



Facultad de Ingeniería
Departamento de Ciencia de Datos e Informática
Carrera de Ingeniería en Estadística

**DESARROLLO DE UN MODELO DE ANÁLISIS DE FALLAS Y
JERARQUIZACIÓN DE RIESGOS BASADOS EN AMEF Y TOPSIS
DESDE UNA PERSPECTIVA FUZZY:**
*Una propuesta para la gestión
del mantenimiento en EFE Valparaíso*

Proyecto de Título para optar al grado de
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería
y al Título de Ingeniera Estadística

Presentado por:

Solange Gutiérrez Flores

Francisca Quiroz Toro

Profesor Guía: Dr. Cristian Carvajal Muquillaza

Valparaíso, Chile

2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer especialmente al Dr. Cristian Carvajal Muquillaza por aceptarnos como sus estudiantes tesisistas, por el conocimiento entregado y su disponibilidad para apoyarnos en este arduo camino, no tan solo en esta investigación, sino que a lo largo de nuestra carrera. Además, agradecer por su paciencia y empatía a la hora de enseñarnos, lo cual nos motiva e inspira a ser mejor.

En segundo lugar, a nuestra directora de carrera Francesca Iunnissi C. por su ayuda y disponibilidad a lo largo de este proyecto.

En tercer lugar y no menos importante agradecer a nuestros familiares quienes fueron un pilar fundamental en el desarrollo del proyecto, en especial a nuestras madres, padres, hermanos y novios, que con su comprensión y apoyo incondicional nos ayudaron a conseguir nuestro objetivo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO I	13
ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Objetivo de la investigación	16
1.2.1 Objetivo General:	17
1.2.2 Objetivos Específicos:	17
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO	18
2.1 Mantenimiento	18
2.2 Estrategias de mantenimiento	19
2.2.1 Mantenimiento predictivo:	19
2.2.2 Mantenimiento Preventivo:	20
2.2.3 Mantenimiento Correctivo:	21
2.3 Indicadores de mantenimiento	22
2.3.1 MTBF (Mean Time Between Failures)	22
2.3.2 MTTR (Mean Time to Repair)	23
2.3.3 Disponibilidad	24
2.3.4 Confiabilidad	25
2.4 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	26
2.4.1 RCM: Las siete preguntas básicas	28
2.4.2 Fallas funcionales	28
2.4.3 Modos de fallas	29
2.4.4 Efectos de las fallas	30
2.5 Número de Prioridad de Riesgo (NPR)	30
2.6 Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)	31
2.7 Marco Normativo	32

CAPÍTULO III	34
TEORÍA FUZZY	34
3.1 Una aproximación a la Teoría Fuzzy	34
3.1.1 Definición: [Conjunto Fuzzy]	35
3.1.2 Definición: [Soporte del conjunto Fuzzy]	36
3.1.3 Definición: [Core del conjunto Fuzzy]	37
3.1.4 Definición: [Conjunto Fuzzy vacío]	37
3.1.5 Definición: [Conjunto Fuzzy Convexo]	37
3.1.6 Definición: [Conjunto Fuzzy Normal]	38
3.1.7 Definición: [Propiedades de los Conjuntos Fuzzy]	39
3.1.8 Definición: [Número Fuzzy]	39
3.1.9 Definición: [Número Fuzzy Triangular]	39
3.1.10 Definición: [Operaciones Básicas de Números Fuzzy]	40
3.1.11 Definición: [Distancia entre dos números fuzzy triangulares]	41
3.1.12 Definición: [Variable Lingüística]	41
3.1.13 Definición: [Desfuzzyficación]	42
CAPÍTULO IV	44
METODOLOGÍA MULTICRITERIO TOPSIS-FUZZY	44
4.1 Pasos de la metodología TOPSIS-Fuzzy	45
CAPÍTULO V	48
MARCO METODOLÓGICO	48
5.1 Tipo y Diseño de la investigación	48
5.2 Población y muestra:	48
5.3 Variables	49
5.4 Recolección de Datos	49
CAPÍTULO VI	50
PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	50
6.1 Modelo de Decisión Propuesto para la Priorización de Riesgos	50
6.2.1 Algunos Estadísticos Descriptivos	53
6.2.2 Indicadores de Mantenimiento	55
6.2.3 Análisis de Criticidad	62

6.2.4 Tabla de Factores ponderados de la Criticidad	62
6.2.5 Matriz de Criticidad	64
6.2.6 Análisis del método multicriterio TOPSIS-Fuzzy	66
CAPÍTULO VII	80
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°01 Número de Pasajeros Transportados	14
Figura N°02 Averías del Material Rodante	16
Figura N°03 Tiempo Medio Entre Fallas	22
Figura N°04 Tiempo Medio de Reparación	24
Figura N°05 Conjuntos fuzzy	35
Figura N°06 Soporte de un conjunto fuzzy	36
Figura N°07 Core o núcleo de un conjunto fuzzy	37
Figura N°08 Conjunto fuzzy Convexo	38
Figura N°09 Conjunto Fuzzy Normal	38
Figura N°10 Forma general de un Número Fuzzy Triangular	39
Figura N°11 Número Fuzzy Triangular	40
Figura N°12 Definición Lingüística para la Ocurrencia de un Modo o Tipo de Falla	42
Figura N°13 Modelo Propuesto	52
Figura N°14 Cantidad de averías por año	54
	55
Figura N°15 Porcentaje de averías 2019-2022	
Figura N°16 MTBF total	56

Figura N°17	MTTR total	57
Figura N°18	Disponibilidad	59
Figura N°19	Confiabilidad de los sistemas	61
Figura N°20	Función de pertenencia de las variables lingüísticas	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°01	Principales Modelos de la Distribución Exponencial	25
Tabla N°02	Normas de Constitución de la Empresa	32
Tabla N°03	Normas Relativas a Funciones y Responsabilidades	33
Tabla N°04	Estadísticos Descriptivos	53
Tabla N°05	MTBF total	56
Tabla N°06	MTTR total	57
Tabla N°07	Disponibilidad	59
Tabla N°08	Confiabilidad	60
Tabla N°09	Impacto a la producción	63
Tabla N°10	Impacto a la calidad	63
Tabla N°11	Matriz de Criticidad Genérica	64
Tabla N°12	Matriz de Criticidad	66
Tabla N°13	Rangos RPN	67
Tabla N°14	RPN clásico tracción	68
Tabla N°15	Transformación a número fuzzy triangular tracción	69
Tabla N°16	FRPN tracción	70
Tabla N°17	FRPN tracción	71
Tabla N°18	FRPN normalizado tracción	71
Tabla N°19	Distancias e índice de similitud tracción	72
Tabla N°20	Jerarquización de actividades tracción	73

Tabla N°21	RPN clásico energía eléctrica	74
Tabla N°22	Transformación a número fuzzy triangular energía eléctrica	75
Tabla N°23	FRPN energía eléctrica	76
Tabla N°24	#FRPN energía eléctrica	77
Tabla N°25	FRPN normalizado energía eléctrica	77
Tabla N°26	Distancias e índice de similitud energía eléctrica	78
Tabla N°27	Jerarquización de actividades energía eléctrica	79

RESUMEN

El análisis de modo y efecto de falla AMEF es uno de los métodos más utilizados para apoyar el análisis de riesgos en los procesos de mantención. Sin embargo, este método tiene algunas limitaciones, incluyendo el uso de solo tres criterios de decisión, cuyos pesos no se consideran. Esta investigación propone un modelo basado en AMEF y TOPSIS-FUZZY para apoyar la priorización de riesgos en los procesos de mantención ferroviario. Se realizó una aplicación piloto del modelo para analizar y priorizar los riesgos de posibles fallas en el material rodante de la filial EFE Valparaíso (X-Trapolis 100 y X-Trapolis Modular). Con base en la opinión de cuatro expertos de la empresa, se definieron y evaluaron los posibles modos de falla. Los resultados de la aplicación sugieren que las fallas “Ondulador, Segregador, Captor, Chopper” del Sistema de Tracción y las fallas “Cargador de batería y Chopper CVS” del Sistema de Energía Eléctrica deben tratarse con la máxima prioridad. El modelo propuesto es útil para apoyar la formulación de planes de acción enfocados a minimizar o eliminar fallas prioritarias. Otras contribuciones de este estudio consisten en: permitir el uso de términos lingüísticos para expresar los juicios de los tomadores de decisiones; considerar los costos relacionados con las fallas; y apoyar las decisiones del staff de mantenimiento.

Palabras clave: Evaluación de riesgos, AMEF, TOPSIS-FUZZY, Toma de decisión multicriterio.

ABSTRACT

The FMEA failure mode and effect analysis is one of the most widely used methods to support risk analysis in maintenance processes. However, this method has some limitations, including the use of only three decision criteria, whose weights are not considered. This research proposes a model based on FMEA and TOPSIS-FUZZY to support risk prioritization in railway maintenance processes. A pilot application of the model was carried out to analyze and prioritize the risks of possible failures in the rolling stock of the EFE Valparaíso subsidiary (X-Trapolis 100 and X-Trapolis Modular). Based on the opinion of four company experts, the possible failure modes were defined and evaluated. The results of the application suggest that the "Undulator, Segregator, Captor, Chopper" faults of the Traction System and the "Battery Charger and CVS Chopper" faults of the Electrical Power System should be treated with the highest priority. The proposed model is useful to support the formulation of action plans focused on minimizing or eliminating priority faults. Other contributions of this study consist of: allowing the use of linguistic terms to express the judgments of the decision makers; considering the costs related to failures; and supporting the decisions of the maintenance staff.

Key words: Risk assessment, FMEA, TOPSIS-FUZZY, Multi-criteria decision making.

INTRODUCCIÓN

En la sociedad moderna la demanda por un transporte público confiable, seguro, eficiente y de alto estándar de calidad, aumenta constantemente, pues estos no sólo facilitan la movilidad de las personas para el desarrollo de sus actividades diarias, sino que además influyen de manera significativa en la dinámica social y económica de la sociedad (Falcone, Silvestri y Duraccio, 2003; Peña, Rey y Talaverano, 2020).

En Chile, los servicios de transporte público operan de manera sistémica, así como lo hace todo aquello que se mueve en la ciudad (Correa, 2010), siendo un actor relevante del sistema, el transporte ferroviario, no tan solo por su rol vinculado al transporte, sino que además por el valor asignado a nivel simbólico y material por los habitantes tanto de zonas urbanas como rurales (Brevis, Urriola, Weisser y Brevis, 2020).

En el transporte ferroviario la eficiencia, la gestión de repuestos y la seguridad son factores esenciales para un desarrollo de calidad, los cuales se encuentran presentes de manera global en todos los elementos que lo componen, desde la gestión, la infraestructura hasta el material rodante, siendo un elemento fundamental en el sistema la gestión de mantenimiento, pues esta facilita la planificación, programación y control de la ejecución del mantenimiento, buscando una mejora continua y teniendo en cuenta aspectos económicos relevantes para la organización. Una adecuada gestión del mantenimiento, debe mejorar y abarcar una gran cantidad de factores, desde reducir los costos globales de la actividad productiva, asegurar el buen funcionamiento de los equipos y sus funciones, disminuir al máximo los riesgos para las personas y los efectos negativos sobre el medio ambiente,

generando, además, procesos y actividades que soporten los objetivos mencionados (Solari, Morales, Herrera, Carrasco y Parra, 2021).

Uno de los métodos más utilizado en la gestión de mantenimiento, es el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) por su sigla en inglés *Reliability Centered Maintenance*, el cual es utilizado para identificar y seleccionar las políticas de gestión de fallas, incluido las actividades de mantenimiento, cambios operativos, modificaciones de diseño u otras acciones que permitan mitigar las consecuencias de las fallas. El RCM proporciona un proceso de decisión para identificar requisitos de mantenimiento preventivo aplicables y efectivos o acciones de gestión para prevenir las consecuencias económicas, operativas y de seguridad de las fallas, y para identificar el mecanismo de degradación responsable de esas fallas.

El RCM es una solución poderosa, ampliamente utilizada en todos los campos industriales en los que la continuidad del servicio representa un requisito obligatorio y el mantenimiento debe optimizarse en términos de dinero y tiempo.

A pesar de lo anterior el RCM presenta una importante desventaja, como es la subjetividad en el análisis del modo y efecto de falla (AMEF) y en el análisis de criticidad, elementos centrales del mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Es por lo anterior que el presente trabajo de título propone un modelo AMEF y una Técnica de Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS), basado en la teoría fuzzy, que permita priorizar los riesgos y así superar las limitaciones del RCM tradicional, con el propósito de mejorar la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad del transporte ferroviario, así como la disminución de órdenes de trabajo para Mantenimiento Correctivo.

Este trabajo se situará en la Empresa de Ferrocarriles del Estado, filial Valparaíso (EFE Valparaíso), la cual cuenta con una red de 43 kilómetros de extensión entre las estaciones Puerto y Limache para el transporte de pasajeros y carga, y con una

flota de 35 trenes de los cuales 27 son trenes modelo “*X Trapolis 100*” y 8 trenes modelo “*X Trapolis Modular*”.

El presente documento se ha organizado en siete capítulos, después de la introducción, se presenta en el primer capítulo los antecedentes del problema y se incorporan un conjunto de estadísticas que describen la problemática de la gestión del mantenimiento ferroviario, además, se plantean el objetivo general y los objetivos específicos que se proponen alcanzar al finalizar la investigación; en el segundo capítulo se analiza el marco teórico y normativo que da sustento a esta investigación; en el tercer capítulo se presentan las bases teóricas de los conjuntos y lógica fuzzy, ambas utilizadas en la propuesta de investigación; en el cuarto capítulo se expone la metodología multicriterio TOPSIS y sus respectivos pasos; en el quinto capítulo se establece el marco metodológico sobre el cual se posiciona la investigación; en el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos; en el séptimo capítulo se presentan las discusiones y conclusiones de la investigación y finalmente los Anexos.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

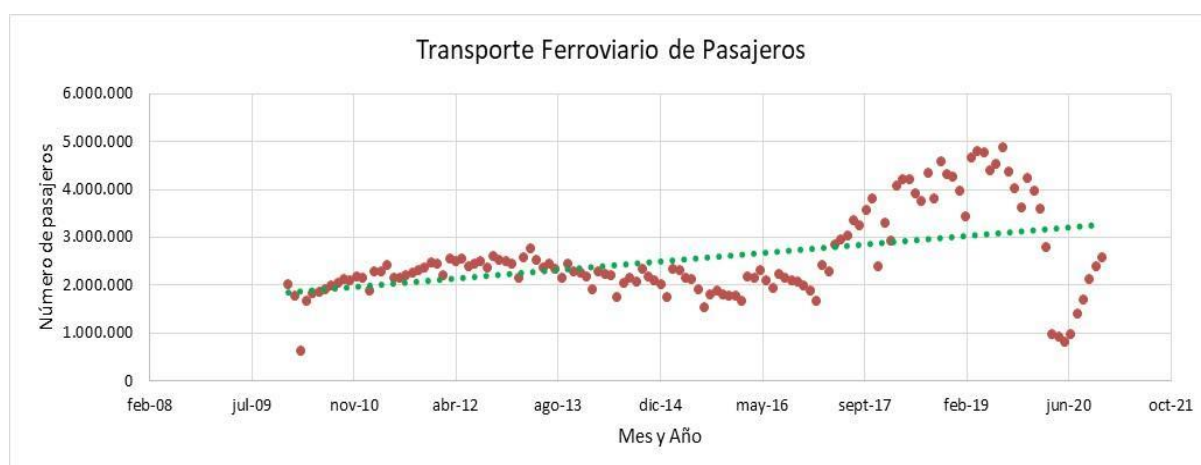
El crecimiento sostenido de la economía y las continuas mejoras en la calidad de vida conducen a un aumento del valor del tiempo, especialmente en los países desarrollados y en aquellos en vías de desarrollo, como es el caso de Chile. Por lo que, la confiabilidad ha surgido como un factor relevante en los sistemas de transporte.

La confiabilidad de los sistemas de transporte público o privado se ha considerado imprescindible por los usuarios, operadores y el estado. Los sistemas de transporte a menudo no brindan un servicio confiable debido a perturbaciones regulares e irregulares, causadas por la congestión del tráfico, las variaciones en las demandas de los pasajeros, las averías de los vehículos, las fallas en los equipos o en la infraestructura, generando incertidumbre, ansiedad y malestar en los pasajeros (Tahmasseby, 2009).

Para reducir o aminorar esta incertidumbre, es fundamental contar con equipos apropiados y en buenas condiciones, es decir, no solo debe existir la maquinaria acorde a las necesidades de la demanda de los pasajeros, sino que, además esta debe encontrarse en un estado óptimo y permanecer así el mayor tiempo posible, por lo que contar con un buen plan de mantenimiento es crucial para un transporte de calidad.

