UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE MATRIZ CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico Automotriz

"DESARROLLO DE METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE ÍNDICES DE MANTENIMIENTO CMD PARA SISTEMAS FERROVIARIOS"

AUTOR:

Christian Fernando Torres Torres

DIRECTOR:

Ing. Renato Fierro J. Mgtr.

Cuenca, Mayo 2016

CERTIFICO

Que el presente trabajo de titulación *"Desarrollo de Metodología para la Implementación de Índices de Mantenimiento CMD para Sistemas Ferroviarios"*, realizado por el estudiante: CHRISTIAN FERNANDO TORRES TORRES, fue dirigido por mi persona.

Ing. Pablo Renato Fierro J.

DECLARATORIA

El trabajo de grado que se presenta, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecida en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. En tal virtud los fundamentos técnicos – científicos y los resultados son exclusiva responsabilidad del autor.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Christian Fernando Torres Torres

DEDICATORIA

Después de un largo y arduo recorrer veo realizarse aquel sueño que nació en mi infancia, con el apoyo y compañía de grandes personas; por lo que dedico este trabajo a toda mi familia, pero principalmente a mis padres Félix y Nube; y, a mis padrinos Flavio y María.

“Daría todo lo que sé, por la mitad de lo que ignoro”. René Descartes

AGRADECIMIENTO

A mis padres por darme la vida, educación, valores y principios para luchar por mis sueños e ideales, pero sobre todo por darme todo su amor.

A mis hermanos Katerine, Alex, Adrián, Henry, Pedro y Jairo, por ser mis primeros y mejores amigos en la vida; y estar siempre en cada momento de ella.

A todos aquellos amigos de la Universidad, colegio, escuela, barrio, fútbol y tocadas que han hecho que merezca la pena el llegar hasta este punto.

De manera especial al Ing. Renato Fierro por su entera disposición y paciencia en la colaboración, seguimiento, guía, y asesoramiento en la realización del presente trabajo.

Y finalmente… a mí, por el esfuerzo, trabajo y dedicación prestados a lo largo de todos estos años durante mi preparación profesional.

¡Gracias infinitas!

RESUMEN

La necesidad de desarrollar una metodología surge de la reciente introducción al medio de transporte urbano de pasajeros del país los sistemas ferroviarios de tracción eléctrica como solución a los problemas de movilidad en las principales ciudades. Al ser estos proyectos innovadores, no cuentan con índices confiables y estandarizados que permitan la evaluación de la gestión de mantenimiento del sistema. Un estudio de índices CMD permite a los sistemas ferroviarios lograr un nivel definido de tráfico en un tiempo dado y de forma segura.

El objetivo principal del presente trabajo de titulación es investigar y desarrollar una metodología que permita la implementación de índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD) en sistemas ferroviarios urbanos con tracción eléctrica para la evaluación de su gestión de mantenimiento.

La metodología usada es netamente investigativa y recopilatoria. En dónde, primeramente se reúne información acerca de los índices de mantenimiento, sus relaciones matemáticas y de distribución; y también se realiza una conceptualización acerca de los sistemas ferroviarios. Después se reúne información acerca de las características de servicio de los principales medios de transporte férreo en Latinoamérica; esto, para a través de una matriz técnica poder realizar una caracterización general de su estructura. Una vez que se ha definido la estructura, se realiza una codificación de los diferentes sistemas, subsistemas y componentes establecidos para poder tener una mejor identificación de los mismos y poder establecer las fórmulas generales para el cálculo CMD de cada uno de ellos.

Entonces, basado en la definición de los tiempos de mantenimiento dentro de un proceso productivo y en la norma ISO/TR10017:2003 se justifica el uso de la distribución de Weibull para el análisis estadístico y probabilístico de los índices. Se indica el procedimiento para la estimación de los parámetros de dicha distribución tanto para Confiabilidad, como para Mantenibilidad, y a través de las cuales se llega

a la Disponibilidad; mediante un correcto manejo de la información necesaria para realizar el cálculo pertinente.

Como resultado se obtiene el proceso de la metodología para realizar la implementación de índices de mantenimiento CMD en sistemas ferroviarios de determinadas características, que a través de su implementación se obtiene la evaluación de la gestión de mantenimiento y permitirá al sistema una mejora continua a lo largo de su ciclo de vida.

ABSTRACT

The necessity to develop a methodology comes from the recent introduction into the urban transport of passengers in the country of rail electric traction systems as a solution to the problems of mobility in the principal cities. As these are innovative projects, they don't have reliable and standardized indicators for evaluating the maintenance management of the system. A study of indices RAM allows to rail systems get a defined level of traffic in a safety way.

The primary objective of this work is the research and develop a methodology that allows to implement Reliability, Maintainability and Availability indexes (RAM) in electric traction rail systems for evaluating their maintenance management

The methodology used is purely research and compilation, where, firstly, information about maintenance indicators is gathered together, their mathematical relationships and distribution; and a conceptualization about rail systems is also performed. After information about the service features of the main ways of rail transport in Latin America was reviewed; this will allow to perform a general characterization of its structure through an array method. Once the structure was defined, the coding of different systems, subsystems and components was done in order to establish a better way to identify them and to establish the general mathematical expressions to calculate RAM.

Then, based on the definition of maintenance times of a production process and in ISO / TR10017: 2003 standard, the use of Weibull distribution for statistical and probabilistic analysis of the indices is justified. The procedure for estimating the parameters of this distribution both reliability, maintainability, and through which reach the Availability indexes; through a proper management of information necessary to perform the relevant calculation.

As a result, the process of the methodology to implement maintenance indicators RAM in rail system of a determinate characteristics is obtained, that through its implementation, the evaluation of the maintenance management will allow to the system a continuous improvement over its life cycle.

ÍNDICE GENERAL

Introducción……1

1 Problema……3

1.1 Antecedentes……...3

1.2 Importancia y alcances……3

1.3 Delimitación……..……..4

2 Objetivos……5

2.1 Objetivo general……..……5

2.2 Objetivos específicos……..……5

3 Fundamentos teóricos……...6

3.1 Introducción……....6

3.2 Índices de mantenimiento……...6

3.2.1 Índice……..……...6

3.3 Confiabilidad……..……6

3.3.1 Definición……..……...6

3.3.1.1 Desempeño satisfactorio……..……7

3.3.1.2 Período de tiempo……..……7

3.3.1.3 Condiciones específicas de operación……..……7

3.3.2 Importancia……..……8

3.4 Mantenibilidad……..……..8

3.4.1 Definición……..……...9

3.4.2 Importancia……..……9

3.5 Disponibilidad…….....9

3.5.1 Definición…….....9

3.5.2 Importancia……10

3.6 Relación entre Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad……..10

3.7 Métodos de predicción CMD……11

3.7.1 Distribución de Weibull……..11

3.7.1.1 Eta……...12

3.7.1.2 Gamma……12

3.7.1.3 Beta……12

3.7.2 Medidas de Confiabilidad……...12

3.7.2.1 Función de confiabilidad……12

3.7.2.2 Función de distribución de fallas acumuladas……....13
3.7.2.3 Función de densidad de probabilidad de fallas……...13
3.7.2.4 Función de tasa de fallas……...……..13
3.7.3 Medidas de Mantenibilidad……13
3.7.3.1 Función de mantenibilidad……..13
3.7.3.2 Tiempo medio de reparación...……...14
3.7.4 Medidas de Disponibilidad……14
3.7.4.1 Disponibilidad inherente……14
3.7.4.2 Disponibilidad alcanzada……14
3.7.4.3 Disponibilidad operacional……15
3.7.4.4 Disponibilidad operacional generalizada……16
3.8 Sistemas ferroviarios……16
3.8.1 Reseña histórica……..16
3.8.2 Clasificación de sistemas ferroviarios……...……17
3.8.2.1 Servicio de pasajeros……...17
3.8.2.1.1 Sistemas ferroviarios ligeros……18
3.8.2.1.2 Sistemas ferroviarios pesados……...18
3.8.2.2 Servicio de carga……19
3.8.2.3 Trenes de Levitación Magnética o de Tipo Maglev……...…19
3.8.3 Infraestructura……19
3.8.3.1 Obras de fábrica……..20
3.8.3.2 Trazado ferroviario……20
3.8.4 Superestructura……...21
3.8.4.1 La vía……...……...21
3.8.4.1.1 Ancho de vía……...……..21
3.8.4.1.2 El carril……..22
3.8.4.1.3 El balasto……...22
3.8.4.1.4 La traviesa……23
3.8.4.1.5 Sujeciones……23
3.8.4.2 La vía en placa……24
3.8.4.3 Aparatos de vía……...……24
3.8.4.3.1 Desvíos o cambios……...……24
3.8.4.3.2 Travesía……24
3.8.4.3.3 Cambios de agujas……...……25

3.8.5 Material rodante……..25
3.8.5.1 Locomotoras eléctricas……...……25
3.8.5.2 Tecnologías de tracción eléctrica……..…….26
3.8.5.3 El circuito eléctrico de tracción ferroviaria……...…….26
3.8.6 Sistemas de electrificación ferroviaria……27
3.8.7 Captación de corriente……...…27
3.8.7.1 Catenaria…….28
3.8.7.1.1 Línea tranviaria…….28
3.8.7.1.2 Catenaria flexible……..28
3.8.7.1.3 Catenaria rígida…….28
3.8.7.2 Tercer carril…….28
3.8.8 Señalización ferroviaria……..29
3.8.8.1 Señalización convencional……..30
3.8.8.1.1 Circuitos de vía o cantones……...…30
3.8.8.1.2 Enclavamientos…….30
3.8.8.2 Sistemas de protección automática (ATP)……..31
3.8.8.3 Sistemas de conducción automática (ATO)……32
3.9 Aplicación de índices CMD en Sistemas Ferroviarios...……..32
3.9.1 Estado del arte…….35
4 Marco metodológico……39
4.1 Caracterización de sistemas ferroviarios……...…...39
4.1.1 Matriz técnica……..39
4.2 Estructura de sistemas……...42
4.2.1 Material rodante……..43
4.2.2 Suministro de energía…….47
4.2.3 Red de comunicaciones……...49
4.2.4 Infraestructura ferroviaria……...49
4.3 Definición de tiempos de funcionamiento……...…….53
4.4 Codificación de la estructura ferroviaria……...…53
4.4.1 Codificación de Material rodante……54
4.4.2 Codificación de Suministro de energía……...……55
4.4.3 Codificación de Red de comunicaciones……55
4.4.4 Codificación de Infraestructura Ferroviaria……...…56
4.5 Determinación de CMD para la estructura ferroviaria……....57

4.5.1 Cálculo CMD para Material rodante……..……58
4.5.1.1 Vehículo……..58
4.5.1.2 Captación de corriente……...……61
4.5.1.2.1 Sistemas con alimentación por Línea aérea de contacto……..……61
4.5.1.2.2 Sistemas con alimentación por suelo……...……62
4.5.1.2.3 Sistemas con alimentación por suelo y línea aérea de contacto……....62
4.5.2 Cálculo CMD para Suministro de energía……..62
4.5.2.1 Sistemas con línea aérea de contacto…….....62
4.5.2.2 Sistemas con alimentación por suelo……...……...64
4.5.2.3 Sistemas con alimentación por suelo y línea aérea de contacto……..65
4.5.3 Cálculo CMD para Red de comunicaciones……...…67
4.5.4 Cálculo CMD para Infraestructura ferroviaria……....68
4.5.4.1 Vía……...68
4.5.4.2 Estación……...70
4.5.4.3 Talleres y cocheras……..70
4.6 Tiempos de mantenimiento……...71
4.7 Manejo de la información…….73
4.8 Medidas CMD……...76
4.8.1 Confiabilidad……...76
4.8.2 Mantenibilidad……77
4.8.3 Disponibilidad…….77
4.8.4 Tiempo medio entre fallas……...……...78
4.8.5 Tiempo medio de recuperación……...78
4.8.6 Estimación de parámetros de Weibull……...……78
4.8.7 Pruebas de ajuste de bondad……...……80
4.8.7.1 Contraste Kolmogorov – Smirnov……..80
4.8.7.2 Contraste Anderson – Darling……80
4.8.7.3 Contraste Chi Cuadrado……..81
4.9 Diagrama para el proceso de medición CMD……...…81
5 Resultados……83
5.1 Interpretación……83
5.2 Toma de decisiones……...90
5.2.1 Toma de decisiones basadas en los índices en subsistemas……....92
5.2.2 Toma de decisiones basadas en los índices en sistemas…….93

6 Conclusiones……95
7 Recomendaciones……96
8 Referencias bibliográficas……..97
9 Anexos……..……100

Índice de figuras

Figura 1. La vía……...……21

Figura 2. Ancho de vía……22

Figura 3. Partes del carril……23

Figura 4. Desvío……..24

Figura 5. Travesía……...…25

Figura 6. Calidad del servicio y RAMS Ferroviaria……...……34

Figura 7. Interrelación de los elementos de la RAMS Ferroviaria……...……..35

Figura 8. Sistema Ferroviario……...……..42

Figura 9. Estructura: Material rodante……...……43

Figura 10. Estructura: Suministro de energía……..…...46

Figura 11. Estructura: Red de comunicaciones……...……48

Figura 12. Estructura: Infraestructura ferroviaria……...……49

Figura 13. Ejemplo estructura de sistemas……....57

Figura 14. Ejemplo estructura en serie……..…57

Figura 15. Ejemplo estructura……58

Figura 16. Perfil de Funcionalidad……..71

Figura 17. Proceso de manejo de la información……...……76

Figura 18. Proceso para medición CMD……...…..81

Figura 19. Ejemplo 1, curva de confiabilidad……...……..84

Figura 20. Ejemplo 2, curva de función de densidad……..84

Figura 21. Ejemplo 3, curva de tasa de fallas……..…..85

Figura 22. Ejemplo 4, curva de mantenibilidad……..86

Figura 23. Ejemplo 5, curva de confiabilidad……...……..86

Figura 24. Ejemplo 6, curva de función de densidad……..…87

Figura 25. Ejemplo 7, curva de tasa de fallas……....88

Figura 26. Ejemplo 8, curva de mantenibilidad……..88

Figura 27. Confiabilidad de un conjunto tren, y confiabilidad de tres bogies motor individuales…….89

Figura 28. Confiabilidad de los subsistemas individuales en comparación con la confiabilidad del bogie motor 3 (MC3)……..…...…….90

Figura 29. Disponibilidades similares…….……...…….92

Figura 30. Costo del ciclo de vida basado en decisiones de mantenimiento….…….93

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad……..11

Ecuación 2. Función de Confiabilidad……...…….12

Ecuación 3. Función de distribución de fallas acumuladas……..……..13

Ecuación 4. Función de densidad de probabilidad de fallas……...……13

Ecuación 5. Función de tasa de fallas……..……...13

Ecuación 6. Función de mantenibilidad……...……...14

Ecuación 7. Tiempo medio de recuperación, MTTR……...……...14

Ecuación 8. Disponibilidad Inherente…….14

Ecuación 9. Disponibilidad alcanzada……...…….14

Ecuación 10. Tiempo medio entre mantenimiento, MTBM……...……15

Ecuación 11. Tiempo promedio de mantenimiento……...…….15

Ecuación 12. Disponibilidad Operacional……...……...15

Ecuación 13. Disponibilidad Operacional Generalizada……..…….16

Ecuación 14. Analogía algébrica de estructuras en paralelo……..……57

Ecuación 15. Ejemplo de analogía algebraica de estructuras en paralelo……..….57

Ecuación 16. Analogía algébrica de estructuras en serie……..……..58

Ecuación 17. Ejemplo de analogía algebraica de estructuras en serie……....58

Ecuación 18. Función de Confiabilidad para la distribución de Weibull……..….76

Ecuación 19. Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución de Weibull……77

Ecuación 20. Función de tasa de fallas para la distribución de Weibull…..……...77

Ecuación 21. Función de mantenibilidad para la distribución de Weibull……..…...77

Ecuación 22. Disponibilidad……...77

Ecuación 23. Tiempo medio entre fallas según parámetros de Weibull…..…….…..78

Ecuación 24. Tiempo medio de recuperación según parámetros de Weibull…..…...78

Ecuación 25. Método de estimación *i*-kaésimo……..……78

Ecuación 26. Aproximación de Benard para el Rango de Mediana……..…79

Ecuación 27. Representación logarítmica de la distribución de fallas acumuladas....79

Ecuación 28. Representación lineal de la distribución de fallas acumuladas…..…..79

Ecuación 29. Expresión de la línea recta……..……..79

Ecuación 30. Parámetro de escala de la distribución de Weibull……..…….……80

Ecuación 31. Ajuste de bondad Kolmogorov – Smirnov……..…….……80

Ecuación 32. Ajuste de bondad Anderson – Darling……..……..…..80

Ecuación 33. Ajuste de bondad Chi Cuadrado……..…….81

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetro de forma Beta de Weibull……..…….12

Tabla 2. Características de los sistemas ferroviarios……..……40

Tabla 3. Matriz técnica de sistemas ferroviarios de Latinoamérica……...……41

Tabla 4. Ejemplo de esquema de codificación……...…….…54

Tabla 5. Codificación, Material Rodante……...…….……54

Tabla 6. Codificación, Suministro de Energía……...…….55

Tabla 7. Codificación, Red de Comunicaciones……...……..55

Tabla 8. Codificación, Infraestructura Ferroviaria……...……..56

Tabla 9. CMD, Vehículo – Material rodante…….…….…58

Tabla 10. CMD, Captación de corriente con LAC – Material rodante……..….61

Tabla 11. CMD, Captación de corriente con APS – Material rodante…….…..62

Tabla 12. CMD, Captación de corriente con LAC y APS – Material rodante…..…62

Tabla 13. CMD, Suministro de energía con LAC……..……63

Tabla 14. CMD, Suministro de energía con APS……..…….……64

Tabla 15. CMD, Suministro de energía con LAC y APS……..…….65

Tabla 16. CMD, Red de comunicaciones……..…….67

Tabla 17. CMD, Vía – Infraestructura ferroviaria……..……68

Tabla 18. CMD, Estación – Infraestructura ferroviaria……..……70

Tabla 19. CMD, Talleres y cocheras – Infraestructura ferroviaria……..……...70

Tabla 20. Responsabilidades proceso de manejo de información……..……74

Tabla 21. Disponibilidad de diferentes sistemas ferroviarios……..…91

INTRODUCCIÓN

El Transporte Ferroviario representa un sistema de movilización de personas y mercancías sobre una vía férrea, y en los últimos dos siglos resulta ser el medio de transporte terrestre más importante debido a su función de integración y comunicación entre los sectores productivos, sociales y territoriales. En la actualidad cuenta con diferentes técnicas para su propulsión; aunque, las nuevas tecnologías se encaminan a unificar las fuentes motrices hacia un sistema de tracción eléctrica debido a motivos ecológicos y medioambientales.

El crecimiento poblacional en las aéreas urbanas demandan un sistema de transporte masivo de pasajeros eficiente y confortable; en el cual el sistema ferroviario satisface estas necesidades y representa una parte clave para el desarrollo de un país, ya que potencia el transporte masivo, convirtiéndose en un elemento básico de integración territorial y social. Es decir, permite en muchos casos la vinculación entre ciudades por el aminoramiento de tiempos de viaje entre ellas. Tales como, *Chemin de Fer Métropolitain* (Ferrocarril metropolitano de París), *London Underground* (Metro de Londres), Metro de Moscú (conocido como el Palacio Subterráneo), etc.

Para la correcta prestación del servicio de transporte de pasajeros, el sistema ferroviario requiere una estructura organizacional dentro de la cual se efectúe una gestión de mantenimiento que garantice la eficiencia del servicio, para el cumplimiento del objetivo principal del sistema.

El correcto desempeño de la actividad y gestión de mantenimiento es imprescindible para garantizar la seguridad y disponibilidad de los sistemas durante la explotación a lo largo del ciclo de vida; y, deben adaptarse todas las disposiciones necesarias para mantener estándares de calidad en el servicio. Tanto los Organismos Ferroviarios e Industria Ferroviaria deben cumplir tales garantías, puesto que en

muchos países son los gobiernos locales apoyados en sus constituciones quiénes regulan y controlan los sistemas de transporte público.

La gestión de mantenimiento está orientada a incrementar la disponibilidad de los equipos, en una conveniente relación costo – beneficio, permitiendo que estos funcionen en forma eficiente y confiable dentro del contexto operacional establecido.

Durante la ejecución de un estudio CMD, se realiza una caracterización probabilística de los procesos de deterioro que afectarán los sistemas, subsistemas y componentes asociados en un proceso de producción, a fin de pronosticar la mayoría de los escenarios de paros y fallas. Las ventajas del estudio científico y matemático de los índices CMD pretenden buscar una metodología adecuada para medirlos y evaluarlos eficazmente; teniendo como objetivo fundamental inferir de manera cuantitativa acerca de posibles desenlaces de un evento en forma de pronósticos o predicciones. Adicionalmente, estos conceptos proveen una serie de herramientas y modelos necesarios para describir y representar la información obtenida, con el fin de brindar una herramienta en el área de mantenimiento para mejorar su gestión.

1. Problema

Los sistemas ferroviarios son proyectos innovadores en el país; y no se cuenta con índices confiables y estandarizados que permitan evaluar la gestión del mantenimiento.

Un sistema ferroviario presenta una gran complejidad tanto desde el punto de vista de gestión como el tecnológico; de modo que exige máximas prestaciones en todas las acciones dirigidas a los medios que intervienen en los diferentes procesos, instalaciones, herramientas, equipo, suministro, personal, etc.

1.1.Antecedentes

El mundo del mantenimiento es un mundo cambiante; como resultado de nuevas expectativas y tendencias, nuevos patrones de fallos en los equipos y nuevas tecnologías en las máquinas. Estos cambios han generado mayores requerimientos en la industria que siente la necesidad de incorporarse a las estrategias o enfoques globales de la gestión de mantenimiento, desarrollando así sistemas de gestión y control que se adapten a los actuales requerimientos. Para llevar a cabo un sistema de gestión de mantenimiento aplicable, es necesario identificar factores que pueden influir en el sistema; su efecto debe ser evaluado, y la causa gestionada a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema. El mantenimiento dentro del sector ferroviario persigue los objetivos de calidad de servicio del transporte de pasajeros o mercancías, buscando incrementar al máximo la disponibilidad de los recursos; para lograr mejores niveles de seguridad y confort. Actualmente existen proyectos ferroviarios en nuestro país, tales como el que se lleva a cabo en nuestra ciudad llamado: TRANVÍA CUATRO RÍOS DE CUENCA. Al mismo tiempo, se desarrollan proyectos ferroviarios similares; tales como: METRO DE QUITO (En construcción), TELEFÉRICO GUAYAQUIL – DURÁN (En estudio), TRANSPORTE AEROVÍA GUAYAQUIL (En estudio).

1.2.Importancia y alcances

La confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos que tiene el mantenimiento para su análisis y su evaluación integral y específica. Por medio del CMD es como se puede planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y la operación del mantenimiento. [1]

El estudio de los índices de mantenimiento resulta muy importante, ya que; la finalidad de un Sistema Ferroviario es lograr un nivel definido de tráfico en un tiempo dado y de forma segura. Con la implementación de índices se logra la confianza con la que el sistema puede garantizar el logro de dicha finalidad a lo largo de su ciclo de vida. [2]

1.3.Delimitación

La presente metodología está elaborada para ser implementada en sistemas ferroviarios de transporte urbano con tracción eléctrica a lo largo de su ciclo de vida, a fin de lograr la obtención de índices cuantitativos con los que se pueda realizar una comparación de la gestión de mantenimiento con otros sistemas ferroviarios e inclusive con otras industrias. Es decir, resulta muy útil para poder aplicar un *benchmarking*[1] con la industria ferroviaria a nivel mundial.

[1] Es el proceso continuo y constante de medir nuestros productos, servicios y prácticas y compararlos con nuestros competidores o aquellas compañías reconocidas como líderes en la industria. Entiéndase como la comparación entre dos empresas o instituciones.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita la implementación de índices de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad (CMD) mediante cálculos estadísticos para la evaluación de la gestión de mantenimiento en sistemas ferroviarios generalizando sus procesos.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Recopilar información que permita una conceptualización explicativa acerca de índices de mantenimiento CMD, sus relaciones matemáticas y de distribución.

2.2.2. Identificar la estructura de sistemas ferroviarios, definiendo los procesos y sus interrelaciones de forma generalizada y común a sistemas implementados en Latinoamérica.

2.2.3. Elaborar un proceso general para la evaluación de la gestión de mantenimiento a través de índices CMD en un sistema ferroviario.

2.2.4. Evaluar la disponibilidad de los diferentes sistemas que componen el sistema ferroviario, y proceso de toma de decisiones en base a los índices.

3. Fundamentos teóricos

3.1.Introducción

Es importante realizar una introducción a los conceptos de índices de mantenimiento: confiabilidad[2], mantenibilidad, disponibilidad; sus relaciones matemáticas y de distribución. También abarcar la conceptualización de sistemas ferroviarios y, la aplicación de los índices en estos sistemas; a partir de la unificación de criterios en la revisión bibliográfica correspondiente.

3.2.Índices de mantenimiento

Los índices son expresiones cuantitativas y cualitativas de las variables que intervienen en un proceso, y de los atributos de los resultados del mismo; con lo cual se logra analizar y evaluar el desarrollo de la gestión de mantenimiento e implementar planes orientados a perfeccionar la realización del mantenimiento para el cumplimiento de las metas respecto a los objetivos trazados por el gestor.

3.2.1. Índice

El índice es un parámetro numérico que facilita la información sobre un factor crítico identificado en el sistema facilitando la interpretación de la información del comportamiento de dicho factor en estudio. [3]

3.3.Confiabilidad

La confiabilidad es una característica del diseño, que permite estudiar con principios científicos y matemáticos los posibles modos y probabilidad de ocurrencia de fallo de los dispositivos, para el análisis de los procesos de un diseño, la determinación de los costos del ciclo de vida y la seguridad de un sistema y componentes.

3.3.1. Definición

[2] El término confiabilidad en inglés es *Reliability*. En este proyecto los términos fiabilidad y confiabilidad son asumidos como idénticos.

Se define como la probabilidad de que un sistema o producto funcione de forma satisfactoria durante un periodo de tiempo determinado, en unas condiciones operativas específicas. [1], [4], [5]

En la definición de confiabilidad se identifican cuatro características que la determinan como estructura:

- Probabilidad
- Funcionamiento adecuado o desempeño satisfactorio
- Periodo de tiempo
- Condiciones específicas de operación o calificación con respecto al entorno

3.3.1.1.DESEMPEÑO SATISFACTORIO

El desempeño satisfactorio implica conocer cuándo se produce la falla y si está desempeñando satisfactoriamente. Por eso, este elemento indica que condiciones específicas deber ser establecidas para describir lo que se considera como una operación satisfactoria; este no implica una falla completa, sino la condición de un desempeño satisfactorio o no; por ejemplo: una bomba puede estar entregando caudal, pero no bombea la cantidad de fluido que requiere el proceso. [1]

3.3.1.2.PERÍODO DE TIEMPO

Esta variable define el tiempo en que el sistema se encuentra en funcionamiento, es decir, su ciclo de vida. El análisis de esta variable aleatoria, implica el uso de las distribuciones de probabilidad, que deben ser modelos razonables de la dispersión de los tiempos de vida. [1], [6]

3.3.1.3.CONDICIONES ESPECÍFICAS DE OPERACIÓN

Son las condiciones a las cuales se encuentra el sistema durante su operación regular. Estas incluyen factores como ubicación o emplazamiento del equipo, tales como: velocidad de línea, peso por eje, carga, temperatura ambiente, etc.

3.3.2. Importancia

La confiabilidad es una medida que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento y ayuda en el momento de seleccionar un equipo entre varias alternativas. [1], [4], [7]

Los estudios de confiabilidad se realizan sistemática y rutinariamente en el diseño de equipos y sistemas, con la idea de mejorar la calidad de los productos o servicios ofrecidos por una empresa.

La confiabilidad como cultura de calidad, busca que todas las actividades de producción y en general todas las tareas se desarrollen bien desde la primera vez y por siempre, con tendencia al mejoramiento; no se acepta que se hagan las cosas defectuosamente. [8]

La aplicación de las técnicas de confiabilidad permite conocer el comportamiento de los equipos en operación con el fin de: [9]

- Aislar equipos o componentes en problemas
- Prever y optimizar el uso de los recursos para el mantenimiento
- Diseñar las políticas de mantenimiento a ser utilizadas
- Calcular instantes óptimos de sustitución económica de equipos
- Establecer frecuencias óptimas de ejecución de mantenimiento preventivo

3.4.Mantenibilidad

La mantenibilidad es una medida muy importante que permitirá la predicción, evaluación y mejora de las decisiones respecto a la facilidad, precisión, seguridad y economía de todas las tareas relativas al mantenimiento de los sistemas durante su uso. Así como los tiempos de identificación de defectos, realización del mantenimiento planeado y restauración del sistema que ha fallado.

