistjanpoller, L. Barbera, y A. Crespo, “Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo”, *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 21, no. 1, pp. 125-138, abr., 2013. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77225903012>
- [34] Norsok Standard Z-008, *Criticality analysis for maintenance purposes. Standards Norway*, 3th ed. Oslo, Norway: Norwegian Technology Centre, 2001. Available: www.standard.no/petroleum
- [35] A. Crespo Márquez, P. Moreu de León, J. F. Gómez Fernández, C. Parra Márquez, y M. López Campos, “The maintenance management framework. A practical view to maintenance management”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 167-178, may., 2009. [online]. doi: 10.1108/13552510910961110
- [36] L. A. Cox Jr, “What's Wrong with Risk Matrices?”, *Risk Anal.*, vol. 28, no. 2, pp. 497-512, apr., 2008. [online]. doi: 10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x
- [37] Fluke. “Cómo utilizar el análisis de criticidad para priorizar los activos”. Centro de recursos de Fluke. Accedido: jun. 20, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/mantenimiento-predictivo/analisis-de-criticidad>
- [38] R. G. Miller, "A Trustworthy Jackknife", *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 35, no. 4, pp. 1594-1605, dec., 1964. [online]. doi: <http://www.jstor.org/stable/2238296>
- [39] L. Wang, F. Yu, Z. Li, and C. Zou “Jackknife Method for Variance Components Estimation of Partial EIV Model”, *J. Surv. Eng.*, vol. 146, no. 4, pp. 1-9, jun., 2020. [online]. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000327
- [40] A. Wijaya, “Methods for availability improvements of a scaling machine system”, Thesis Ph.D., Dep. of Civil, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2012. [online]. Available: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-25836>
- [41] J. J. Ganoza Piña, “Modelo de diagnóstico de oportunidades de mejora de la gestión del mantenimiento – planta manufacturera”, Tesis de Mtr., Dir. de Operaciones y Logística, U. Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/623845>
- [42] F. Yuan and J. Lu, “The Misconception and Risk of Using MTBF as a Reliability Indicator for Industry Management”, *ICMSEM 2022*, vol. 12, pp. 324-332, dec., 2023. [online]. doi: 10.2991/978-94-6463-038-1_30

- [43] S. Duer, M. Woźniak, J. Pás, K. Zajkowski, and D. Bernatowicz, “Reliability Testing of Wind Farm Devices Based on the Mean”, *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 1659, jan., 2023. [online]. doi: 10.3390/en16041659
- [44] L. A. Mora Gutiérrez, *Mantenimiento Planeación, Ejecución y Control*, 1ra ed. México: Alfaomega, 2009.
- [45] E. T. Senalp, “Functional Availability and Reliability Modelling in Platform Design and Manufacture”, in *Proceedings of the 11th IMA Int. Conf. Modell. Ind. Maint. Reliab. (MIMAR)*, Jul. 1, 2021, pp. 1-6. [online]. doi: 10.19124/ima.2021.01.12
- [46] Society for Maintenance and Reliability Professionals (SMRP). “Best Practices, Metrics & Guidelines”. SMRP. Accessed: jun. 20, 2024. [online]. Available: <https://smrp.org/Learning-Resources/SMRP-Library/Best-Practices-Metrics-Guidelines>
- [47] Pardus Consulting. “How to create Jack-Knife Diagrams for Reliability Engineering”. Pardus Consulting. Accessed: may. 7, 2023. [online]. Available: <https://pardusconsulting.com/articles/how-to-create-jack-knife-diagrams-for-reliability-engineering>
- [48] R. Moore, *Making Common Sense Common Practice: Models for Manufacturing Excellence*. 3th ed. Burlington, USA: Editorial Butterworth-Heinemann, 2002.
- [49] G. A. Escalante Luna, “Aplicación de la ingeniería de confiabilidad para optimizar el mantenimiento actual del área de chancado primario de una planta concentradora de cobre usando el histórico de fallos de una empresa minera en el Sur del Perú”, Tesis de Gdo., Esc. de Ingeniería mecánica, U. Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/9929>
- [50] D. F. Allauca Naranjo, “Desarrollo de un modelo de mantenimiento basado en el Método Jack Knife para priorización de equipos, toma de decisiones en costos de ciclo de vida y tiempo óptimo de reemplazo, Proyecto técnico de grado, Ingeniería en Mantenimiento Industrial”, Tesis de Gdo., Dep. Mantenimiento Industrial, Esc. Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/16867>
- [51] J. D. Aulestia Espinoza, and A. F. Guerrero Romero, “Desarrollo de una herramienta informática basada en el método Jack-Knife para el análisis de fallas y costos en flotas de transporte”, Tesis de Gdo., Dep. Ingeniería Mecánica Automotriz, U. Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22479>