En Chile uno de los actores relevantes del sistema de transporte público es el transporte ferroviario, siendo la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE) la encargada de proveer a la sociedad un medio de transporte confiable, eficiente, seguro y responsable con el medioambiente y sus comunidades. El número de pasajeros transportados por EFE, a nivel nacional, en los últimos once años ha mostrado un claro crecimiento tendencial (ver figura N°01) lo que hace evidente la necesidad de contar con un eficiente plan de mantenimiento.

Figura N°01: Número de Pasajeros Transportados



Fuente: EFE Valparaíso

Una de las filiales de EFE, es EFE Valparaíso, cuyo servicio y área de cobertura abarca un total de 43 Km, distribuidos en 20 estaciones desde La Estación Puerto a la Estación Limache, transportando más de 75.000 pasajeros diarios. Mantener esta cifra se ha transformado en un gran desafío para la compañía, por lo que trabaja constantemente en optimizar y mejorar el servicio con el objetivo de satisfacer a todos sus pasajeros.

A finales de 2005 se contaba con un total de 27 trenes a disponibilidad, luego en el año 2015 se integraron 8 trenes más para poder ofrecer un servicio eficiente. En la actualidad se cuenta con 35 trenes, de los cuales existen dos tipos; XT100 y XTM,

estos presentan diferentes tipos de fallas las cuales pueden afectar o no el servicio ofrecido.

Existen múltiples tipos de falla, algunas de ellas significan tener que realizar una mantención correctiva, lo cual implica un tiempo de indisponibilidad según la falla que este presenta y en el lugar en donde se reporte dicha avería.

Las averías más comunes son las siguientes:

- Tracción
- Aire acondicionado
- Puertas
- Energía eléctrica
- Freno mecánico.

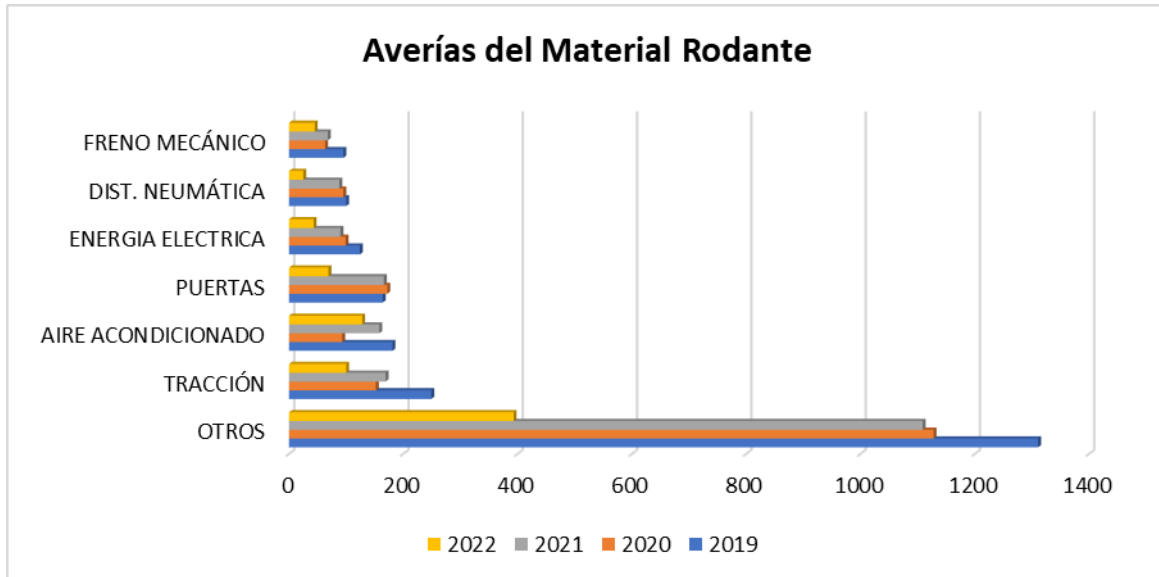
Por otro lado, se tienen las fallas no críticas que son aquellas que no afectan directamente al pasajero, ni a la funcionalidad del material rodante, algunos ejemplos de estas son:

- vidrio de ventanas trizados (levemente trizado)
- pistón a gas en el asiento del conductor
- manilla de ventana
- asientos en mal estado (uno o dos por vagón)
- ampolleta quemada
- tapiz roto

Estas fallas suceden de improviso y por lo general tienen una rápida solución.

Por su parte, las averías registradas por EFE Valparaíso en el cuatrienio (2019-2022), muestra gran dispersión, tanto en su frecuencia como en el tipo de falla (Ver Figura N°02).

Figura N°02: Averías del Material Rodante.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, el gráfico de la figura N°02 deja ver que las fallas más recurrentes son las fallas no críticas, sin embargo, el número de fallas de tracción muestra una frecuencia nada despreciable, al igual que las fallas del aire acondicionado y del sistema de puertas. Es importante destacar que el mantenimiento preventivo en EFE Valparaíso se lleva a cabo cada 15.000 Km (40 días de funcionamiento aproximadamente), sin embargo, una gran cantidad de trenes presentan diferentes tipos de fallas antes de dicho mantenimiento, lo cual afecta significativamente en la calidad del servicio.

1.2 Objetivo de la investigación

Contar con un sustento científico, que respalde el diseño e implementación de un sistema robusto de mantención, se hace cada día más necesario, en este sentido el presente trabajo de investigación pretende ser un aporte al cubrir en parte esta

necesidad. Por otro lado las evidencias que se recolecten en la investigación, servirán de insumos para que EFE Valparaíso, pueda establecer con éxito sus políticas y estrategias destinadas a mejorar la eficiencia de sus procesos de mantención. Para lograr este propósito se ha delimitado la investigación al alcance de los siguientes objetivos.

1.2.1 Objetivo General:

Desarrollar un modelo de análisis de fallas y jerarquización de riesgo, basado en la teoría fuzzy, para el mejoramiento de la eficiencia en la gestión de mantenimiento del material rodante

1.2.2 Objetivos Específicos:

- i. Cuantificar indicadores de mantenibilidad,
- ii. Identificar modos de fallas del material rodante,
- iii. Identificar los efectos de fallas del sistema,
- iv. Establecer un indicador de priorización de riesgo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron como soporte los siguientes criterios, conceptos y bases teóricas:

2.1 Mantenimiento

Cuando se está en presencia de sistemas complejos, como por ejemplo el sistema de transporte público o privado, surgen interrogantes que aparentan una simpleza supina, tales como ¿Cómo harán para que el metro tren siempre pase a la hora?, ¿Cómo harán para que el interior del vagón del tren siempre esté temperado?, Sin embargo, dar respuesta a estas dos “simples preguntas” trae consigo un grado de dificultad mayor, pues estas dos acciones dependen de un ecosistema complejo de redes interconectadas, en donde la falla o interrupción del funcionamiento de uno o más nodos de este entramado puede provocar una falla parcial o total del sistema y esta redundar en un potencial corte del servicio. Uno de estos nodos vitales es la gestión del mantenimiento.

El mantenimiento es un término que se utiliza para describir todas las actividades que deben llevarse a cabo para mantener un sistema apto para el servicio, de modo que los activos continúen siendo seguros y fiables durante toda la fase del ciclo de vida de explotación.

Por su parte Moubray (2004), establece que el fundamento principal del mantenimiento es incrementar la disponibilidad de una maquina o equipo, aumentando proporcionalmente la confiabilidad y reduciéndose la mantenibilidad, permitiendo minimizar las horas perdidas no programadas que impiden cumplir con los tiempos de producción que elevan los costos de mantenimiento.

2.2 Estrategias de mantenimiento

La literatura ha diferenciado diversos tipos de mantenimientos, a saber:

2.2.1 Mantenimiento predictivo:

Es un mantenimiento planificado y programado, de carácter preventivo, que se fundamenta en el análisis técnico, programas de inspección y reparación de equipos, el cual se adelanta al suceso de las fallas, es decir, es un mantenimiento que detecta las fallas potenciales con el sistema en funcionamiento.

La mayoría de las fallas se producen lenta y previamente, en algunos casos, arrojan indicios evidentes de una futura falla, indicios que pueden advertirse simplemente, en otros casos es posible advertir la tendencia a entrar en falla de un bien, mediante el monitoreo de condición, es decir, mediante la elección, medición y seguimiento de algunos parámetros relevantes que representan el buen funcionamiento del equipo en análisis.

En otras palabras, con este método, se trata de acompañar o seguir, la evolución de las futuras fallas. El seguimiento continuo de las variables operacionales permite contar con un registro histórico de sus características, sumamente útil ante fallas repetitivas; puede programarse la reparación en algunos casos, junto con la parada

programada del equipo y existen menos intervenciones de la mano de obra en mantenimiento.

2.2.2 Mantenimiento Preventivo:

El mantenimiento preventivo (MP) se introdujo en la década del cincuenta, luego de reconocer la necesidad de prevenir las fallas (Murthy et al., 2002). Como alternativa al mantenimiento correctivo (MC), el MP se ha adoptado para las tecnologías emergentes, ya que tales sistemas son generalmente más complejos que los basados en el uso de las herramientas manuales. El MP consiste en una serie de actividades planificadas que se ejecutan periódicamente, con el objetivo de garantizar que los equipos cumplan con las funciones requeridas durante su ciclo de vida útil dentro del contexto operacional donde se ubican, alargar sus ciclos de vida y mejorar la eficiencia de los procesos (Moubray, 2004).

Según Simões et al. (2011), el MP se realiza desde dos perspectivas, las cuales se conocen como gerencial y operativa. La perspectiva gerencial se refiere al apoyo a la toma de decisiones que facilita el análisis de datos (Söderholm et al., 2007).

Los insumos para la perspectiva gerencial incluyen la determinación de los objetivos de MP, la planificación para realizar acciones de mantenimiento y los métodos involucrados en la solución de cualquier problema que ocurra con respecto a MP, así como el desempeño de los sistemas. La perspectiva gerencial también se conoce como un proceso externo, ya que basa las decisiones en la historia y el análisis antes de la ejecución de las acciones de MP. Mientras tanto, la perspectiva operacional se refiere a la ejecución de acciones de mantenimiento para mantener la capacidad de un sistema para realizar sus funciones previstas (Bjorklund et al., 2010). Esta perspectiva es un proceso interno que consiste en aspectos técnicos mediante los cuales la MP se lleva a cabo en base a los aportes al proceso externo.

Ambas perspectivas que prefiguran MP son cruciales para asegurar su eficacia y eficiencia. Sin embargo, la perspectiva gerencial juega el papel más importante en la planificación y determinación de soluciones adecuadas y viables antes de llevar a cabo MP para que cumpla con sus objetivos. Esto se debe a que, sin una planificación adecuada, la ejecución de las acciones de MP podría afectar el sistema u otros sistemas que puedan requerir más acciones de planificación (Ab-Samat et al., 2012). Por lo tanto, debe prestarse la mayor atención a la planificación como clave para perspectivas gerenciales y operativas. Con la ayuda de la planificación, MP se puede dirigir en una forma estructurada y sistemática para supervisar y aumentar la vida útil de un sistema.

2.2.3 Mantenimiento Correctivo:

El mantenimiento correctivo consiste en la realización de una serie de tareas de reparación no programadas, con la finalidad de restaurar la función de un equipo cuando se verifica que el mismo no se encuentra en condiciones de seguir operando. En estos casos es necesario realizar paros imprevistos que comúnmente tienen sus orígenes en desperfectos no detectados durante las inspecciones predictivas, errores operacionales, ausencia de tareas de mantenimiento y requerimientos de producción que generan políticas como la de “repara cuando falle” (Moubray, 2004).

Todas estas estrategias pretenden aumentar la disponibilidad del sistema, pues una correcta estrategia de mantenimiento tiene que considerar no sólo el análisis de fiabilidad del tipo de sistemas, sino también su evolución durante la vida útil y su caída, en este sentido las normas de mantenimiento de los medios de transporte, suelen ignorar el análisis de su vida útil y el historial de fallos (Falcone et al., 2003).

2.3 Indicadores de mantenimiento

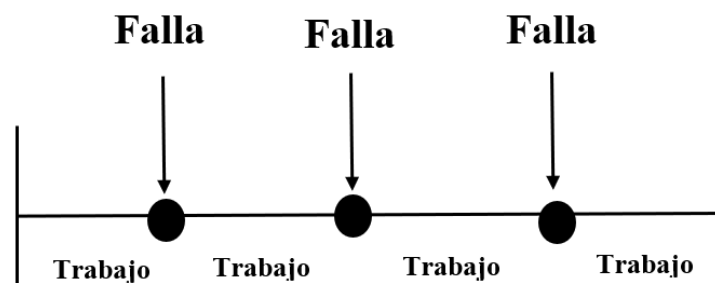
El desarrollo y uso de indicadores es fundamental, pues según López (2011) estos crean medidas estándares, las cuales son comprensibles, convirtiéndose en verdaderos parámetros de comparación y dada la globalización, se establecen unidades de medida similares para facilitar la comprensión.

2.3.1 MTBF (Mean Time Between Failures)

El Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) por sus siglas en inglés *Mean Time Between Failures* es un indicador de mantenimiento que mide el tiempo medio entre fallas en un equipo o sistema y está directamente relacionado con la fiabilidad del equipo.

Este indicador es relevante, pues permite llevar el control de los activos, equipos y maquinaria.

Figura N°03: Tiempo Medio Entre Fallas.



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del MTBF se utiliza la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo Total Disponible} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Número de Paradas}} \quad (ec. 1)$$

Donde:

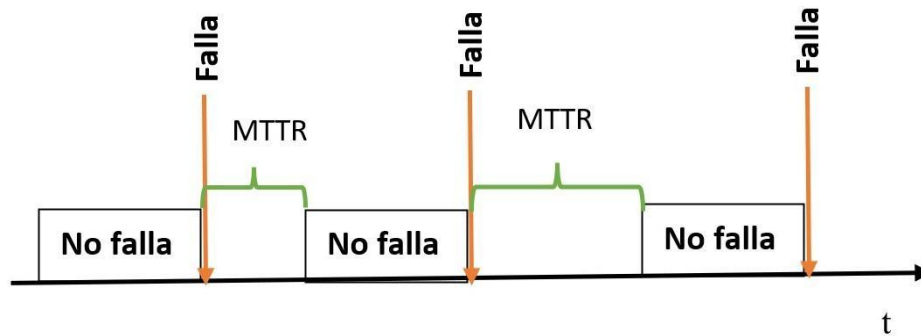
- Tiempo total disponible: total de horas en las que la máquina podría haber estado funcionando.
- Tiempo de inactividad: número total de horas en las que la máquina o equipo estuvo en estado de parada a consecuencia de una avería.
- Número de paradas: número total de paradas por avería, o lo que es lo mismo el número de averías en el periodo de tiempo considerado para el cálculo.

Para el cálculo del MTBF no se consideran los tiempos por operaciones de mantenimiento planificadas, inspecciones, etc. Se deben considerar los fallos entendiendo por tales aquellos que hacen que el equipo, activo o máquina quede fuera de servicio.

2.3.2 MTTR (Mean Time to Repair)

La sigla MTTR procede de *Mean Time to Repair* o, en español, Tiempo Medio de Reparación, también conocido como Tiempo Medio de Mantenimiento Correctivo, y representa el tiempo medio necesario para reparar una avería y hacer que un equipo vuelva a funcionar normalmente.

Figura N°04: Tiempo Medio de Reparación



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo del MTTR se utiliza la ecuación:

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de mantenimiento}}{\text{Número de reparaciones}} \quad (\text{ec. 2})$$

2.3.3 Disponibilidad

La disponibilidad es una función que permite estimar en forma global el porcentaje de tiempo total en que se puede esperar que un equipo esté disponible para cumplir la función para la cual fue destinado. A través del estudio de los factores que influyen sobre la disponibilidad, el MTBF y el MTTR, es posible para la gerencia evaluar distintas alternativas de acción para lograr los aumentos necesarios de disponibilidad (Amendola, 2003).

La Disponibilidad está dada por la siguiente ecuación:

$$D_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (\text{ec.3})$$

2.3.4 Confiabilidad

Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un período determinado. El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente. Si se tiene un equipo sin fallo, se dice que el equipo es ciento por ciento confiable o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a uno. Al realizar un análisis de confiabilidad a un equipo o sistema, obtenemos información valiosa acerca de la condición del mismo: probabilidad de fallo, tiempo promedio para fallo, etapa de la vida en que se encuentra el equipo (Amendola, 2003).