3.4.1. Definición

La mantenibilidad es la probabilidad de que un equipo recupere un estado en el que pueda cumplir su misión en un tiempo dado, luego de la aparición de una falla y cuando el mantenimiento es realizado en un determinado periodo de tiempo, al nivel deseado de confianza, con: personal especificado, experiencia necesaria, equipo adecuado, datos técnicos, normas y procedimientos de operación y mantenimiento, y bajo condiciones ambientales especificadas. [9]

La efectividad del sistema de mantenimiento jugará un papel muy importante para el grado de mantenibilidad. Dentro del tiempo para realizar las tareas de reparación se debe considerar también el grado de dificultad en disponer de las piezas de recambio. [10]

3.4.2. Importancia

La mantenibilidad es una medida vital para la predicción, la evaluación, el control y la ejecución de las tareas correctivas o proactivas (mantenimientos planeados, preventivos o predictivos) de mantenimiento; permite mejorar los tiempos y las frecuencias de ejecución de acciones de reparación o mantenimiento en las máquinas. [1]

3.5.Disponibilidad

La disponibilidad es una herramienta útil en situaciones en las que se debe tomar decisiones con respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibles alternativas. La disponibilidad depende de cuán frecuente se producen los fallos en determinado tiempo, es decir, la confiabilidad; y de cuánto tiempo se requiere para corregir el fallo, es decir, la mantenibilidad.

3.5.1. Definición

La probabilidad de que el equipo esté operando satisfactoriamente en el momento en que sea requerido después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables, donde el tiempo total considerado incluye el tiempo de operación, tiempo activo de reparación, tiempo inactivo, tiempo en mantenimiento preventivo, tiempo administrativo y tiempo logístico se define como disponibilidad. [7]

3.5.2. Importancia

La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionalidad de un elemento. Es una medida extremadamente importante y útil en casos en los que el usuario tiene que tomar decisiones respecto a la adquisición de un elemento entre varias posibilidades alternativas. [11]

3.6.Relación entre Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad

La disponibilidad resulta ser una función de la confiabilidad y la mantenibilidad. En donde, esta depende de cuán frecuente se producen los fallos en determinado tiempo y condiciones (confiabilidad), y de cuánto tiempo se requiere para corregir el fallo (mantenibilidad).

Por lo que se puede decir; que mientras mayor confiabilidad tenga de un sistema este mejorará su disponibilidad. Así mismo para mejorar la disponibilidad se debe disminuir la mantenibilidad, debido a su interrelación y dependencia directa.

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad}$$

Ecuación 1. Relación entre confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad.

Fuente: Mora, Mantenimiento, Alfaomega

3.7.Métodos de predicción CMD

Existen varias alternativas que difieren en su metodología y en su fundamentación técnica, aunque todas persiguen el mismo objetivo; algunas son más adecuadas que otras en función del entorno y características de reparación o no de los elementos. Tales como: modelos puntuales, distribuciones (normal, Log – normal, exponencial, gamma, weibull), métodos de modelos HPP[3] o NHPP[4], series temporales. De los cuales sobresale la distribución de Weibull, debido a la gran diversidad de formas que esta puede tomar gracias al amplio rango de sus parámetros característicos, y con ello resulta ser muy flexible y se ajusta a las tres zonas de la curva de Davies.

Las técnicas utilizadas en el análisis de confiabilidad frecuentemente requieren de la utilización de métodos estadísticos para tratar las incertidumbres, características aleatorias o probabilidades de ocurrencia (de fallas, etc.) a lo largo del tiempo. Dicho análisis generalmente involucra la utilización de modelos estadísticos apropiados para caracterizar las variables de interés, tales como el tiempo de falla, o el tiempo entre fallas. Se estiman los parámetros de estos modelos estadísticos sobre la base de datos empíricos obtenidos en ensayos/pruebas de laboratorio, fábricas o en campo de operación. [12]

La exactitud de las estimaciones dependerá por lo tanto de la validez de la suposición básica de que el desempeño de un sistema bajo estudio puede caracterizarse razonablemente por una distribución estadística. [12]

3.7.1. Distribución de Weibull

[3] Proceso homogéneo de Poisson
[4] Proceso no homogéneo de Poisson

Está distribución permite describir la forma en la curva de Davies, la misma que define tres zonas: rodaje o mortalidad infantil, madurez o vida útil, y, envejecimiento. Esta función posee estos tres parámetros que le permiten una gran flexibilidad para obtener mejores ajustes: [13]

3.7.1.1. Eta – parámetro de escala o característica de vida útil (η): su valor es muy importante para determinar la vida útil del sistema.

3.7.1.2. Gamma – parámetro de posición (γ): Indica el lapso donde la probabilidad de falla es nula, su cálculo no es fácil y usualmente se asume como valor cero.

3.7.1.3. Beta – parámetro de forma (β): Refleja la dispersión de los datos y determina la forma de la distribución. Basado en *Beta* la distribución toma varias formas y esto es lo que la adecua a la curva de *Davies.*

Valor (β)	**Característica**
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente
$\beta = 1$	Distribución exponencial
$1 < \beta < 2$	Tasa de falla creciente, cóncava
$\beta = 2$	Distribución Rayleigh
$\beta > 2$	Tasa de falla creciente, convexa
$3 \leq \beta \leq 4$	Tasa de falla creciente se aproxima a la distribución normal; simétrica

Tabla 1. Parámetro de forma Beta de Weibull.

Fuente: Pupo I., Estrategias de mantenimiento y operación, EAFIT

3.7.2. Medidas de Confiabilidad

3.7.2.1. FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD, se define como la probabilidad de que un elemento no falle en ningún instante de tiempo *t.* [1], [9]

$$R(t) = \Pr\{\tau \geq t\}$$

Ecuación 2. Función de Confiabilidad.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

Donde:

$R(O) = 1$

$\lim_{t \to \infty} R(t) = 0$

3.7.2.2. FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE FALLAS ACUMULADAS, es la probabilidad de que la duración de un elemento tenga un valor menor a un tiempo dado *t*. [1], [9]

$$F(t) = 1 - R(t) = \Pr\{\tau < t\}$$

Ecuación 3. Función de distribución de fallas acumuladas.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

Donde:

$F(O) = 0$

$\lim_{t \to \infty} F(t) = 1$

3.7.2.3. FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE FALLAS, esta función describe la forma de la distribución de fallas. [1] [9]

$$f(t) = \frac{d\,F(t)}{dt} = -\frac{d\,R(t)}{dt}$$

Ecuación 4. Función de densidad de probabilidad de fallas.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

3.7.2.4. FUNCIÓN DE TASA DE FALLAS, es la probabilidad de que un elemento que está funcionando en el instante *t* deje de funcionar en el intervalo *(t, t+dt)*. [1]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Ecuación 5. Función de tasa de falla.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

3.7.3. Medidas de Mantenibilidad

3.7.3.1. FUNCIÓN DE MANTENIBILIDAD, indica la probabilidad de que la funcionalidad del equipo sea recuperada en el momento especificado de mantenimiento, o antes: [14]

$$M(t) = \int_0^t m(t)\, dt$$

Ecuación 6. Función de Mantenibilidad.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

Donde *m(t)* es la función de distribución de la variable aleatoria TTR.

3.7.3.2.TIEMPO MEDIO DE REPARACIÓN, MTTR: es la esperanza de la variable aleatoria TTR, que representa el área bajo la función complementaria de la mantenibilidad:

$$E(TTR) = MTTR = \int_0^\infty [1 - M(t)]\, dt$$

Ecuación 7. Tiempo medio de recuperación, MTTR.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

3.7.4. Medidas de Disponibilidad

3.7.4.1.DISPONIBILIDAD INHERENTE, está basada únicamente en la distribución de fallas y la distribución de tiempo de recuperación: [9]

$$A_{inh} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ecuación 8. Disponibilidad Inherente.

Fuente: Mora, Mantenimiento, Alfaomega

3.7.4.2.DISPONIBILIDAD ALCANZADA, es excelente cuando se busca controlar las tareas de mantenimiento planeadas y las correctivas por separado; no interesan los tiempos de demora.

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}}$$

Ecuación 9. Disponibilidad Alcanzada.

Fuente: Mora, Mantenimiento, Alfaomega

Donde:

$$MTBM = \frac{t_d}{m(t_d) + \frac{t_d}{T_{pm}}}$$

Ecuación 10. Tiempo medio entre mantenimiento, MTBM.
Fuente: Fierro R, Implementación de índices CMD. UPS

Sabiendo que:

$T_{pm} =$ Tiempo medio entre tareas de mantenimiento preventivo

$t_d =$ Diseño del sistema o la vida económica

$m(t_d) =$ Número esperado de fallas en el intervalo $(0, t_d)$

$$\bar{M} = \frac{m(t_d)MTTR + \left(\frac{t_d}{T_{pm}}\right)MPMT}{m(t_d) + \left(\frac{t_d}{T_{pm}}\right)}$$

Ecuación 11. Tiempo promedio de mantenimiento.
Fuente: Fierro R, Implementación de índices CMD. UPS

Donde, MPMT es el tiempo promedio de mantenimiento preventivo; y, $\bar{M}$ tiempo medio del equipo en estado SoFa.

3.7.4.3.DISPONIBILIDAD OPERACIONAL, es adecuada cuando se requiere vigilar de cerca los tiempos de demoras administrativas o de recursos físicos o humanos. [1]

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + \bar{M}'}$$

Ecuación 12. Disponibilidad Operacional.
Fuente: Mora, Mantenimiento, Alfaomega

Donde:

$\bar{M}' = MTTR + MDT + SDT$

$MDT =$ Tiempo medio de retraso en el mantenimiento

$SDT =$ Tiempo medio de retraso en el suministro de repuestos

3.7.4.4. DISPONIBILIDAD OPERACIONAL GENERALIZADA, se usa básicamente cuando se predice CMD en equipos con mucho tiempo de operación en donde funcionan más no producen, algo así como trabajo en vacío. [9]

$$A_G = \frac{MTBM + Tiempo \cdot disponible}{MTBM + Tiempo \cdot disponible + \overline{M}'}$$

Ecuación 13. Disponibilidad Operacional Generalizada.

Fuente: Fierro R, Implementación de índices CMD. UPS

3.8. Sistemas ferroviarios

3.8.1. Reseña histórica

El ferrocarril no es fruto de una idea surgida espontáneamente, sino del resultado de un prolongado proceso iniciado a mediados del siglo XVII para el transporte de carbón en las minas de Inglaterra y Alemania. [15]

Aunque ya en la antigüedad el hombre se había percatado de que al tener sistemas guiados, estos evitaban accidentes, manteniendo a los carros sin salirse de la senda prevista. Se tienen referencias de caminos guiados hacia el siglo VII A. C.

La aparición del ferrocarril tal y como se lo conoce hoy, data de 1803 cuando Richard Trevithick, patentó una locomotora de vapor que se desplazaba sobre raíles. Ya para febrero de 1804, hizo mover el primer convoy ferroviario en Gales meridional, realizando un recorrido de 16 km a una velocidad de 8 km/h.

La primera vía férrea pública del mundo, la línea Stockton – Darlington (18,8 km), en el noroeste de Inglaterra, dirigida por George Stephenson, fue inaugurada en 1825. [16]

Luego, las vías férreas tuvieron mucho éxito comercial, económico y técnico, llegando a revolucionar el transporte de largo recorrido, tanto de pasajeros como de mercancías.

Para el año 1881 en Berlín, se puso en servicio el primer tranvía eléctrico; y, dos años después en Gran Bretaña se inaugura el primer tramo de ferrocarril eléctrico. [17]

En Ecuador, la construcción del primer ferrocarril se inició en 1873, poniendo al servicio del país 41 km de vía, desde Yaguachi hasta Milagro. Para 1902 en el cerro "Nido del Cóndor" se construyó "La Nariz del Diablo", una obra de ingeniería que por su complejidad fue denominada como "El Tren más difícil del mundo". [18]

3.8.2. Clasificación de sistemas ferroviarios

Un sistema ferroviario está destinado para servir al mercado del transporte, por ende, surge su principal clasificación:

- Servicio de pasajeros
- Servicio de carga

Siendo el tipo de tracción o combustible que utilice el sistema un factor importante a lo largo de la historia del desarrollo de estos sistemas, se define otro tipo de clasificación:

- Tracción animal
- De vapor
- De diésel
- Combustibles alternos
- Eléctricos

3.8.2.1.Servicio de pasajeros

Los sistemas ferroviarios para el servicio de pasajeros, principalmente se da para sectores urbanos, aunque también existen servicios para recorridos mucho mayores a los de la superficie urbana.

3.8.2.1.1. SISTEMAS FERROVIARIOS LIGEROS

- Metro: generalmente subterráneos, pudiendo también ser elevado o en superficie. La mayoría de los metros alcanzan velocidades de 100 km/h y son electrificados a 750 – 1500 VDC.
- Tranvía: tiene un trazado en la superficie urbana o mayormente urbana. La mayoría de tranvías funcionan con 750 VDC, alcanzando velocidades de hasta 80 km/h, pero en el recorrido urbano circula con velocidades bajas de hasta 40 km/h.
- Tren ligero: son a menudo imposibles de distinguir de los tranvías, pero generalmente se los reconoce por su utilización ya que son diseñados para rutas específicas de servicio, tales como aeropuertos y centros de convenciones. Funcionan alimentados con 750 VDC.
- Premetro: en un sistema de muy similar al tren ligero, se utiliza para extender las líneas de metros subterráneas en áreas donde no se justifica una infraestructura compleja.

3.8.2.1.2. SISTEMAS FERROVIARIOS PESADOS

- Trenes de cercanía: son ferrocarriles de corto o medio alcance y transportan gran cantidad de pasajeros diariamente; operando según horarios en lugar de intervalos fijos. Suelen clasificarse en: trenes urbanos, trenes suburbanos, trenes metropolitanos o trenes regionales. Pueden ser servicios electrificados o con locomotoras diésel, o duales; con alimentaciones eléctricas de 25 KVAC, alcanzando velocidades de hasta 120 km/h.
- Trenes de larga distancia o interurbanos: estos sistemas prestan servicio de largo alcance, usualmente halados por locomotoras eléctricas o duales a 25 KVAC. Las máximas velocidades alcanzadas son de 120 km/h.

- Trenes de alta velocidad (TGV[5]): alcanzan velocidades de 250 km/h o más. Algunos tienen locomotoras integradas, otros tienen motores repartidos a lo largo del tren. Los TGV tienen su propia servidumbre de paso, de manera que su frecuencia es usualmente elevada. Estos trenes son siempre eléctricos, y la alimentación de 25 KVAC es típica.

3.8.2.2.Servicio de carga

Los sistemas ferroviarios de carga son importantes para el crecimiento económico en números países y regiones; estos son eficaces, y pueden transportar volúmenes masivos de carga sobre largas distancias eficazmente y a precios razonables. [19]

Y la principal caracterización se debe al vagón que utilizan para el material o carga que transportan:

- Vagones cerrados: para mercancía que debe protegerse de la intemperie.
- Vagones para minerales: cuya caja está descubierta en su parte interior, e incorpora puertas en sus costados para descargar la mercancía.
- Vagones especiales: cuentan con características especiales según la carga que transporten.
- Vagones plataforma: destinado para transportan vehículos automotores.

3.8.2.3.Trenes de Levitación Magnética o de Tipo Maglev

Son trenes que emplean propiedades magnéticas y cuánticas para levitar, reduciendo enormemente la resistencia por fricción, con ello se alcanzan altas velocidades, mucho superior a los TGV. La tecnología de levitación magnética tiene el potencial de superar los 6440 km/h si se realiza en un túnel al vacío. [20] La mayor velocidad obtenida hasta ahora fue de 603 km/h en la ruta Yamanashi en abril del 2015. [21]

3.8.3. Infraestructura

[5] Tren de Gran Velocidad, del francés Train à Grande Vitesse

Es el terreno base sobre el que se asienta la vía, también denominado explanación o plataforma. La componen, aparte de numerosas obras de defensa (muros de contención y sostenimiento, drenajes, saneamientos, etc.), las denominadas obras de fábrica. [15]

3.8.3.1.Obras de fábrica

- Viaductos: utilizados cuando la distancia a cubrir es grande, debido a depresiones del terreno.
- Puentes: utilizadas para salvar la dificultad de la orografía, con luz superior a ocho metros.
- Pasos a distinto nivel: permiten el cruzamiento entre distintos viales ya sean carretera – ferrocarril o ferrocarril – ferrocarril.
- Túneles: para el paso por zonas montañosas y/o para salvar zonas urbanas.

3.8.3.2.Trazado ferroviario

El trazado ferroviario es una sucesión de alineaciones; unas rectas y otras curvas. En las primeras solo es preciso delimitar su longitud; en las curvas se precisa, además de su longitud, su radio. [17]

En las curvas aparecen fuerzas centrífugas, el objetivo de un adecuado trazado es limitar los esfuerzos de dichas fuerzas, haciéndolas paulatinas y evitando discontinuidades. Se puede mencionar los siguientes tipos de trazados:

- En planta: se utilizan tramos rectos y curvos (arco de circunferencia).
- Perfil longitudinal: es una línea que une los diferentes planos denominados rasantes que componen el trazado de la vía, recogiendo las alturas sobre el nivel del mar, con expresión de la declividad en milímetros por metro. Las rasantes pueden ser: rampa, pendiente, horizontal.
- Perfil transversal: Se define a la intersección de la plataforma con un plano vertical que es normal, en el punto de interés, a la superficie vertical que contiene el eje del proyecto.

3.8.4. Superestructura

La superestructura comprende la vía propiamente dicha y el conjunto de aparatos e instalaciones necesarias para que los trenes puedan circular con garantías de eficacia y seguridad. [15]

3.8.4.1.La vía

Está formada por raíles o carriles, fijados habitualmente sobre traviesas transversales, o, más modernos, sobre una losa rígida de hormigón, llamándose a la vía en este caso vía de placa. [17]

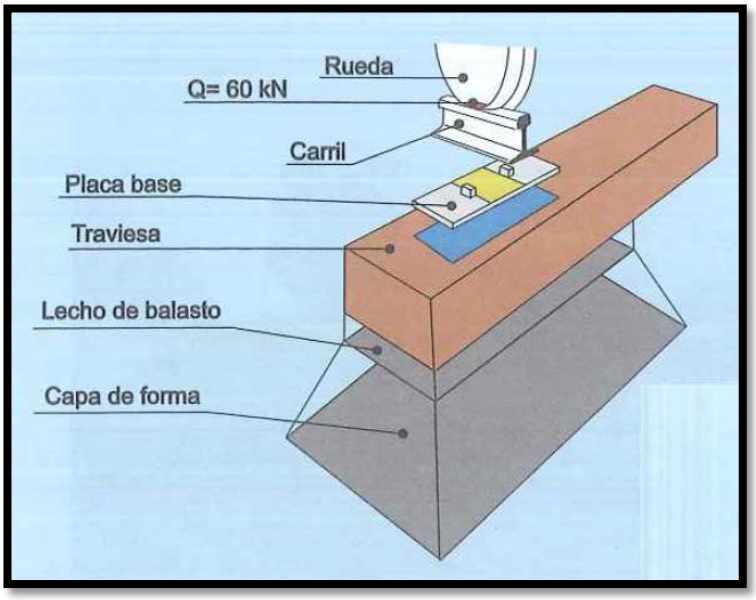


Figura 1. La vía.

Fuente: *UNED*, Ingeniería Ferroviaria

3.8.4.1.1. ANCHO DE VÍA

Se mide entre las caras internas de los carriles, a 14 milímetros bajo el plano de rodadura.

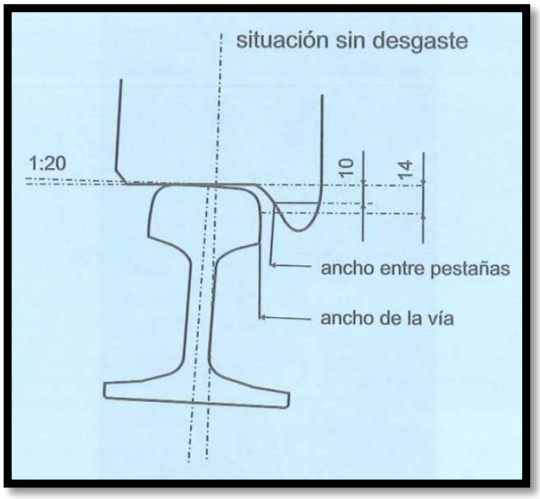


Figura 2. Ancho de vía.

Fuente: *UNED*, Ingeniería Ferroviaria

Siendo esta de 1,668 m en la vía española de RENFE[6] y de 1,435 m en la vía internacional UIC[7]. [17]

3.8.4.1.2. EL CARRIL

Es el elemento que soporta directamente las cargas, encargado de la sustentación y el guiado de los trenes.

La forma más utilizada hoy en día es la llamada *Vignole*, que se reconocen tres zonas:

- Cabeza: se utiliza como elemento de rodadura, y sufre directamente el desgaste.
- Alma: une la cabeza y el patín, y da la inercia a flexión necesaria.
- Patín: actúa de base de apoyo y da estabilidad, sujeta a las traviesas.

[6] Red Nacional de Ferrocarriles Españoles
[7] Unión Internacional de Ferrocarriles, del francés *Union Internationale des Chemins de Fer*.

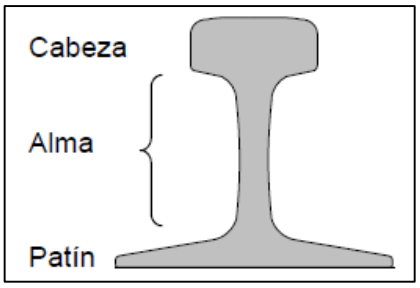


Figura 3. Partes del carril.

Fuente: *ADIF, Conceptos Básicos Ferroviarios*

3.8.4.1.3. EL BALASTO

El balasto es un elemento granular de silíceo sobre el que se asientan las traviesas en cinco de sus seis caras, cuya función es amortiguar y repartir los esfuerzos que ejercen los trenes sobre la vía, impedir el desplazamiento de esta y proteger la plataforma. [15]

3.8.4.1.4. LA TRAVIESA

Es el elemento transversal de la vía, situado entre el carril y el balasto, que forma con el carril el emparrillado de la vía. Sirve de soporte a los carriles, mantiene el ancho de vía y su nivelación. Su misión es además, resistir los esfuerzos en las tres direcciones creados por el tren y recibidos por el carril, y transmitirlos al balasto. [17]

3.8.4.1.5. SUJECIONES

Es el elemento que, sujetando a la traviesa o al bloque de la vía en placa, hace posible la continuidad estructural de la vía. La misión inicial de las sujeciones era evitar el vuelco de carril y su desplazamiento sobre la traviesa en sentido longitudinal a esta. Ahora, se exige a las sujeciones el asegurar al máximo la conexión carril - traviesa en la dirección longitudinal al carril y transversal a la traviesa. [17]

Según el tipo de fijación se pueden clasificar en:

- Sujeciones rígidas clásicas
- Clavos elásticos

- Sujeciones elásticas de lámina o grapa
- Sujeciones elásticas de clip
- Sujeciones de apoyo, con el carril flotante

3.8.4.2.La vía en placa

Es la vía colocada sobre una estructura rígida de hormigón, y que confía la elasticidad necesaria para la vía a elementos flexibles situados entre el carril y la placa. Generando ventajas en costes de mantenimiento. [17]

3.8.4.3.Aparatos de vía

Son los elementos que permiten el desdoblamiento de los carriles mediante unas piezas llamadas agujas. Una aguja se compone de una parte fija en la conexión de las dos vías que se llama corazón; y una parte móvil que permite el paso hacia una u otra vía, que se denomina espadín. [15]

3.8.4.3.1. DESVÍOS O CAMBIOS

Permiten el desdoblamiento de una vía en dos. En casos que sea necesario compatibilizar los dos anchos de vía, se utilizan los desvíos mixtos.

Figura 4. Desvío.

Fuente: *ADIF, Conceptos Básicos Ferroviarios*

3.8.4.3.2. TRAVESÍA

Permite el cruzamiento de dos vías en oblicuo o perpendicularmente con continuidad de sus direcciones respectivas.

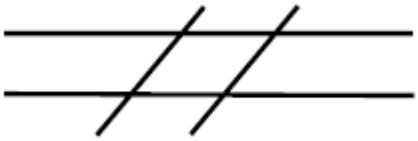


Figura 5. Travesía.
Fuente: *ADIF, Conceptos Básicos Ferroviarios*

Los desvíos y travesías se combinan para dar lugar a las bifurcaciones, que constan de dos desvíos y de una travesía, a los escapes, que son dos desvíos en oposición y a las bretelles o comunicaciones cruzadas. [17]

3.8.4.3.3. CAMBIOS DE AGUJAS

Para poder efectuar los cambios de vía, se utilizan los cambios de aguja, entre los que se tiene: [15]

- Eléctricos
- Mecánicos
- Manuales

3.8.5. Material rodante

El material rodante o material móvil, en un sistema ferroviario está constituido por todos los equipos que circulan a lo largo de las vías férreas. Se pueden clasificar en dos grupos: el material de tracción que son las locomotoras, y; los equipos de arrastre que son todos los equipos acoplados a la locomotora siendo arrastradas o empujadas por la misma. [15]

3.8.5.1.Locomotoras eléctricas

Las locomotoras eléctricas marcan el final de una evolución lógica en la tracción ferroviaria, sustituyendo en la gran mayoría de Redes a las locomotoras de vapor y, poco a poco, a las locomotoras Diésel y las duales. [17]

Alimentadas con energía eléctrica desde el exterior, a través de un tendido específico para ese fin, denominado catenaria, o a través de un tercer riel electrificado situado al lado de la vía, según sea el caso. [22]

Las locomotoras eléctricas se pueden dividir en dos grandes grupos debido a una característica esencial, que es la alimentación por corriente continua o por corriente alterna. Hoy en día la alimentación por corriente continua se ha generalizado para sistemas metropolitanos, tranvías y líneas de cercanías; mientras que en largas distancias y en alta velocidad la corriente alterna es la elección primordial. [17]

3.8.5.2.Tecnologías de tracción eléctrica

- CORRIENTE CONTINUA
  - Sistema de línea aérea de contacto
  - Sistema de tercer rail paralelo
- CORRIENTE ALTERNA
  - Sistema monofásico de línea aérea de contacto
  - Sistema trifásico de línea aérea de contacto

El sistema de línea aérea de contacto en corriente continua y el sistema monofásico de corriente alterna son los más utilizados por las administraciones ferroviarias. El sistema trifásico de corriente alterna fue descartado hace ya muchos años debido a la complejidad asociada a su montaje. [22]

3.8.5.3.El Circuito eléctrico de tracción ferroviaria

De forma genérica, el circuito eléctrico de tracción ferroviaria puede considerarse en tres partes fundamentales: [22]

- Circuito aéreo positivo: constituido por la línea aérea de contacto y todos aquellos cables que incrementan la sección del conjunto, es decir, los alimentadores de refuerzo o positivo.

- Circuito negativo o retorno: es el encargado de retornar la corriente consumida por la locomotora a la subestación eléctrica de tracción, pudiendo ser:
  - Circuito de retorno del tren, formado por los cables que unen la salida de los motores a las llantas de rodadura.
  - Carriles de rodadura, que se conectan al circuito a través de las llantas de rodadura.
  - El terreno, que conduce la corriente que se deriva de los carriles.
- Puestas a tierra de los diferentes elementos de la superestructura: tales como las subestaciones, túneles, acueductos, postes o carriles, en el caso de sistemas de tracción en corriente alterna.

3.8.6. Sistemas de electrificación ferroviaria

La principal función del sistema de electrificación ferroviaria es asegurar la operación de los vehículos de forma segura y confiable, garantizando en todo momento lo siguiente: [22]

- Proveer ininterrumpidamente potencia a los vehículos.
- Absorber y reutilizar la energía procedente de la frenada de los vehículos.
- Cumplir y garantizar normativas existentes referentes a la explotación de sistemas ferroviarios.