- [52] N. Aslam-Zainudeen, and A. Labib, "Practical application of the Decision Making Grid (DMG)", *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 138-149, may., 2011. [online]. doi:10.1108/13552511111134574
- [53] M. Burhanuddin, A. Ahmad, and M. Desa "An Application of Decision Making Grid to Improve Maintenance Strategies in Small and Medium Industries", in *2nd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, jun, 2007, pp. 455-460. [online]. doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318450
- [54] A. Shahin, A. Labib, S. Emami, and M. Karbasian "Developing a decision making grid using fault tree analysis with a case study in Mobarakeh Steel Company", *The TQM J.*, vol. 29, no. 8, pp. 1296-1315, dec., 2018. [online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:145045795>
- [55] E. Hartini, and M. Subekti, "An Improvement of the Decision Making Grid Model in Failure- Based Maintenance on RSG-Gas System/Components", *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1198, no. 2, pp. 1-11, oct., 2019. [online]. doi: 10.1088/1742-6596/1198/2/022060
- [56] J. M. Ponce Hernández, "Rediseño del sistema de control de velocidad de un motor de corriente directa de 600HP con variador de velocidad SINAMICS", Tesis de Gdo., Dep. Ingeniería Electromecánica, U. Antonio Nariño, Santa Marta, Colombia, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7666>
- [57] Z. Tahir, A. Ahmad, M. Indha, N. Anugrahyani, B. Aboobaidar, and S. Kobayashi, "Using Genetic Algorithm to bridge Decision Making Grid data gaps in Small and Medium Industries", in *Int. Conf. Electr. Eng. Inf. (MICEEI)*, mar, 2014, pp. 114-117. [online]. doi:10.1109/MICEEI.2014.7067322
- [58] J. Núñez, P. Baziuk, R. Calvo, and S. Rivera, "Failure Profiles for Maintenance in Industrial Facilities", in *Proc. World Congr. Eng. WCE*, jul. 1-3, 2015, pp. 1-6. [online]. Available: https://www.iaeng.org/publication/WCE2015/WCE2015_pp814-819.pdf
- [59] A. Rastegari, and M. Mobin, "Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system", in *The 2016 Reliab. Maintainab. Symp. (RAMS)*, jan. 2016, pp. 1-8. [online]. doi: 10.1109/RAMS.2016.7448086.
- [60] E. Azriadi, "Implementing Decision-MakingGrid Model to ImproveMaintenance Strategies in Oil Palm Industries", *J. Eng. Sci. Technol. Manage. (JES-TM)*, vol. 1, no. 2, pp. 37-46, sept., 2021. [online]. doi: 10.31004/jestm.v1i2.51
- [61] A. Shahin, A. Labib, A. H. Shirmohammadi, and H. B. Jamkhaneh, "Developing a 3D decision-making grid based on failure modes and effects analysis with a case study in the steel industry",