Uno de los modelos de distribución utilizados en el estudio de la Confiabilidad en el mantenimiento es la distribución Exponencial, la tabla N°01 muestra los principales modelos derivados de la distribución exponencial.

Tabla N°01: Principales Modelos de la Distribución Exponencial

Denominación	Expresión Matemática
Función de densidad	$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t); \quad t \geq 0, \lambda > 0$ (ec. 4)
Función de distribución	$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t); \quad t \geq 0, \lambda > 0$ (ec. 5)
Función de confiabilidad	$R(t) = \exp(-\lambda t); \quad t \geq 0, \lambda > 0$ (ec. 6)
Tasa de falla	$h(t) = \lambda; \quad t \geq 0$ (ec. 7)
Tiempo medio de falla (MTBF)	$MTBF = \frac{1}{\lambda}$ (ec. 8)
Función p-cuantil	$t_p = \frac{-\ln(1-p)}{\lambda}$ (ec. 9)

Fuente: Elaboración propia

2.4 Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés, *Reliability Centred Maintenance*) surgió durante la Segunda Guerra Mundial, específicamente, en el sector de la aviación, en donde se registraban alrededor de dos accidentes aéreos diarios, los cuales se originaban por fallas internas del motor del avión. Si bien es cierto, se empezaron a realizar revisiones periódicas que redujeron los accidentes a uno cada dos semanas; aquellas se efectuaban cuando el motor empezaba a fallar (Barreda, 2015).

Hoy en día, el RCM cuenta con un procedimiento para su implementación mediante el cual es pertinente un estudio de los activos fijos, evaluar la criticidad de los equipos, para después, mediante un análisis de fallo, determinar las tareas de mantenimiento, logrando reducir las paradas prolongadas de los equipos y sus costos asociados. Por lo tanto, para la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad es necesario realizar un análisis de modos y efectos de falla (AMEF) y el análisis de criticidad.

Por un lado, el AMEF es un procedimiento de análisis de fallas a través del cual cada falla de un equipo es analizada, de tal forma que permita determinar los efectos sobre las mismas mediante una clasificación de cada falla y así ayudar a reducir la ocurrencia de las mismas (Valdivieso, 2010). Mientras que el análisis de criticidad es una metodología que establece prioridades de procesos, sistemas y equipos, facilitando así la toma de decisiones, enfocándose en las áreas donde más se requiera, para mejorar la confiabilidad operacional según el contexto actual (Jaimes et al., 2016).

El RCM es una solución poderosa, ampliamente utilizada en todos los campos industriales en los que la continuidad del servicio representa un requisito obligatorio

y el mantenimiento debe optimizarse en términos de dinero y tiempo (Fisher et al.,2011). Algunos investigadores proponen un enfoque de evaluación del RCM utilizando software de confiabilidad (Pandey y Sonwane, 2016). Otros artículos utilizan modelos analíticos y un enfoque dinámico (Tirapong y Titti, 2014; Khorshidi et al., 2015), mientras que algunos autores crean su propio marco para la toma de decisiones de mantenimiento (Chen et al., 2019). Por su parte Zakikhani et al., (2020) proponen un RCM basado en la disponibilidad, mientras que (Yssaad y Abene, 2015) introduce un estudio completo de confiabilidad (RAMS) para optimizar la política de mantenimiento.

El mantenimiento centrado en la confiabilidad es una forma efectiva de seleccionar las políticas de mantenimiento adecuadas para cada tipo de sistema. De acuerdo con la norma internacional IEC 60300-3-11, el proceso RCM clásico se divide en cinco pasos:

1. **Iniciación y planificación:** establecer un plan de análisis y el contexto operativo;
1. **Análisis de falla funcional:** identificación de los modos de falla, causas, efectos y criticidad de cada componente;
2. **Selección de tareas:** selección de la tarea y el intervalo de mantenimiento adecuados;
3. **Implementación;**
4. **Mejora continua:** supervisar la eficacia del plan de mantenimiento para garantizar la mejora continua.

2.4.1 RCM: Las siete preguntas básicas

El proceso de RCM incita a responder las siguientes siete preguntas sobre el bien o sistema bajo revisión:

1. ¿Cuáles son las funciones y respectivos estándares de desempeño de este bien en su contexto operativo presente?
2. ¿En qué aspecto no responde al cumplimiento de sus funciones?
3. ¿Que ocasiona cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando se produce cada falla en particular?
5. ¿De qué modo afecta cada falla?
6. ¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla?
7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra el plan de acción apropiado?

2.4.2 Fallas funcionales

Los objetivos de mantenimiento son determinados por las funciones y respectivas expectativas de desempeño del bien bajo consideración. Pero ¿cómo se alcanzan estos objetivos?

El único suceso que puede hacer que un bien deje de funcionar al nivel requerido es algún tipo de falla. Esto sugiere que el departamento de mantenimiento alcanza sus objetivos, al adoptar un acercamiento acertado al manejo de las fallas. Sin embargo, antes de que se pueda aplicar la conjunción de herramientas apropiadas, se necesitará identificar el tipo de fallas que pueden presentarse.

El proceso de RCM realiza esto en dos niveles:

- Primero, identificando qué circunstancias llevaron a un estado fallido.

- Luego, investigando qué situaciones son las causantes de que un bien caiga en ese estado de falla.

En el mundo de RCM, los estados de falla son conocidos como fallas funcionales, porque ocurren cuando un bien es incapaz de cumplir una función a un nivel de desempeño que sea aceptable por el usuario. En adición a la incapacidad total para funcionar, esta definición abarca fallas parciales, donde el bien todavía funciona, pero a nivel inaceptable de desempeño, (incluyendo también los casos donde no se alcanza el nivel de precisión o calidad). Pero éstas solo pueden ser identificadas una vez que las funciones y desempeño estándares hayan sido definidas con claridad.

2.4.3 Modos de fallas

Una vez que se ha identificado cada falla funcional, el próximo paso es tratar de identificar todas las posibles causas de este estado de error. Estos eventos se conocen como modos de fallas. Los modos de falla “razonablemente similares” incluyen aquellas fallas que ocurrieron en el mismo equipo o en similares, operando en el mismo contexto, fallas que actualmente están siendo prevenidas por regímenes de mantenimiento ya existentes, y aquellas fallas que no ocurrieron aun, pero que se consideran como posibilidades muy reales en el contexto en cuestión. Las listas de modos de fallas más tradicionales, incorporan fallas causadas por el deterioro o el uso y desgaste normal. Sin embargo, también puede incluir fallas causadas por errores humanos (en parte por operarios y personal de mantenimiento) o por desperfectos de diseño de modo que los posibles causantes de fallas en equipos pueden ser identificadas y manejadas apropiadamente. Es también de suma importancia identificar la causa en detalle de modo que no se desperdicien tiempo ni esfuerzo en tratar síntomas en lugar de causas. Por otro lado, Es también de suma

importancia asegurar que el tiempo no se desperdicia en el análisis mismo, por concentrarse en demasiados detalles.

2.4.4 Efectos de las fallas

El paso siguiente en el proceso de RCM implica enlistar los efectos de las fallas, que describen lo que sucede cuando se presenta cada modo de falla. Esta descripción debe incluir toda la información necesaria para respaldar la evaluación de las consecuencias de las fallas, como ser:

- Evidencias, (si las hubiera), de que la falla ocurrió
- En qué manera, (si las hubiera), representa una amenaza para la seguridad del medioambiente.
- De qué modo, (si los hubiera) afecta la producción u operaciones.
- Que debe hacerse para reparar la falla.

2.5 Número de Prioridad de Riesgo (NPR)

El Número de Prioridad de Riesgo (NPR) es un indicador clásico que establece una jerarquización de las fallas en el sistema a través de la multiplicación del grado de ocurrencia (O), severidad (S) y detección (D) y provee la prioridad con la que se debe atacar cada modo o tipo de falla, identificando ítems críticos; lo que conlleva a dar prioridad a los NPR más altos.

$$NPR = O \times S \times D \quad (ec. 10)$$

2.6 Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF)

El AMEF es uno de los métodos más aplicados para identificar y eliminar fallas potenciales o conocidas en un sistema, proyecto o proceso. Su aplicación permite mejorar la seguridad, confiabilidad y apoyar el proceso de toma de decisiones (Liu et al., 2013). Este método suele aplicarse en la industria automotriz, aeroespacial, armamentista, electrónica, tecnologías médicas, entre otras (Carpinetti, 2016). Maleki & Saadat (2013) y Carpinetti (2016) sugieren que el AMEF se aplique mediante la ejecución de los siguientes tres pasos:

Paso 1:

- Constituir el equipo de expertos,
- Definir los requisitos del proceso o las funciones de los componentes del producto,
- Identificar modos de falla potenciales o conocidos,
- Analizar y describir los efectos de cada modo de falla y evaluar su severidad,
- Investigar y definir las causas probables de cada modo de falla y evaluar la ocurrencia de estas causas,
- Verificar los controles existentes y evaluar la capacidad de detección del modo de falla por parte de estos recursos,
- Calcular el NPR, según la ecuación 10.

Paso 2:

- Ordenar los valores NPR en orden descendente,
- Los modos de falla con los resultados de NPR más altos se asumen como los más importantes y tendrán mayor prioridad para tomar acciones.
- Desarrollar un plan de acción correctivo o preventivo priorizado.

Paso 3:

- Implementar el plan de acción,
 - Evaluar la efectividad de estas acciones, realizando una nueva evaluación del modo de falla considerando los criterios de severidad, ocurrencia y detección.
- Si las actuaciones han sido efectivas, se espera que se produzca la reducción del valor del RPN en relación con el resultado inicial.

2.7 Marco Normativo

Las siguientes tablas son un conjunto de leyes, normas y reglamentos de la empresa EFE Valparaíso las cuales son aplicables a las funciones y/o actividades que se planea llevar a cabo y que deben ser identificadas de manera armónica, sin incurrir en riesgos legales.

Tabla N°02 Normas de Constitución de la Empresa

Denominación	Fecha de Publicación D.O.
Constitución de la Sociedad Metro Regional Valparaíso S.A.	29.09.1995
Protocolización modificación razón social	25.10.2021
Protocolización Extracto Metro Regional de Valparaíso S.A.	30.11.1995
Publicación Extracto Diario Oficial	30.11.1995
Reducción a Escritura Publica Sesión Ordinaria de Directorio N° 432	05.10.2017

Fuente: EFE Valparaíso

Tabla N°03: Normas Relativas a Funciones y Responsabilidades

Tipo de Norma	Denominación	Fecha de Publicación D.O.
Política	Política de Prevención de Delitos Económicos	20.11.2018
Reglamento de Contratista	Reglamento de Contratista	23.04.2018
Modificación Reglamento Interno	Modifica Reglamento Interno de Orden, Higiene y Seguridad de Metro Valparaíso	14.04.2016
Modificación Reglamento Interno	Modifica Reglamento Interno de Orden, Higiene y Seguridad de Metro Valparaíso	19.07.2012
Reglamento Interno	Reglamento Interno de Orden, Higiene y Seguridad de Metro Valparaíso	01.01.2011
Decreto con Fuerza de Ley	Fija texto refundido, coordinado y sistematizado de la Ley Orgánica de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado	03.08.1993
Decreto N° 1157	Decreto N° 1157 – Ley General de Ferrocarriles	16.09.1931
Manual	Manual de adquisiciones de efe	01.04.2021
Manual	Manual Modelo Prevención del Delito	16.12.2021

Fuente: EFE Valparaíso

CAPÍTULO III

TEORÍA FUZZY

3.1 Una aproximación a la Teoría Fuzzy

En innumerables ocasiones el espacio en el que se desarrolla un sistema de ayuda a la decisión es de incertidumbre, imprecisión y vaguedad, de modo que expertos y decisores son incapaces de dar valores concretos a las utilidades de las alternativas entre las cuales decidir, a los pesos de los distintos criterios de decisión, o a las probabilidades de ocurrencia de los distintos escenarios (Cestero, 2013).

La Teoría Fuzzy, creada por Lotfy A. Zadeh a mediados de la década de los años 60 del siglo pasado, es un paradigma de representación del conocimiento donde los objetos no tienen por qué “ser” o “no ser” elementos de un determinado conjunto, sino que puede haber matices continuos entre ambas condiciones. Dicho paradigma nos permite modelar términos lingüísticos vagos e imprecisos, del tipo “mucho”, “mediano” o “poco”, y operar con ellos en un proceso de inferencia (Cestero, 2013).

En este sentido, la noción de conjunto fuzzy proporciona un punto de partida conveniente para la construcción de un marco conceptual que es paralelo en muchos aspectos al marco utilizado en la teoría de conjuntos clásico, pero es más general que este último y, potencialmente, puede demostrar tener un ámbito de aplicación mucho más amplio, particularmente en los campos de clasificación de patrones y procesamiento de información. Esencialmente, dicho marco proporciona una forma natural de tratar con problemas en los que la fuente de imprecisión es la ausencia de criterios claramente definidos (Zadeh, 1975).

Se comenzará la discusión de los conjuntos fuzzy con la presentación de un conjunto de definiciones básicas, las cuales permitirán una mayor y mejor comprensión de la propuesta.

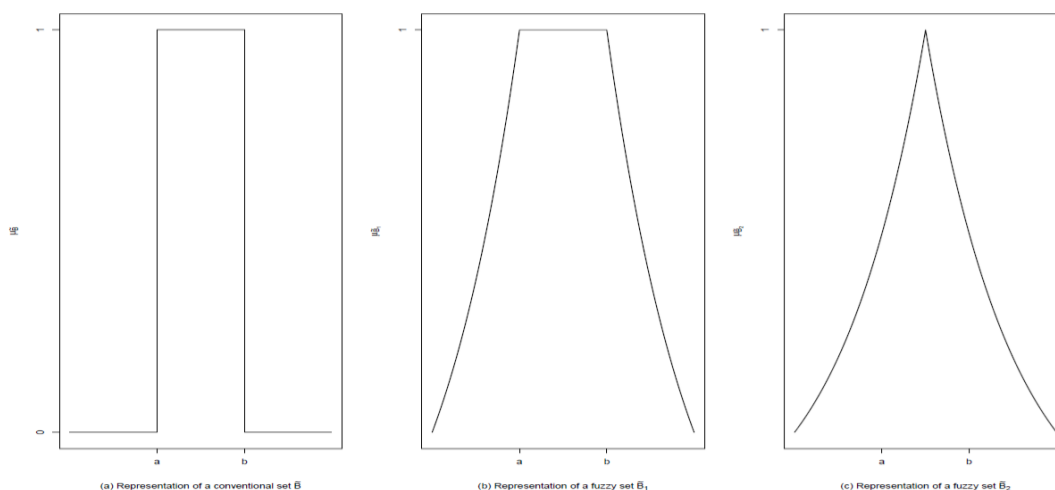
3.1.1 Definición: [Conjunto Fuzzy]

Un conjunto fuzzy $\tilde{A}$ en el universo del discurso X es caracterizado por una función de membresía $\mu_{\tilde{A}}(x)$, que mapea cada elemento $x \in X$ a un número real en el intervalo $[0,1]$ lo que se denota:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X\}$$

El valor de la función $\mu_{\tilde{A}}(x)$ determina el grado de pertenencia de x en $\tilde{A}$, (Zadeh, 1965,1975).