La electrificación ferroviaria cuenta principalmente de los siguientes sistemas:

- Sistema de generación de potencia
- Sistema de transporte de alta tensión
- Sistema de alimentación:
  - Subestaciones transformadoras, en sistemas de corriente alterna
  - Subestaciones rectificadoras, en sistemas de corriente continua
- Sistema de distribución de energía a las cargas móviles
- Componentes propios del material rodante

3.8.7. Captación de corriente

La captación de corriente consiste en entregar la energía eléctrica a las unidades de material móvil, a fin de que los motores de tracción transformen dicha energía eléctrica en energía mecánica.

3.8.7.1.Catenaria

El sistema de captación por catenaria es cuando la línea de aérea de contacto tiene un cierto grado de movilidad en altura y lateral, y está formada por una serie de hilos, cables, soportes, aisladores y otros elementos. [17]

3.8.7.1.1. LÍNEA TRANVIARIA

Consiste en un hilo de contacto suspendido en apoyos consecutivos sobre la vía férrea, se toma la energía de este hilo a través de un pantógrafo o de un trole. [15]

3.8.7.1.2. CATENARIA FLEXIBLE

Consiste en dos cables principales, de los cuales el superior tiene aproximadamente la forma de la curva conocida como catenaria y se llama *sustentador*. Mediante péndolas sostiene otro cable, el de contacto, llamado hilo de contacto, de modo que permanezca manteniéndose en un plano paralelo al plano de las vías. [15]

3.8.7.1.3. CATENARIA RÍGIDA

La catenaria rígida se distingue de las otras en que el elemento que transmite la corriente eléctrica no es un cable, sino un carril rígido. Para mantener este carril paralelo a la vía, debido a su peso, es necesario aumentar el número de apoyos en los que hay que suspenderlo, para disimular la distancia entre ellos. [17]

3.8.7.2. Tercer carril

El sistema de tercer carril se basa en sustituir la captación a través de un pantógrafo articulado en el techo de la unidad ferroviaria, por un captador de corriente inferior,

normalmente, instalado en el lateral de los bogíes, cuyo patín o frotador de contacto obtiene la intensidad de tracción de un carril inferior situado a un nivel parecido al de los carriles de rodadura. [17]

3.8.8. Señalización ferroviaria

La señalización ferroviaria es básicamente la técnica de control y regulación del tráfico de trenes basada en semáforos. La secuencia de semáforos autorizando un determinado trayecto se denomina itinerario y, para que los sistemas de control y regulación autoricen realizar un determinado itinerario a un tren, necesitan conocer la situación de este y de todos los demás con los que pudiera chocar en el tramo en el que se encuentren. Asimismo se necesita conocer la posición de los aparatos de vía que condicionan el que el tren siga en línea recta o se desvíe a otra vía. Anteriormente era suficiente y, hoy sirve como base para la señalización ferroviaria, el conocer el tramo o sección de vía que ocupaba un tren. [17]

Al depender solo de semáforos, se confiaba al conductor toda la seguridad de la circulación. Con un error humano se podía ocasionar accidentes. Para ello se desarrollaron sistemas para que controlasen acciones indebidas de los conductores, con lo que nacieron los sistemas de protección de tren (ATP[8]), que al principio se desarrolló independientemente a la señalización ferroviaria, frenaba a los trenes que realizaran un itinerario prohibido con riesgo de colisión. [17]

Por último, aparecen los sistemas de conducción automática, cuya función es regular los procesos de arranque y freno entre puntos de salida y parada de estaciones, haciendo los trayectos más homogéneos y regulares al no intervenir el factor humano subjetivo a la conducción. Estos sistemas pueden operarse con conductor en la cabina, como muchos ATO[9], o ya sin conductor, en trenes totalmente automáticos. [17]

[8] *Automatic Train Protection*
[9] *Automatic Train Operation*

Los objetivos de estos sistemas para la explotación de una línea férrea son:

- Proporcionar seguridad en la operación
- Posibilitar una operación flexible y eficiente

3.8.8.1.Señalización convencional

La señalización convencional se basa por tanto en un sistema de localización "segura" de cada tren, basado en que dicho tren cortocircuita a través de sus ruedas y ejes un determinado circuito. Esta localización, junto con la detección de la posición de los aparatos de vía y los cuadros de servicio de la instalación establecidos, condiciona la iluminación de los semáforos, los aparatos de vía y, en resumen, los itinerarios permitidos. [17]

3.8.8.1.1. CIRCUITOS DE VÍA O CANTONES

Estos sistemas son encargados de:

- Detección de la presencia de un tren sobre el mismo (o un solo eje de dicho tren).
- Definir las zonas que permitan agilizar la realización de circulaciones y permitir el intervalo adecuado entre trenes.
- Servir, en determinados tipos de ATP, de transmisor de las consignas del sistema de ATP, mediante señales codificadas transmitidas por los carriles.
- Posibilitar la detección de roturas de carril, por interrupción del circuito eléctrico que forman los dos carriles de un circuito o cantón, cortocircuitados en su extremo.

3.8.8.1.2. ENCLAVAMIENTOS

El enclavamiento es el "corazón" del control de los itinerarios y desvíos, asegurando, que la posición de las agujas y señales no entren en conflicto y la protección del tren

durante el paso por cruzamientos contra una hipotética colisión. Sus funciones principales son: [17]

- Almacenamiento lógico de aquellos itinerarios permitidos según estados y ocupaciones de vía en la zona de control que tiene asignada.
- Recepción de informaciones relativas a la posición de los trenes, aparatos de vía y órdenes de control.
- Procesamiento de órdenes de acuerdo con el estado de la instalación, órdenes recibidas y condiciones preestablecidas en el diseño.
- Emisión de órdenes a los aparatos de vía, autorizando los itinerarios a los trenes a través de las señales luminosas, e impidiendo la realización de itinerarios incompatibles.
- Indicación del estado de la instalación a través de mandos locales o centralizados.

3.8.8.2.Sistemas de protección automática (ATP)

Los sistemas de protección automática se consideran parte adicional a la señalización, y su filosofía se basa en la supervisión de la correcta actuación de los conductores. [17]

Los sistemas de protección automática, para ferrocarriles metropolitanos, al ser estos los que tienden a más altas aceleraciones y desaceleraciones posibles, son [17]:

- Sistemas Puntuales de Velocidad Máxima, están encaminados a dar una orden de frenado de emergencia al convoy, condicionando las actuaciones del conductor ante incumplimiento de especificaciones.
- Sistemas Cantonales de Velocidad Máxima, su principio es que solo puede existir un tren en cada cantón. Por un lado indica la velocidad que se puede desarrollar en dicho cantón y, por otro da información de cantón o cantones abandonados, de forma que no se permite que trenes que le sucedan puedan dar alcance.
- Sistemas de Distancia Objetivo, cada tren “sabe” en todo momento su posición, así como en qué cantón se encuentra el tren que le precede.

- Sistemas Lineales o Continuos, se basa en la implantación de sistemas que apliquen el frenado de emergencia no según sectores o tramos predeterminados e inamovibles, sino según la distancia de cada tren al que le precede.

3.8.8.3.Sistemas de conducción automática (ATO)

La conducción automática de trenes es considerada usualmente como una tercera fase de la señalización ferroviaria; se utilizan para optimizar recorridos y velocidades pero manteniendo al personal de conducción en la cabina, hasta sistemas totalmente automatizados en que los trenes se explotan sin conductor con una supervisión centralizada para la línea.

Estando el sistema ATO supervisado todo el tiempo por el sistema ATP, presentan las siguientes ventajas sobre la conducción manual: [17]

- Tiempos de recorrido mínimos a marcha tendida, aprovechando al máximo las características tracción/freno de los trenes.
- Marchas muy regulares para el conjunto de la línea.
- Marchas confortables.

El sistema también permite estas funciones adicionales: [17]

- Paso sin parada por estación.
- Cambio de punto de parada en estaciones.
- Posibilidad de realizar diferentes marchas interestación.
- Permiso de apertura en el lado correcto de puertas.
- Apertura y cierre automático de puertas.
- Vuelta semiautomática, en terminales.

3.9.Aplicación de índices CMD en Sistemas Ferroviarios

Las administraciones ferroviarias realizan grandes inversiones en proyectos ferroviarios, estos proyectos son líderes tanto en desarrollo e integración de

tecnologías como en su concepción global, exigiendo cumplir estrictos parámetros en cuanto a Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad a los sistemas de material rodante, señalización, comunicaciones y electrificación durante todo el ciclo de vida.

En Europa existe una asociación que promueve las aplicaciones de RAMS[10], que es ESReDA[11] que organiza foros para el intercambio de información, de datos y de investigaciones. Una de las aplicaciones más típicas de esta tecnología es en los sistemas ferroviarios, basados en la normativa CENELEC:

- EN 50126 – Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS)
- EN 50128 – Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Software para sistemas de control y protección del ferrocarril
- EN 50129 – Sistemas de comunicación, señalización y procesamiento. Sistemas electrónicos relacionados con la seguridad para la señalización

Para poder establecer la necesidad de los índices CMD con organismos e industria ferroviaria, nos referenciamos en la norma EN 50126:2005 [2] aplicada en la Unión Europea, y de tendencia mundial en el área. Esta consiste en requerimientos y procedimientos para la puesta en práctica de un enfoque consistente en la gestión de la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad al alcance del área ferroviaria, con sus respectivos requisitos.

El proceso definido esta norma europea parte de la base de que los organismos ferroviarios y la industria ferroviaria disponen de políticas de nivel empresarial que se ocupan de la Calidad, la Fiabilidad, y la Seguridad. El enfoque definido en esta norma es consistente con la aplicación de los requisitos de gestión de calidad contenidos en la serie ISO 9000 de Normas Internacionales.

---

[10] Fiabilidad, Mantenibilidad, Confiabilidad y Seguridad, del inglés *Reliability, Availability, Maintainability and Safety*.
[11] *European Safety, Reliability & Data Association.*

Esta norma puede ser utilizada a lo largo de todas las fases del ciclo de vida de una aplicación ferroviaria, a fin de desarrollar un proceso sistemático para la especificación de requisitos RAMS para sistemas ferroviarios y la demostración de que dichos requisitos se han cumplido.

La gestión RAMS ferroviaria supone una aportación importante a la Calidad del Servicio, como se puede visualizar en la figura:

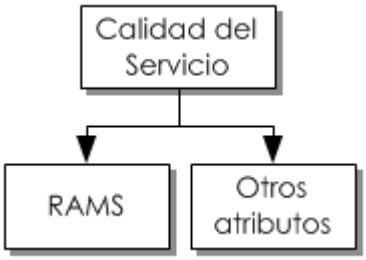


Figura 6. Calidad del servicio y RAMS Ferroviaria.
Fuente: EN 50126, AENOR

El logro de objetivos de seguridad y disponibilidad dentro del servicio solo pueden alcanzarse cumpliendo todos los requisitos de fiabilidad y mantenibilidad; y controlando el mantenimiento y las actividades de funcionamiento, en curso y a largo plazo, así como el entorno del sistema (figura 7). [2]

En esta investigación se estudia únicamente el programa CMD; definido en la norma como: el conjunto de documentos de actividades planificados temporalmente, recursos y acontecimientos que sirven para poner en práctica la estructura organizativa, las responsabilidades, procedimientos, actividades, capacidades y recursos que juntos garantizan que un elemento cumpla los requisitos CMD dados y pertinentes a un contrato o proyecto determinados. [2]

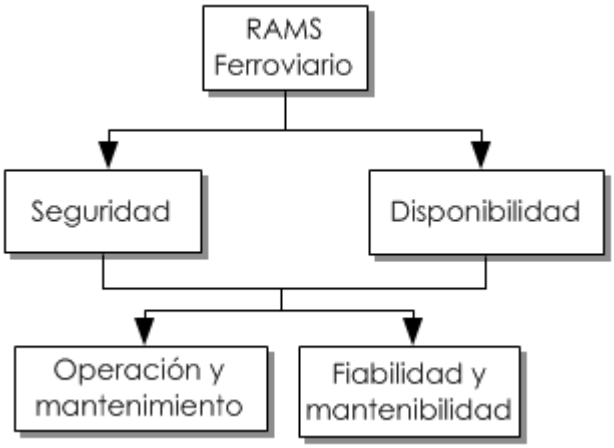


Figura 7. Interrelación de los elementos de la RAMS Ferroviaria.

Fuente: EN 50126, AENOR

3.9.1. Estado del arte

A continuación se presentan algunos trabajos realizados alrededor del mundo sobre la aplicación de índices de mantenimiento en diferentes sistemas ferroviarios:

- Yuan, Jun Yong y Jiang Jian (2009), en su trabajo *"Reliability Evaluation of a Bulk Power System for the Traction Power Supply System of a High – Speed Railway"* analizan los más de 5000 km de red ferroviaria de alta velocidad en China. Basados en la norma IEC 62278:2002 donde se da un enfoque cuantitativo de la evaluación a desarrollarse. Se discute a detalle los tres niveles de la evaluación de la confiabilidad del sistema de energía: evaluación de la capacidad de generación, evaluación de la generación y de la transmisión compuesta, y la evaluación del sistema de distribución.

  Para la evaluación de la confiabilidad en este documento los autores plantean cuatro índices de confiabilidad para el TPS[12]: a) Probabilidad de pérdida de carga *LOLP*[13], b) Frecuencia de pérdida de carga *LOLF*[14], c) Demanda esperada no suministrada *EDNS*[15], d) Energía esperada no suministrada *EENS*[16]*;* y cinco para el ferrocarril de alta velocidad: a) Probabilidad de pérdida de capacidad de

[12] *Traction Power Substations*
[13] *Loss of Load Probability*
[14] *Loss of Load Frequency*
[15] *Expected Demand Not Supplied*
[16] *Expected Energy Not Supplied*

carga del ferrocarril *RLCCP*[17], b) Frecuencia de pérdida de capacidad de carga del ferrocarril *RLCCF*[18], c) Demanda esperada no suministrada del ferrocarril *REDNS*[19], d) Energía esperada no suministrada del ferrocarril *REENS*[20], e) Índice del sistema ferroviario *RSI*[21]. La primera evaluación de la confiabilidad se realiza con la utilización del método de Monte Carlo, después de realizar el ejemplo numérico que presenta este documento se concluye que con la optimización de la confiabilidad de uno de los nodos del sistema, se logra mejorar la confiabilidad total de todo el sistema de ferrocarril.

- Se realiza un estudio en la línea Malmbanan que va desde Luleå – Suecia hasta Narvik – Noruega, por Prasad, Söderholm y Kumar (2008) *"Uncertainty in Life Cycle Cost of Railway Track".* En el cual se propone ofrecer una aproximación de la identificación de los parámetros CMD que contribuyen a la incertidumbre en el costo del ciclo de vida de la vía férrea; utilizando para ello una metodología para la estimación de la incertidumbre relacionada con LCC[22] por una combinación de Diseño de experimentos y la simulación Monte Carlo. Y se utiliza el LCC como una decisión rentable para el mantenimiento de la infraestructura de vía férrea.
- Xu y Huang (2011), en su trabajo *"Control system of Maglev train based on RAMS".* Se promueve la normalización e internacionalización del desarrollo de la industria de tren de levitación magnética de China a través del estudio de la gestión RAMS, que para 2011 está en una etapa infantil. Considera una aplicación más práctica para la medición de índices de fallo de software y hardware de los sistemas, y utiliza la estimación puntual y la distribución exponencial para la determinación de la fiabilidad básica del sistema y la fiabilidad de tareas.

  En este trabajo se estudia principalmente los índices de confiabilidad del control del sistema de tren de levitación magnética de manera preliminar. Y propone la fiabilidad básica que considera principalmente los fallos de hardware; y la fiabilidad de tareas que toma en cuenta los fallos de hardware y software.

---

[17] *Railway Loss of Carrying Capacity Probability*
[18] *Railway Loss of Carrying Capacity Frequency*
[19] *Railway Expected Demand Not Supplied*
[20] *Railway Expected Energy Not Supplied*
[21] *Railway System Index*
[22] *Life Cycle Cost*

- Somnath Pal (2012), en su trabajo *"Reliability and Maintainability Activities in Indian Railways".* Analiza los enfoques adoptados por Ferrocarriles de la India para enfrentar los desafíos de la fiabilidad y gestión de mantenimiento de equipo moderno de señalización ferroviaria, debido a los riesgos que implican los fallos en este equipo de señalización se debe tener un alto nivel de confianza en el sistema. Por lo que se utiliza modelos de Markov y Redes de Petri para estudiar los modelos matemáticos de señalización ferroviaria. Para lograr todo esto se realizan matrices de competencia en Gestión de la seguridad, ingería de sistemas, gestión CMD, para enfrentar los desafíos antes mencionados.
- Hua Ju, Yufei Lu y Xinyan Du (2011), en su trabajo *"Integrating RAMS Approach on the Safety Life Cycle of Rail Transit".* Exponen la discusión de la gestión RAMS para promover la normalización y la globalización de la industria del transporte ferroviario urbano; y lograr los objetivos de seguridad, rendimiento y económicos del proyecto; basado en la norma EN 50126:1999.

  En el documento se tratan los principales requisitos RAMS para un proyecto ferroviario con alta seguridad y servicios de calidad. Siguiendo la metodología RAMS se propone mostrar cómo se puede evaluar la relación entre el coste del ciclo de vida y los requisitos RAMS. Concluyendo que efectivamente se puede garantizar la seguridad y fiabilidad del tránsito ferroviario, y al mismo tiempo, también se puede mejorar los beneficios económicos y sociales.
- Jin Han, Young Yun y Park (2011), en su trabajo *"A RAM Design of a Rolling Stock System".* Los autores exponen un diseño de gestión CMD para los componentes del material rodante de un sistema ferroviario, considerando el coste del ciclo de vida y la disponibilidad del sistema. Con ello se quiere determinar valores objetivos de MTBF, MTTR de los componentes que satisfaga los requisitos de rendimiento del sistema, para ello proponen un algoritmo genético con base heurística por simulación, y para el ejemplo numérico se utilizan la distribución exponencial y la distribución de Weibull. Con la finalidad de optimizar MTBF y MTTR de los componentes, con el fin de obtener soluciones óptimas.
- Kumar, Goyal y Mohan (2015), en su trabajo *"RAM Apportionment Model for Mass Rapid Transit Systems".* En este documento, se analiza los requisitos

RAMS para derivar un buen servicio de trenes de alta velocidad con lo que a puntualidad respecta, que se lo puede ver como un indicador clave de rendimiento KPI[23] del "*Mass Rapid Transit System"* (MRTS), dado que la puntualidad del servicio y los requisitos CMD están estrechamente unidos y deben decidirse prudentemente. Primero se especifica el KPI, lo que lleva a decidir los requisitos CMD de diversos sistemas para cumplir o exceder los objetivos KPI especificados.

El modelo propuesto se ha aplicado para el proyecto "Metro Rail" de la India; se utiliza un modelo de prorrateo CMD para demostrar que se cumple el objetivo KPI especificado. El objetivo de puntualidad del sistema se traduce en términos de fiabilidad, disponibilidad y facilidad de mantenimiento del sistema y subsistemas.

- Conradie, Fourie, Vlok y Treurnicht (2015) en su trabajo "*Quantifying system reliability in rail transportation in an ageing fleet environment*" presentan una aproximación a la cuantificación de la fiabilidad de los elementos del material rodante de un sistema ferroviario, haciendo uso de las estadísticas de fracaso. La configuración del sistema es establecida mediante un Diagrama de Bloques (RBD) considerada la representación más lógica y natural de un sistema. Para la selección de las distribuciones de falla sugiere que antes de montar una distribución, los datos de falla deben ser probados para una tendencia, y en casi de estar presente una tendencia hay que determinarla.

  Definen el modelado de la confiabilidad en los siguientes pasos: 1) Identificación de los sistemas y creación de los diagramas de bloque. 2) Recolección y procesamiento de datos. 3) Análisis del sistema y los resultados.

  Esta metodología es aplicada al caso específico del Metro de Sudáfrica.

[23] *Key Performance Indicator*

4. Marco metodológico

4.1. Caracterización de sistemas ferroviarios

4.1.1. Matriz técnica

Se desarrolla una matriz con la que se pretende conseguir una jerarquización de importancia de los principales sistemas ferroviarios de Latinoamérica, para con ello tomar como referencia las principales características y realizar una caracterización general de un sistema ferroviario.

Se consideran los siguientes sistemas:

- Tranvía de Ayacucho, Medellín – Colombia
- Premetro Subte (Línea P), Buenos Aires – Argentina
- Subte Buenos Aires Ciudad (Línea A), Buenos Aires – Argentina
- Metro Caracas (Línea 1), Caracas – Venezuela
- Tranvía Cuatro Ríos de Cuenca, Cuenca – Ecuador
- Sistema de Tren Eléctrico Urbano (Línea 3), Guadalajara – México
- Metro de Lima y Callao, Lima – Perú
- Metro de Medellín, Medellín – Colombia
- Metro de Panamá, Panamá – Panamá
- Metro de Quito, Quito – Ecuador
- Metro de Santiago (Línea 1), Santiago – Chile
- Metro de Santo Domingo (Línea 2), Santo Domingo – Santo Domingo
- Metro de São Paulo (Línea 4 – Amarillo), São Paulo – Brasil

Cuyas características técnicas de cada uno de los sistemas se expresan en la tabla 2.

Ítem		A	B	C	D	E	F
Ciudad	**Tipo**	**Longitud (km)**	**Velocidad (km/h)**	**Estaciones**	**Frecuencia (minutos)**	**Pasajeros por día**	**Inversión ($)**
Ayacucho	Tranvía	4,3	25	9	4:00	85.000	178’458.000,00
Buenos Aires	Tranvía	7,4	18	17	7:30	2.500	113’000.000,00
Buenos Aires	Metro	9,4	45	18	3:39	200.000	452’000.000,00
Caracas	Metro	20,4	65	22	2:00	1’200.000	250’952.000,00
Cuenca	Tranvía	10,2	22	27	6:00	120.000	231’807.853,48
Guadalajara	Tren Ligero	21,45	39	18	4:30	233.000	973’909.216,00
Lima	Metro	34,6	40	26	6:00	559.500	1.142’000.000,00
Medellín	Metro	34,5	40	21	3:30	630.000	656’300.000,00
Panamá	Metro	15,8	35	15	3:20	200.000	1.452’000.000,00
Quito	Metro	22	37	15	4:00	400.000	1.499’500.000,00
Santiago	Metro	19,7	32	27	2:30	948.000	135’700.000,00
Santo Domingo	Metro	34	60	14	1:30	145.000	830’000.000,00
São Paulo	Metro	12,8	37,5	11	2:40	780.000	1.750’000.000,00

Tabla 2. Características de los sistemas ferroviarios.

Fuente: Página Web Oficial de cada sistema

Para realizar la matriz se califica cada característica de los diferentes sistemas, comparándolos entre sí. El puntaje más alto (13 puntos) se le otorga al sistema con el valor más alto en cada característica evaluada, y continuando con el siguiente sistema su puntaje disminuye un punto, hasta llegar a un punto el menor valor. Es decir, por ejemplo: en cuanto a longitud se le otorga 13 puntos a Lima con sus 34,6 km; 12 puntos para Medellín con su 34,5 km. Y así sucesivamente hasta llegar a Ayacucho 1 punto con sus 4,3 km.

El proceso es igual para el resto de características; a excepción de cuando se evalúa frecuencia ya que el puntaje mayor será para el menor valor. Y cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla:

Ciudad	Tipo	A	B	C	D	E	F	Total
Ayacucho	Tranvía	1	3	1	6	2	3	16
Buenos Aires	Tranvía	2	1	6	1	1	1	12
Buenos Aires	Metro	3	11	8	7	5	6	40
Caracas	Metro	8	13	10	12	13	5	61
Cuenca	Tranvía	4	2	13	3	3	4	29
Guadalajara	Tren Ligero	9	8	7	4	7	9	44
Lima	Metro	13	10	11	2	9	10	55
Medellín	Metro	12	9	9	8	10	7	55
Panamá	Metro	6	5	4	9	6	11	41
Quito	Metro	10	6	5	5	8	12	46
Santiago	Metro	7	4	12	11	12	2	48
Santo Domingo	Metro	11	12	3	13	4	8	51
São Paulo	Metro	5	7	2	10	11	13	48

Tabla 3. Matriz técnica de sistemas ferroviarios de Latinoamérica.

Fuente: El autor

Después de calificar los diferentes sistemas, se concluye que el Metro de Caracas resulta el más importante; debido a sus características operativas para transporte de pasajeros en áreas urbanas. Por lo que el Metro de Caracas será la referencia principal para poder realizar la caracterización general de un sistema ferroviario.

Dentro de la caracterización general de un sistema ferroviario se toma también como referencia aquellos sistemas que tienen tecnologías y características que difieren de la referencia principal, especificando que en algunos casos el sistema ferroviario puede contar o no con dicha tecnología.

4.2.Estructura de sistemas

Un sistema ferroviario consta de cuatro grandes subdivisiones, las mismas que tienen sus subsistemas:

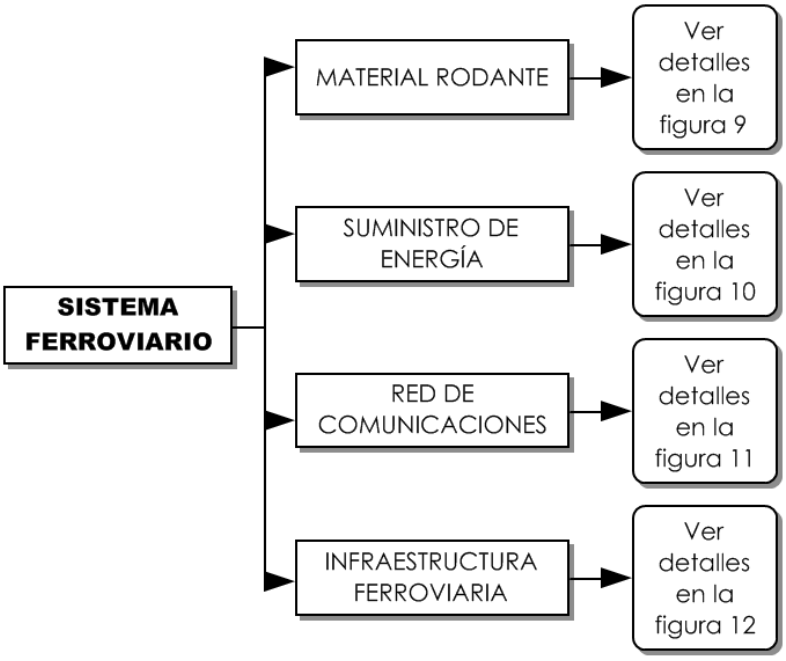


Figura 8. Sistema Ferroviario.

Fuente: El autor

Dentro de cada subsistema se establece niveles de importancia; esto, para poder tener una idea de la relevancia de cada subdivisión dentro de los sistemas caracterizados. Es decir, para que al momento de realizar el cálculo CMD de un sistema, se considere si el componente de la subdivisión que interviene en el cálculo es tan relevante como para afectar el resultado general del cálculo del sistema.

Así como: cuando se calcula la disponibilidad un sistema, y se obtiene una medida muy baja debido a la poca fiabilidad de un solo elemento. Pero resulta que el no

funcionamiento de este elemento no afecta considerablemente la disponibilidad total general.

Los niveles de importancia representan las características y complejidades tecnológicas y de funcionamiento de los diferentes elementos que componen los sistemas, es decir, que estos no indican cuan importantes son los componentes, sino que realizan una diferenciación entre cada uno de ellos.