- Int. J. Qual. Reliab. Manage.*, vol. 38, no. 2, pp. 628-645, jul., 2021. [online]. doi: 10.1108/IJQRM-03-2019-0096
- [62] A. N. Karar, and A. Labib, “Agile asset criticality assessment approach using decision-making grid”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 1-13, sept., 2022. [online]. doi: 10.1108/JQME-05-2020-0034
- [63] A. N. Karar, “Maintenance strategy selection utilising the decision-making process as an enabler for agile asset performance management”, Thesis Ph.D., Dep. of Philosophy, University of Portsmouth, Portsmouth, 2023. [Online]. Available: <https://researchportal.port.ac.uk/en/studentTheses/maintenance-strategy-selection-utilising-the-decision-making-proc>
- [64] H. N. Teixeira, I. S. Lopes, and R. N. Pires, “Maintenance Strategy Selection: An Approach Based on Equipment Criticality and Focused on Components”, in *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems*, F. F. Silva, Eds., Porto, Portugal: Springer, 2024, ch. 18, pp. 3-11. [online]. doi: 10.1007/978-3-031-38165-2_1
- [65] Z. Bahou, M. Lemnaouar, and I. Krimi, “A dynamic availability analysis of an N-component production system with interdependency effects: a fractional-order approach”, *Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 18, no. 1, pp. 99-115, jul., 2024. [online]. doi: 10.1007/s11740-023-01216-4
- [66] A. W. Labib, “A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS”, *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 191-202, sept., 2004. [online]. doi: 10.1108/13552510410553244
- [67] A. Gwilliam, 2022, “What is the Difference between Run-to-Failure and Breakdown Maintenance?”, MaintainX. [online]. Available: <https://www.getmaintainx.com/learning-center/run-to-failure-vs-breakdown-maintenance#so-which-is-it-run-to-failure-vs-breakdown-maintenance>
- [68] G. H. Chica Mejia, and J. G. Hernández, “Modelo para implementación de PMO (Planned Maintenance Optimization)”, Trabajo de Gdo., Dep. Ingeniería Mecánica, U. EAFIT, Medellín, Colombia, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/items/1d96c6b4-a329-4d12-af3a-5d44c2b9ecf4>
- [69] R. Gulati, and R. Smith, “Understanding Maintenance”, in *Maintenance and Reliability Best Practices*, New York, USA: Industrial Press, 2009, ch 3, pp. 53-56.

- [70] *Condition monitoring and diagnostics of machines-General guidelines*, ISO 17359:2018, ISO, Geneva, Switzerland, 2018. [online]. Available: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/71194/c551f4c170654bb19be2ee017d144969/ISO-17359-2018.pdf>
- [71] P. Muganyi, C. Mbohwa, and I. Madanhire, “Design-Out Maintenance as a Crucial Maintenance Facet”, in *8th Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manage.*, mar. 6-8, 2018, pp. 3406-3416. [online]. doi: 10.46254/AN08.20180677
- [72] *Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*, SAE JA1011:1999, Society of Automotive Engineers, USA, aug. 1999. [online]. Available: https://ifmaindy.org/images/downloads/RCM/evaluation_criteria_for_rel_centered_maint_rcm_processes.pdf
- [73] *A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard*, SAE JA1012:2002, Society of Automotive Engineers, USA, jan. 2002. [online]. Available: https://ifmaindy.org/images/downloads/RCM/a_guide_to_the_rel_centered_maint_rcm_standard.pdf
- [74] E. H. Hartmann, *Successfully Installing TPM in a Non-Japanese Plant*. New York, USA: TPM Press Inc., 1992.
- [75] S. Nakajima, *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, U. K: Productivity Press, 1988.
- [76] O. Fernández, A. Labib, R. Walmsley, and D. J. Petty, “A Decision Support Maintenance Management System: Development and Implementation”, *Int. J. Qual. Reliab. Manage.*, vol. 20, no. 8, pp. 965-979, nov., 2003. [online]. doi: 10.1108/02656710310493652
- [77] Z. Tahir, M. A. Burhanuddin, A. R. Ahmad, S. M. Halawani, and F. Arif, “Improvement of Decision Making Grid Model for Maintenance Management in Small and Medium Industries”, in *2009 Int. Conf. Ind. Inf. Syst. (ICIIS)*, dec. 2009, pp. 598-603. [online]. doi: 10.1109/ICIINFS.2009.5429791
- [78] A. W. Labib, G. B. Williams, and R. F. O’Connor, “An Intelligent Maintenance Model (System): An Application of A.H.P. and a Fuzzy Logic Rule-Based Controller”, *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 49, no. 7, pp. 745-757, jul., 1998. [online]. doi: 10.1057/palgrave.jors.2600542
- [79] B. Al-Najjar, and I. Alsyouf, “Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 84, no. 11, pp. 85-100, apr., 2003. [online]. doi: 10.1016/S0925-5273(02)00380-8