Figura N°05: Conjunto fuzzy



Fuente: Elaboración propia

En la figura N°05 se pueden apreciar tres conjuntos fuzzy $\tilde{B}$, $\tilde{B}_1$ y $\tilde{B}_2$ cuyas funciones de membresía son:

1. Función de membresía para el conjunto fuzzy $\tilde{B}$

$$\tilde{B} = \{(x, 1): x \in B\} \cup \{(x, 0): x \notin B\}$$

2. Función de membresía para el conjunto fuzzy $\tilde{B}_1$

$$\tilde{B}_1 = \{(x, 1): x \in B\} \cup \{(x, \exp \exp(-(a-x))): x \leq a\} \cup \{(x, \exp \exp(-(x-b))): x \geq b\}$$

3. Función de membresía para el conjunto fuzzy $\tilde{B}_2$

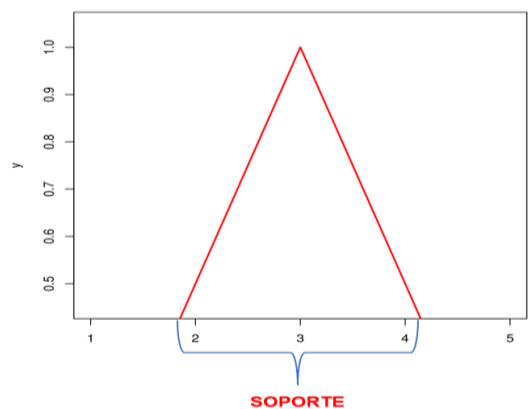
$$\tilde{B}_2 = \{(x, \exp \exp(-|x-c|)): x \in B\} \cup \{(x, 0): x \notin B\}$$

3.1.2 Definición: [Soporte del conjunto Fuzzy]

Sea $\tilde{A}$ un conjunto fuzzy, entonces el soporte de $\tilde{A}$ se define como

$$Sop(\tilde{A}) = \{x \in X: \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\}$$

FiguraN°06: Soporte de un conjunto fuzzy



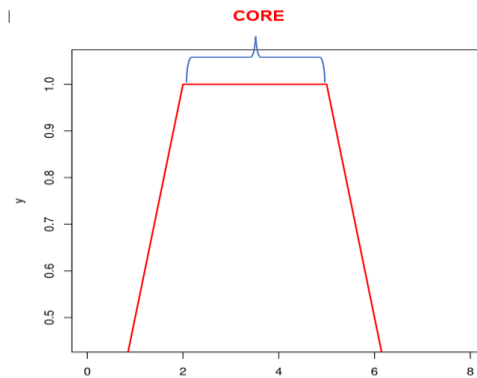
Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Definición: [Core del conjunto Fuzzy]

Sea $\tilde{A}$ un conjunto fuzzy, entonces el Core de $\tilde{A}$ se define como

$$\text{core}(\tilde{A}) = \{x \in X: \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\}$$

Figura N°07: Core o núcleo de un conjunto fuzzy



Fuente: Elaboración propia

3.1.4 Definición: [Conjunto Fuzzy vacío]

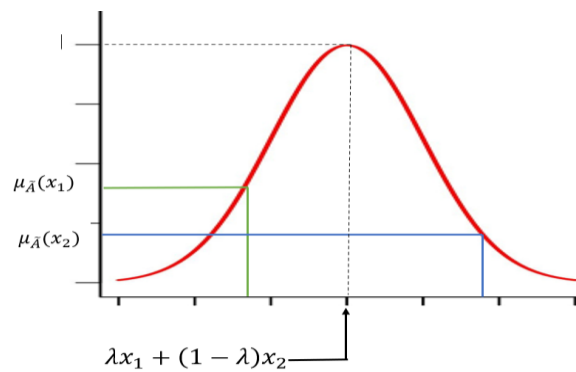
Un conjunto fuzzy es un conjunto fuzzy vacío $\tilde{\emptyset}$, si el valor de la función de pertenencia es cero, es decir

$$\mu_{\tilde{\emptyset}}(x) = 0, \quad \forall x \in X$$

3.1.5 Definición: [Conjunto Fuzzy Convexo]

Un conjunto fuzzy $\tilde{A}$ en el universo del discurso X es convexo si y sólo si para todo $x_1, x_2 \in X$, $\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq (\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2))$, donde $\lambda \in [0,1]$ (Chen, 2000).

Figura N°08: Conjunto fuzzy Convexo

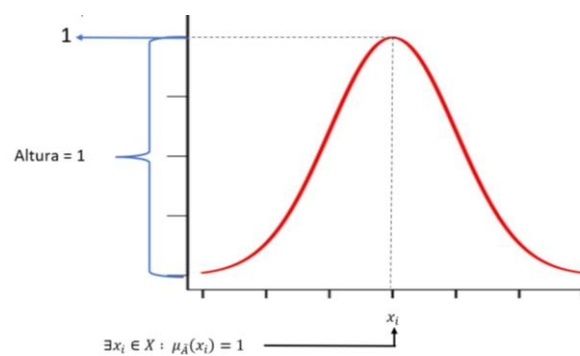


Fuente: Elaboración propia

3.1.6 Definición: [Conjunto Fuzzy Normal]

Un conjunto fuzzy $\tilde{A}$ en el universo del discurso X es llamado conjunto fuzzy normal, lo que implica que $\exists x_i \in X : \mu_{\tilde{A}}(x_i) = 1$ (Chen, 2000).

Figura N°9: Conjunto Fuzzy Normal



Fuente: Elaboración propia

3.1.7 Definición: [Propiedades de los Conjuntos Fuzzy]

Sean $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$ dos conjuntos Fuzzy en X , entonces:

- a) Unión: $\tilde{A} \cup \tilde{B} = \{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\}, \forall x \in X$
- b) Intersección: $\tilde{A} \cap \tilde{B} = \{\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)\}, \forall x \in X$
- c) Complemento: $\tilde{A}^c = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x)$
- d) Si $\tilde{A} \subseteq \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) < \mu_{\tilde{B}}(x)$

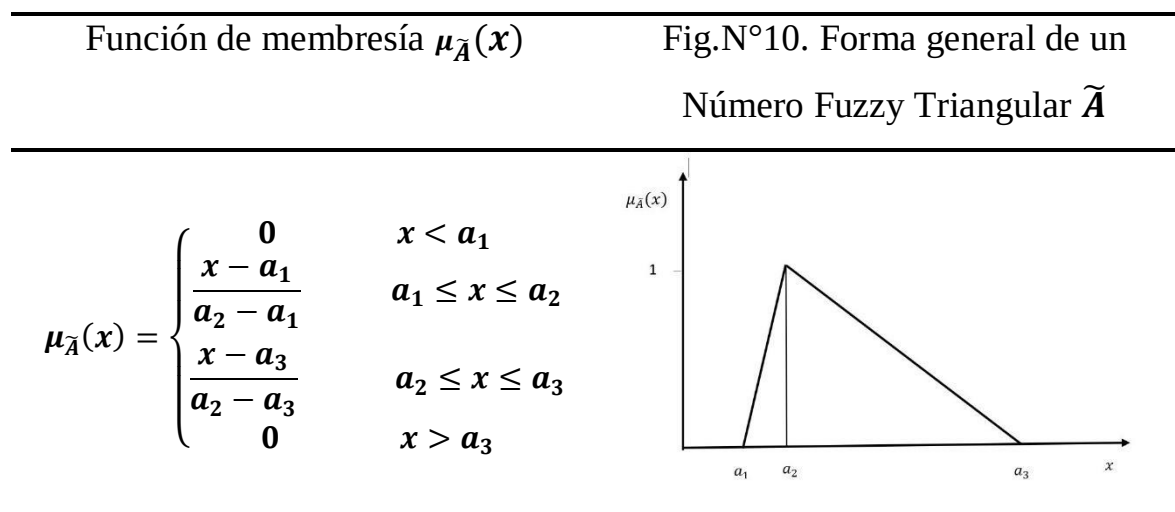
3.1.8 Definición: [Número Fuzzy]

Un número fuzzy es un subconjunto fuzzy en el universo del discurso X que es tanto convexo como normal (Chen, 2000).

3.1.9 Definición: [Número Fuzzy Triangular]

Un número positivo fuzzy triangular $\tilde{A}$ (ver figura N°10), puede ser denotado por (a_1, a_2, a_3) . La función de membresía $\mu_{\tilde{A}}(x)$ se define como (Chen y Cheng, 2009):

Figura N°10: Forma general de un Número Fuzzy Triangular

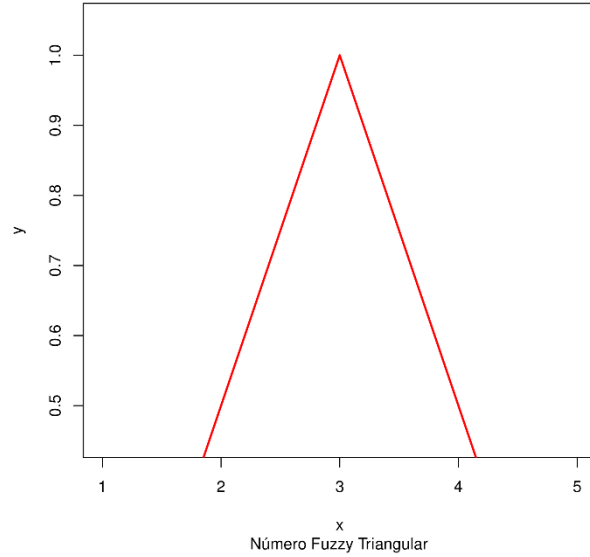


Fuente: Elaboración propia

Ejemplo: Sea $\tilde{A} = (1,3,5)$ con función de pertenencia definida por

Figura N°11: Número Fuzzy Triangular

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < 1 \\ \frac{x-1}{2} & 1 \leq x \leq 3 \\ \frac{x-5}{-2} & 3 \leq x \leq 5 \\ 0 & x > 5 \end{cases}$$



Fuente: Elaboración propia

3.1.10 Definición: [Operaciones Básicas de Números Fuzzy]

Sea $\tilde{A}$ un número fuzzy triangular (a_1, a_2, a_3) , $\tilde{B}$ otro número fuzzy triangular (b_1, b_2, b_3) y r un número real positivo, entonces se definen las siguientes operaciones (Chen y Cheng, 2009):

a) Suma de dos números fuzzy:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3] \text{ (ec. 11)}$$

b) Resta de dos números fuzzy:

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = [a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1] \text{ (ec. 12)}$$

c) Multiplicación de dos números fuzzy:

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} \cong [a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3] \text{ (ec. 13)}$$

d) División de dos números fuzzy:

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} \cong [a_1/b_3, a_2/b_2, a_3/b_1] \text{ (ec. 14)}$$

e) Multiplicación de un número fuzzy y un número real positivo:

$$\tilde{A} \otimes r = [a_1 r, a_2 r, a_3 r] \text{ (ec. 15)}$$

3.1.11 Definición: [Distancia entre dos números fuzzy triangulares]

Sean $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ y $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ dos números fuzzy triangulares $\tilde{B}$, entonces la distancia entre $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$ lo que denotaremos $d(\tilde{A}, \tilde{B})$, puede ser calculada a través del método de los vértices propuesto por Wan y Li (2013):

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]} \text{ (ec. 16)}$$

3.1.12 Definición: [Variable Lingüística]

Una Variable Lingüística es aquella cuyos valores son palabras u oraciones en un lenguaje natural o artificial. El concepto de variable lingüística proporciona un medio de caracterización aproximada de fenómenos complejos o mal definidos como para ser susceptibles de una descripción en términos cuantitativos convencionales.

En términos más formales una variable lingüística se caracteriza por un quintuple $(L, T(L), U, G, M)$ en el que L es el nombre de la variable; $T(L)$ es el conjunto de términos de L , es decir, la colección de sus valores lingüísticos; U es un universo de discurso; G es una regla sintáctica que genera los términos en $T(L)$; y M es una regla semántica que asocia a cada valor lingüístico X su significado, $M(X)$, donde $M(X)$ denota un subconjunto fuzzy de U . El significado de un valor lingüístico X se caracteriza por una función de compatibilidad, $c: U \rightarrow [0,1]$, que asocia a cada $u \in U$ su compatibilidad con X (Zadeh, 1975).

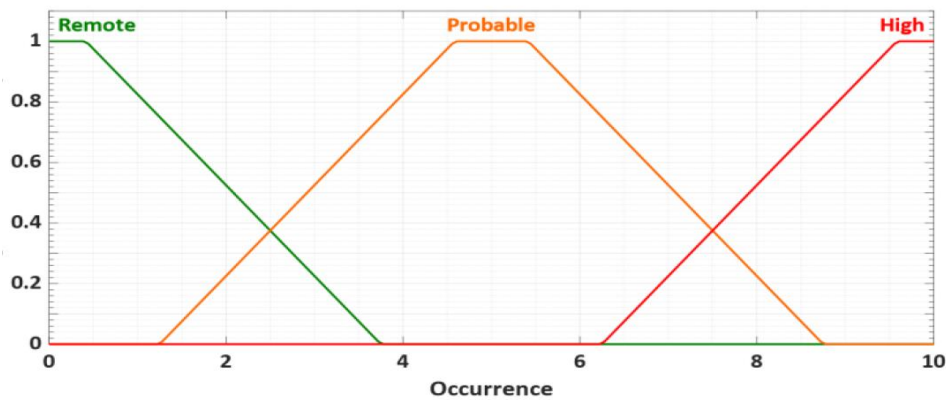
Ejemplo: Definición lingüística para la ocurrencia de un modo o tipo de falla:

- $L =$ Ocurrencia del tipo o modo de falla.
- $T(L) = \{Remoto (R) Probable (P) Alto (H)\}$

Donde:

- Remoto (R): El tipo de falla tiene una remota probabilidad de ocurrir.
- Probable (P): El tipo de falla tiene una probabilidad media de ocurrir.
- Alto (H): El tipo de falla tiene una alta probabilidad de ocurrir.

Figura N°12: Definición Lingüística para la Ocurrencia de un Modo o Tipo de Falla.



Fuente: Ciani et al, 2021

3.1.13 Definición: [Desfuzzyficación]

La desfuzzyficación es la operación de transformar un número fuzzy a número nítido. Un método simple y popular utilizado para desfuzzyficar un número fuzzy es el método del centroide, el que se define como (Ebrahimnejad et al., 2012):

Sea $\tilde{A}$ un número fuzzy y sea $\mu_{\tilde{A}}(x)$ la función de membresía, entonces

$$\bar{x}(\tilde{A}) = \frac{\int x \mu_{\tilde{A}}(x) dx}{\int \mu_{\tilde{A}}(x) dx}$$

Donde $\bar{x}(\tilde{A})$ es el valor desfuzzyficado.

Para un número fuzzy trapezoidal $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, el valor desfuzzyficado basado en el centroide resulta ser:

$$\bar{x}(\tilde{A}) = \frac{1}{3} \left[a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - \frac{a_4 a_3 - a_1 a_2}{(a_4 + a_3) - (a_1 + a_2)} \right]$$

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA MULTICRITERIO TOPSIS-FUZZY

El análisis de toma de decisiones multicriterio *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), es una técnica para clasificar las preferencias por similitud con una solución ideal, desarrollado originalmente por Ching-Lai Hwang y Yoon en 1981 y luego mejorado por Yoon en 1987 y Hwang, Lai y Liu en 1993.

TOPSIS utiliza el principio de soluciones ideales positivas y soluciones ideales negativas desde un punto de vista geométrico utilizando distancias.

Las soluciones ideales positivas se definen como la suma de todos los mejores valores que se pueden alcanzar para cada atributo, mientras que la solución ideal negativa consiste en todos los peores valores alcanzados para cada atributo (Rahim, R., Siahaan, A. P. U., Wijaya, R. F., Hantono, H., Aswan, N., Thamrin, S., ... & Sujarwo, S., 2018). El TOPSIS clásico utiliza valores exactos y precisos para determinar el peso de los criterios y clasificar las opciones, por su parte la propuesta de TOPSIS fuzzy evalúa los elementos de la matriz de decisión o el peso de los criterios, o ambos, utilizando variables lingüísticas que ofrecen la lógica fuzzy (Khodadadi-Karimvand, M., & Shirouyehzad, H., 2021).

4.1 Pasos de la metodología TOPSIS-Fuzzy

Para definir los pasos de esta metodología, se utilizará la técnica descrita por Cheng y Hwang (2019) para el caso de números fuzzy triangulares.

Paso 1: Construcción de la Matriz de Decisión

Partiendo de m alternativas A_i con $i = 1, 2, \dots, m$ que serán evaluadas a partir de los criterios C_j con $j = 1, 2, \dots, n$, se obtiene la siguiente matriz de decisión.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_{11} & \cdots & \tilde{X}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{X}_{m1} & \cdots & \tilde{X}_{mn} \end{bmatrix} \quad (ec. 17)$$

Con $\tilde{X}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$

Donde $\tilde{X}_{ij}$ representa la valoración de la alternativa A_i , con respecto al criterio C_j .

El vector de pesos de los criterios se define de la siguiente manera:

$$\tilde{w} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \dots, \tilde{w}_n]$$

$$\tilde{w}_j = (\tilde{w}_{j1}, \tilde{w}_{j2}, \tilde{w}_{j3})$$

Paso 2: Normalización de la Matriz de Decisión

Los elementos de la matriz de decisión pueden no estar definidos en el mismo dominio y por ello han de ser normalizados. La norma que se usa estará dada por la expresión

$$\tilde{X}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right) \text{ (ec. 18)}$$

$$c_j^* = \max c_{ij}$$

Luego la matriz de decisión normalizada $\tilde{R}$, está dada por

$$\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Paso 3: Construcción de la Matriz de Decisión Normalizada Ponderada

Los elementos de la matriz de decisión normalizada ponderada $\tilde{V}$ estarán dado por la expresión

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_j, \text{ (ec. 19)}$$

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Dónde $\tilde{w}_j$ es el peso del j -ésimo criterio.