4.2.1. Material rodante

Según el estudio de los principales sistemas ferroviarios latinoamericanos, existen tres tipos de captación de corriente:

- Línea aérea de contacto
- Alimentación por suelo
- Línea aérea de contacto y Alimentación por suelo (Caso puntual: Tranvía Cuatro Ríos de Cuenca)

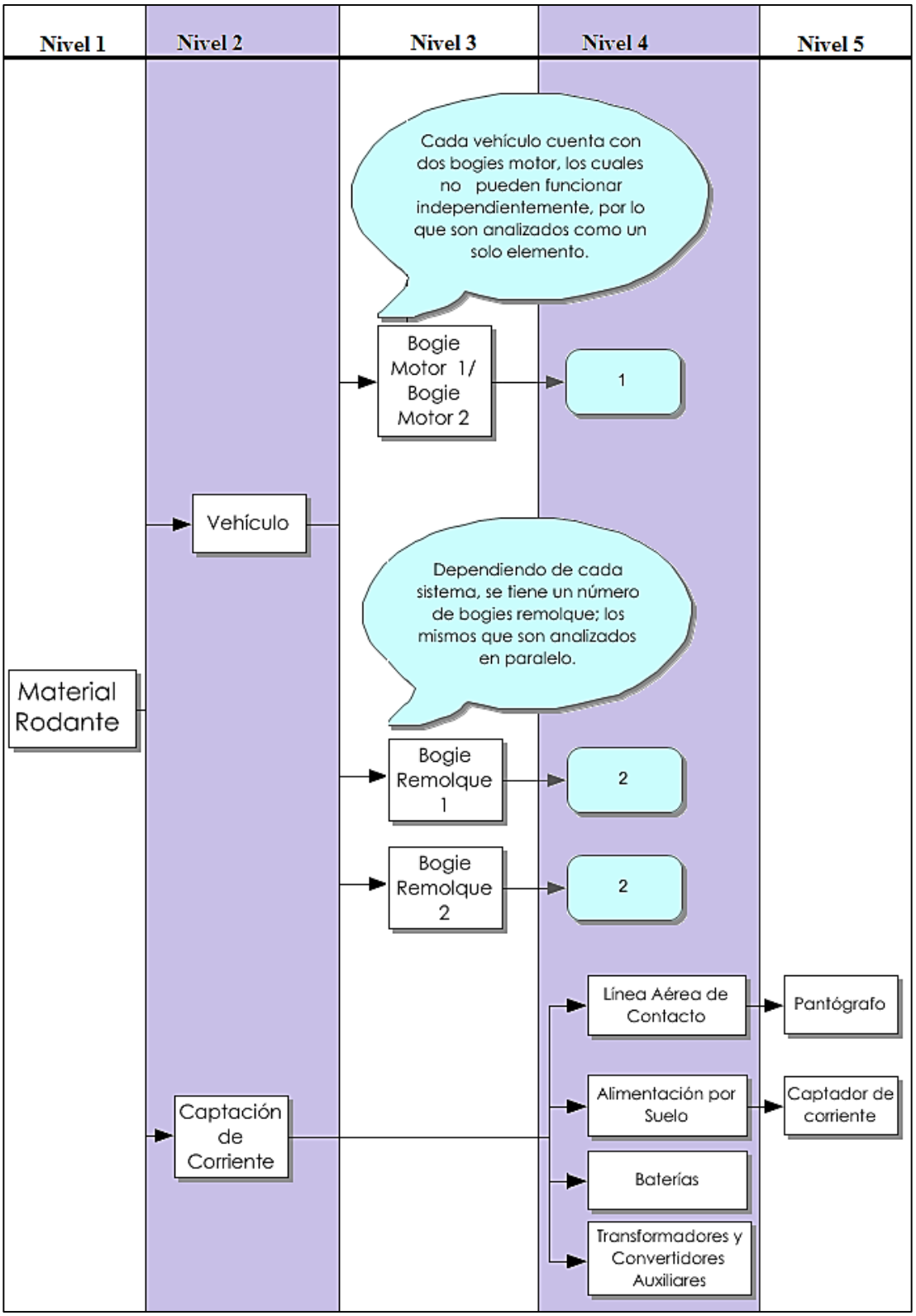


Figura 9. Estructura: Material rodante.

Fuente: El autor

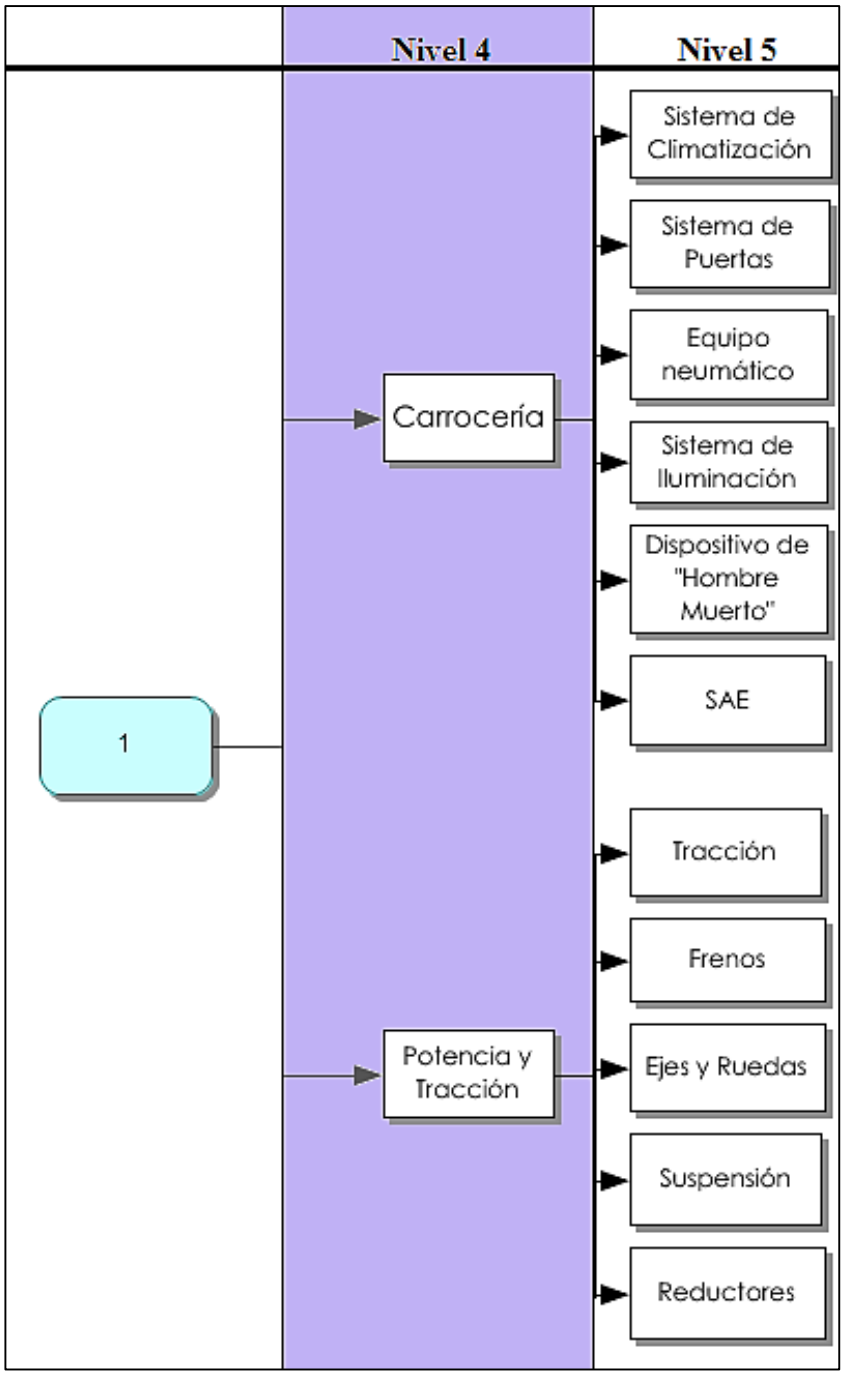


Figura 9. Estructura: Material rodante.

Fuente: El autor

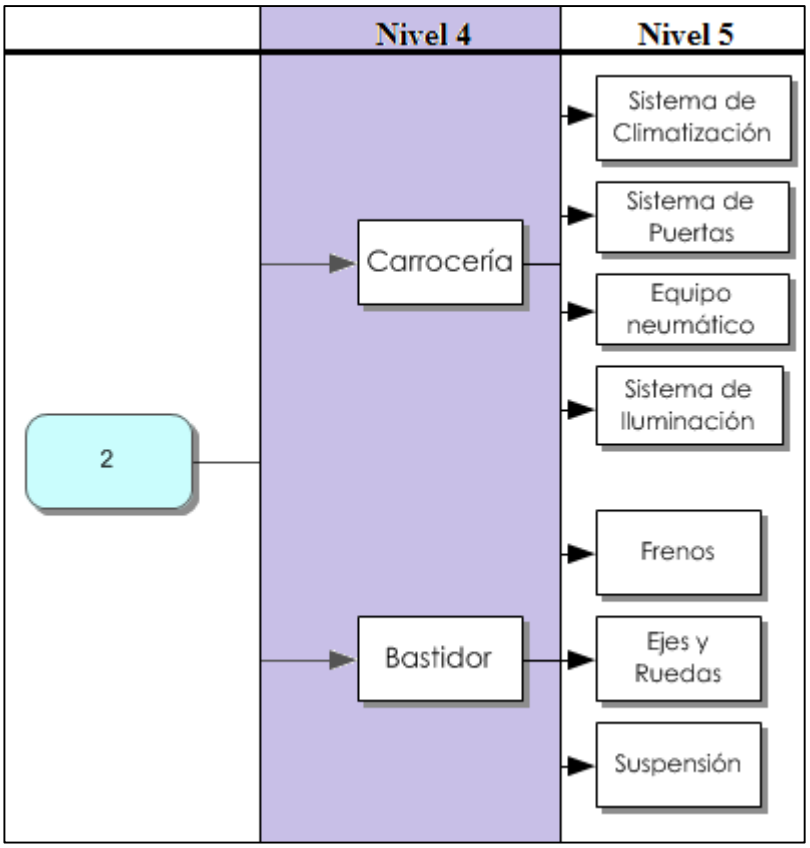


Figura 9. Estructura: Material rodante.

Fuente: El autor

4.2.2. Suministro de energía

Igualmente en este subsistema se presentan los tres tipos de captación de corriente.

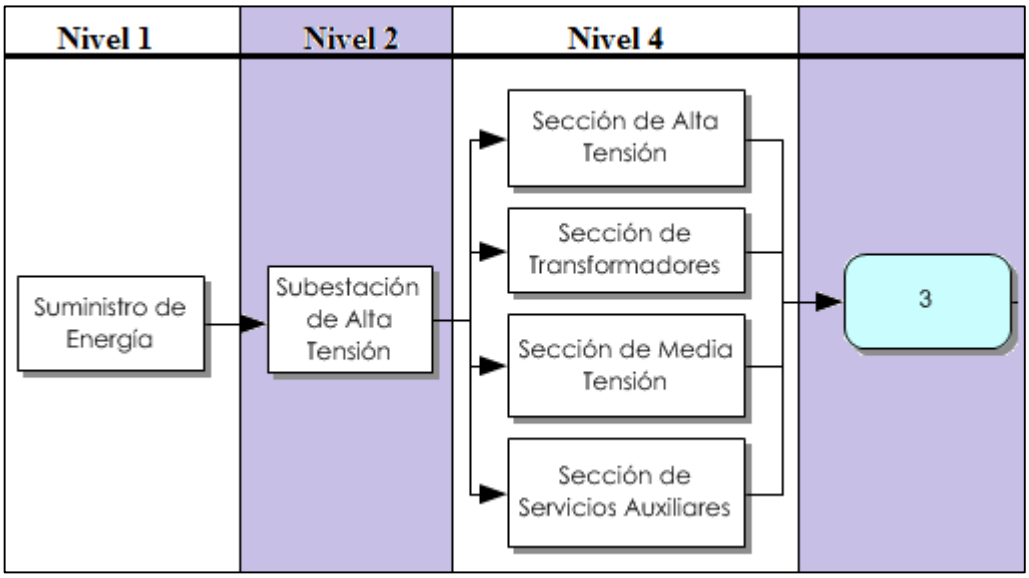


Figura 10. Estructura: Suministro de energía.

Fuente: El autor

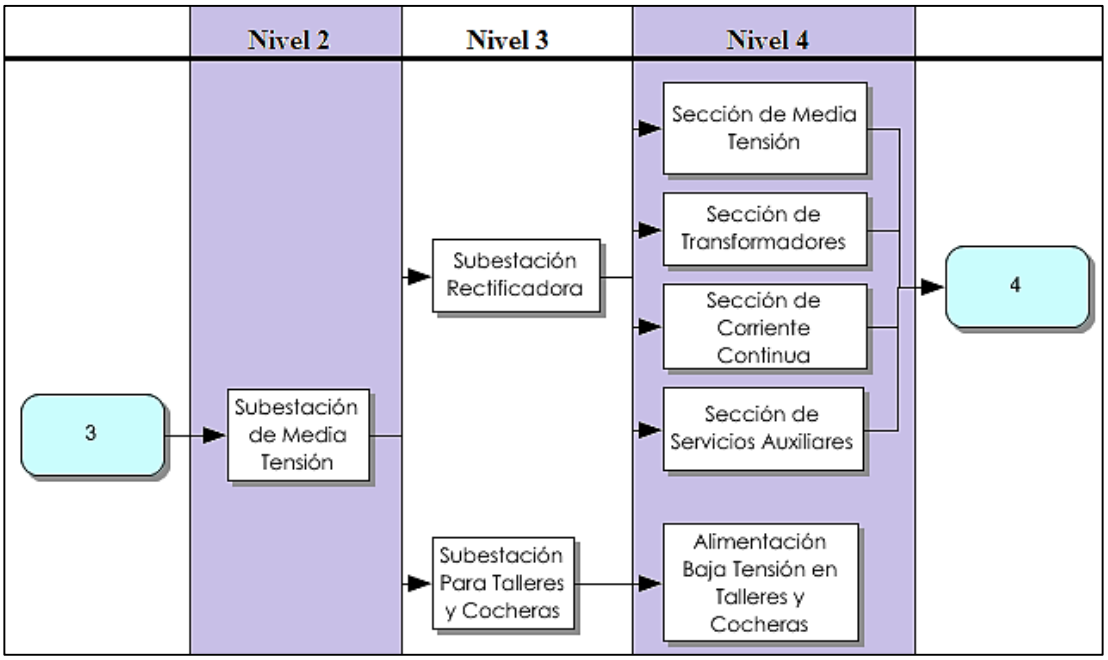


Figura 10. Estructura: Suministro de energía.

Fuente: El autor

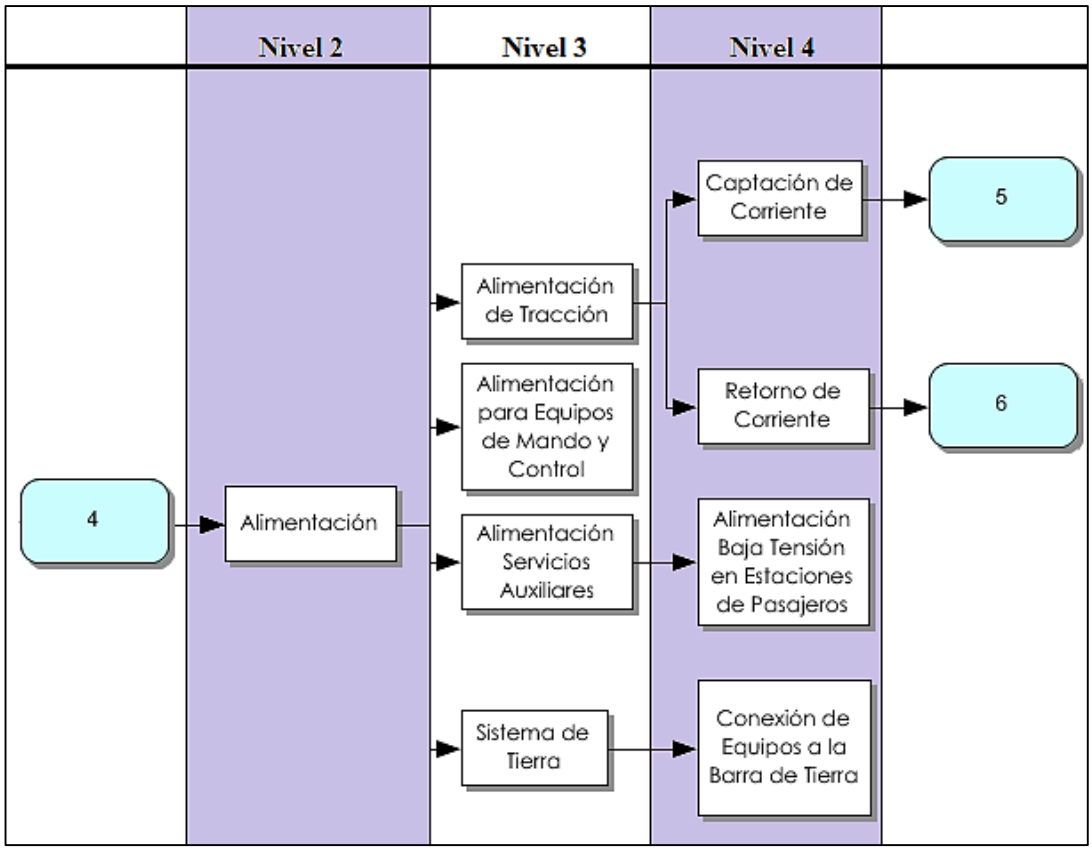


Figura 10. Estructura: Suministro de energía.

Fuente: El autor

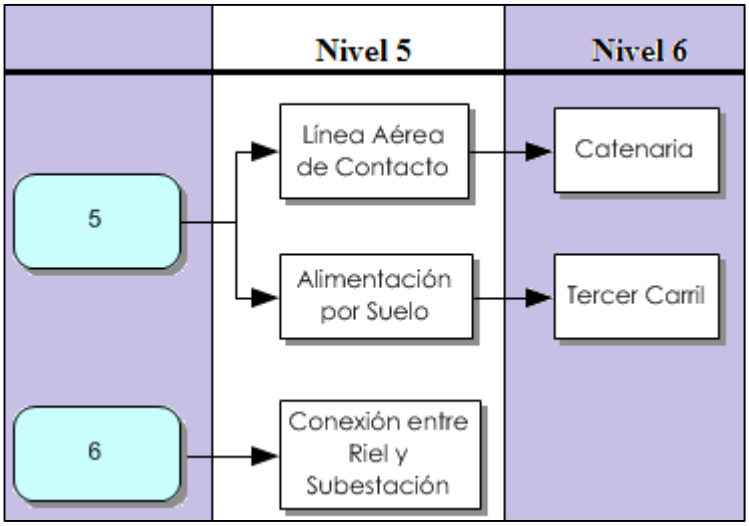


Figura 10. Estructura: Suministro de energía.

Fuente: El autor

4.2.3. Red de comunicaciones

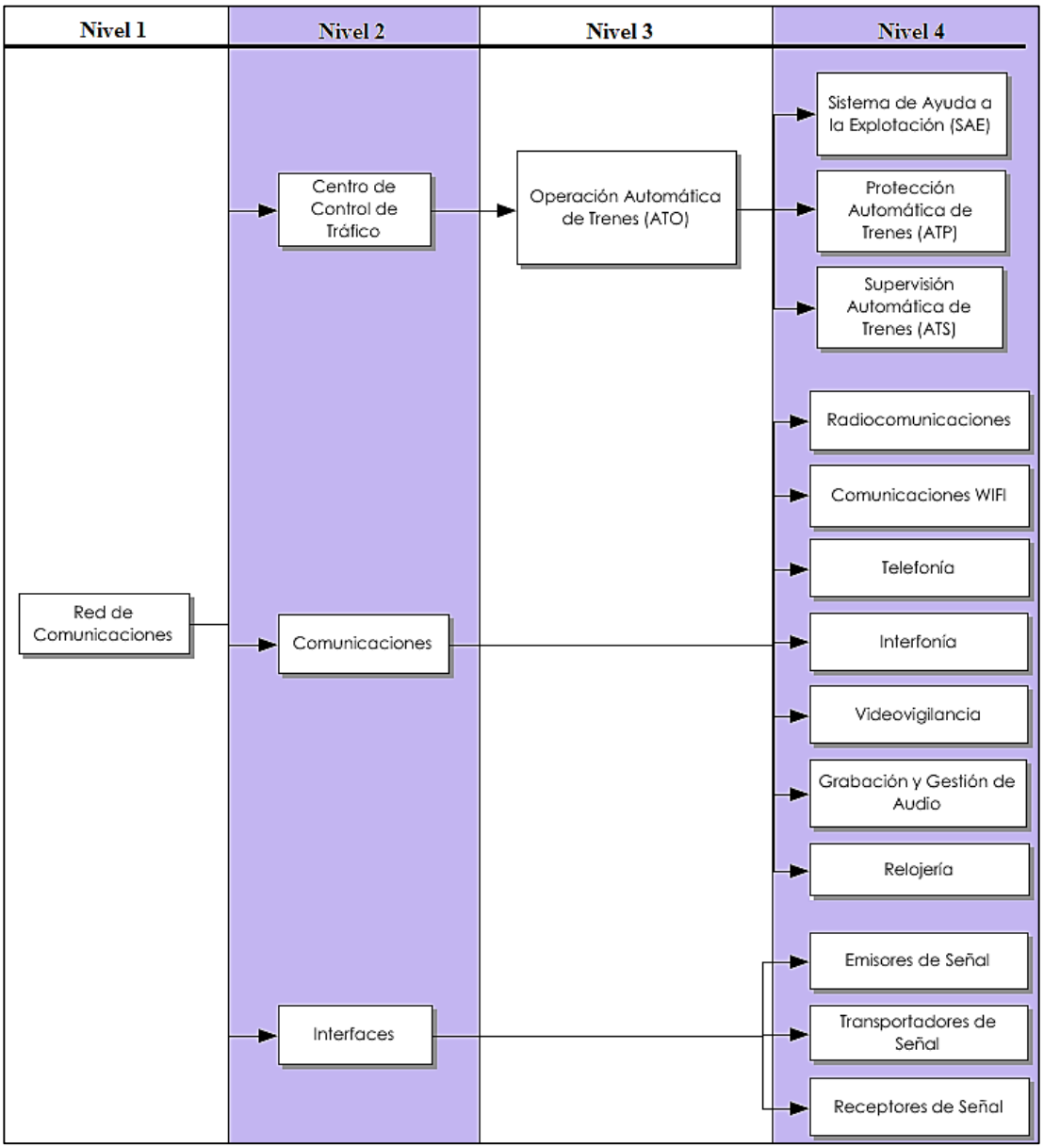


Figura 11. Estructura: Red de comunicaciones.