- [80] S. Ierace, and S. Cavalieri, "Maintenance Strategy Selection: a comparison between Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 3, pp. 228-233, oct., 2008. [online]. doi: 10.3182/20081205-2-CL-4009.00041
- [81] Insurance Institute for Highway Safety (IIHS). "Large trucks". IIHS HLDI. Available: jul. 5, 2024. [online]. <https://www.iihs.org/topics/large-trucks#defective-equipment>

ANEXOS

Anexo A. Tablas de indicadores RAM

Tabla 13. Indicadores RAM por equipos

Cuadrante	Equipo	(R)	(A)	(M)	Conclusión	Observaciones
Crónico agudo	2	88 h	56,1 %	38,8 h	Fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad baja.	Tasa de fallas y tiempo de reparación alto.
	3	110 h	70,5 %	32,3 h		
Crónico-A	4	94 h	73,3 %	25,2 h	Fiabilidad baja, disponibilidad media, mantenibilidad alta.	Alta tasa de fallas, tiempo de reparación bajo.
Crónico-B	7	94 h	80,1 %	18,8 h	Fiabilidad baja, disponibilidad alta, mantenibilidad muy alta.	Alta tasa de fallas, tiempo de reparación muy bajo.
	9	106 h	87,6 %	13,1 h		
Agudo-A	1	183 h	55,7 %	80,8 h	Fiabilidad alta, disponibilidad baja, mantenibilidad muy baja.	Baja tasa de fallas, tiempo de reparación muy alto.
Agudo-B	5	148 h	75,9 %	35,8 h	Fiabilidad alta, disponibilidad y mantenibilidad media.	Baja tasa de fallas, tiempo de reparación medio.
	8	135 h	77,2 %	30,7 h	Fiabilidad y disponibilidad alta, mantenibilidad media.	

Cuadrante	Equipo	(R)	(A)	(M)	Conclusión	Observaciones
	6	209 h	81,8 %	37,9 h	Fiabilidad muy alta, disponibilidad alta, mantenibilidad media.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Indicadores RAM por sistemas.

Cuadrante	Sistema	(R)	(A)	(M)	Conclusión	Observaciones
Crónico Agudo	3	97 h	96,2 %	33,5	Fiabilidad y mantenibilidad baja, alto impacto en la disponibilidad.	Tasa de fallas y tiempo de reparación alto.
	4	103 h	96,4 %	33,6		
	5	122 h	96,7 %	35,8		
Crónico-A	1	62 h	94,6 %	29,9	Muy baja fiabilidad, alto impacto en la indisponibilidad, mantenibilidad media.	Alta tasa de fallas, tiempo de reparación bajo.
	2	87 h	96,1 %	30,1		
Agudo-B	7	324 h	98,8 %	35,6	Fiabilidad e impacto en la indisponibilidad medio, baja mantenibilidad.	Baja tasa de fallas, alto tiempo de reparación.
	8	350 h	98,8 %	37,1		

Cuadrante	Sistema	(R)	(A)	(M)	Conclusión	Observaciones
	9	350 h	98,9 %	33,3		
Leve	6	168 h	98,0 %	30,6	Fiabilidad, indisponibilidad y mantenibilidad media.	Tasa de fallas y tiempo de reparación medio.
	10	515 h	99,4 %	25,8	Alta fiabilidad y mantenibilidad, bajo impacto en la indisponibilidad.	Tasa de fallas y tiempo de reparación bajo.
	11	626 h	99,5 %	25,8		
	12	730 h	99,6 %	26,0		

Fuente: Elaboración propia.