Paso 4: Obtención de las Soluciones Ideales Positivas y las Soluciones Ideales Negativas

Las soluciones fuzzy ideales positivas A^* y negativas A^- se determinan mediante las expresiones:

$$A^* = \{\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \tilde{v}_3^*, \dots, \tilde{v}_n^*\}$$

$$A^- = \{\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \tilde{v}_3^-, \dots, \tilde{v}_n^-\}$$

$$\tilde{v}_j^* = \max\{\tilde{v}_{ij}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{v}_j^- = \min\{\tilde{v}_{ij}\} \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Paso 5: Cálculo de la distancia a las soluciones ideales positivas y negativas

La distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa, está dada respectivamente por:

$$S_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_1^*); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (ec. 20)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_1^-); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (ec. 21)$$

donde

$$d_v = \sqrt{\frac{1}{3} [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2]}$$

Paso 6: Cálculo del Índice de Similitud a la Solución Ideal

El índice de similitud a la solución ideal CC_i se calculará mediante la expresión:

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-}; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (ec. 22)$$

Si $CC_i = 1$, entonces A_i es igual a A^* (solución ideal).

Si $CC_i = 0$, entonces A_i es igual a A^- (solución no ideal).

Es decir, cuanto más próximo es el valor a 1, indica una mayor prioridad de la alternativa i -ésima.

CAPÍTULO V

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe el marco metodológico, donde se define el tipo y diseño de la investigación, así como la población y muestra, las variables estudiadas y las técnicas de recolección de datos.

5.1 Tipo y Diseño de la investigación

Basándose en los conceptos de Sampieri (2014), el diseño de esta investigación es no experimental de tipo transversal, pues las variables no se modifican intencionalmente.

5.2 Población y muestra:

La población de estudio en esta investigación estará constituida por el material rodante perteneciente a EFE, a partir de esta población, la muestra serán las cinco averías más recurrentes del material rodante perteneciente a la empresa filial EFE Valparaíso, específicamente sus dos modelos de trenes (“X Trapolis 100 y X Trapolis Modular).

5.3 Variables

Las variables de estudio en la presente investigación son:

- Número de fallas presentadas anualmente,
- Tiempo entre fallas,
- Tiempo de reparación de las fallas,
- Modos y efectos de fallas.

5.4 Recolección de Datos

El mecanismo de recolección de datos en la presente investigación estará dividido en dos tipos de información:

- **Recolección de información documental:** Las técnicas e instrumentos de recolección de la información documental en la presente investigación son los manuales de operación y mantenimiento del material rodante, las bitácoras de los operadores donde se detallan todas las incidencias del día a día.
- **Recolección de información de campo:** Las técnicas e instrumentos de recolección de información de campo en la presente investigación, se realizó mediante una reunión presencial con el staff de mantenimiento de EFE Valparaíso.

Posterior a la reunión realizada, se enviaron cinco encuestas para los distintos tipos de averías enfocándose en sus 15 modos de falla más recurrentes, dichas encuestas fueron enviadas de manera remota y respondidas de igual forma.

CAPÍTULO VI

PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se presentarán los resultados de la investigación y sus respectivos análisis, para esto se dividirá el capítulo en dos subsecciones, en la primera subsección se presenta el Modelo de Decisión Propuesto para la priorización de riesgos y en la segunda subsección se presentan los resultados del modelo aplicado al material rodante de la filial EFE Valparaíso.

6.1 Modelo de Decisión Propuesto para la Priorización de Riesgos

A partir de una exhaustiva revisión bibliográfica y del análisis teórico realizado en esta investigación, proponemos un modelo de decisión para apoyar la priorización de riesgos en los procesos de mantenibilidad (ver figura N°13), el cual combina el análisis de modo y efecto de fallas AMEF con la técnica TOPSIS-Fuzzy.

Este modelo está constituido por tres pasos, que pasamos a describir:

Paso 1 del Modelo Propuesto

Este paso se inicia con la conformación del staff de mantenimiento, quienes actuarán como tomadores de decisiones.

- La primera tarea del staff es definir el alcance de la aplicación, es decir, elegir qué procesos serán evaluados, para esto se utiliza una matriz de criticidad,

- Luego deben identificar y describir los modos de falla potenciales o conocidos.
- En este paso se debe construir una escala lingüística difusa para puntuar los los modos de fallas y otra para definir los pesos de los criterios.
- El staff debe evaluar individualmente cada modo de falla descrito y asignar los puntajes correspondientes a cada criterio.

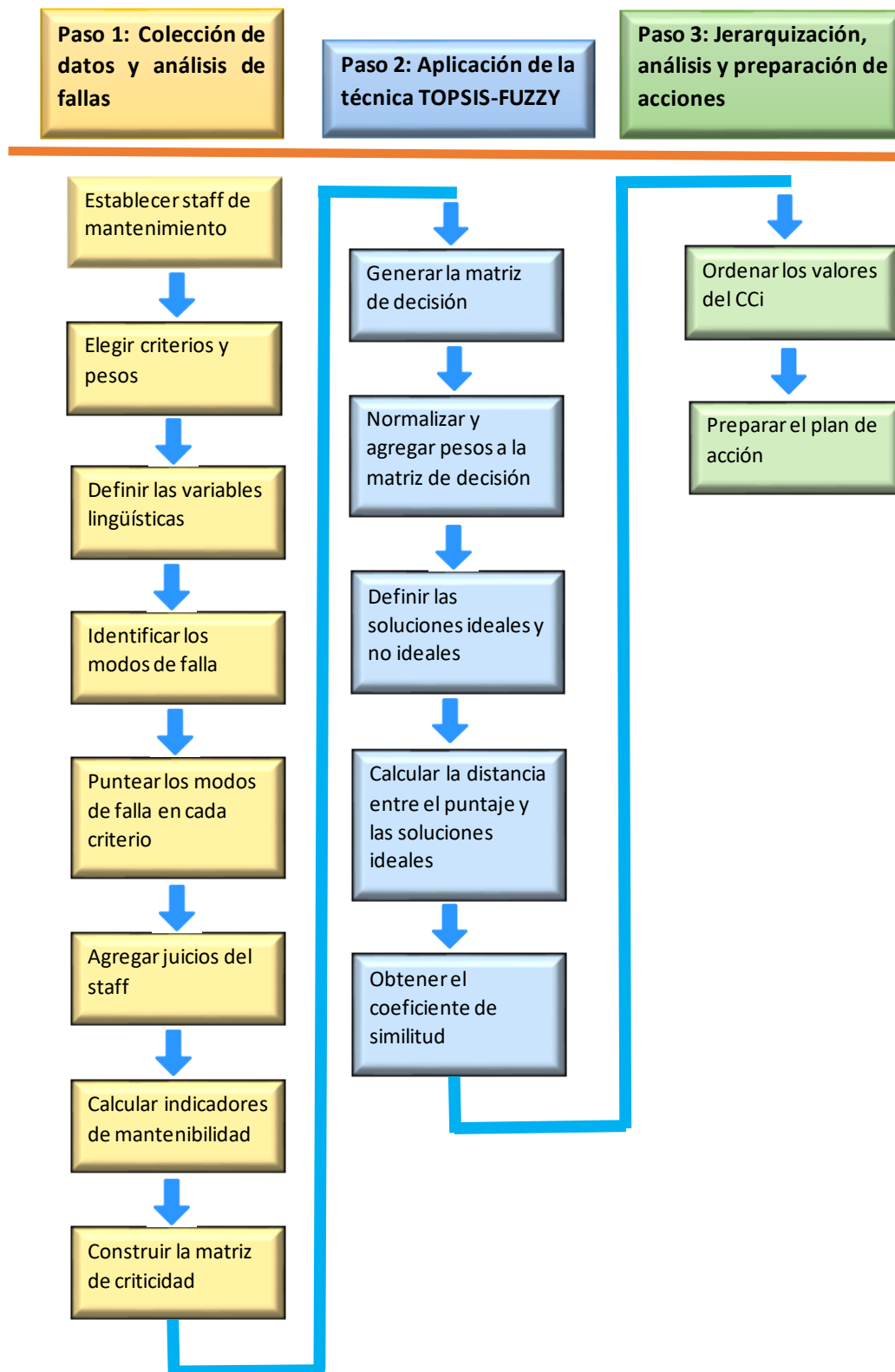
Paso 2 del Modelo Propuesto

Este paso sigue el procedimiento definido por el método TOPSIS-Fuzzy, discutido en el capítulo IV.

Paso 3 del Modelo Propuesto

Finalmente, en el paso 3, los valores de CC_i se clasifican en orden descendente, creando un ranking en el que las alternativas con los puntajes generales más altos representan los modos de falla más indeseables. Por lo tanto, con base en este ordenamiento, se priorizan las fallas para desarrollar las acciones necesarias para eliminar o mitigar los principales riesgos del proceso bajo análisis.

Figura N°13: Modelo Propuesto



Fuente: Elaboración propia

6.2 Resultados de la Aplicación del Modelo

En reunión con el staff de mantenimiento, y luego de un profundo análisis de la matriz de diseño de falla y una extensa discusión, se decidió trabajar con cinco sistemas (*Aire Acondicionado, Energía Eléctrica, Freno mecánico, Puertas y Tracción*) y con los 15 modos de fallas más recurrentes en cada una de estos.

6.2.1 Algunos Estadísticos Descriptivos

A partir de los datos extraídos de la matriz de diseño, se pudo establecer algunos estadísticos descriptivos del periodo 2019-2022.

Tabla N°04 Estadísticos Descriptivos

AIRE ACONDICIONADO				
	Media	S.D	Mín	Máx
TTD	5845,3	9,2	5840	5856
TI	428,8	296,6	124,8	717,6
NA	57,6	34,0	31	96
TRP	5416,4	288,9	5138,3	5715,1
FRENO MECÁNICO				
	Media	S.D	Mín	Máx
TTD	5845,3	9,2	5840,0	5856,0
TI	267,2	187,9	80,7	456,4
NA	21,0	13,5	6,0	32,0
TRP	5578,1	188,2	5383,6	5759,3
TRACCIÓN				
	Media	S.D	Mín	Máx
TTD	5845,3	9,2	5840,0	5856,0
TI	363,0	94,3	255,3	430,6
NA	71,3	25,0	47,0	97,0
TRP	5482,3	88,8	5425,4	5584,7

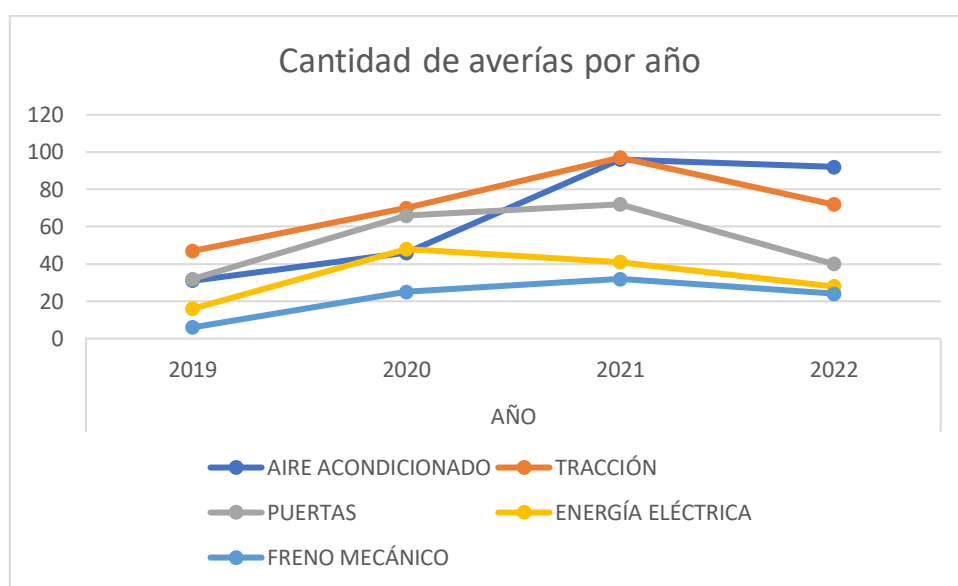
ENERGÍA ELÉCTRICA				
	Media	S.D	Mín	Máx
TTD	5845,3	9,2	5840,0	5856,0
TI	237,3	137,9	118,1	388,3
NA	35,0	16,8	16,0	48,0
TRP	5608,0	140,0	5451,7	5721,9
PUERTAS				
	Media	S.D	Mín	Máx
TTD	5845,3	9,2	5840,0	5856,0
TI	449,8	188,8	265,1	642,4
NA	56,7	21,6	32,0	72,0
TRP	5395,6	180,7	5213,6	5574,9

TTD = Tiempo Total Disponible
TI = Tiempo Inactivo
NA = Números de Averías
TRP = Tiempo Real de Producción

Fuente: Elaboración propia

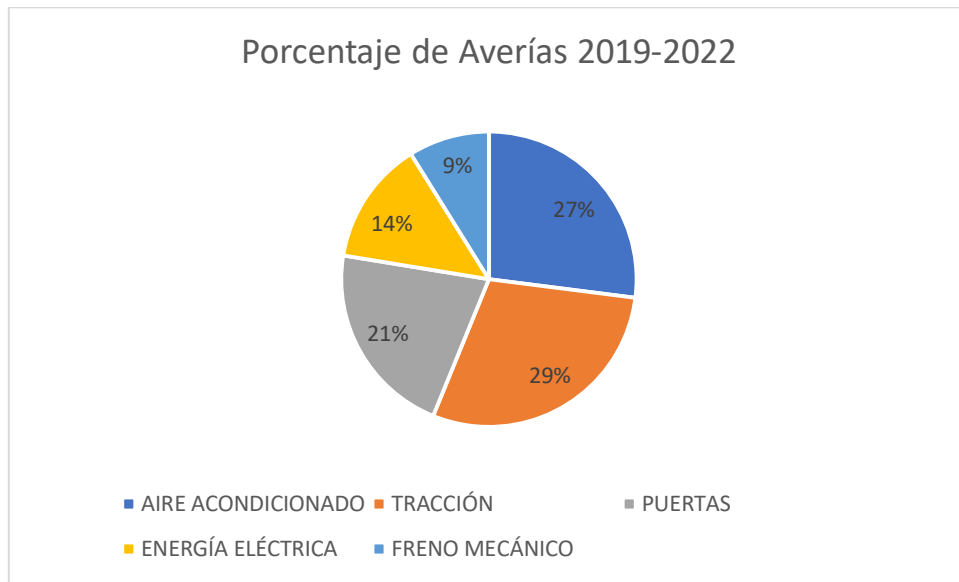
En cuanto a las averías, la figura N°15 muestra el porcentaje de averías registradas por los trabajadores de EFE Valparaíso durante el periodo 2019 hasta marzo de 2022, en donde la mayor cantidad de ellas se centran en la tracción y aire acondicionado con un 29% y 27% respectivamente, mientras que tan solo el 9% de las averías registradas son por fallas del freno mecánico, por su parte la figura N° 14 muestra el número de averías por años y tipo de averías.

Figura N°14: Cantidad de averías por año



Fuente: Elaboración propia

Figura N°15: Porcentaje de averías 2019-2022



Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Indicadores de Mantenimiento

Como se expuso en el capítulo II, el desarrollo y uso de indicadores es fundamental, pues estos crean medidas estándares, las cuales son comprensibles, convirtiéndose en verdaderos parámetros de comparación lo que permite tener una mejor comprensión de los fenómenos estudiados.

Tiempo medio entre fallas (MTBF)

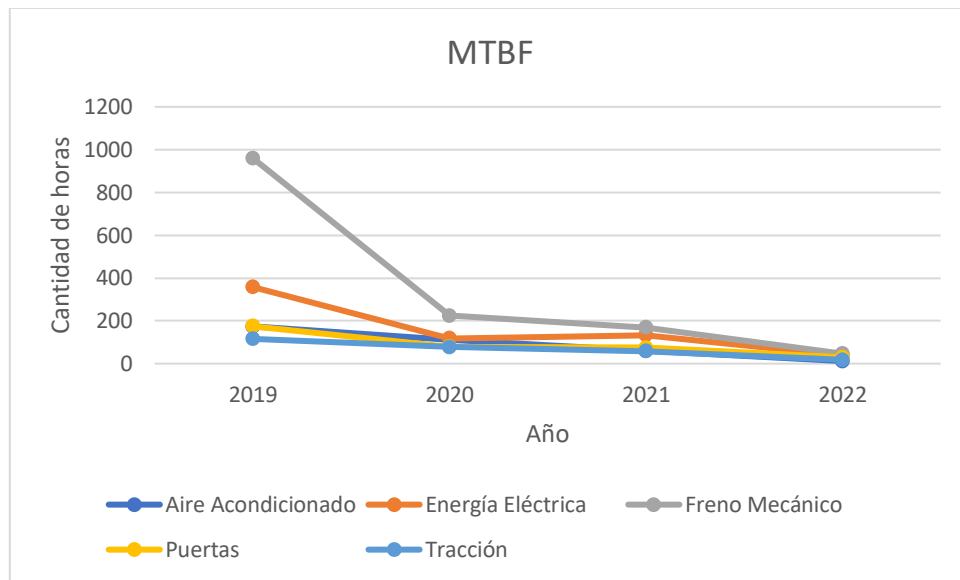
La tabla N° 05 muestra los resultados obtenidos al calcular el tiempo medio entre fallas, según la ecuación 1, expresado en horas de las cinco averías estudiadas, durante el periodo 2019 hasta marzo de 2022.