Fuente: El autor

4.2.4. Infraestructura ferroviaria

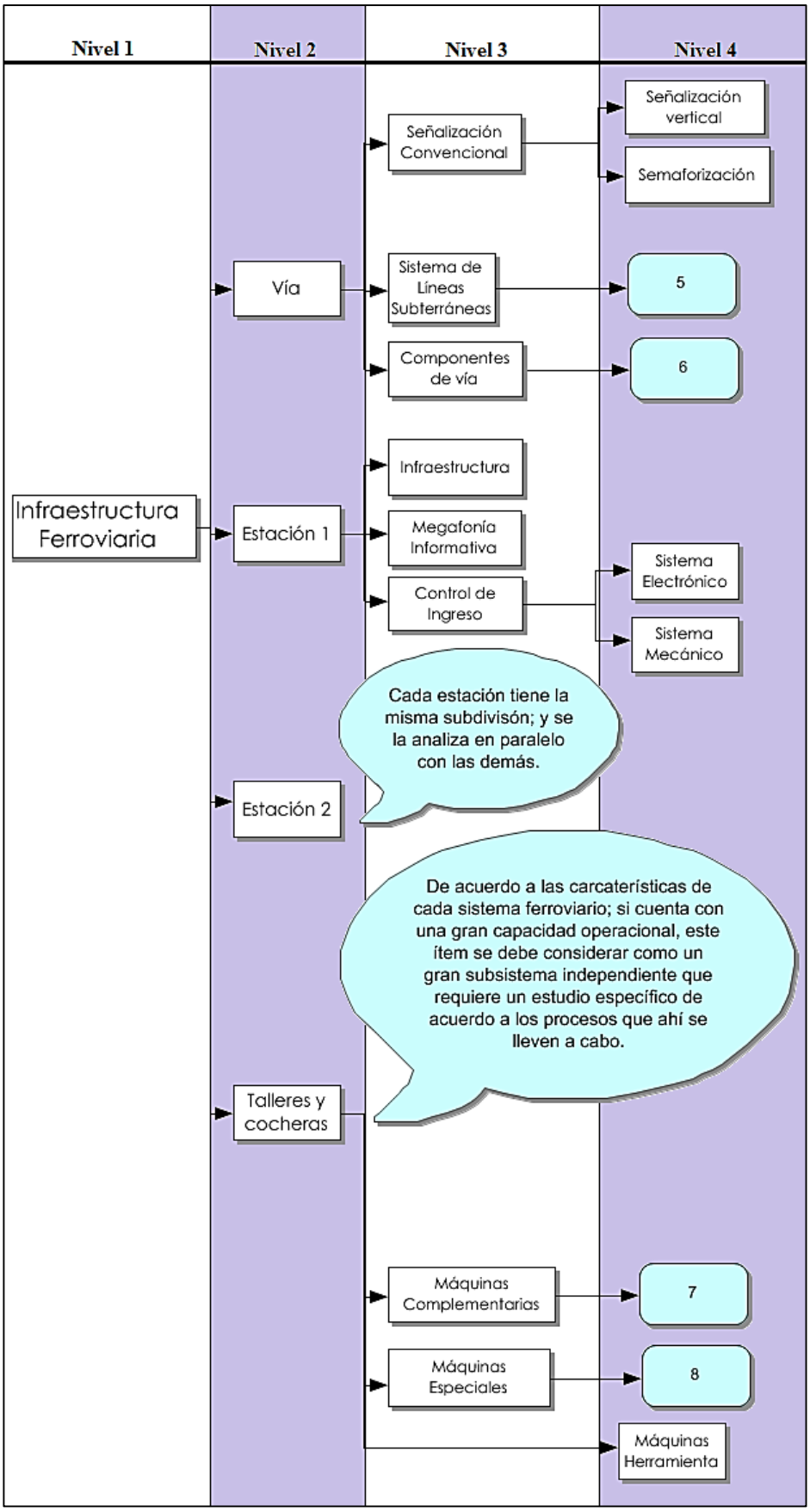


Figura 12. Estructura: Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

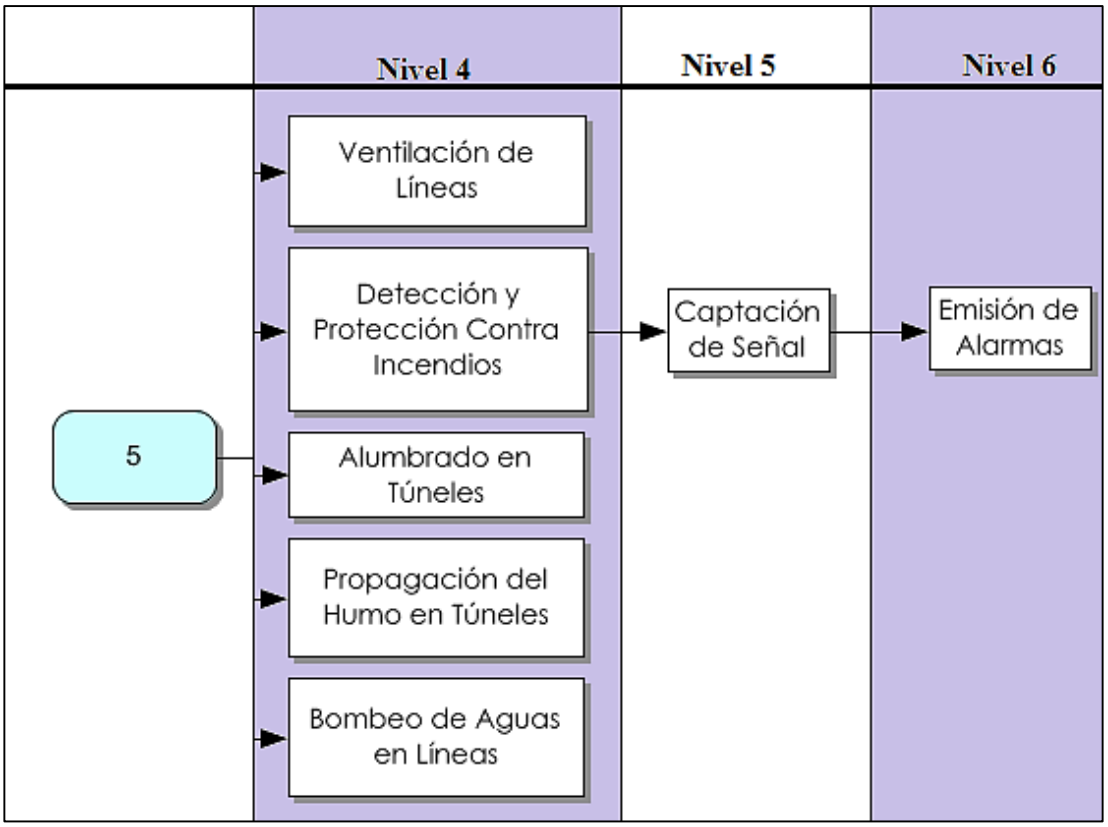


Figura 12. Estructura: Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

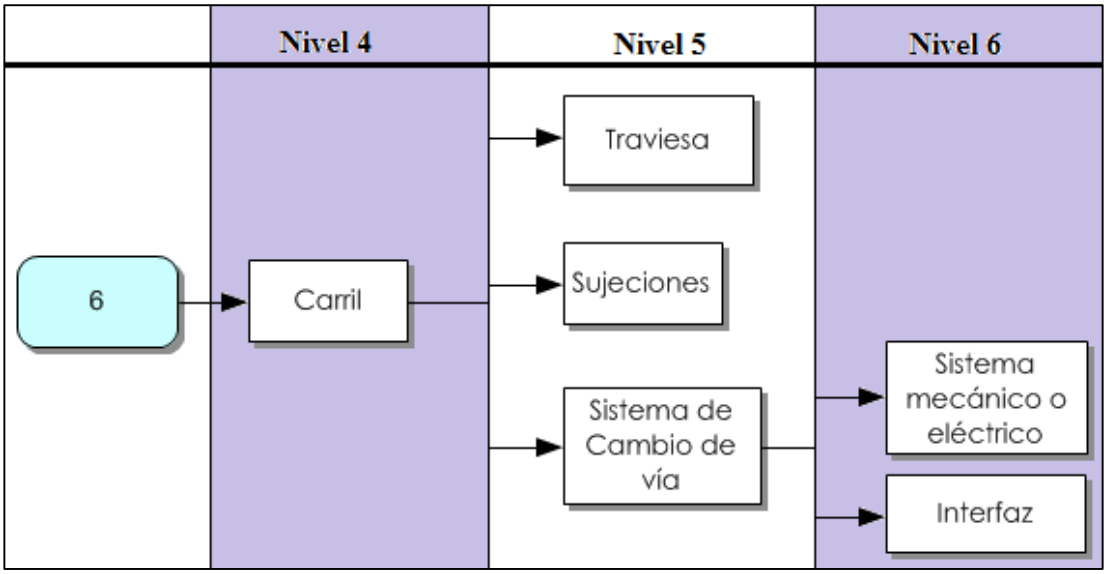


Figura 12. Estructura: Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

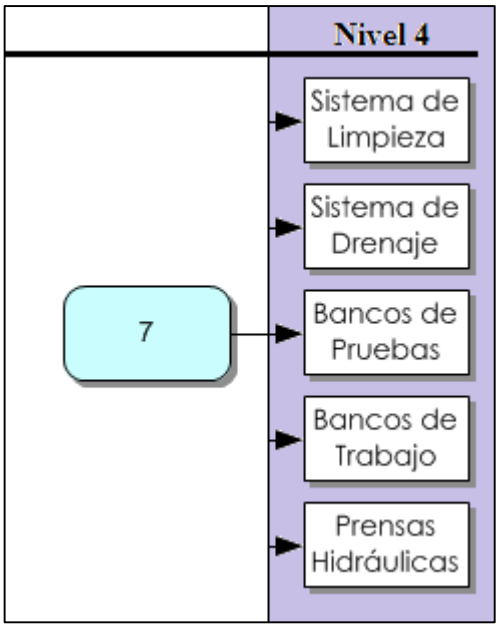


Figura 12. Estructura: Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

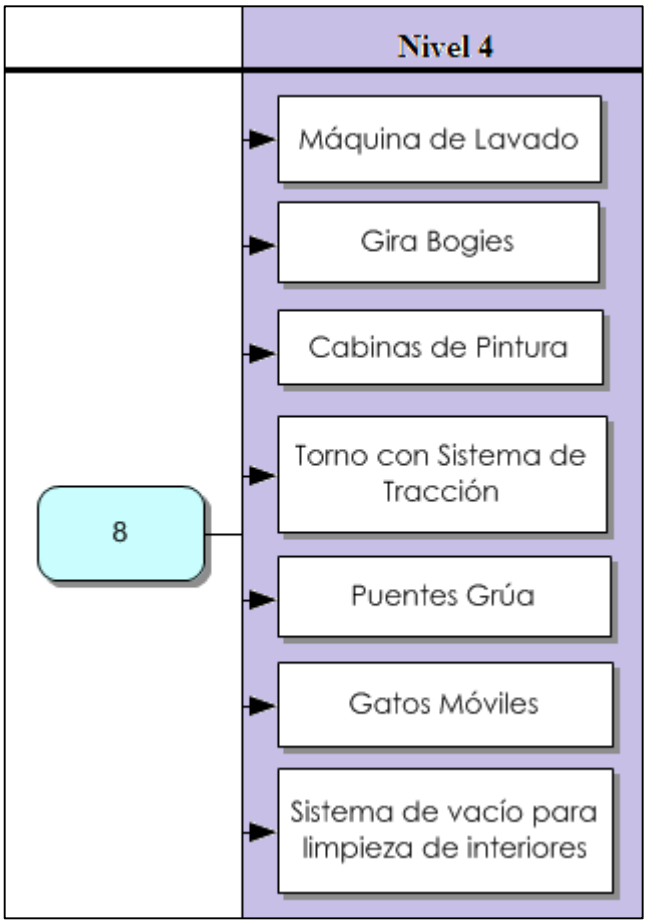


Figura 12. Estructura: Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

4.3.Definición de tiempos de funcionamiento

Una vez definida la estructura de un sistema ferroviario, se establece el tiempo de funcionamiento de cada subsistema, de acuerdo con su funcionalidad.

Al ser un sistema de transporte masivo de pasajeros, sus sistemas y subsistemas deben estar disponibles las 24 horas; a excepción de los siguientes:

- Estación: requiere estar operativo solo en horas de atención al público.
- Talleres y cocheras: requiere estar operativo solo en las horas de funcionamiento.

En el tiempo de operatividad del sistema se debe diferenciar, entre el tiempo de alistamiento (o puesta en marcha del servicio) y el tiempo de producción (tiempo que presta el servicio de transporte a pasajeros); puesto que aunque se indica que los sistemas deben estar disponibles las 24 horas, estos no prestan el servicio este tiempo, por ejemplo:

- Línea P del Subte de Buenos Aires, presta el servicio durante 23 horas al día; con lo que se puede establecer que su tiempo de alistamiento será de 1 hora.
- Metro de Lima, presta el servicio durante 16 horas diarias, y aunque se establezca un mayor tiempo de alistamiento el sistema no tendrá un funcionamiento de 24 horas.
- Línea 1 del Metro de caracas, presta el servicio por 17.5 horas diarias; estableciendo también que el sistema no funciona las 24 horas.

4.4.Codificación de la estructura ferroviaria

Se realiza una codificación de los sistemas y subsistemas ferroviarios para una más fácil identificación de cada uno de ellos. Como resultado se tiene un código alfanumérico con dos letras (iniciales de cada gran subsistema) y números según los niveles que presente cada subsistema, por ejemplo:

ESQUEMA DE CODIFICACIÓN				
Subsistema	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
XX	X	X	X	X
IF	1	3	1	3
IF1313 – Sistema de cambio de vía				

Tabla 4. Ejemplo de esquema de codificación

Fuente: El autor

4.4.1. Codificación de Material rodante:

Nombre				Código
Vehículo				**MR1**
	Bogie motor ½			**MR11**
		Carrocería		**MR111**
			Sistema de climatización	**MR1111**
			Sistema de puertas	**MR1112**
			Equipo Neumático	**MR1113**
			Sistema de iluminación	**MR1114**
			Dispositivo “Hombre muerto”	**MR1115**
			SAE	**MR1116**
		Potencia y tracción		**MR112**
			Tracción	**MR1121**
			Frenos	**MR1122**
			Ejes y ruedas	**MR1123**
			Suspensión	**MR1124**
			Reductores	**MR1125**
	Bogie remolque 1			**MR12**
		Carrocería		**MR121**
			Sistema de climatización	**MR1211**
			Sistema de puertas	**MR1212**
			Equipo neumático	**MR1213**
			Sistema de iluminación	**MR1214**
		Bastidor		**MR122**
			Frenos	**MR1221**
			Ejes y ruedas	**MR1222**
			Suspensión	**MR1223**
	Bogie remolque 2			**MR13**
Captación de corriente				**MR2**
	Línea aérea de contacto			**MR21**
		Pantógrafo		**MR211**
	Alimentación por suelo			**MR22**
		Captador de corriente		**MR221**
	Baterías			**MR23**
	Transformadores y convertidores auxiliares			**MR24**

Tabla 5. Codificación, Material Rodante.

Fuente: El autor

4.4.2. Codificación de Suministro de energía:

Nombre					Código
Subestación de alta tensión					**SE1**
	Sección de alta tensión				**SE11**
	Sección de transformadores				**SE12**
	Sección de media tensión				**SE13**
	Sección de servicios auxiliares				**SE14**
Subestación de media tensión					**SE2**
	Subestación rectificadora				**SE21**
		Sección de media tensión			**SE211**
		Sección de transformadores			**SE212**
		Sección de corriente continua			**SE213**
		Sección de servicios auxiliares			**SE214**
	Subestación de talleres y cocheras				**SE22**
		Alimentación baja tensión en talleres y cocheras			**SE221**
Alimentación					**SE3**
	Alimentación de tracción				**SE31**
		Captación de corriente			**SE311**
			Línea aérea de contacto		**SE3111**
				Catenaria	**SE31111**
			Alimentación por suelo		**SE3112**
				Tercer carril	**SE31121**
		Retorno de corriente			**SE312**
			Conexión entre riel y subestación		**SE3121**
	Alimentación para equipos de mando y control				**SE32**
	Alimentación servicios de auxiliares				**SE33**
		Alimentación baja tensión en estaciones de pasajeros			**SE331**
	Sistema de tierra				**SE34**
		Conexión de equipos a la barra de tierra			**SE341**

Tabla 6. Codificación, Suministro de Energía.

Fuente: El autor

4.4.3. Codificación de Red de Comunicaciones:

Nombre			Código
Centro de control de tráfico			**RC1**
	Operación automática de trenes		**RC11**
		Sistema de ayuda a la explotación	**RC111**
		Protección automática de trenes	**RC112**
		Supervisión automática de trenes	**RC113**
Comunicaciones			**RC2**
	Radiocomunicaciones		**RC21**
	Comunicaciones WIFI		**RC22**
	Telefonía		**RC23**
	Interfonía		**RC24**
	Videovigilancia		**RC25**
	Grabación y gestión de audio		**RC26**
	Relojería		**RC27**
Interfaces			**RC3**
	Emisores de señal		**RC31**
	Transportadores de señal		**RC32**
	Receptores de señal		**RC33**

Tabla 7. Codificación, Red de Comunicaciones.

Fuente: El autor

4.4.4. Codificación de Infraestructura ferroviaria:

Nombre					Código
Vía					**IF1**
	Señalización Convencional				**IF11**
		Señalización vertical			**IF111**
		Semaforización			**IF112**
	Sistema de líneas subterráneas				**IF12**
		Ventilación de líneas			**IF121**
		Detección y protección contra incendios			**IF122**
			Captación de señal		**IF1221**
				Emisión de alarmas	**IF12211**
		Propagación de humo en túneles			**IF123**
		Bombeo de agua en líneas			**IF124**
		Alumbrado de túneles			**IF125**
	Componentes de vía				**IF13**
		Carril			**IF131**
			Traviesa		**IF1311**
			Sujeciones		**IF1312**
			Sistema de cambio de vía		**IF1313**
				Sistema mecánico o eléctrico	**IF13131**
				Interfaz	**IF13132**
Estación 1					**IF2**
	Infraestructura				**IF21**
	Megafonía informativa				**IF22**
	Control de ingreso				**IF23**
		Sistema electrónico			**IF231**
		Sistema mecánico			**IF232**
Estación 2					**IF3**
Talleres y cocheras					**IF4**
	Máquinas complementarias				**IF41**
		Sistema de limpieza			**IF411**
		Sistema de drenaje			**IF412**
		Bancos de prueba			**IF413**
		Bancos de trabajo			**IF414**
		Prensas hidráulicas			**IF415**
	Máquinas especiales				**IF42**
		Máquina de lavado			**IF421**
		Gira bogies			**IF422**
		Cabinas de pintura			**IF423**
		Torno			**IF424**
		Puentes grúa			**IF425**
		Gatos móviles			**IF426**
		Sistema de vacío para limpieza de interiores			**IF427**
	Máquinas herramientas				**IF431**

Tabla 8. Codificación, Infraestructura Ferroviaria.

Fuente: El autor

4.5.Determinación de CMD para la estructura ferroviaria

Para determinar la equivalencia estructural de cada subsistema y poder establecer una fórmula CMD, primero se demuestra gráficamente con un ejemplo las analogías algebraicas:

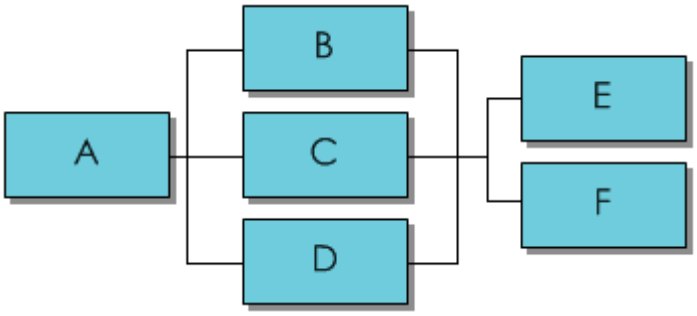


Figura 13. Ejemplo estructura de sistemas

Fuente: El autor

Donde, los elementos B, C y D se encuentran en paralelo; al igual que E y F. Por lo que su reducción basada en las fórmulas que se presentan a continuación sería la siguiente:

$$f(x) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - x_i)$$

Ecuación 14. Analogía algebraica estructura en paralelo.

Fuente: Fiabilidad, Nachlas

$$X = 1 - [(1 - B).(1 - C).(1 - D)]$$

$$Y = 1 - [(1 - E).(1 - F)]$$

Ecuación 15. Ejemplo de analogía algebraica de estructuras en paralelo.

Fuente: El autor

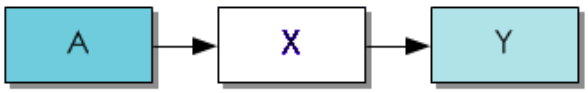


Figura 14. Ejemplo estructura en serie

Fuente: El autor

Finalmente, para reducir estos tres elementos que se encuentran en serie:

$$f(x) = \prod_{i=1}^{n} x_i$$

Ecuación 16. Analogía algébrica de estructuras en serie.

Fuente: Fiabilidad, Nachlas

$$Sistema = A * X * Y$$

$$Sistema = \{A\} * \{1 - [(1 - B).(1 - C).(1 - D)]\} * \{1 - [(1 - E).(1 - F)]\}$$

Ecuación 17. Ejemplo de analogía algebraica de estructuras en serie.

Fuente: El autor

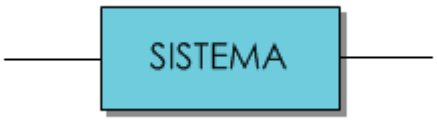


Figura 15. Ejemplo estructura

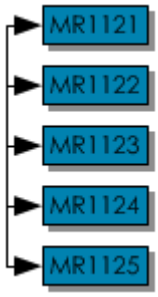
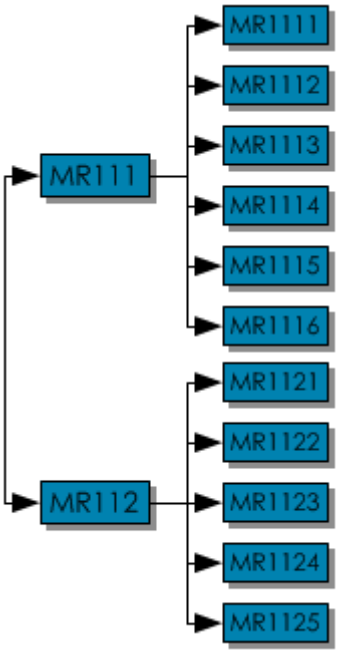
Fuente: El autor

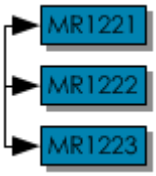
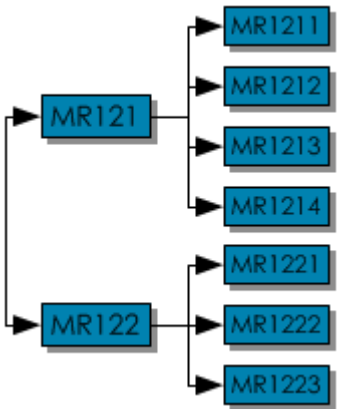
Con esta metodología se procede a encontrar las fórmulas para cada subsistema.

4.5.1. Cálculo CMD para Material Rodante

Debido a la diferencia de las características operacionales de los subsistemas del Material rodante, no se establece una CMD global; por eso se calcula independientemente para VEHÍCULO y CAPTACIÓN DE CORRIENTE. [1]

4.5.1.1.Vehículo

Código/ Nombre	**Gráfico**	**Fórmula**
MR111 Carrocería		$1-[(1-MR1111)(1-MR1112)(1-MR1113)(1-MR1114)(1-MR1115)(1-MR1116)]$
MR112 Potencia y tracción		$1-[(1-MR1121)(1-MR1122)(1-MR1123)(1-MR1124)(1-MR1125)]$
MR11 Bogie motor 1/2		$1-[(1-MR111)(1-MR112)]$

MR121 Carrocería		$1-[(1-MR1211)(1-MR1212)(1-MR1213)(1-MR1214)]$
MR122 Bastidor		$1-[(1-MR1221)(1-MR01222)(1-MR1223)]$
MR12 Bogie remolque 1		$1-[(1-MR121)(1-MR122)]$

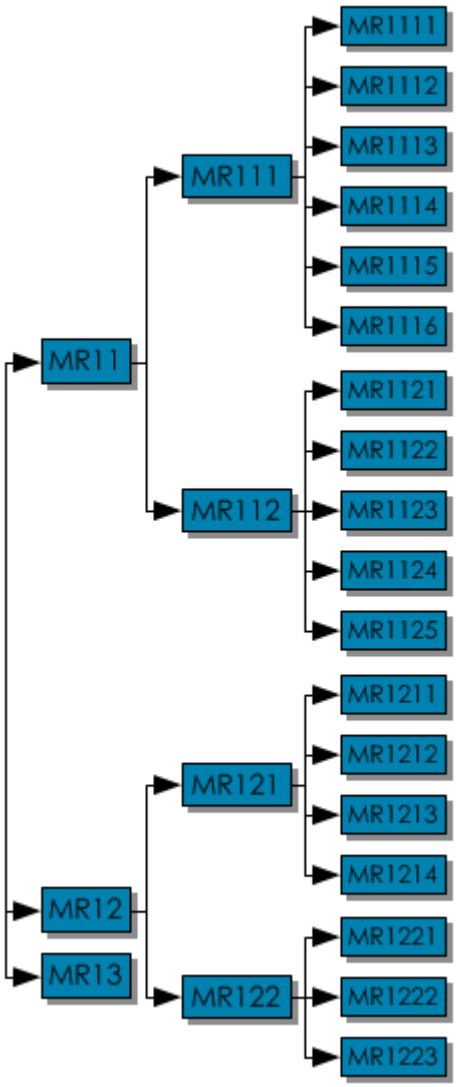
MR1 Vehículo		$1-[(1-MR11)(1-MR12)(1-MR13)]$

Tabla 9. CMD, Vehículo – Material rodante.

Fuente: El autor

4.5.1.2.Captación de corriente

Como se define en la estructura, existen tres formas de captación de corriente (Alimentación por suelo, Línea aérea de contacto, y una combinación entre ambas), por eso se establece una fórmula para cada caso.

4.5.1.2.1. Sistemas con alimentación por Línea aérea de contacto

Código/Nombre	Gráfico	Fórmula
MR21 Línea aérea de contacto		$MR211$

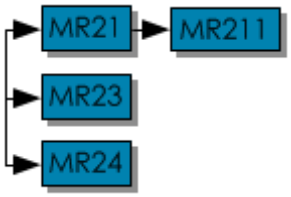
MR2 Captación de corriente		$1-[(1-MR21)(1-MR23)(1-MR24)]$

Tabla 10. CMD, Captación de corriente con LAC – Material rodante.

Fuente: El autor

4.5.1.2.2. Sistemas con alimentación por suelo

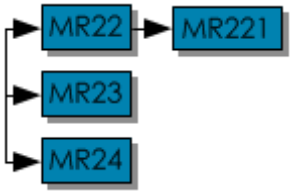
Código/Nombre	Gráfico	Fórmula
MR21 Línea aérea de contacto		$MR221$
MR2 Captación de corriente		$1-[(1-MR22)(1-MR23)(1-MR24)]$

Tabla 11. CMD, Captación de corriente con APS – Material rodante.

Fuente: El autor

4.5.1.2.3. Sistemas con alimentación por suelo y línea aérea de contacto

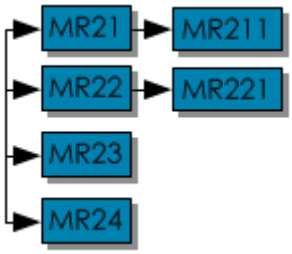
Código/Nombre	Gráfico	Fórmula
MR2 Captación de corriente		$1-[(1-MR21)(1-MR22)(1-MR23)(1-MR24)]$

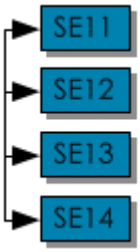
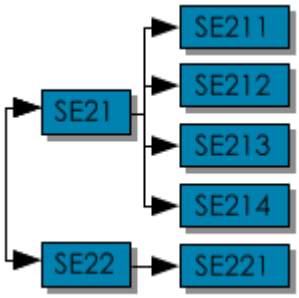
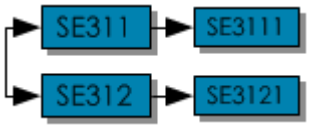
Tabla 12. CMD, Captación de corriente con LAC y APS – Material rodante.

Fuente: El autor

4.5.2. Cálculo CMD para suministro de energía

Igualmente al caso anterior, se establece una fórmula para cada tipo de captación de corriente.

4.5.2.1.Sistemas con línea aérea de contacto

Código/ Nombre	Gráfico	Fórmula
SE1 Subestación de alta tensión		$1-[(1-SE11)(1-SE12)(1-SE13)(1-SE14)]$
SE21 Subestación rectificadora		$1-[(1-SE211)(1-SE212)(1-SE213)(1-SE214)]$
SE22 Subestación de talleres y cocheras		$SE221$
SE2 Subestación de media tensión		$1-[(1-SE21)(1-SE22)]$
SE3111 Línea aérea de contacto		$SE31111$
SE311 Captación de corriente		$SE3111$
SE312 Retorno de corriente		$SE3121$
SE31 Alimentación de tracción		$1-[(1-SE311)(1-SE312)]$

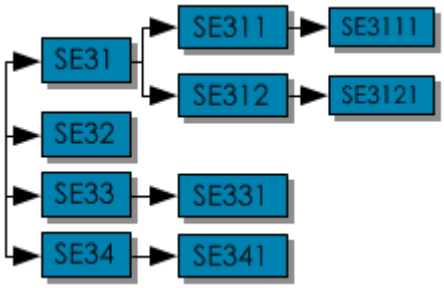
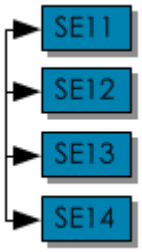
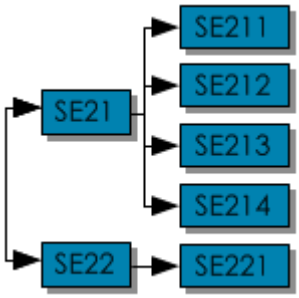
SE3 Alimentación		$1-[(1-SE31)(1-SE32)(1-SE33)(1-SE34)]$
Suministro de energía		$SE1 * SE2 * SE3$

Tabla 13. CMD, Suministro de energía con LAC.

Fuente: El autor

4.5.2.2.Sistemas con alimentación por suelo

Código/ Nombre	**Gráfico**	**Fórmula**
SE1 Subestación de alta tensión		$1-[(1-SE11)(1-SE12)(1-SE13)(1-SE14)]$
SE21 Subestación rectificadora		$1-[(1-SE211)(1-SE212)(1-SE213)(1-SE214)]$
SE22 Subestación de talleres y cocheras		$SE221$
SE2 Subestación de media tensión		$1-[(1-SE21)(1-SE22)]$

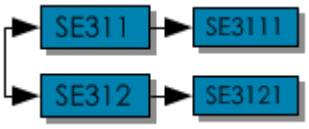
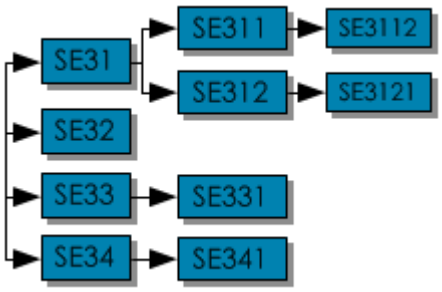
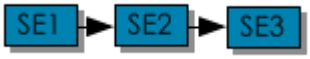
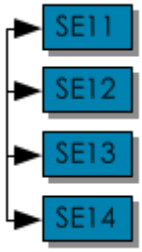
SE3112 Alimentación por suelo		$SE31121$
SE311 Captación de corriente		$SE3112$
SE312 Retorno de corriente		$SE3121$
SE31 Alimentación de tracción		$1 - [(1 - SE311)(1 - SE312)]$
SE3 Alimentación		$1 - [(1 - SE31)(1 - SE32)(1 - SE33)(1 - SE34)]$
Suministro de energía		$SE1 * SE2 * SE3$

Tabla 14. CMD, Suministro de energía con APS.

Fuente: El autor

4.5.2.3.Sistemas con alimentación por suelo y línea aérea de contacto

Código/ Nombre	**Gráfico**	**Fórmula**
SE1 Subestación de alta tensión		$1 - [(1 - SE11)(1 - SE12)(1 - SE13)(1 - SE14)]$
SE21 Subestación rectificadora		$1 - [(1 - SE211)(1 - SE212)(1 - SE213)(1 - SE214)]$

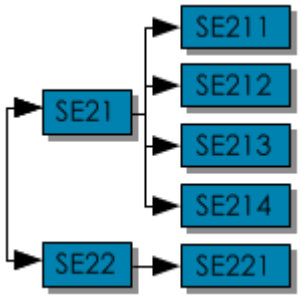
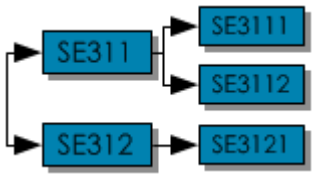
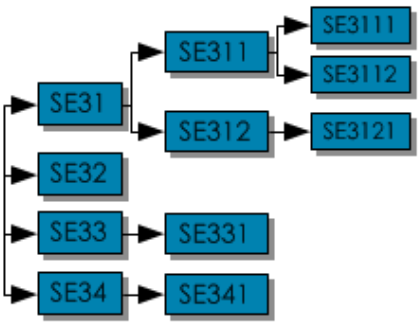
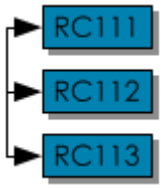
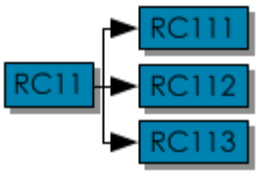
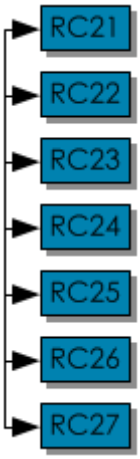
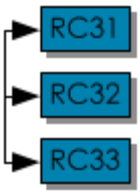
SE22 Subestación de talleres y cocheras		$SE221$
SE2 Subestación de media tensión		$1 - [(1 - SE21)(1 - SE22)]$
SE3111 Línea aérea de contacto		$SE31111$
SE3112 Alimentación por suelo		$SE31121$
SE311 Captación de corriente		$1 - [(1 - SE3111)(1 - SE112)]$
SE312 Retorno de corriente		$SE3121$
SE31 Alimentación de tracción		$1 - [(1 - SE311)(1 - SE312)]$
SE3 Alimentación		$1 - [(1 - SE31)(1 - SE32)(1 - SE33)(1 - SE34)]$
Suministro de energía		$SE1 * SE2 * SE3$

Tabla 15. CMD, Suministro de energía con LAC y APS.