Tabla N°05 MTBF total

MTBF				
Averías	2019	2020	2021	2022
Aire Acondicionado	174,06129	111,703623	59,5328125	11,9396739
Energía Eléctrica	357,620833	117,716667	132,96748	38,2238095
Freno Mecánico	959,886111	223,658667	168,2375	46,7236111
Puertas	174,215625	78,9936869	74,975463	29,7966667
Tracción	115,680142	77,5052381	57,5738832	18,0886574

Fuente: Elaboración propia

Figura N°16: MTBF total



Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que a través de los años han ido disminuyendo significativamente las horas de los MTBF de las distintas averías, esto se debe a que el año 2019 ha sido el único año relativamente “normal” puesto que 2020 y 2021 producto de la pandemia los trenes trabajaban menos horas diarias ya que había mucha menos demanda de pasajeros. También, cabe destacar que del año 2022 solo se consideraron los primeros tres meses de dicho año, es por lo anterior que las horas de sus MTBF son significativamente menor a los años anteriores.

Tiempo medio de reparación (MTTR)

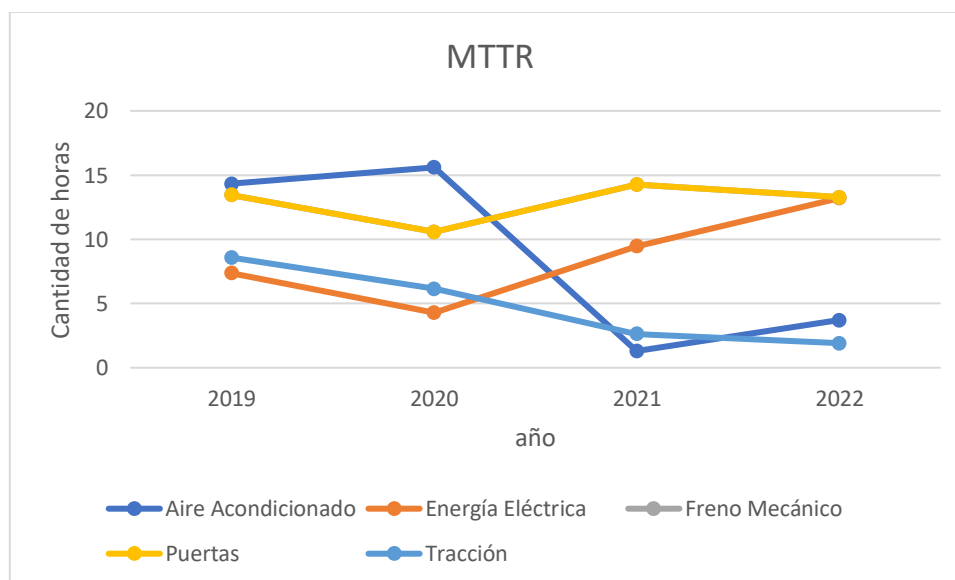
A continuación, se muestran los resultados de los MTTR (ver ecuación 2) expresado en horas para las distintas averías durante el periodo 2019 hasta marzo de 2022.

Tabla N°06 MTTR total

MTTR				
Averías	2019	2020	2021	2022
Aire Acondicionado	14,3258065	15,6007246	1,30052083	3,7125
Energía Eléctrica	7,37916667	4,28333333	9,47154472	13,2047619
Freno Mecánico	13,4472222	10,5813333	14,2625	13,2763889
Puertas	13,4472222	10,5813333	14,2625	13,2763889
Tracción	8,5751773	6,15190476	2,63230241	1,91134259

Fuente: Elaboración propia

Figura N°17: MTTR total



Fuente: Elaboración propia

De la figura N°17, podemos observar lo siguiente:

- El sistema de aire acondicionado presenta un tiempo medio de reparación entre 1 y 6 horas, siendo el 2020 el año con la mayor cantidad de horas y el 2021 con una menor cantidad de horas.
- El sistema de energía eléctrica presenta un tiempo medio de reparación entre 4 y 14 horas, teniendo una baja en la cantidad de horas en el año 2020 y un alza significativa entre los años 2021 y 2022 en comparación con años anteriores.
- El sistema de freno mecánico presenta un tiempo medio de reparación entre 10 y 15 horas, siendo el año 2020 el año con menos tiempo de reparación y el año 2019 con un mayor tiempo medio de reparación.
- El sistema de puertas presenta un tiempo medio de reparación entre 6 y 10 horas, siendo el 2020 el año con reparaciones más extensas y el 2021 el año con menor tiempo de reparación.
- El sistema de tracción ha tenido un tiempo medio de reparación que ha disminuido significativamente en el transcurso de los años.

Disponibilidad

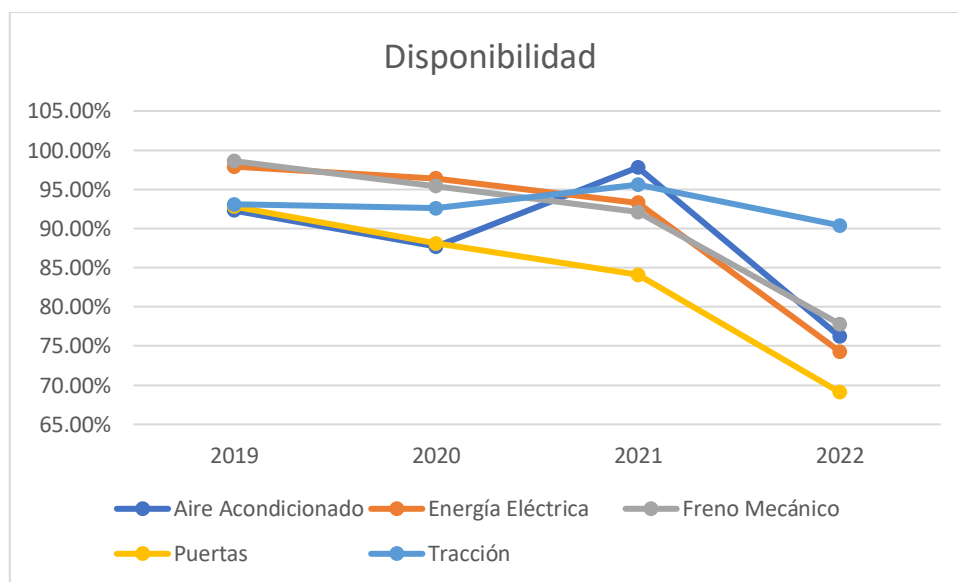
La tabla N° 07 muestra los resultados obtenidos al calcular, según la ecuación 3, la Disponibilidad de los sistemas del material rodante, durante el periodo 2019 hasta marzo de 2022.

Tabla N°07: Disponibilidad

DISPONIBILIDAD				
Sistemas	2019	2020	2021	2022
Aire Acondicionado	92,3%	87,7%	97,8%	76,2%
Energía Eléctrica	97,9%	96,4%	93,3%	74,3%
Freno Mecánico	98,6%	95,4%	92,1%	77,8%
Puertas	92,8%	88,1%	84,1%	69,1%
Tracción	93,1%	92,6%	95,6%	90,4%

Fuente: Elaboración propia

Figura N°18: Disponibilidad



Fuente: Elaboración propia

De la figura N°18, podemos observar lo siguiente:

- El sistema de aire acondicionado presenta su mayor disponibilidad en el año 2021 con un 97,8%, mientras que, su disponibilidad más baja se presentó en el año 2022 con un 76,2%.

- El sistema de energía eléctrica en el año 2019 tuvo una disponibilidad del 97,9%, la cual ha ido descendiendo a través de los años llegando a una disponibilidad de 74,3% en el año 2022.
- El sistema de freno mecánico en el año 2019 tuvo una disponibilidad del 98,6%, la cual tuvo una leve baja entre los años 2020 y 2021, llegando a una disponibilidad de 77,8% en el año 2022.
- El sistema de puertas presenta una disponibilidad regular entre los años 2019-2021, sin embargo, en el año 2022 presento una baja en comparación a los años anteriores llegando a una disponibilidad de 69,1%
- El sistema de tracción tiene una disponibilidad regular, teniendo su máxima en el año 2021 con un 95,6% y su mínima en el año 2022 con un 90,4%.

Confiabilidad

Tabla N°08: Confiabilidad

CONFIABILIDAD					
HORAS	Aire Acondicionado	Freno Mecánico	Tracción	Energía eléctrica	Puertas
0	100%	100%	100%	100%	100%
50	67,13%	79,63%	47,52%	82,30%	52,83%
100	45,07%	63,42%	22,59%	67,73%	27,91%
150	30,26%	50,50%	10,73%	55,74%	14,74%
200	20,31%	40,22%	5,10%	45,87%	7,79%
250	13,64%	32,03%	2,42%	37,75%	4,11%
300	9,15%	25,50%	1,15%	31,07%	2,17%
350	6,15%	20,31%	0,55%	25,57%	1,15%
400	4,13%	16,17%	0,26%	21,04%	0,61%
450	2,77%	12,88%	0,12%	17,32%	0,32%
500	1,86%	10,26%	0,06%	14,25%	0,17%

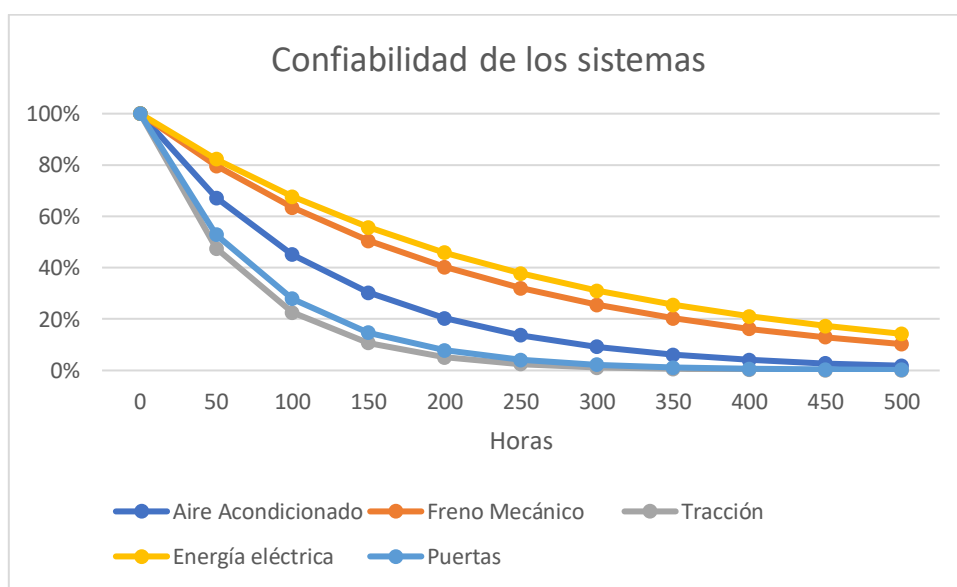
Fuente: Elaboración propia

La tabla N°08 evalúa la confiabilidad de los sistemas (según la ecuación 6) durante el período de un mes de servicio, el cual está expresado en horas, teniendo en cuenta que el servicio está disponible 16 horas diarias los 7 días de la semana.

Se observó que los sistemas con mayor confiabilidad al término del período fueron Energía eléctrica (14,25%) y Freno mecánico (10,26%), mientras que el sistema menos confiable resultó ser la tracción con tan solo un 0,06% de confiabilidad al término del período.

A continuación en la figura N°19 se muestra la confiabilidad de los sistemas.

Figura N°19: Confiabilidad de los sistemas



Fuente: Elaboración propia

Luego de obtener y analizar los resultados de los indicadores de mantenimiento se realizó un análisis de criticidad, con el objetivo de determinar las averías más críticas y así enfocarse en los modos de fallo de cada una de ellas.

6.2.3 Análisis de Criticidad

Para el Análisis de Criticidad, se utilizó el Modelo de Factores Ponderados basado en la teoría de riesgo, desarrollado por *The Woodhouse Partnership Limited* (1994). Este método está soportado con el concepto de riesgo: *frecuencia de falla x consecuencia*, es decir:

$$\textbf{Criticidad} = \textbf{Frecuencia} \times \textbf{Consecuencia}$$

Donde la **frecuencia** está asociada al número de fallas que presenta el sistema y la **consecuencia** está referida con el impacto de estas averías en las áreas de producción (Pr), calidad (Ca), costo de mantenimiento (Mtto), seguridad (Se) y flexibilidad (Fl), por lo que finalmente la criticidad es determinada a través de la siguiente ecuación:

$$\textit{Criticidad} = \textit{Frecuencia} \times ((Pr \times Fl) + Mtto + Se + Ca) \textit{ (ec. 23)}$$

6.2.4 Tabla de Factores ponderados de la Criticidad

La puntuación de los factores ponderados fue determinada por el staff de mantenimiento, para esto se les hizo entrega de un conjunto de fichas, separadas por averías (Ver Anexos).

Algunas de las puntuaciones de los factores ponderados se presentan a continuación:

- Impacto a la producción:

Tabla N°09 Impacto a la producción

IMPACTO A LA PRODUCCIÓN		
10	Muy peligroso	Tiene un impacto extremo en la producción
9		
8	Peligroso	Tiene un alto impacto en la producción
7		
6	Moderada	Tiene un moderado impacto en la producción
5		
4	Bajo	Tiene un bajo impacto en la producción
3		
2	Ninguna	No tiene impacto en la producción
1		

Fuente: Elaboración propia

- Impacto a la calidad:

Tabla N°10 Impacto a la calidad

IMPACTO A LA CALIDAD		
10	Muy peligroso	Afecta sobre todo a salud, seguridad y medioambiente
9		
8	Alta	Alta interrupción de las operaciones
7		
6	Moderada	Interrupción moderada de las operaciones
5		
4	Bajo	Interrupción menor de las operaciones
3		
2	Ninguna	No hay razón de impacto en la calidad
1		

Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Matriz de Criticidad

A partir de las fichas completadas por el staff de mantenimiento, se confeccionó la Matriz de Criticidad, para esto se toman los valores totales individuales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias y se ubican en la Matriz de Criticidad (Ver tabla N°11)

NC: área de sistemas no críticos

MC: área de sistemas de media criticidad

C: área de sistemas critico

Tabla N°11 Matriz de Criticidad Genérica

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		[0 – 10]	]10 – 20]	]20 – 30]	]30 – 40]	]40 – 50]
CONSECUENCIA						

Fuente: Elaboración propia

Se evaluó cada subsistema para determinar la criticidad de cada uno de ellos.

Subsistema evaluado: Aire acondicionado (AA)

Frecuencia: 3

Consecuencia: 34

Criticidad:102

Categoría de criticidad: criticidad media

Subsistema evaluado: Puertas (P)

Frecuencia: 3

Consecuencia: 27

Criticidad: 81

Categoría de criticidad: criticidad media

Subsistema evaluado: Energía eléctrica (EE)

Frecuencia: 3

Consecuencia: 40

Criticidad: 120

Categoría: crítica

Subsistema evaluado: Tracción (T)

Frecuencia: 3

Consecuencia: 41

Criticidad: 123

Categoría: crítica

Subsistema evaluado: Freno mecánico (FM)

Frecuencia: 2

Consecuencia: 34

Criticidad: 68

Categoría: criticidad media

Tabla N°12 Matriz de Criticidad

FRECUENCIA	4					
	3			AA - P	T - EE	
	2			FM		
	1					
		[0 – 10]	]10 – 20]	]20 – 30]	]30 – 40]	]40 – 50]
CONSECUENCIA						

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de criticidad (Ver tabla N°12), se concluye que existen dos averías críticas, las cuales son tracción y energía eléctrica.

A las averías mencionadas anteriormente se les realizó un análisis del método multicriterio TOPSIS-Fuzzy.