Fuente: El autor

4.5.3. Cálculo CMD para red de comunicaciones

Código/ Nombre	Gráfico	Fórmula
RC11 Operación automática de trenes		$1-[(1-RC111)(1-RC112)(1-RC113)]$
RC1 Centro de control de tráfico		$RC11$
RC2 Comunicaciones		$1-[(1-RC21)(1-RC22)(1-RC23)(1-RC24)(1-RC25)(1-RC26)(1-RC27)]$
RC3 Interfaces		$1-[(1-RC31)(1-RC32)(1-RC33)]$

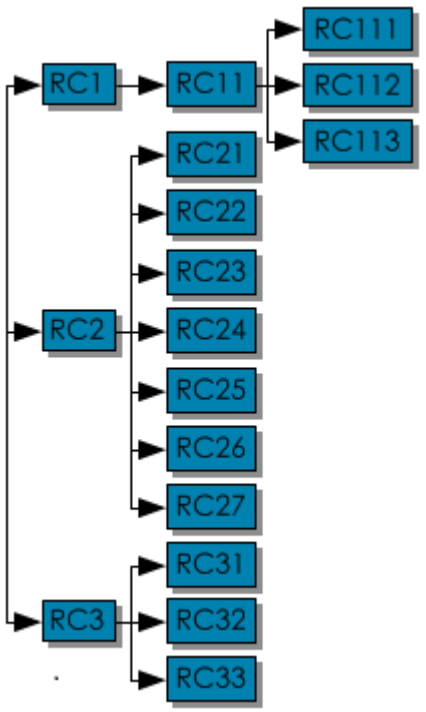
Red de comunicaciones		$1-[(1-RC1)(1-RC2)(1-RC3)]$

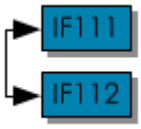
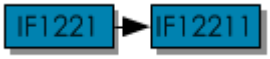
Tabla 16. CMD, Red de comunicaciones.

Fuente: El autor

4.5.4. Cálculo CMD para infraestructura ferroviaria

La infraestructura ferroviaria tiene tres subsistemas; los cuales, debido a las diferencias de sus características operacionales, se establece una fórmula CMD independiente para VÍA, ESTACIÓN, TALLERES Y COCHERAS. [1]

4.5.4.1.Vía

Código/ Nombre	Gráfico	Fórmula
IF11 Señalización convencional		$1-[(1-IF11)(1-IF112)]$
IF122 Detección y protección contra incendios		$IF1221 * IF12211$

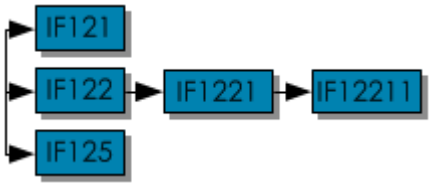
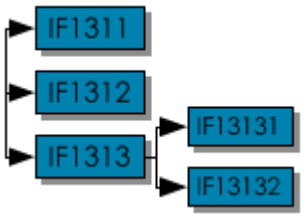
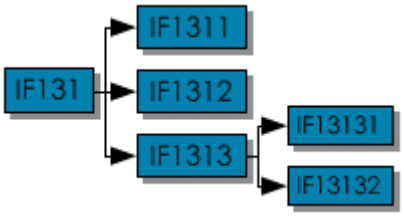
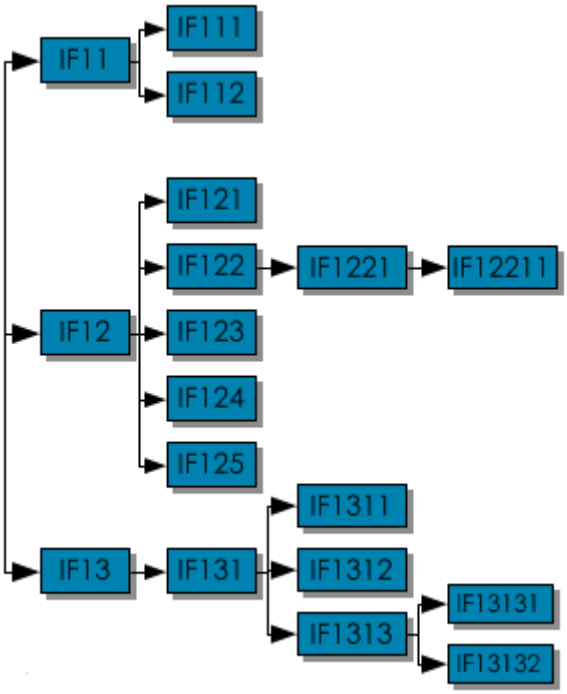
IF12 Sistema de líneas subterráneas		$1-[(1-IF121)(1-IF122)(1-IF125)]$
IF1313 Sistema de cambo de vía		$1-[(1-IF13131)(1-IF13132)]$
IF131 Carril		$1-[(1-IF1311)(1-IF1312)(1-IF1313)]$
IF13 Componentes de vía		$IF131$
IF1 Vía		$1-[(1-IF11)(1-IF12)(1-IF13)]$

Tabla 17. CMD, Vía – Infraestructura ferroviaria.

Fuente: El autor

4.5.4.2.Estación

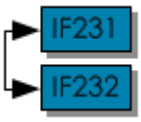
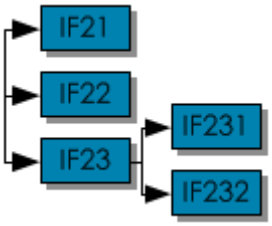
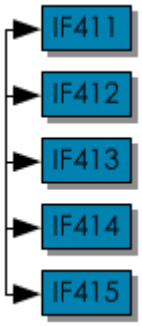
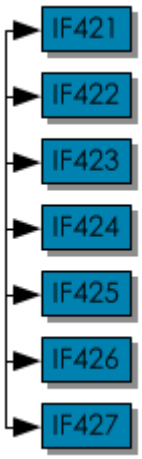
Código/ Nombre	Gráfico	Fórmula
IF23 Control de ingreso		$1-[(1-IF231)(1-IF232)]$
IF2 Estación 1		$1-[(1-IF21)(1-IF22)(1-IF23)]$

Tabla 18. CMD, Estación – Infraestructura ferroviaria.

Fuente: El autor

4.5.4.3.Talleres y cocheras

Código/ Nombre	Gráfico	Fórmula
IF41 Máquinas complementarias		$1-[(1-IF411)(1-IF412)(1-IF413)(1-IF414)(1-IF415)]$
IF42 Máquinas especiales		$1-[(1-IF421)(1-IF422)(1-IF423)(1-IF424)(1-IF425)(1-IF426)(1-IF427)]$

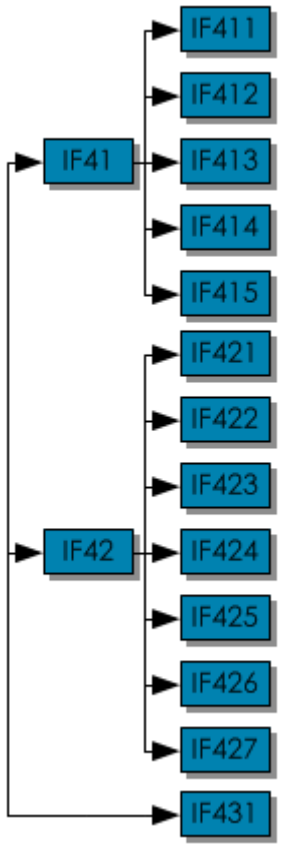
IF4 Talleres y cocheras		$1-[(1-IF41)(1-IF42)(1-IF431)]$

Tabla 19. CMD, Talleres y cocheras – Infraestructura ferroviaria.

Fuente: El autor

4.6.Tiempos de mantenimiento

El punto de partida para el estudio de la fiabilidad es el funcionamiento correcto. Por tanto, el estudio trata de la dicotomía de que un dispositivo o funciona adecuadamente o falla.

El fallo de un elemento es la pérdida de capacidad de dicho elemento para realizar su función o satisfacer los requisitos especificados. Con lo que se asume solos dos estados posibles y mutuamente excluyentes que son:

- Estado de funcionamiento, SOFU[24]
- Estado de fallo, SOFA[25]

[24] SOFU *"State Of Functioning"*
[25] SOFA *"State Of Failure"*

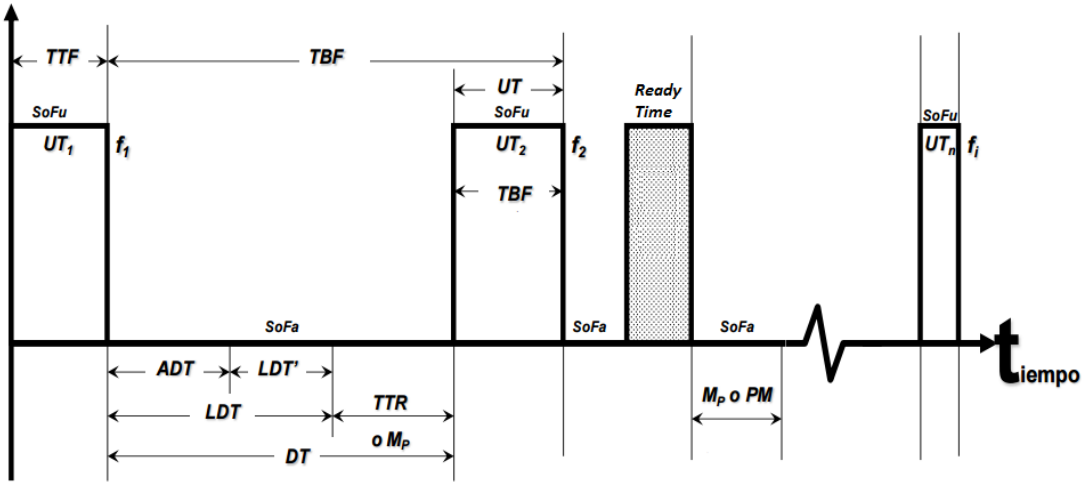


Figura 16. Perfil de Funcionalidad.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

Un equipo recuperable durante su ciclo de vida, fluctuará entre SOFU y SOFA. Los estados del equipo durante su proceso de uso se llama perfil de funcionalidad, normalmente, se usa el tiempo calendario como unidad de tiempo operativo en la representación del perfil. [9]

Basado en este concepto se definen los tiempos de mantenimiento dentro de un proceso productivo:

- Tiempo hasta fallar TTF (*Time to Failure*): para equipos que fallan una sola vez, no reparables.
- Tiempo para reparar TTR (*Time to Repair*): sin incluir demoras ni tiempos logísticos, ni administrativos.
- Tiempo entre fallas TBF (*Time Between Failure*)
- Tiempo útil UP (*Up Time*): tiempo que el equipo funciona correctamente.
- Tiempo no operativo (*Down Time*)
- Tiempo de retrasos administrativos ADT (*Administrative Delay Time*): retrasos administrativos exógenos a la actividad propia de reparación.
- Tiempo de retrasos logísticos LDT' (*Logistics Delay Time*): retrasos logísticos para la obtención de insumos para la reparación.

- Tiempo total logístico LDT (*Logistics Down Time*): $LDT = ADT + LDT'$
- Mantenimientos planeados PM (*Planned Maintenances*): preventivos o predictivos.
- Tiempo de alistamiento (*Ready Time*): el equipo está operando, pero no produce.

Los fallos en los sistemas, subsistemas y componentes ferroviarios se producen de forma aleatoria, por lo que los tiempos medidos se consideran datos aleatorios continuos adaptables a la distribución de Weibull. La distribución de Weibull provee, mediante cálculos, representaciones del comportamiento de los componentes y su ciclo de vida, gracias a la gran diversidad de formas que esta puede tomar debido al amplio rango de sus parámetros característicos y las familias de distribuciones que cubre. Este tipo de distribución es muy flexible y se ajusta a las tres zonas de la curva de Davies: mortalidad infantil, madurez y envejecimiento, etapas típicas del ciclo de vida.

Según la norma ISO/TR10017:2003, las técnicas estadísticas empleadas en el análisis de confiabilidad, permiten que los niveles de confianza estadísticos se adjunten a las estimaciones de los parámetros de los modelos de confiabilidad desarrollados, y a las predicciones realizadas utilizando en este caso el modelo de la distribución de Weibull.

4.7.Manejo de la información

El manejo de la información hace referencia a la recopilación, procesamiento e interpretación de los diferentes tiempos de mantenimiento especificados anteriormente, de cada uno de los componentes del sistema ferroviario a analizar.

En el proceso del manejo de la información es necesario establecer responsabilidades para cada paso, de acuerdo con los siguientes actores:

Tipo	Responsabilidad
Involucrados	Ejecutan la recopilación de información
Responsables	Se encargan del procesamiento e interpretación de la información
Colaboradores	No tienen responsabilidad directa con el proceso, pero aportan en el mismo

Tabla 20. Responsabilidades proceso de manejo de información.

Fuente: El autor

A continuación se describe un proceso para el manejo de la información.

- RECOPILACIÓN

  En esta primera fase se realiza un recuento cronológico de fallos e intervenciones correctivas de los diferentes componentes del sistema durante el tiempo de operación del mismo.

  Esta fase se realiza generalmente por el personal de mantenimiento, que viene a ser la parte involucrada.

- PROCESAMIENTO
  - Verificación; se debe comprobar que la información fue recopilada de manera que los datos sean veraces.
  - Archivo; se establece un registro histórico de los datos anteriormente recopilados y verificados.
  - Frecuencia de recopilación; la frecuencia de recopilación de datos es importante debido a que con ello se establece cada que tiempo se realiza la evaluación de los componentes del sistema. En casos especiales debido a la criticidad de algunos de los equipos la evaluación se lo realiza más frecuentemente.

    A raíz del estudio de los sistemas ferroviarios latinoamericanos se recomienda realizar el estudio semanalmente, a excepción de elementos que debido a su criticidad requieren de una disponibilidad muy aproximadamente del 100 %, tales como por ejemplo: Control de ingreso (Estación), Gira bogies (Talleres y cocheras).

- Retención de registros[26]; es necesario determinar el tiempo de conservación de los registros, para comparaciones con futuras evaluaciones. En la norma ISO 9001 se establece un plazo de tres años.

- INTERPRETACIÓN

  En este paso, se realiza el análisis del cálculo de los índices CMD, que con las medidas correspondientes obtenidas se procede al análisis y la evaluación de la gestión y operación del mantenimiento. Es decir, se observa el cumplimiento o no de los objetivos planteados.

  Cuando no se alcanzan los requisitos mínimos establecidos, la gestión de mantenimiento requiere un análisis causa raíz[27].

[26] El tiempo de retención de registros es la expresión que utiliza ISO 9001 para referirse al intervalo de tiempo que se almacena un registro antes de eliminarlo.

[27] Análisis de causa raíz, es un método para la resolución de problemas que intenta evitar la recurrencia de un problema o defecto a través de la identificación de sus causas. Por lo tanto, este análisis resulta ser un proceso reiterativo y una herramienta para la mejora continua. Este análisis requiere un estudio independiente, por lo que no se considera en esta investigación.

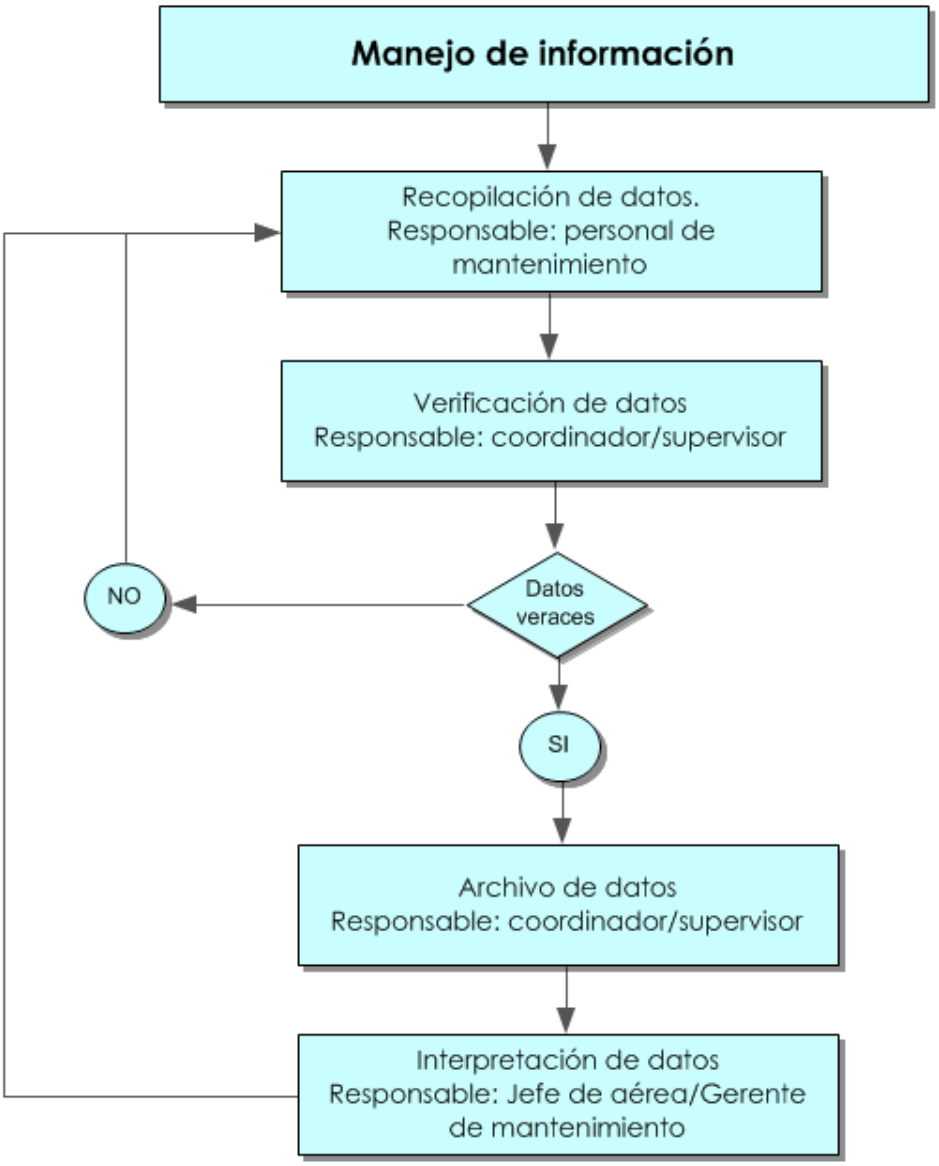


Figura 17. Proceso de manejo de la información.

Fuente: El autor

4.8.Medidas CMD

4.8.1. Confiabilidad: es la probabilidad de que un sistema o equipo funcione correctamente durante un intervalo de tiempo específico y bajo condiciones de operación dadas.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Ecuación 18. Función de Confiabilidad para la distribución de Weibull.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}(t-\gamma)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Ecuación 19. Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución de Weibull.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^{\beta}}$$

Ecuación 20. Función de tasa de fallas para la distribución de Weibull.

Fuente: Céspedes y Toro, Metodología para medir CMD en Mantenimiento

Donde:
$\gamma = parámetro\ de\ posición$
$\beta = parámetro\ de\ forma$
$\eta = parámetro\ de\ escala$

4.8.2. Mantenibilidad: es la probabilidad de que un equipo o sistema pueda restablecer sus condiciones específicas de funcionamiento después de un fallo o avería en un tiempo determinado, realizando el mantenimiento en condiciones establecidas utilizando procedimientos y recursos establecidos.

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-C_m}{A_m-C_m}\right)^{B_m}}$$

Ecuación 21. Función de mantenibilidad para la Distribución de Weibull.

Fuente: Knezevic, Mantenibilidad. Isdefe

Donde:
$A_m = Parámetro\ de\ escala$
$B_m = Parámetro\ de\ forma$
$C_m = Parámetro\ de\ origen$

4.8.3. Disponibilidad: es la probabilidad de que un equipo o sistema pueda realizar su función satisfactoriamente en el momento que sea requerido y bajo condiciones dadas.

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Ecuación 22. Disponibilidad.

Fuentes: Mora; González; Arques; Melo

4.8.4. Tiempo medio entre fallas MTBT: es el tiempo medio de funcionamiento hasta el fallo de un elemento. Es un indicador directo de la confiabilidad.

$$MTBF = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Ecuación 23. Tiempo medio entre fallas según parámetros de Weibull.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

4.8.5. Tiempo medio de recuperación MTTR: es el tiempo neto medio para realizar reparaciones o mantenimientos. Es un indicador directo de la mantenibilidad.

$$MTTR = A_m * \Gamma\left(1 + \frac{1}{B_m}\right)$$

Ecuación 24. Tiempo medio de recuperación según parámetros de Weibull.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

4.8.6. Estimación de parámetros de Weibull

Para poder realizar el cálculo de la distribución de Weibull para cada función anteriormente descrita es necesario estimar los parámetros de la misma. Para estimar ambos parámetros se realiza el siguiente proceso:

a) Se obtienen los historiales de tiempo entre fallas y tiempo para reparación.
b) Se ordenan los ítems de tiempo (TBF o TTR) de manera ascendente de menor a mayor.
c) Se debe obtener los porcentajes acumulados para cada tiempo de falla $F(t)$ y para cada ítem de reparación $M(t)$; a continuación se describen algunos métodos sencillos.

- Método i-kaésimo o estimador no sesgado

$$F(t_i) = M(t_i) = \frac{j}{N+1}$$

Ecuación 25. Método de estimación *i*-kaésimo.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

Donde:
$j = posición\ del\ dato\ ordenado\ de\ menor\ a\ mayor$
$N = número\ total\ de\ datos$

- Método de Benard para el rango de mediana

$$F(t_i) = M(t_i) = \frac{j - 0{,}3}{N + 0{,}4}$$

Ecuación 26. Aproximación de Benard para el Rango de Mediana.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

Donde:
$j = posición\ del\ dato\ ordenado\ de\ menor\ a\ mayor$
$N = número\ total\ de\ datos$

d) A partir de la ecuación 3 (sección 3.7.2.2) llegamos a una representación lineal de la función de distribución de fallas acumuladas para la distribución Weibull.

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$Ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \left(\frac{t - \gamma}{\eta}\right)^{\beta}$$

Ecuación 27. Representación logarítmica de la distribución de fallas acumuladas.

Fuente: O'Connor, Practical Reliability Engineering

$$Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)\right) = \beta\ Ln(t - \gamma) - \beta\ Ln(\eta)$$

Ecuación 28. Representación lineal de la distribución de fallas acumuladas.

Fuente: O'Connor, Practical Reliability Engineering

Que en las escalas apropiadas toma la forma de una recta del tipo:

$$y = a * x + b$$

Ecuación 29. Expresión de la línea recta.

Fuente: O'Connor, Practical Reliability Engineering

Para llegar a esta ecuación es necesario realizar una regresión lineal, donde:

$Ln(t - \gamma) = x\ de\ la\ regresión$; y, $Ln\left(Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = y\ de\ la\ regresión.$

e) Al obtener la ecuación de la recta tenemos que la pendiente de la recta a es el parámetro de forma β.

Y con el intercepto b se puede encontrar el parámetro de escala η de la siguiente forma:

$$b = -\beta\ Ln(\eta)$$

$$\eta = e^{\frac{-b}{\beta}}$$

Ecuación 30. Parámetro de escala de la distribución de Weibull.

Fuente: O'Connor, Practical Reliability Engineering

Con los parámetros calculados, se puede graficar las diferentes funciones de la distribución de Weibull.

4.8.7. Pruebas de ajuste de bondad

Una prueba de bondad de ajuste trata de contrastar la hipótesis nula; es decir, describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad en general resumen la concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica en un modelo de estudio. [23]

4.8.7.1. Contraste Kolmogorov – Smirnov, se basa en la diferencia entre la función de distribución empírica y la función de distribución teórica. [23]

$$D = max|F_t(t) - F_0(t)|$$

Ecuación 31. Ajuste de bondad Kolmogorov – Smirnov.

Fuente: Martínez, Métodos de inferencia para la distribución de Weibull

Donde:
$D =$ Mayor diferencia absoluta entre la distribución empírica y la distribución teórica
$F_t =$ Función de la distribución empírica
$F_0 =$ Función de la distribución teórica

4.8.7.2. Anderson – Darling, este contraste también está basado en la diferencia entre la función de distribución teórica y la función de distribución empírica. [23]

$$A_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left(F_t(t) - F_0(t)\right)^2}{F_0(t)\left(1 - F_0(t)\right)} dF_0(t)$$

Ecuación 32. Ajuste de bondad Anderson – Darling.

Fuente: Martínez, Métodos de inferencia para la distribución de Weibull.

Donde:
A_n^2 = Mayor diferencia absoluta entre la distribución empírica y la distribución teórica
F_t = Función de la distribución empírica
F_0 = Función de la distribución teórica

4.8.7.3.Chi Cuadrado, se considera una prueba no paramétrica; cuanto mayor sea χ^2 menos verosímil es que la hipótesis sea correcta. [1]

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Ecuación 33. Ajuste de bondad Chi Cuadrado.

Fuente: Mora, Mantenimiento. Alfaomega

Donde:
O_i = Eventos observados en el intervalo i.
E_i = Eventos esperados en la hipótesis de que los datos provengan realmente de la distribución considerada.

4.9.Diagrama para el proceso de medición CMD

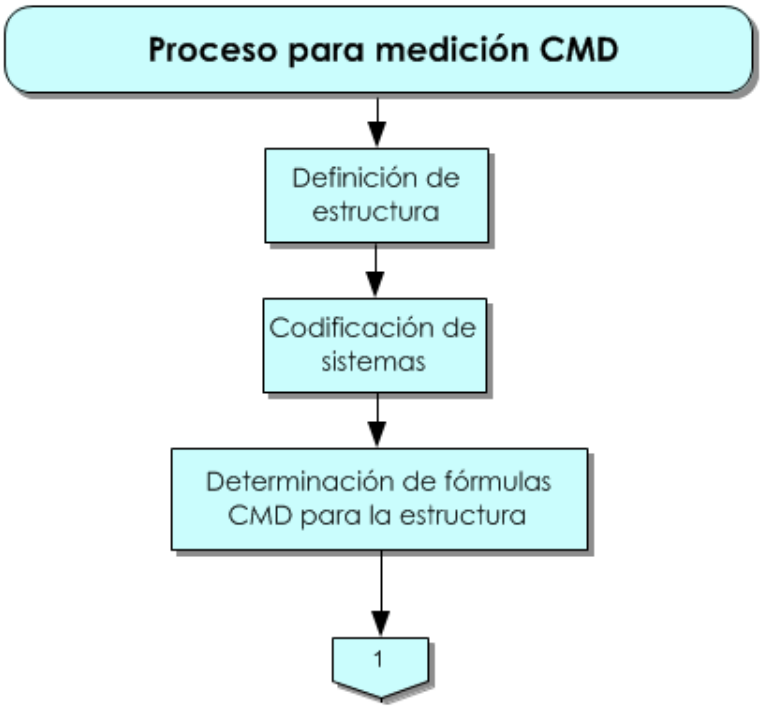


Figura 18. Proceso para medición CMD.

Fuente: El autor

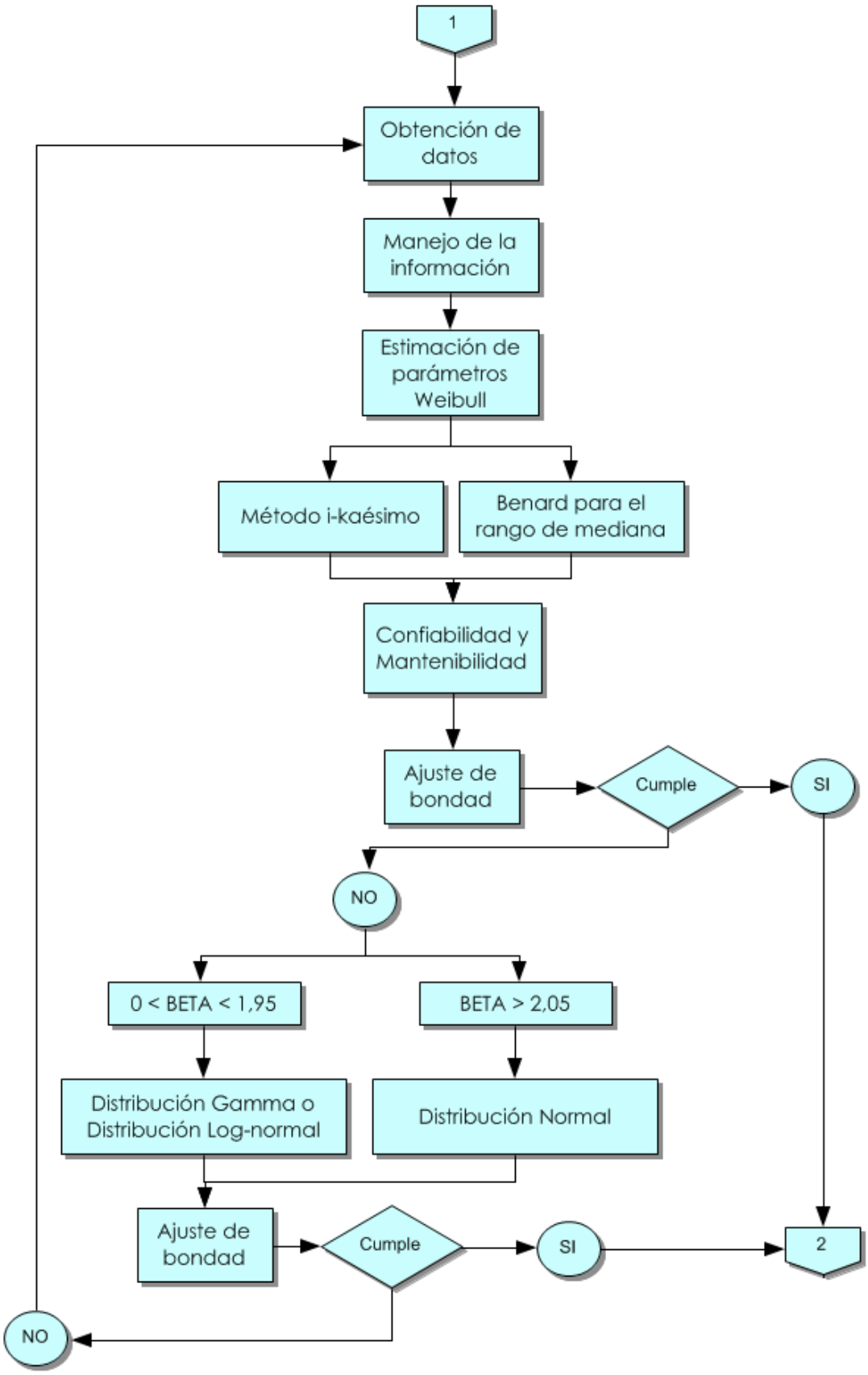


Figura 18. Proceso para medición CMD.

Fuente: El autor

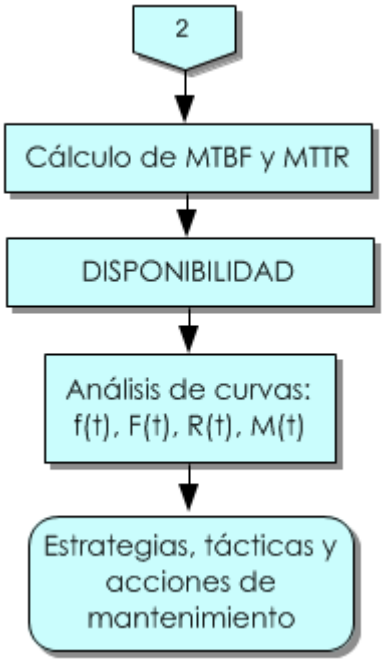


Figura 18. Proceso para medición CMD.

Fuente: El autor

5. Resultados

5.1.Interpretación

De la interpretación y análisis de las curvas características CMD, y de sus pronósticos se desprenden las estrategias a realizar para lograr el cumplimiento de metas, objetivos, misión y visión de la empresa a través del uso intensivo de estos instrumentos en la gestión y operación del mantenimiento. La estrategia de mantenimiento se diseña definiendo la táctica recomendada de acuerdo con el análisis de las variables del estudio CMD, analizadas en la sección 4.8.

A continuación se presentan algunas curvas características, resultado de la realización de los cálculos CMD en otros trabajos respectivamente referenciados, para exponer la interpretación de las mismas.

Caso 1

- Confiabilidad

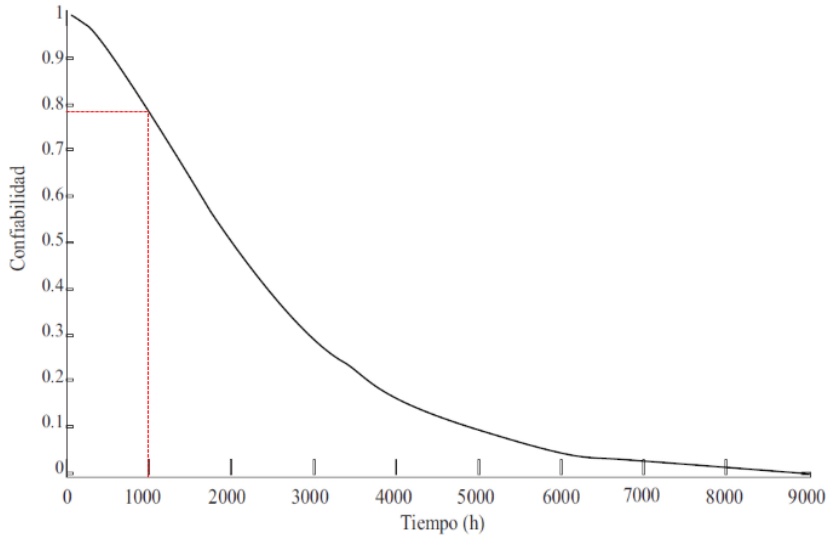


Figura 19. Ejemplo 1, curva de confiabilidad.

Fuente: Melo, Estimación CMD

Se puede observar que la probabilidad de que el equipo no falle antes de las 1000 horas de funcionamiento es de 78 %. Esta, es una curva decreciente característica del comportamiento de la confiabilidad debido a la degradación del equipo por uso.

- Función de densidad de fallas

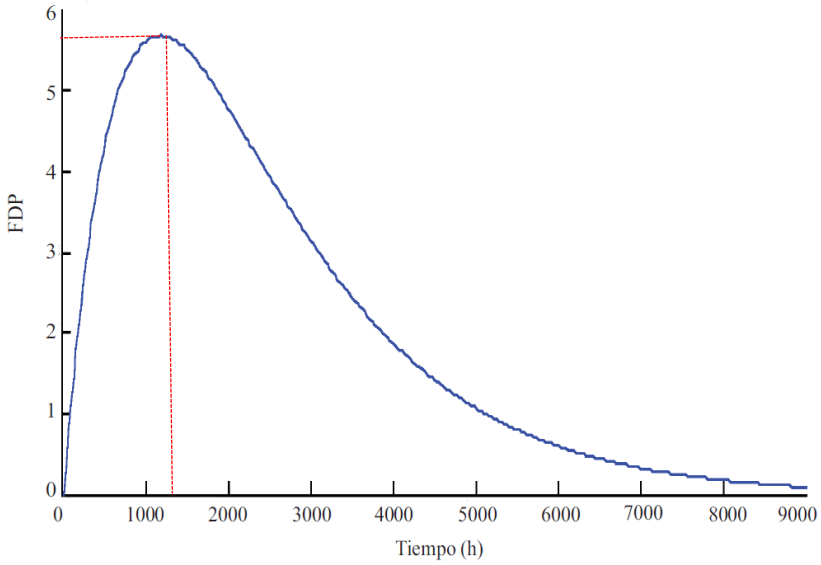


Figura 20. Ejemplo 2, curva de función de densidad.

Fuente: Melo, Estimación CMD.

La gráfica nos muestra que la mayor parte de fallas (5.6 FDP), se dará alrededor de las 1300 horas, para luego decrecer a un periodo de estabilización.

- Tasa de fallas

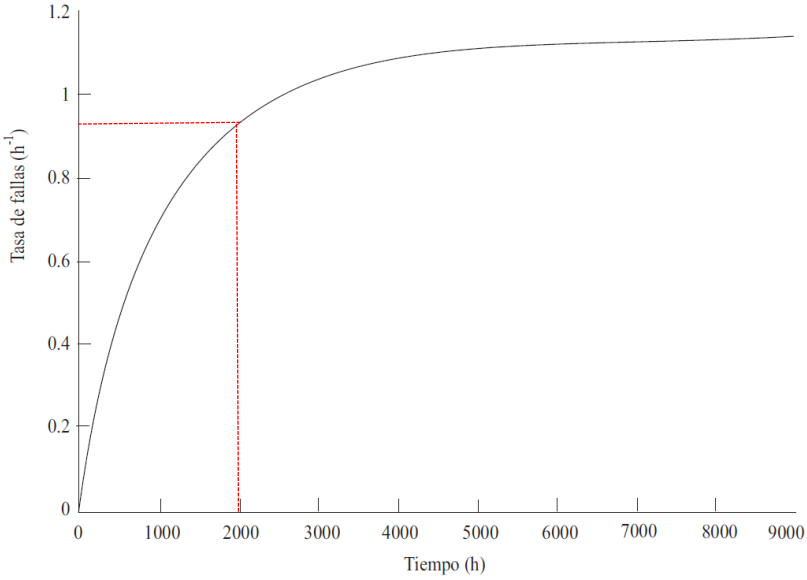


Figura 21. Ejemplo 3, curva de tasa de fallas.

Fuente: Melo, Estimación de CMD

Esta gráfica nos indica la probabilidad de que el sistema analizado falle en un intervalo de tiempo determinado. Es decir, existe una probabilidad del 92 % de que el equipo deje de funcionar alrededor de las 2000 horas.

- Mantenibilidad

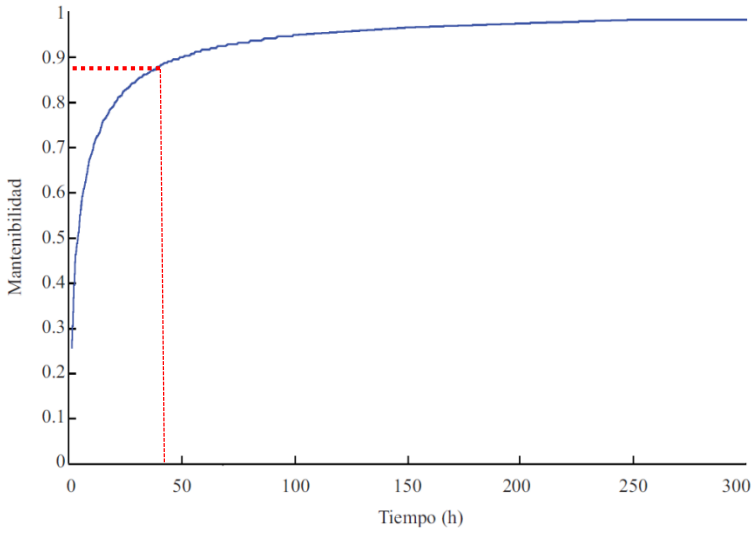


Figura 22. Ejemplo 4, curva de mantenibilidad.

Fuente: Melo, Estimación de CMD

La probabilidad de que el sistema sea reparado y retornado a un estado de operación en 50 horas es de 90 %.

Caso 2

- Confiabilidad

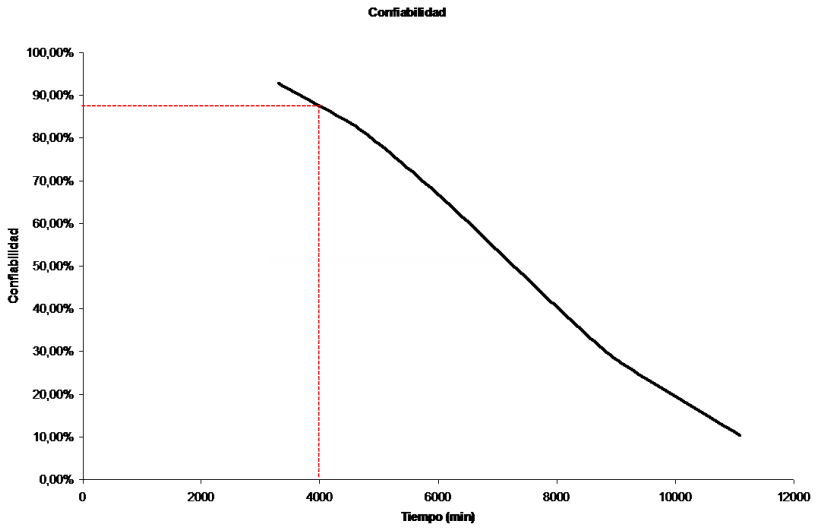


Figura 23. Ejemplo 5, curva de confiabilidad.

Fuente: Fierro, Implementación de índices CMD, UPS

En esta gráfica se observa que la probabilidad de que no falle el elemento antes de 4000 minutos es de 87 %. Lo que permitirá determinar su confiabilidad hasta aproximadamente los 12000 minutos de funcionamiento.

- Función de densidad de fallas

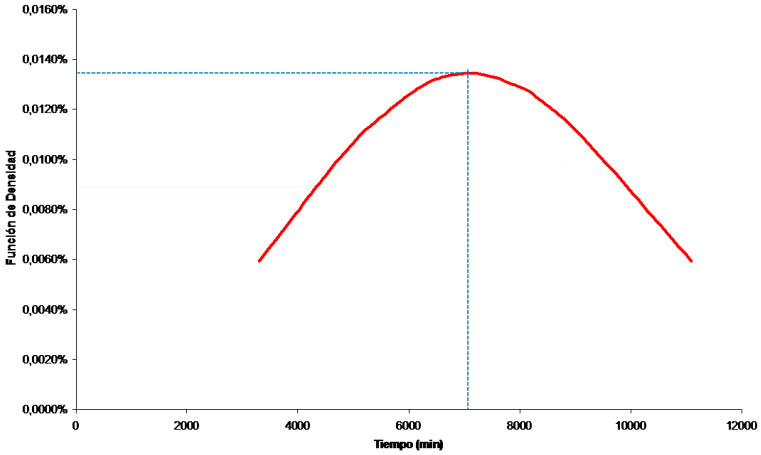


Figura 24. Ejemplo 6, curva de función de densidad.
Fuente: Fierro, Implementación de índices CMD, UPS

En esta gráfica se puede interpretar que la mayoría de las fallas se dará alrededor de los 7000 minutos.

- Tasa de fallas

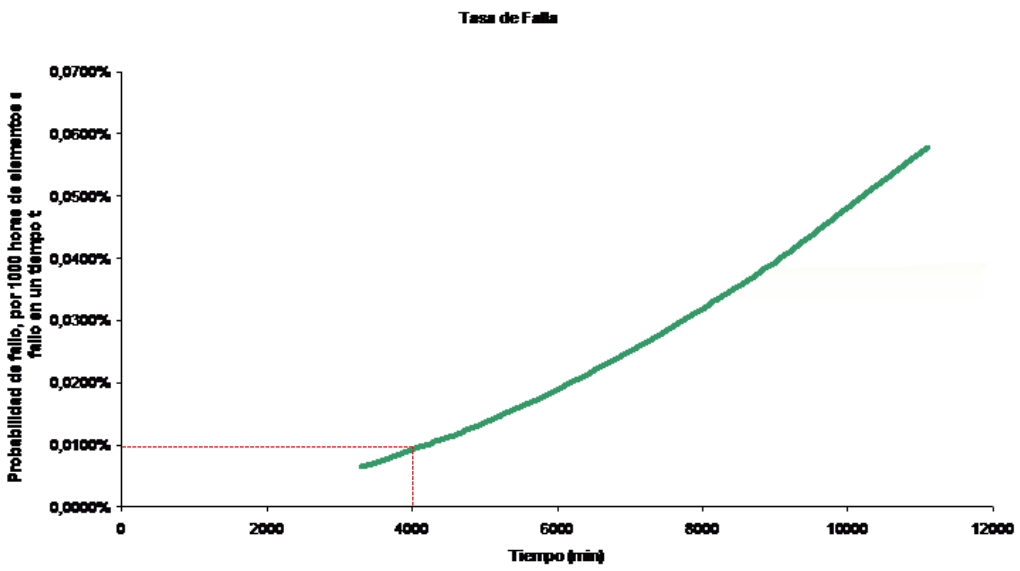


Figura 25. Ejemplo 7, curva de tasa de fallas.

Fuente: Fierro, Implementación de índices CMD, UPS

En la gráfica se puede ver que la probabilidad de que el elemento falle a los 4000 es del 10 %. Y conforme aumenta las horas de funcionamiento la probabilidad de que el elemento falle en cierta hora también aumenta.

- Mantenibilidad

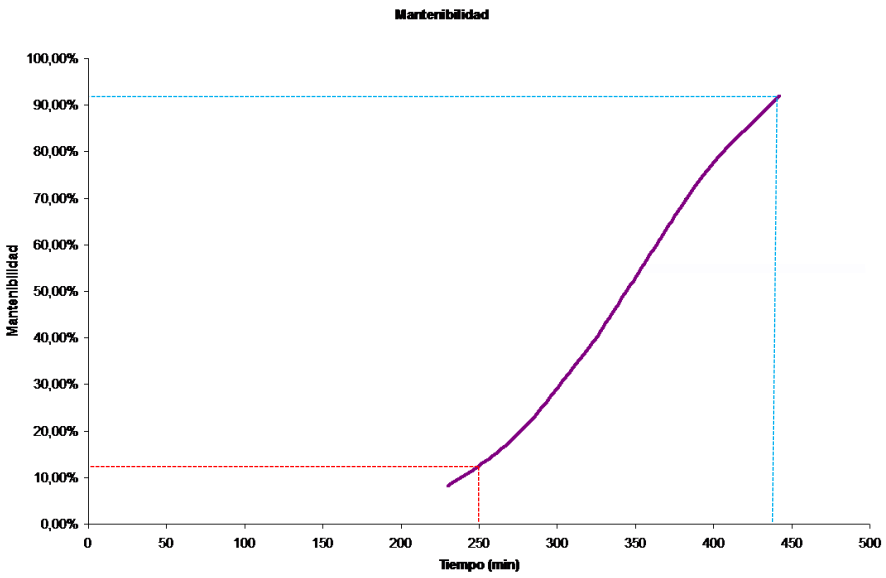


Figura 26. Ejemplo 8, curva de mantenibilidad.

Fuente: Fierro, Implementación de índices CMD, UPS

La probabilidad de que el elemento sea devuelto a un estado de operación después de haber fallado, es alrededor del 12 % en un tiempo de 250 minutos. Mientras que para que sea repuesto en un tiempo 430 minutos la probabilidad es alrededor de 92 %. Con lo que se puede deducir que las probabilidades más altas de recuperación se darán en periodos de tiempos mucho más extensos.

Caso 3

Ahora se expone, como caso de estudio una empresa ferroviaria de Sudáfrica que opera una flota de material rodante envejecido, y en el que predominantemente, se hace uso de mantenimiento basado en el tiempo. En análisis de confiabilidad de tres bogies motor considerados individualmente, y un conjunto de tren, compuesto por los tres bogies, se obtuvo la siguiente curva:

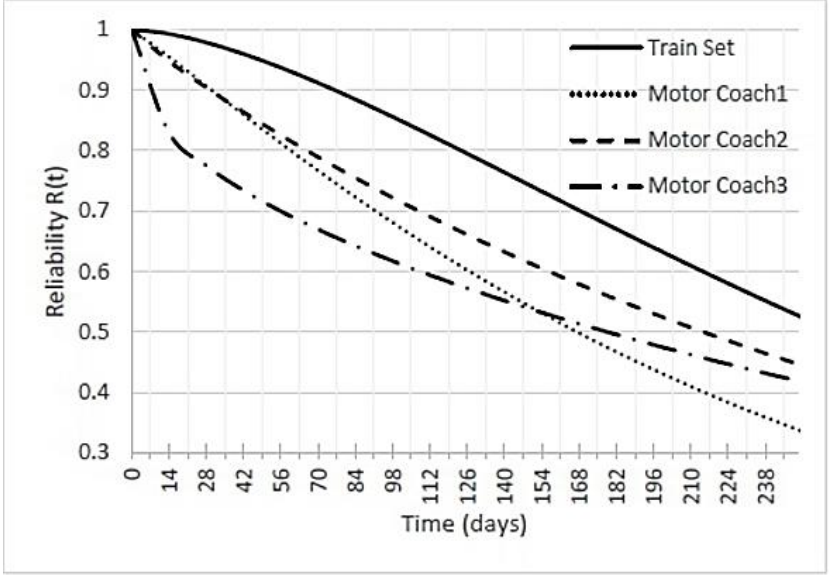


Figura 27. Confiabilidad de un conjunto tren, y confiabilidad de tres bogies motor individuales.
Fuente: Conradie. Quantifying system reliability in rail transportation

Se hace evidente que la confiabilidad de MC2 y MC3 sigue una tendencia similar, aunque MC1 inicialmente es más alto que los dos, pero entonces la reducción de confiabilidad de MC1 reduce significativamente. De la figura se puede derivar que la

confiabilidad del conjunto tren es superior a la confiabilidad de cualquiera de los bogies motor individuales.

Se determina que en un tiempo de 14 días los bogies individuales tienes una confiabilidad de: MC1 95. 5 %, MC2 94.8 %, y MC3 83 %. Y, para el mismo intervalo de tiempo el conjunto tren tiene una confiabilidad del 99.3 %.

Caso 4

A continuación se compara la confiabilidad del bogie motor 3 (MC3, analizado en el caso anterior) con la confiabilidad de algunos subsistemas, tales como: equipo auxiliar, compresor, aspirador de vacío.

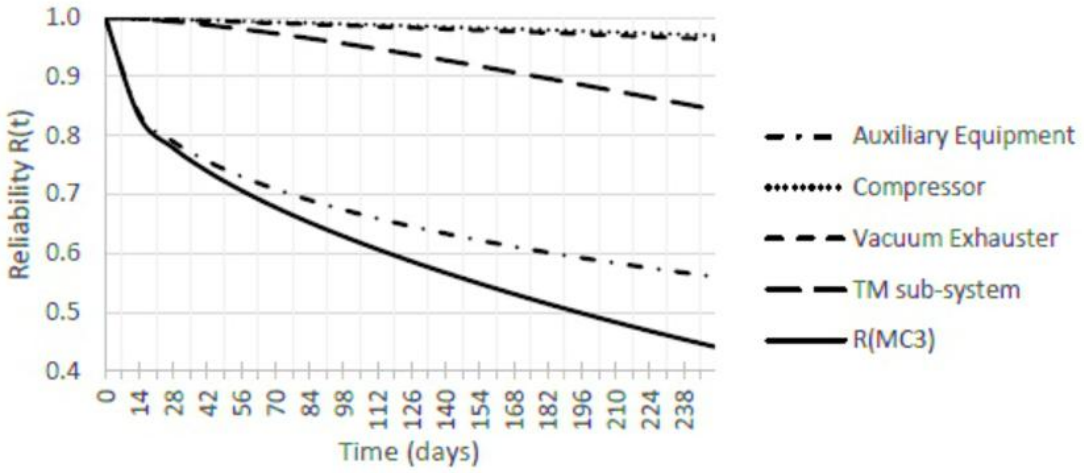


Figura 28. Confiabilidad de los subsistemas individuales en comparación con la confiabilidad del bogie motor 3 (MC3).

Fuente: Conradie. Quantifying system reliability in rail transportation

Se puede ver claramente que el equipo auxiliar tiene una confiabilidad mucho más baja que el resto de subsistemas, con lo que después de cierto tiempo de funcionamiento puede esperar una pronunciada degradación de la confiabilidad de este subsistema, lo que afecta la confiabilidad del sistema.

5.2.Toma de decisiones

La obtención de los índices permitirá valor cuantitativamente la gestión de mantenimiento aplicada, y ayudará a tomar decisiones para plantearse acciones

correctivas en el caso de no cumplimiento de las metas de mantenimiento, o para el proceso de mejora continua. A través de los índices de los diferentes sistemas y subsistemas se podrá identificar en cuales se encuentran los problemas que no permiten la obtención de las metas trazadas, para efectuar sobre ellos las acciones que sean necesarias.

Esta evaluación cuantitativa de la calidad de gestión a través de los índices CMD conduce a la empresa hacia la búsqueda de certificaciones internacionales, tales como la Certificación IRIS[28] que complementa la norma de calidad internacional ISO 9001 e introduce requisitos específicos del ferrocarril. El objetivo principal de esta norma es mejorar la calidad en el sector ferroviario mediante la reducción de esfuerzos y costos.

Así, en los casos específicos de los siguientes sistemas, donde las empresas encargadas de la instalación y puesta en servicio, o empresas encargadas de la operación y mantenimiento de los sistemas, establecen y garantizan disponibilidades generales, (parte contractual) sin descuidar la seguridad; lo que obliga al contratante a establecer o implementar un sistema de medición y monitoreo continuo de CMD.

Sistema Ferroviario	**Disponibilidad**
Tranvía de Cuenca	96 %
Metro de Dubai	99,9 %
Monoriel de Palm Jumeirah	99,9 %
Tren Ligero de Docklands	98,25 %

Tabla 21. Disponibilidad de diferentes sistemas ferroviarios.

Fuente: Serco, Transit Operation and Maintenance Capabilities

Entonces, cuando el sistema tiene una alta disponibilidad ($D \geq 96$ %)[29], este garantiza la puntualidad en el tráfico ferroviario, y la toma de decisiones se enfocan hacia el proceso de mejora continua. Por el contrario, con un sistema de baja disponibilidad las decisiones se encaminan para cumplir con las metas establecidas por la gestión de

[28] Norma Internacional de la Industria Ferroviaria, del inglés *International Railway Industry Standard.*
[29] Referenciado en las disponibilidades de sistemas ferroviarios presentados en la tabla 21.

mantenimiento, con el mejoramiento de los tiempos de mantenimiento y operación (MTBF, MTTR).

Como ya se indicó, la disponibilidad resulta ser una función de la confiabilidad y la mantenibilidad, por lo que se debe tener en cuenta que se puede obtener la misma disponibilidad con diversas combinaciones de confiabilidad y mantenibilidad.

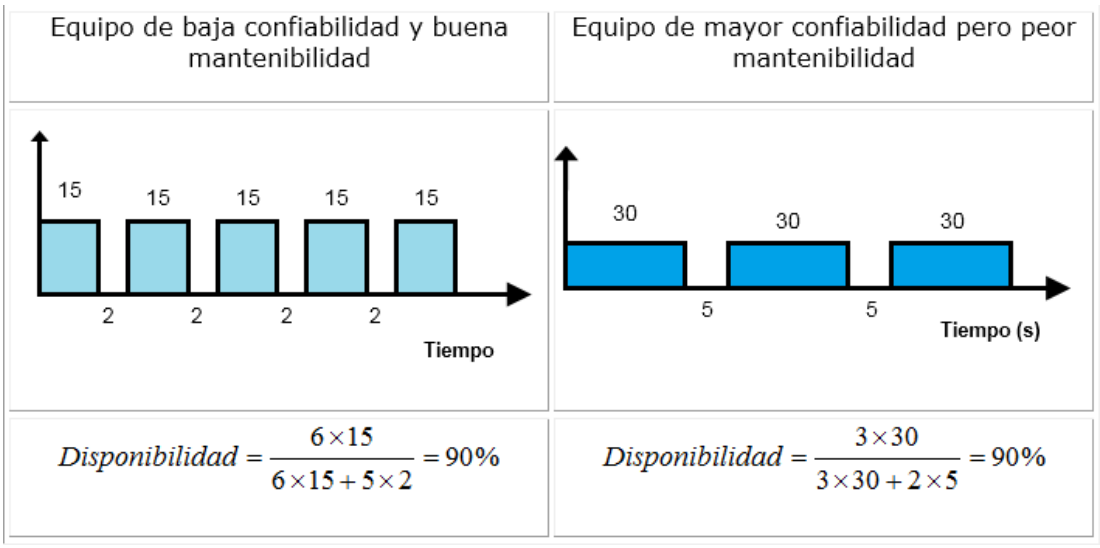


Figura 29. Disponibilidades similares.

Fuente: Fierro, Implementación de índices CMD, UPS

5.2.1. Toma de decisiones basadas en los índices en Subsistemas

Basados en los índices CMD calculados se pueden presentar las siguientes decisiones en cuanto a acciones en los subsistemas:

- Reparaciones, parte del mantenimiento correctivo en la que se realizan acciones manuales sobre un elemento [2], a través de lo cual se llega a la restauración[30] de dicho elemento.
- Modificaciones, transformación de algunas características sin modificar la esencia de un elemento para que cumpla con los requisitos de funcionamiento. [24]

[30] Restauración. El evento que se da cuando un elemento recupera la capacidad de realizar una función requerida después de un defecto.

- Sustituciones, las sustituciones o cambios propiamente dicho de piezas, elementos y/o componentes que no pudieron ser restaurados ni modificados. [24]

Esto, para que a través de los índices se tomen las decisiones más acertadas y así aumentar la confiabilidad de los elementos que no permiten el logro de los objetivos, con lo que se tiene un aumento de la disponibilidad en el sistema principal al que pertenecen.