6.2.6 Análisis del método multicriterio TOPSIS-Fuzzy

Para realizar el método multicriterio TOPSIS-Fuzzy, primero se calcula el RPN clásico donde se utiliza la ocurrencia, severidad y detección para conocer el orden de prioridad de riesgo de cada modo de falla.

Luego, se toman los datos para determinar el FRPN, para esto se transformaron los resultados de la encuesta a números difusos triangulares, para posteriormente calcular sus números ideales y no ideales.

Finalmente, se obtuvo el índice de similitud y los resultados obtenidos son comparados con el RPN clásico.

Considerando lo anterior, se asignaron cinco variables lingüísticas a saber: muy bajo (MB), bajo (B), Moderado (M), Alto (A), y muy alto (MA), los cuales

asignaron a todos los factores influyentes el grado de riesgo, es decir, la gravedad, ocurrencia y detección.

A las variables obtenidas en el RPN clásico se le asignan rangos según la siguiente tabla:

Tabla N°13 Rangos RPN

Número fuzzy	Variable lingüística	Rango
(0.9,1,1)	MB	9,10
(0.7,0.85,1)	B	7,8,9,10
(0.4,0.6,0.8)	M	4,5,6,7,8
(0.2,0.35,0.5)	A	2,3,4,5
(0,0.15,0.3)	MA	1,2,3

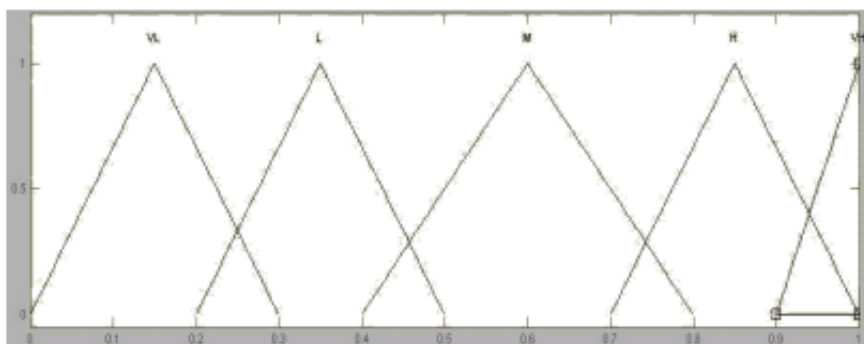
Fuente: Elaboración propia basado en Mazdak et al (2021)

$\{MB, B, M, A, MA\} = T(x)$ =conjunto de valores de las variables lingüísticas

$[0,1]=U$ =amplitud de variación del conjunto de referencia.

Función de pertenencia de las variables lingüísticas

Figura N°20: Función de pertenencia de las variables lingüísticas



Fuente: Mazdak et al (2021)

A continuación se aplica el método multicriterio TOPSIS-Fuzzy, para cada una de los sistemas críticos.

Tracción

RPN Clásico

Tabla N°14 RPN clásico tracción

MODO DE FALLA	OCURRENCIA	SEVERIDAD	DETECCION	NPR
FUSIBLE	8	6	7	308
ONDULADOR	7	7	8	368
SEGREGADOR	7	7	7	319
AISLADOR	6	8	7	308
RELÉ	6	6	6	182
CAPTOR	7	8	7	392
MOTOR	3	8	8	141
MOTOVENTILADOR	6	8	9	351
RESISTENCIA	6	6	7	234
PLATINA MFR	6	6	7	197
PANTÓGRAFO	4	9	8	252
TCU	6	7	8	289
COCI BUSBAR	5	7	6	210
PERNERÍA	5	4	5	88
CHOPPER	7	7	8	368

Fuente: Elaboración propia

Tras determinar las variables lingüísticas correspondientes para los valores, los números difusos de gravedad, ocurrencia y detección se definen mediante la función de pertenencia y de acuerdo con la tabla N°14. A continuación el FRPN se calcula según la tabla N°13, Finalmente, se utiliza el TOPSIS-Fuzzy para priorizarlos.

Tabla N°15 Transformación a número fuzzy triangulares tracción

MODO DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECCION
FUSIBLE	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)
ONDULADOR	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)
SEGREGADOR	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)
AI SLADOR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
RELÉ	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CAPTOR	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)
MOTOR	(0.7,0.85,1)	(0.2,0.35,0.5)	(0.7,0.85,1)
MOTOVENTILADOR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.9,1,1)
RESISTENCIA	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
PLATINA MFR	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
PANTÓGRAFO	(0.9,1,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
TCU	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
CO CI BUSBAR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
PERNERÍA	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CHOPPER	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)

Fuente: Elaboración propia

Tras determinar las variables lingüísticas de gravedad, ocurrencia y detección para los 15 modos de fallo más potenciales de la tracción, los valores fuzzy se sustituyen según la tabla N°15. A continuación, se calculan los FRPN.

Tabla N°16 FRPN tracción

MODO DE FALLA	FRPN (S*O*D)		
FUSIBLE	0,4335	0,196	0,8
ONDULADOR	0,614125	0,343	1
SEGREGADOR	0,614125	0,343	1
AISLADOR	0,4335	0,196	0,8
RELÉ	0,216	0,064	0,512
CAPTOR	0,614125	0,343	1
MOTOR	0,252875	0,098	0,5
MOTOVENTILADOR	0,51	0,252	0,8
RESISTENCIA	0,306	0,112	0,64
PLATINA MFR	0,306	0,112	0,64
PANTÓGRAFO	0,51	0,252	0,8
TCU	0,4335	0,196	0,8
COCI BUSBAR	0,306	0,112	0,64
PERNERÍA	0,216	0,064	0,512
CHOPPER	0,614125	0,343	1

Fuente: Elaboración propia

Luego, los 15 modos de fallo más potenciales se priorizan utilizando el TOPSIS-Fuzzy. Los criterios se consideran positivos y cada miembro se divide en el número máximo de cada columna para normalizarlo (ver Tabla N°17)

Tabla N°17 #FRPN tracción

#FRPN	
FUSIBLE	(0.4335,0.196,0.8)
ONDULADOR	(0.614125,0.343,1)
SEGREGADOR	(0.614125,0.343,1)
AISLADOR	(0.4335,0.196,0.8)
RELÉ	(0.216,0.064,0.512)
CAPTOR	(0.614125,0.343,1)
MOTOR	(0.252875,0.098,0.5)
MOTOVENTILADOR	(0.51,0.252,0.8)
RESISTENCIA	(0.306,0.112,0.64)
PLATINA MFR	(0.306,0.112,0.64)
PANTÓGRAFO	(0.51,0.252,0.8)
TCU	(0.4335,0.196,0.8)
COCI BUSBAR	(0.306,0.112,0.64)
PERNERÍA	(0.216,0.064,0.512)
CHOPPER	(0.614125,0.343,1)

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del FRPN normalizado

Tabla N°18 FRPN normalizado tracción

MODO DE FALLA	FRPN NORMALIZADO
FUSIBLE	(0.705882352941176,0.571428571,1)
ONDULADOR	(1,1,1.25)
SEGREGADOR	(1,1,1.25)
AISLADOR	(0.705882352941176,0.571428571,1)
RELÉ	(0.351719926725015,0.186588921,0.64)
CAPTOR	(1,1,1.25)
MOTOR	(0.411764705882353,0.285714286,0.625)
MOTOVENTILADOR	(0.830449826989619,0.734693878,1)
RESISTENCIA	(0.498269896193772,0.326530612,0.8)
PLATINA MFR	(0.498269896193772,0.326530612,0.8)
PANTÓGRAFO	(0.830449826989619,0.734693878,1)
TCU	(0.705882352941176,0.571428571,1)
COCI BUSBAR	(0.498269896193772,0.326530612,0.8)
PERNERÍA	(0.351719926725015,0.186588921,0.64)
CHOPPER	(1,1,1.25)

Fuente: Elaboración propia

Luego, calculando la proximidad a las soluciones ideales, no ideales y el índice de similitud:

Tabla N°19 Distancias e índice de similitud tracción

MODO DE FALLA	DISTANCIA IDEAL	DISTANCIA NO IDEAL	INDICE DE SIMILITUD
FUSIBLE	0,300099239	0,779914634	0,722133904
ONDULADOR	0,144337567	1,089724736	0,883038671
SEGREGADOR	0,144337567	1,089724736	0,883038671
AISLADOR	0,300099239	0,779914634	0,722133904
RELÉ	0,635480038	0,435171358	0,406454762
CAPTOR	0,144337567	1,089724736	0,883038671
MOTOR	0,57644018	0,462532098	0,445182329
MOTOVENTILADOR	0,181782471	0,862056071	0,825851927
RESISTENCIA	0,498428903	0,575874735	0,536044666
PLATINA MFR	0,498428903	0,575874735	0,536044666
PANTÓGRAFO	0,181782471	0,862056071	0,825851927
TCU	0,300099239	0,779914634	0,722133904
COCI BUSBAR	0,498428903	0,575874735	0,536044666
PERNERÍA	0,635480038	0,435171358	0,406454762
CHOPPER	0,144337567	1,089724736	0,883038671

Fuente: Elaboración propia

La prioridad de las actividades se obtiene de la siguiente manera:

Tabla N°20 Jerarquización de actividades tracción

TRACCIÓN			
DIFUSA		CLÁSICA	
Prioridad	Sistema	Prioridad	Sistema
1	Ondulador	1	Captor
1	Segregador	2	Ondulador
1	Captor	2	Chopper
1	Chopper	3	Motoventilador
2	Motoventilador	4	Segregador
2	Pantógrafo	5	Fusible
3	Fusible	5	Aislador
3	Aislador	6	TCU
3	TCU	7	Pantógrafo
4	Resistencia	8	Resistencia
4	Platina MFR	9	Coci busbar
4	Coci busbar	10	Platina MFR
5	Motor	11	Relé
6	Relé	12	Motor
6	Pernería	13	Pernería

Fuente: Elaboración propia

Energía eléctrica

RPN CLÁSICO

Tabla N°21 RPN clásico energía eléctrica

MODO DE FALLA	OCURRENCIA	SEVERIDAD	DETECCION	NPR
ENCENDEDORA	7	7	6	273
FILTROS	7	7	6	250
ONDULADOR CVS	7	8	6	315
CONV. 1010/24	5	7	5	163
CAPTOR	5	7	5	163
BOLSA	7	6	6	215
MANDO CVS	6	8	6	227
CARGADOR BATERÍA	6	9	7	357
TARJETA TJ1	6	8	5	206
MOTOVENTILADOR	6	8	6	227
RELE	6	7	5	189
CHOPPER CVS	7	9	6	357
CONTACTOR	5	7	5	158
CABLE DAÑADO	3	8	4	90
RIOM	6	8	5	225

Fuente: Elaboración propia

Tras determinar las variables lingüísticas correspondientes para los valores, los números fuzzy de gravedad, ocurrencia y detección se definen mediante la función de pertenencia y de acuerdo con la tabla N°21. A continuación el FRPN se calcula según la tabla N°13, Finalmente, se utiliza el TOPSIS-Fuzzy para priorizarlos.

Tabla N°22 Transformación a número fuzzy triangular energía eléctrica

MODO DE FALLA	SEVERIDAD	OCURRENCIA	DETECCION
ENCENDEDORA	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)
FILTROS	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)
ONDULADOR CVS	(0.7,0.85,1)	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)
CONV. 1010/24	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CAPTOR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
BOLSA	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)
MANDO CVS	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CARGADOR BATERÍA	(0.9,1,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.7,0.85,1)
TARJETA TJ1	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
MOTOVENTILADOR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
RELE	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CHOPPER CVS	(0.9,1,1)	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)
CONTACTOR	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)
CABLE DAÑADO	(0.7,0.85,1)	(0.2,0.35,0.5)	(0.4,0.6,0.8)
RIOM	(0.7,0.85,1)	(0.4,0.6,0.8)	(0.4,0.6,0.8)

Fuente: Elaboración propia

Tras determinar las variables lingüísticas de gravedad, ocurrencia y detección para los 15 modos de fallo más potenciales de la energía eléctrica, los valores fuzzy se sustituyen según la tabla N°22. A continuación, se calculan los FRPN.

Tabla N°23 FRPN energía eléctrica

MODO DE FALLA	FRPN (O*S*D)		
ENCENDEDORA	0,4335	0,196	0,8
FILTROS	0,4335	0,196	0,8
ONDULADOR CVS	0,4335	0,196	0,8
CONV. 1010/24	0,306	0,112	0,64
CAPTOR	0,306	0,112	0,64
BOLSA	0,306	0,112	0,64
MANDO CVS	0,306	0,112	0,64
CARGADOR BATERÍA	0,51	0,252	0,8
TARJETA TJ1	0,306	0,112	0,64
MOTOVENTILADOR	0,306	0,112	0,64
RELE	0,306	0,112	0,64
CHOPPER CVS	0,51	0,252	0,8
CONTACTOR	0,306	0,112	0,64
CABLE DAÑADO	0,1785	0,056	0,4
RIOM	0,306	0,112	0,64

Fuente: Elaboración propia

Luego, los 15 modos de fallo más potenciales se priorizan utilizando el TOPSIS-Fuzzy. Los criterios se consideran positivos y cada miembro se divide en el número máximo de cada columna para normalizarlo (ver Tabla N°24).

Tabla N°24 #FRPN energía eléctrica

#FRPN	
ENCENDEDORA	(4.335,0.196,0.8)
FILTROS	(0.4335,0.196,0.8)
ONDULADOR CVS	(0.4335,0.196,0.8)
CONV. 1010/24	(0.306,0.112,0.64)
CAPTOR	(0.306,0.112,0.64)
BOLSA	(0.306,0.112,0.64)
MANDO CVS	(0.306,0.112,0.64)
CARGADOR BATERÍA	(0.51,0.252,0.8)
TARJETA TJ1	(0.306,0.112,0.64)
MOTOVENTILADOR	(0.306,0.112,0.64)
RELE	(0.306,0.112,0.64)
CHOPPER CVS	(0.51,0.252,0.8)
CONTACTOR	(0.306,0.112,0.64)
CABLE DAÑADO	(0.1785,0.056,0.4)
RIOM	(0.306,0.112,0.64)

Fuente: Elaboración propia

Cálculo del FRPN normalizado

Tabla N°25 FRPN normalizado energía eléctrica

MODO DE FALLA	FRPN NORMALIZADO
ENCENDEDORA	(0.85,0.777777778,1)
FILTROS	(0.85,0.777777778,1)
ONDULADOR CVS	(0.85,0.777777778,1)
CONV. 1010/24	(0.6,0.444444444,0.8)
CAPTOR	(0.6,0.444444444,0.8)
BOLSA	(0.6,0.444444444,0.8)
MANDO CVS	(0.6,0.444444444,0.8)
CARGADOR BATERÍA	(1,1,1)
TARJETA TJ1	(0.6,0.444444444,0.8)
MOTOVENTILADOR	(0.6,0.444444444,0.8)
RELE	(0.6,0.444444444,0.8)
CHOPPER CVS	(1,1,1)
CONTACTOR	(0.6,0.444444444,0.8)
CABLE DAÑADO	(0.35,0.222222222,0.5)
RIOM	(0.6,0.444444444,0.8)

Fuente: Elaboración propia

Luego, calculando la proximidad a las soluciones ideales, no ideales y el índice de similitud:

Tabla N°26 Distancias e índice de similitud energía eléctrica

MODO DE FALLA	DISTANCIA IDEAL	DISTANCIA NO IDEAL	INDICE DE SIMILITUD
ENCENDEDORA	0,154793105	0,880802337	0,850527437
FILTROS	0,154793105	0,880802337	0,850527437
ONDULADOR CVS	0,154793105	0,880802337	0,850527437
CONV. 1010/24	0,411761248	0,631804523	0,605428561
CAPTOR	0,411761248	0,631804523	0,605428561
BOLSA	0,411761248	0,631804523	0,605428561
MANDO CVS	0,411761248	0,631804523	0,605428561
CARGADOR BATERÍA	0	1	1
TARJETA TJ1	0,411761248	0,631804523	0,605428561
MOTOVENTILADOR	0,411761248	0,631804523	0,605428561
RELE	0,411761248	0,631804523	0,605428561
CHOPPER CVS	0	1	1
CONTACTOR	0,411761248	0,631804523	0,605428561
CABLE DAÑADO	0,652543299	0,375003429	0,364950244
RIOM	0,411761248	0,631804523	0,605428561

Fuente: Elaboración propia

La prioridad de las actividades se obtiene de la siguiente manera:

Tabla N°27 Jerarquización de actividades energía eléctrica

ENERGÍA ELÉCTRICA			
DIFUSA		CLÁSICA	
Prioridad	Sistema	Prioridad	Sistema
1	Cargador de batería	1	Cargador de batería
1	Chopper CVS	1	Chopper CVS
2	Encendedora	2	Ondulador CVS
2	Filtros	3	Encendedora
2	Ondulador CVS	4	Filtros
3	Conv. 1010/24	5	Mando CVS
3	Captor	5	Motoventilador
3	Bolsa	6	RIOM
3	Mando CVS	7	Bolsa
3	Tarjeta TJI	8	Tarjeta TJI
3	Motoventilador	9	Relé
3	Relé	10	Conv. 1010/24
3	Contactor	10	Captor
3	RIOM	11	Contactor
4	Cable dañado	12	Cable dañado

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VII

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Dada la importancia de reconocer los factores de riesgo y su multiplicidad, es importante priorizarlos (Khodadadi-Karimvand y Shirouyehzad, 2021). Este estudio presentó un nuevo enfoque para respaldar la priorización y el análisis de riesgos, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la gestión de mantenimiento del material rodante de la filial EFE Valparaíso. El modelo propuesto combina el Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF) con el método TOPSIS-FUZZY desarrollado originalmente por Ching-Lai Hwang y Yoon en 1981.

El modelo propuesto cuenta con tres momentos (ver figura N°13), el primer momento se encarga de coleccionar los datos y analizar los modos de fallas, el segundo momento del modelo lo constituye la aplicación de la técnica TOPSIS-FUZZY y el último momento está centrado en jerarquizar los modos de fallas y prepara el plan de acción.

Análisis Exploratorio e indicadores de mantenibilidad

El primer paso en este derrotero fue analizar una base de datos o matriz de diseño, entregada por EFE Valparaíso, la cual contaba con información detallada de los tipos de averías, de los tipos de fallas, de las horas del material rodante en el taller, ente otras tantas variables asociadas a la gestión de mantenimiento de EFE Valparaíso. A partir de este análisis y junto al staff de mantenimiento se

seleccionaron las cinco funciones o sistemas que presentaban averías con mayor frecuencia, a saber: *Aire Acondicionado*, *Energía Eléctrica*, *Freno mecánico*, *Puertas y Tracción*.

A estos cinco sistemas se les realizó un análisis exploratorio y se les calculó un conjunto de indicadores de mantenibilidad durante el periodo 2019-2022, los resultados sugieren que el sistema de puertas muestra el mayor tiempo promedio de inactividad, con 449,8 horas promedio anual, por su parte el sistema de tracción presenta el mayor número de averías promedio con 71,3 averías anuales (ver tabla N°04). Por otro lado, con respecto a los indicadores de mantenibilidad el estudio revela que el tiempo medio entre fallas (MTBF) ha mostrado un decrecimiento sostenido entre los años 2019 y 2022 (ver figura N°16), lo que muestra un mayor número de detenciones del sistema durante el año, fenómeno que redundará en un aumento de los costos económicos y sociales, por su parte el indicador que mide el tiempo medio de reparación (MTTR) muestra un comportamiento zigzagueante en los cinco sistemas (ver tabla N°06), siendo la tracción la que presenta un MTTR promedio más bajo con 4,82 horas, por su parte el freno mecánico es el sistema con un tiempo promedio de reparación mayor, con 12,89 horas.

En términos de la disponibilidad de los sistemas, el estudio reveló que el sistema de tracción mostró una mayor disponibilidad con un 92,93% promedio anual, mientras que el sistema de puertas fue el que estuvo menos disponible, con un 83,53%. Finalmente y en términos de la confiabilidad, los resultados de la investigación muestran que si mantenemos constante el tiempo de evaluación, el sistema que presenta una mayor confiabilidad, es el sistema de energía eléctrica con una confiabilidad de un 67,73% de que no falle antes de las próximas 100 horas, mientras que la tracción sólo muestra una confiabilidad de un 22,59% de que no

falle antes de las próximas 100 horas, siendo este el sistema menos confiable (ver tabla N°08).

Análisis de modo y efecto de fallos y TOPSIS-FUZZY

En este punto de la investigación y con el objetivo de analizar la criticidad de los sistemas estudiados se aplicó, al staff de mantenimiento de la empresa, una batería de instrumentos. Los resultados obtenidos mostraron que tres de los cinco sistemas presentaban una criticidad media (aire acondicionado, puertas y freno mecánico) y los otros dos sistemas (tracción y energía eléctrica) se presentaron en estado crítico, con una criticidad de 123 y 120 respectivamente (ver tabla N°12), a partir de este hallazgo la investigación centró su atención en estos dos últimos sistemas.

De estos dos sistemas se obtuvieron los 15 modos de fallas más recurrentes para su análisis, el cual consistió en un principio en determinar el número de prioridad de riesgo clásico RPN, técnica que permitió jerarquizar las fallas en el sistema, los resultados obtenidos de este proceso fueron:

- **Tracción:** Captor (1), Ondulador y Chopper (2), Motoventilador (3), Segregador (4), Fusible y Aislador (5), TCU (6), Pantógrafo (7), Resistencia (8), Coci busbar (9), Platina MFR (10), Relé (11), Motor (12), Pernería (13).
- **Energía eléctrica:** Cargador batería y Chopper CVS (1), Ondulador CVS (2), Encendedora (3), Filtros (4), Mando CVS y Motoventilador (5), RIOM (6), Bolsa (7), Tarjeta TJ1 (8), Relé (9), Conv. 1010/24 y Captor (10), Contactor (11), Cable dañado (12).

Una de las críticas que se ha realizado a esta técnica es el uso de valores numéricos *deterministas*, que no permiten la cuantificación de medidas inciertas o

imprecisas, inherentes al proceso de evaluación de riesgos, es por esto que se llevó a cabo el orden de prioridad de riesgo con una metodología difusa FRPN y análisis TOPSIS-FUZZY, en donde se determinaron las siguientes jerarquizaciones de fallas en los sistemas a través del indicador de similitud:

- **Tracción:** Ondulador, Segregador, Captor, Chopper (1), Motoventilador, Pantógrafo (2), Fusible, Aislador, TCU (3), Resistencia, Platina MFR, Coci busbar (4), Motor (5), Relé, Pernería (6).
- **Energía eléctrica:** Cargador de batería y Chopper CVS (1), Encendedora, Filtros y Ondulador CVS (2), Conv. 1010/24, Captor, Bolsa, Mando CVS, Tarjeta TJ1, Motoventilador, Relé, Contactor, RIOM (3), Cable dañado (4).

Estos resultados sugieren que las fallas “Ondulador, Segregador, Captor, Chopper” del Sistema de Tracción y las fallas “Cargador de batería y Chopper CVS” del Sistema de Energía Eléctrica deben tratarse con la máxima prioridad.

El enfoque propuesto es una alternativa para eludir las limitaciones del modelo clásico de jerarquización de riesgo, en este sentido, algunas de las contribuciones de este estudio al análisis y priorización de riesgos son: (1) la posibilidad de considerar los pesos (nivel de importancia) de diferentes criterios; (2) apoya decisiones en escenarios de incertidumbre mediante el uso de términos lingüísticos y números fuzzy para expresar los juicios del staff de mantenimiento y (3) apoya la toma de decisiones en grupo, de modo que considere el conocimiento y la experiencia de expertos de diferentes áreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ab-Samat, H., Jeikumar, L. N., Basri, E. I., Harun, N. A., & Kamaruddin, S. (2012). *Effective preventive maintenance scheduling: a case study. In Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 3-6).
- Amendola, L. (2003). Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento. *Departamento de Proyectos de Ingeniería Universidad Politécnica de Valencia*.
- Barreda Beltrán, S. (2015). Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) en la EDAR de Nules-Vilavella.
- Bjorklund, S., Pribytkova, M., & Karaulova, T. (2010). Development the maintenance plan: maintenance activities on operational level. *In Proceedings of the 7th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering* (pp. 1-2).
- Brevis, H. R., Urriola, J. C., Weisser, J. A., & Brevis, M. R. (2020). Viajeros interurbanos en un contexto patrimonial ferroviario. *Revista de Urbanismo*, (43), 63-78.
- Carpinetti, L. C. R. (2016). *Gestão da qualidade: conceitos e técnicas* (3. ed.). São Paulo: Grupo Gen-Atlas.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy sets and systems*, 114(1), 1-9.
- Chen, C. T., & Cheng, H. L. (2009). A comprehensive model for selecting information system project under fuzzy environment. *International Journal of Project Management*, 27(4), 389-399.
- Chen, Z., He, Y., Zhao, Y., Han, X., Liu, F., Zhou, D., & Wang, W. (2019). Mission reliability-oriented selective maintenance optimization for intelligent multistate manufacturing systems with uncertain maintenance quality. *IEEE Access*, 7, 109804-109816.
- Ciani, L., Guidi, G., Patrizi, G., & Galar, D. (2021). Condition-based maintenance of HVAC on a high-speed train for fault detection. *Electronics*, 10(12), 1418.
- Correa Díaz, G. (2010). Transporte y ciudad. *EURE (Santiago)*, 36(107), 133-137.

- Ebrahimnejad, S., Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hashemi, H., & Vahdani, B. (2012). A novel two-phase group decision making approach for construction project selection in a fuzzy environment. *Applied Mathematical Modelling*, 36(9), 4197-4217.
- Efe Valparaíso (2021). Marco Normativo. Normas de constitución de la empresa y normas relativas a funciones y responsabilidades.
- Falcone, D., Silvestri, A., & Duraccio V. (2003). MKBF, MKTR: NEW INDEXES FOR THE MAINTENANCE MANAGEMENT IN TRANSPORT.
- Fischer, K., Besnard, F., & Bertling, L. (2011). Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 184-195.
- IEC, N. (2009). Dependability management–Part 3-11: Application guide–Reliability centred maintenance. *BRITISH STANDARD*.
- Jaimes, J. E. S., Ochoa, J. A. V., & Camacho, E. A. A. (2017). Análisis de criticidad y árboles de diagnóstico de fallas para transformadores de potencia. *Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada (Rcta)*, 1(27), 104-111.
- Khodadadi-Karimvand, M., & Shirouyehzad, H. (2021). Well drilling fuzzy risk assessment using fuzzy FMEA and fuzzy TOPSIS. *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, 2(2), 144-155.
- Khorshidi, H. A., Gunawan, I., & Ibrahim, M. Y. (2015). Reliability centered maintenance using system dynamics approach. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1932-1936). IEEE.
- Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: a literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828-838. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>.
- López de Castaneda, N. (2011). Importancia de los indicadores y la medición del quehacer científico.
- Maleki, H., & Saadat, Y. (2013). Comparison of failure mode and effects analysis by using AHP vs. REMBRANDT system. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 14(1), 5-19. <http://dx.doi.org/10.1504/IJISE.2013.052918>.
- Moubray, J. (2004). Mantenimiento centrado en confiabilidad. *Gran Bretaña: Aladon ltda*.

- Murthy, D. N. P., Atrens, A., & Eccleston, J. A. (2002). Strategic maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Pandey, A., & Sonwane, P. M. (2016). Implementation of reliability centred maintenance for transformer. In *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)* (pp. 578-581). IEEE.
- Peña-Prado, K., Rey de Castro, J., & Talaverano-Ojeda, A. (2020). Factores asociados a somnolencia diurna en conductores de transporte público de Lima Metropolitana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 36, 629-635.
- Rahim, R., Siahaan, A. P. U., Wijaya, R. F., Hantono, H., Aswan, N., Thamrin, S., ... & Sujarwo, S. (2018). Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method for decision support system in top management. *Pro Mark*, 8(2).
- Simões, J. M., Gomes, C. F., & Yasin, M. M. (2011). A literature review of maintenance performance measurement: A conceptual framework and directions for future research. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*.
- Söderholm, P., Holmgren, M., & Klefsjö, B. (2007). A process view of maintenance and its stakeholders. *Journal of quality in maintenance engineering*.
- Solari, F., Morales, M., Herrera, A., Carrasco, H., & Parra, C. (2021) Técnicas de auditoría para los procesos de mantenimiento, fiabilidad operacional y gestión de activos: AMORMS & AMS-ISO 55001. Caso de estudio: Sector Ferroviario.
- Tahmasseby, S. (2009). Reliability in urban public transport network assessment and design.
- Tirapong, K., & Titti, S. (2014). Reliability improvement of distribution system using Reliability Centered Maintenance. In *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition* (pp. 1-5). IEEE.
- Valdivieso Torres, J. C. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Extruplas SA* (Bachelor's thesis).
- Vicente Cestero, E. (2013). *Un enfoque borroso para el análisis y la gestión de riesgos en los sistemas de información* (Doctoral dissertation, Informática).

- Wan, S. P., & Li, D. F. (2013). Fuzzy LINMAP approach to heterogeneous MADM considering comparisons of alternatives with hesitation degrees. *Omega*, 41(6), 925-940.
- Yssaad, B., & Abene, A. (2015). Rational reliability centered maintenance optimization for power distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 350-360.
- Zadeh, L.A., (1965). Fuzzysets. *Infect. Control* 8,338–353.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249.
- Zakikhani, K., Nasiri, F., & Zayed, T. (2020). Availability-based reliability-centered maintenance planning for gas transmission pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 183, 104105.

ANEXOS

Tabla de factores ponderados de la criticidad

- Impacto a la producción:

Tabla N°01 Impacto a la producción

IMPACTO A LA PRODUCCIÓN		
10	Muy peligroso	Tiene un impacto extremo en la producción
9		
8	Peligroso	Tiene un alto impacto en la producción
7		
6	Moderada	Tiene un moderado impacto en la producción
5		
4	Bajo	Tiene un bajo impacto en la producción
3		
2	Ninguna	No tiene impacto en la producción
1		

Fuente: Elaboración propia

- Impacto a la calidad:

Tabla N°02 Impacto a la calidad

IMPACTO A LA CALIDAD		
10	Muy peligroso	Afecta sobre todo a salud, seguridad y medioambiente
9		
8	Alta	Alta interrupción de las operaciones
7		
6	Moderada	Interrupción moderada de las operaciones
5		
4	Bajo	Interrupción menor de las operaciones
3		
2	Ninguna	No hay razón de impacto en la calidad
1		

Fuente: Elaboración propia

- Costo de mantenimiento:

Tabla N°03 Costo de mantenimiento

COSTO DE MANTENIMIENTO		
10	Muy alto	Tiene un costo de mantenimiento muy alto
9		
8	Alto	Tiene un alto costo de mantenimiento
7		
6	Moderado	Tiene un moderado costo de mantenimiento
5		
4	Bajo	Tiene un bajo costo de mantenimiento
3		
2	Muy bajo	Tiene un costo de mantenimiento muy bajo
1		

Fuente: Elaboración propia

- Impacto a la seguridad/severidad:

Tabla N°04 Impacto a la seguridad/severidad

IMPACTO A LA SEGURIDAD/SEVERIDAD		
10	Muy peligroso	Afecta sobre todo a salud, seguridad y medioambiente
9		
8	Alta	Alta interrupción de las operaciones
7		
6	Moderado	Interrupción moderada de las operaciones
5		
4	Bajo	Interrupción menor de las operaciones
3		
2	Ninguno	No hay razón para que ocurran fallos
1		

Fuente: Elaboración propia

- Flexibilidad:

Tabla N°05 Flexibilidad

FLEXIBILIDAD	
10	La función no se puede reemplazar
9	
8	La función se puede reemplazar con muchas limitaciones
7	
6	La función se puede reemplazar con moderadas limitaciones
5	
4	La función se puede reemplazar con pocas limitaciones
3	
2	Existe Stand By
1	

Fuente: Elaboración propia

- Frecuencia de falla/ocurrencia:

Tabla N°06 Frecuencia de falla/ocurrencia

FRECUENCIA DE FALLA/OCURRENCIA		
10	Extremadamente alta	Muy alta probabilidad de fallo
9		
8	Alta	Alta probabilidad de fallo
7		
6	Moderada	Fallo moderado
5		
4	Bajo	Baja probabilidad de fallo
3		
2	Caso raro de ocurrencia	No se espera que falle
1		

Fuente: Elaboración propia

- Detección:

Tabla N°07 Detección

DETECCIÓN		
10	Muy alta posibilidad de que el defecto llegue al cliente	91 al 100%
9		81 al 90%
8	Alta posibilidad de que el defecto llegue al cliente	71 al 80%
7		61 al 70%
6	Es probable que el defecto llegue al cliente	51 al 60%
5		41 al 50%
4	Posibilidades entre baja y moderada de que el defecto llegue al cliente	31 al 40%
3		21 al 30%
2	Poca posibilidad de que el defecto llegue al cliente	11 al 20%
1		0 al 10%

Fuente: Elaboración propia