5.2.2. Toma de decisiones basadas en los índices en Sistemas

A través de los índices se tiene un enfoque cuantitativo de evaluación para la toma de decisiones en las estrategias de mantenimiento, las mismas que afectan el costo del ciclo de vida de un sistema ferroviario, que se explica en la siguiente figura:

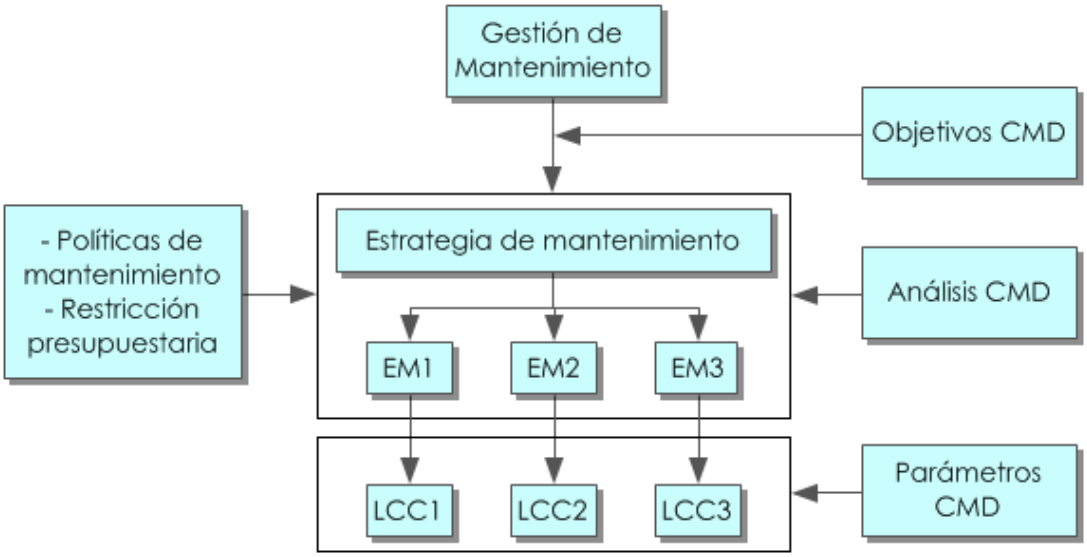


Figura 30. Costo del ciclo de vida basado en decisiones de mantenimiento.
Fuente: Prasad, Uncertainty in Life Cycle Cost of Railway Track

La gestión de mantenimiento plantea los objetivos CMD que a través de la estrategia de mantenimiento aplicada se trata de alcanzarlos.

La estrategia de mantenimiento se ve limitada por las políticas de mantenimiento y las restricciones presupuestarias vigentes de la empresa, a pesar de eso se pueden aplicar diferentes estrategias las mismas que son analizadas por un estudio CMD.

Con ello, cada estrategia de mantenimiento genera un costo del ciclo de vida diferente, con sus respectivos parámetros CMD a ser evaluados, para comprobar el cumplimiento de los objetivos planteados por la gestión de mantenimiento. Cada estrategia busca reducir el costo del ciclo de vida y el cumplimiento de los requerimientos CMD.

La estrategia de mantenimiento con el costo del ciclo de vida más bajo y que permita el cumplimiento de los objetivos, es considerada como la solución más rentable para ser implementada en las operaciones.

6. Conclusiones

- La estructura de un sistema ferroviario definida en este trabajo es generalizada debido a la gran diversidad de tecnologías aplicadas en las diferentes líneas férreas tomadas en cuenta, por lo que para implementar esta metodología en un sistema específico se necesita de un estudio más exhaustivo y minucioso acerca de la estructura, proceso e interrelaciones, involucradas en el sistema.
- La estimación de índices CMD permite una evaluación cuantitativa de la gestión de mantenimiento del sistema ferroviario para el cumplimiento de metas, y planear actividades de mantenimiento basadas en análisis estadístico confiable.
- La disponibilidad del sistema ferroviario es la meta última que persigue la implementación de índices CMD para alcanzar el cumplimiento del objetivo principal del transporte sobre vía férrea; con estándares de calidad y confort. Es decir, que al tener una alta disponibilidad se garantiza la puntualidad del tráfico ferroviario sin descuidar la seguridad, esto se logrará con el cumplimiento de las RAMS.
- La aplicación de índices CMD además de evaluar la gestión de mantenimiento dentro de la organización, influye en el costo del ciclo de vida del sistema; de acuerdo al análisis de estos índices permite aplicar diferentes estrategias de mantenimiento que son limitadas por las políticas de área y las restricciones presupuestarias aplicadas dentro de la organización.
- Con la presente metodología se cumple parte de los requerimientos establecidos en la sección 6.4.3.3 de la norma EN 50126:2005, tales como: análisis y predicción de la confiabilidad, distribución de la confiabilidad, adquisición y evaluación de datos de confiabilidad, análisis y predicción de la mantenibilidad, adquisición y evaluación de datos de mantenibilidad, análisis de disponibilidad.
- Para la ejecución e implementación de índices CMD deberá ser la autoridad ferroviaria quien establezca los objetivos y políticas mínimas para la evaluación de la gestión de mantenimiento del sistema.
- El análisis CMD en un sistema ferroviario puede darse desde el primer día de funcionamiento de este, pero, cabe recalcar que mientras más tiempo de funcionamiento tenga se tendrá mayor cantidad de datos para que las diferentes curvas puedan ser más estables y permitan pronósticos confiables.

7. Recomendaciones

- En el trabajo se trata de explicar la estimación de parámetros de la distribución de Weibull de una manera “manual”, pero en la actualidad existe una gran variedad de Software que permite este procedimiento, y además el uso de otras distribuciones, así como la realización de pronósticos CMD, entre otras características, por lo que se recomienda el estudio y aplicación de estos. Se citan algunos paquetes informáticos para dichos propósitos: PROM, VALRAMOR, WEIBULL++, FORECAST PRO XE, etc.
- Para realizar trabajos futuros, se recomienda analizar cada subsistema independientemente debido a la gran complejidad tecnológica que representa cada uno de ellos.

8. Referencias bibliográficas

[1] MORA, Luis Alberto. *Mantenimiento: planeación, ejecución y control*. Primera edición. México D. F.: Alfaomega, 2009.

[2] AENOR. *Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS)*. UNE – EN 50126. Madrid, 2005.

[3] HERNÁNDEZ, E.; NAVARRETE, E. "Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento". Ingeniería Mecánica 4. Revista No 6. Cuba. 2001.

[4] BLANCHARD, Benjamin. *Ingeniería Logística*. Primera edición. Madrid: Isdefe, 1995.

[5] PINEDA, Steven Alner; SILVA, Luisa Jimena. "Implementación de los Índices CMD en los equipos rotativos de la planta de CRACKING UOP I de la GRB ECOPETROL S.A.". Director: Ing. Carlos Ramón González. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bucaramanga, 2008.

[6] UPARELA, José Manuel. "Medición estratégica CMD en el sistema de vapor de una planta química en el departamento del Atlántico". Asesor: Dr. PhD. Luis Alberto Mora. Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medellín, 2013.

[7] MELO, R.; LARA, C.; JACOBO, F. *Estimación de la confiabilidad – disponibilidad – mantenibilidad mediante una simulación tipo Monte Carlo de un sistema de compresión de gas amargo durante la etapa de ingeniería*. Tecnol. Ciencia. Ed. (IMIQ) 24(2), 2009.

[8] GARCÍA PALENCIA, Oliverio. *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial: Principios Fundamentales.* Primera Edición. Bogotá: Ediciones de la U, 2012.

[9] FIERRO, Pablo Renato. "Implementación de índices de mantenimiento en la Compañía Ecuatoriana del Caucho S. A.". Director: Ing. Iván Chérrez Ávila. Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías, Cuenca, 2005.

[10] PISTARELLI, Alejandro J. *Mantenibilidad.* 2010. Recuperado el 16 de diciembre de 2015, disponible en: http://www.pistarelli.com.ar

[11] KNEZEVIC, Jezdimir. *Mantenibilidad.* Cuarta edición. Madrid: Isdefe, 2006.

[12] ISO. *Orientación sobre las técnicas estadísticas para la norma ISO 9001:2000.* ISO/TR 10017:2003.

[13] PUPO MALABET, Ivan Enrique. "Estrategias de mantenimiento y operación en línea de trituración y apilamiento Cerro Matoso S.A. Montelíbano – Colombia, desde el análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad alcanzada". Director: Dr. PhD Alberto Mora Gutiérrez. Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, Medellín – Colombia, 2014.

[14] CÉSPEDES, Pedro; TORO, Juan. *Metodología para medir Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad en Mantenimiento.* Universidad EAFIT, Medellín – Colombia, 2001.

[15] ADIF. *Conceptos Básicos Ferroviarios.* 2008. Recuperado el 26 de diciembre de 2015, disponible en: http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/oferta_de_empleo_publico/doc/08_fc_ConceptosFerroviarios.pdf

[16] RIBES, Josep – Maria. "Análisis de la evolución de la interoperabilidad y de la seguridad ferroviaria en Europa en el periodo 1991 – 2011 y Propuesta de mejora". Director: Dr. Ricard Bosch. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Barcelona – España, 2012.

[17] GONZÁLEZ, Francisco Javier. *Ingeniería Ferroviaria.* Segunda Edición. Madrid: Librería UNED, 2010.

[18] Ferrocarriles del Ecuador, "Historia". Recuperado el 24 de diciembre de 2015, disponible en: http://trenecuador.com/ferrocarrilesdelecuador

[19] EL BANCO INTERNACIONAL PARA LA RECONSTRUCCIÓN Y EL FOMENTO/GRUPO DEL BANCO MUNDIAL. *La Reforma de los Ferrocarriles: Manual para Mejorar el Rendimiento del Sector Ferroviario.* Primera Edición. Washington DC, 2011.

[20] POPULAR SCIENCE. *Trans – Atlantic Maglev: Vacuum Tube Train.* 2004. Recuperado el 25 de diciembre de 2015, disponible en: http://www.popsci.com

[21] EUROPAPRESS. *Un tren japonés maglev bate record de velocidad, con 603 km/h.* 2015. Recuperado el 25 de diciembre de 2015, disponible en: http://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia

[22] VALERO, Jorge. "Análisis y simulación de potenciales de carril en sistemas ferroviarios de tracción en DC". Director: Javier Sanz Feito. Universidad Carlos II de Madrid Escuela Politécnica Superior, Madrid, 2011.

[23] MARTÍNEZ, Laura. "Métodos de inferencia para la distribución de Weibull: Aplicación en la Fiabilidad Industrial". Asesor: Estela Sánchez Rodríguez, Juan Carlos Pardo Fernández. Universidad de Vigo, Vigo, 2011.

[24] MURILLO, Willian. *Confiabilidad y análisis estadístico para la predicción de fallas, seguridad, supervivencia, riesgo, costo y garantías de los equipos.* RCM INGENIERÍA, Chile 2012.

[25] CONRADIE, P. D. F. "Quantifying system reliability in rail transportation in an ageing fleet environment". S. Afr. J. Ind. Eng. Vol 26 n.2 Pretoria, 2015.

[26] GONZÁLEZ F., Francisco. *Auditoría del Mantenimiento e Indicadores de Gestión: Las cinco amenazas del mantenimiento.* Segunda edición. Madrid: Fundación Confemetal, 2010.

[27] LEON, Cyri. "Estudio de la optimización del diseño de subestaciones para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica". Director: Bernat Martínez. Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2007.

[28] NACHLAS, Joel A. *Fiabilidad.* Primera edición. Madrid: Isdefe, 1995.

[29] PRASAD, Ambika. "Uncertainty in Life Cycle Cost of railway track". Reliability and Maintainability Symposium, 2008. RAMS 2008. IEEE, pp. 42-47. 2008.

[30] RODRIGUEZ DEL AGUILA, Miguel Angel. "Propuesta de mejora de la gestión de mantenimiento basado en la mantenibilidad de equipos de acarreo de una empresa minera de Cajamarca". Director: Lucía Maribel Bautista. Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Cajamarca – Perú, 2012.

[31] VUCHIC, Vukan. *Urban Transit: Systems and technology.* Primera edición. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

9. Anexos

ANEXO 1. Fórmulas CMD para la estructura de un sistema ferroviario

1. Material Rodante

1.1. Vehículo

$$MR1 = 1 - [(1 - MR11)(1 - MR12)(1 - MR13)]$$

$$MR1 = 1 - \left\{\left\{1 - \left[1 - \left[\left[1 - \left[1 - [(1 - MR1111)(1 - MR1112)(1 - MR1113)(1 - MR1114)(1 - MR1115)(1 - MR1116)]\right]\left[1 - \left[1 - [(1 - MR1121)(1 - MR1122)(1 - MR1123)(1 - MR1124)(1 - MR1125)]\right]\right]\right]\right]\right\} * \left\{1 - \left[1 - \left[\left[1 - \left[1 - [(1 - MR1211)(1 - MR1212)(1 - MR1213)(1 - MR1214)]\right]\left[1 - \left[1 - [(1 - MR1221)(1 - MR01222)(1 - MR1223)]\right]\right]\right]\right]\right\} * \{1 - MR13\}\right\}$$

1.2. Captación de corriente

1.2.1. Línea aérea de contacto

$$MR2 = 1 - [(1 - MR21)(1 - MR23)(1 - MR24)]$$

$$MR2 = 1 - [(1 - MR211)(1 - MR23)(1 - MR24)]$$

1.2.2. Alimentación por suelo

$$MR2 = 1 - [(1 - MR22)(1 - MR23)(1 - MR24)]$$

$$MR2 = 1 - [(1 - MR221)(1 - MR23)(1 - MR24)]$$

1.2.3. Alimentación por suelo y línea aérea de contacto

$$MR2 = 1 - [(1 - MR21)(1 - MR22)(1 - MR23)(MR24)]$$

$$MR2 = 1 - [(1 - MR211)(1 - MR221)(1 - MR23)(1 - MR24)]$$

2. Suministro de energía

$$Suministro\ de\ energía = SE1 * SE2 * SE3$$

2.1.1. Línea aérea de contacto

$$SE = \{1 - [(1 - SE11)(1 - SE12)(1 - SE13)(1 - SE14)]\} * \left\{1 - \left[\left[1 - \left[1 - [(1 - SE211)(1 - SE212)(1 - SE213)(1 - SE214)]\right]\right]\left[1 - [SE221]\right]\right]\right\} * \left\{1 - \left[\left[1 - \left[1 - [(1 - SE311)(1 - SE312)]\right]\right][1 - SE32][1 - SE331][1 - SE341]\right]\right\}$$

2.1.2. Alimentación por suelo

$$SE = \{1 - [(1 - SE11)(1 - SE12)(1 - SE13)(1 - SE14)]\} * \left\{1 - \left[\left[1 - \left[1 - [(1 - SE211)(1 - SE212)(1 - SE213)(1 - SE214)]\right]\right]\left[1 - [SE221]\right]\right]\right\} * \left\{1 - \left[\left[1 - \left[1 - \left[[1 - SE31121][1 - SE3121]\right]\right]\right][1 - SE32][1 - SE331][1 - SE341]\right]\right\}$$

2.1.3. Alimentación por suelo y línea aérea de contacto

$$SE = \{1 - [(1 - SE11)(1 - SE12)(1 - SE13)(1 - SE14)]\} * \Big\{1 - \Big[\Big[1 - \Big[1 - [(1 - SE211)(1 - SE212)(1 - SE213)(1 - SE214)]\Big]\Big[1 - [SE221]\Big]\Big]\Big\} * \Big\{1 - \Big[\Big[1 - \Big[1 - \Big[\Big[1 - \Big[1 - [(1 - SE31111)(1 - SE31121)]\Big][1 - SE3121]\Big]\Big][1 - SE32][1 - SE331][1 - SE341]\Big]\Big]\Big\}$$

3. Red de comunicaciones

$$RC = 1 - [(1 - RC1)(1 - RC2)(1 - RC3)]$$

$$RC = 1 - \Big\{\Big[1 - \Big[1 - [(1 - RC111)(1 - RC112)(1 - RC113)]\Big]\Big] * \Big[1 - \Big[1 - [(1 - RC21)(1 - RC22)(1 - RC23)(1 - RC24)(1 - RC25)(1 - RC26)(1 - RC27)]\Big]\Big] * \Big[1 - \Big[1 - [(1 - RC31)(1 - RC32)(1 - RC33)]\Big]\Big]\Big\}$$

4. Infraestructura ferroviaria

4.1.Vía

$$IF1 = 1 - [(1 - IF11)(1 - IF12)(1 - IF13)]$$

$$IF1 = 1 - \Big\{\Big[1 - \Big[1 - [(1 - IF111)(1 - IF112)]\Big]\Big] * \Big[1 - \Big[1 - \Big[[1 - IF121] * [1 - (IF1221 * IF12211)] * [1 - IF125]\Big]\Big]\Big] * \Big[1 - \Big[1 - \Big[[1 - IF1311][1 - IF1312]\Big[1 - \Big[1 - [(1 - IF13131)(1 - IF13132)]\Big]\Big]\Big]\Big]\Big\}$$

4.2.Estaciones

$$IF2 = 1 - [(1 - IF21)(1 - IF22)(1 - IF23)]$$

$$IF2 = 1 - \left\{[1 - IF21] * [1 - IF22] * \left[1 - \left[1 - [(1 - IF231)(1 - IF232)]\right]\right]\right\}$$

4.3.Talleres y cocheras

$$IF4 = 1 - [(1 - IF41)(1 - IF42)(1 - IF431)]$$

$$IF4 = 1 - \left\{\left[1 - \left[1 - [(1 - IF411)(1 - IF412)(1 - IF413)(1 - IF414)(1 - IF415)]\right]\right] * \left[1 - \left[1 - [(1 - IF421)(1 - IF422)(1 - IF423)(1 - IF424)(1 - IF425)(1 - IF426)(1 - IF427)]\right]\right] [1 - IF431]\right\}$$

ANEXO 2. Conceptualización de la estructura ferroviaria

1. Material rodante

Todos los equipo que circulan a lo largo de la vía férrea.

1.1.Vehículo

1.1.1. Bogie motor

Bogie que contiene los motores eléctricos que generan la fuerza motriz para el movimiento del tren.

1.1.1.1.Carrocería

Elemento que contiene los diferentes elementos de seguridad y confort del vehículo. Y alberga a los usuarios.

1.1.1.1.1. Sistema de climatización

Debe asegurar un caudal de aportación de aire lo más uniforme posible y a velocidades preestablecidas.

1.1.1.1.2. Sistema de puertas

Permite la apertura y el cierre de puertas para la entrada y salida de los pasajeros, y también bloquea las puertas cuando el tren está en movimiento.

1.1.1.1.3. Equipo neumático

Para el mando de un elevado número de sistemas del tren, tales como: freno, puertas, contactores, pantógrafo, etc.

1.1.1.1.4. Sistema de iluminación

Ilumina el interior de los vehículos cuando el nivel de iluminación natural no es suficiente para garantizar la correcta iluminación.

1.1.1.1.5. Dispositivo de “Hombre muerto”

Asegura que el conductor esté atento y concentrado en la conducción a través de un dispositivo que debe manipular periódicamente.

1.1.1.1.6. Sistema de ayuda a la explotación (SAE)

Equipo a bordo del vehículo del sistema SAE que se explica el punto 3.1.1.1.

1.1.1.2.Potencia y tracción

Grupo de elementos para realizar las diferentes aceleraciones y desaceleraciones del tren.

1.1.1.2.1. Tracción

Motores que generan la fuerza motriz.

1.1.1.2.2. Frenos

Sistema que realiza la desaceleración del vehículo, normalmente se cuenta con cuatro tipos de freno: de servicio, de emergencia, de seguridad y de estacionamiento.

1.1.1.2.3. Ejes y ruedas

Reciben el movimiento del motor a través de reductores.

1.1.1.2.4. Suspensión

Se encarga de absorber las vibraciones producidas por la vía férrea hacia el vehículo.

1.1.1.2.5. Reductores

Interconexión entre motor y eje para reducir la alta velocidad de giro del motor hacia los ejes.

1.1.2. Bogie remolque

Bogie intermedio no motorizado que será remolcado o empujado, según sea el caso, por el bogie motor.

1.1.2.1.Carrocería

Idéntico al punto 1.1.1.1.

1.1.2.1.1. Sistema de climatización

Idéntico al punto 1.1.1.1.1.

1.1.2.1.2. Sistema de puertas

Idéntico al punto 1.1.1.1.2.

1.1.2.1.3. Equipo neumático

Idéntico al punto 1.1.1.1.3.

1.1.2.1.4. Sistema de iluminación

Idéntico al punto 1.1.1.1.4.

1.1.2.2.Bastidor

1.1.2.2.1. Frenos

Idéntico al punto 1.1.1.2.2.

1.1.2.2.2. Ejes y ruedas

Idéntico al punto 1.1.1.2.3.

1.1.2.2.3. Suspensión

Idéntico al punto 1.1.1.2.4.

1.2.Captación de corriente

Forma en la que se recibe la energía desde la subestación rectificadora en el vehículo.

1.2.1. Línea aérea de contacto

Energización a través de catenaria.

1.2.1.1.Pantógrafo

Dispositivo que capta la corriente desde la catenaria.

1.2.2. Alimentación por suelo

Energización a través de un tercer carril, paralelo a los carriles que guían el camino del vehículo.

1.2.2.1.Captador de corriente

Dispositivo que capta la corriente desde el tercer carril

1.2.3. Baterías

Acumuladores de energía para alimentación de baja tensión de los dispositivos del vehículo.

1.2.4. Transformadores y convertidores auxiliares

Generan y regulan la corriente continua y alterna necesaria para alimentar los circuitos de baja tensión del tranvía y servicios auxiliares (ejemplo climatización).

2. Suministro de energía

Se encarga de la recepción, transformación y distribución de la energía eléctrica proveniente de los alimentadores de la compañía suministradora, hacia los circuitos de tracción, alumbrado, fuerza y servicios propios.

2.1.Subestación de alta tensión

Se alimentan de una acometida generalmente de una red pública o empresa suministradora de la energía eléctrica.

2.1.1. Sección de alta tensión

Recibe la alta tensión.

2.1.2. Sección de transformadores

Transforma la corriente de alta tensión en media tensión.

2.1.3. Sección de media tensión

Envía la corriente de media tensión hacia las subestaciones rectificadoras.

2.1.4. Sección de servicios auxiliares

Alimentan los distintos servicios auxiliares en la subestación de alta tensión

2.2.Subestación de media tensión

2.2.1. Subestación rectificadora

Convierte la corriente alterna de media tensión en corriente continua y así proporcionar la energía eléctrica para la tracción.

2.2.1.1.Sección de media tensión

Recibe la corriente de media tensión de la subestación de alta tensión.

2.2.1.2.Sección de transformadores

Transforma la corriente alterna de media tensión en corriente de baja tensión.

2.2.1.3.Sección de corriente continua

Distribuye corriente continua de una tensión nominal de 750 Vcc (Tranvías) o 1500 Vcc (Metros) según sea el caso.

2.2.1.4.Sección de servicios auxiliares

Alimentan los distintos servicios auxiliares de las subestación de media tensión.

2.2.2. Subestación para talleres y cocheras

Transforma y rectifica la corriente para la energización de los talleres y cocheras.

2.3.Alimentación

2.3.1. Alimentación de tracción

2.3.1.1.Captación de corriente

2.3.1.1.1. Línea aérea de contacto

Es la red de suministro de tracción para el vehículo.

2.3.1.1.1.1.Catenaria

Transportar la energía eléctrica desde las subestaciones de rectificación hasta los pantógrafos de las motrices de los trenes.

2.3.1.1.2. Alimentación por suelo

2.3.1.1.2.1.Tercer carril

Transporta la energía eléctrica desde las subestaciones rectificadoras hasta los captadores de corriente.

2.3.1.2.Retorno de corriente

2.3.1.2.1. Conexión entre riel y subestación

Permite que las corrientes absorbidas por los tranvías vuelvan a las subestaciones. Evita que esta corriente de retorno escape a tierra y provoque corrientes vagabundas perjudiciales para estructuras, canalizaciones metálicas, etc.

2.3.2. Alimentación para equipos de mando y control

Las subestaciones rectificadoras generan su propia energía en baja tensión para control y mando.

2.3.3. Alimentación de servicios auxiliares

2.3.3.1.Alimentación baja tensión en estaciones de pasajeros

Las subestaciones rectificadoras generan energía en baja tensión para los servicios auxiliares, como la estación de pasajeros.

2.3.4. Sistema de tierra

Reduce al mínimo la corriente de fuga y permite máximo aislamiento a tierra de los rieles; y también tiene conductancia longitudinal de los rieles para facilitar el retorno “correcto” de corriente de tracción.

2.3.4.1.Conexión de equipos a la barra de tierra

3. Red de comunicaciones

3.1.Centro de control de tráfico

Su objetivo es conseguir de manera centralizada la supervisión y gestión remota de todos los sistemas consiguiendo, al mismo tiempo, cumplir todas las exigencias aplicables a un conjunto de sistemas de control moderno.

3.1.1. Operación automática de trenes (ATO)

Garantiza la óptima y confortable conducción de los trenes a lo largo de la línea, y la gestión de los trenes en las maniobras a la terminal y estacionamiento en los patios. Su funcionamiento siempre estará condicionado al funcionamiento del ATO, ATS y SAE.

3.1.1.1.Sistema de ayuda a la explotación (SAE)

Garantiza el seguimiento, la supervisión y la regulación del tráfico de los trenes en la línea y cocheras.

3.1.1.2.Protección automática de trenes (ATP)

Controla todo el equipo que asumen funciones relacionadas con la seguridad de la circulación de los trenes, utilizando información como: posición del vehículo, perfil de la velocidad máxima, control de las puertas de tren y plataforma, control de frenado de emergencia, comando de parada, cualquier desaceleración introducida.

3.1.1.3.Supervisión automática de trenes (ATS)

Gestiona el movimiento de los trenes en la línea sobre la base de programas que operan en conformidad con el rendimiento requerido en términos de tiempo y frecuencia, esta gestión también incluye el control de la circulación en área de patios y cocheras. Utilizando información como: orden de salida, parámetros de ajuste de la marcha, comando enviados desde el puesto central de operaciones, o generados automáticamente a partir de los programas de operación.

3.2.Comunicaciones

3.2.1. Radiocomunicaciones

Permite la transmisión de la fonía y datos entre el Centro de Control y los trenes, es decir, permite transmisiones bidireccionales tren – tierra – tren.

3.2.2. Comunicaciones WIFI

Sistema de comunicaciones inalámbricas de datos “no críticos” de alta capacidad en el conjunto de recorrido, que comunica los vehículos con los nodos de comunicaciones instalados en paradas.

3.2.3. Telefonía

Sistema basado en la tecnología de Voz IP. Debe ofrecer cobertura a los operadores del Centro de Control, locales técnicos, oficinas administrativas, estaciones, subestaciones, talleres y depósitos.

3.2.4. Interfonía

Sistema basado en tecnología Voz IP. Cobertura en centro de control, estaciones, elevadores, máquinas expendedoras de boletos, salidas de emergencia de túneles. Soportará llamadas de información y emergencia.

3.2.5. Videovigilancia

Permite asegurar un alto nivel de control y seguridad tanto en el interior como en el exterior de las dependencias, estaciones y trazado del enlace ferroviario.

3.2.6. Grabación y gestión de audio

Sistema basado en tecnología de Voz IP. Grabar todas las llamadas entrantes y salientes, y registrar información del audio como: tipo de llamada, hora de inicio, duración, identificación del origen y destinatario de la llamada.

3.2.7. Relojería

Permite provisionar una referencia temporal precisa, centralizada y sincronizada a todos los subsistemas que tienen necesidad de sincronizar y controlar los relojes presentes en todos los ambientes del sistema ferroviario.

4. Infraestructura ferroviaria

4.1. Vía

Infraestructura por donde se desplaza el tren

4.1.1. Señalización convencional

4.1.1.1. Señalización vertical

Se posicionan de forma que el conductor pueda observarlas y detener el vehículo de forma segura antes de rebasarla aplicando el freno de servicio.

4.1.1.2.Semaforización

Garantiza la coordinación de la circulación de los tranvías en la vía pública compartida con el resto de usuarios de la vía (peatones, bicicletas, vehículos motorizados, etc.).

4.1.2. Sistema de líneas subterráneas

4.1.2.1.Ventilación de líneas

Proporciona el caudal de aire necesario para renovar el ambiente de los túneles y mantener la calidad del aire y su temperatura dentro de límites admisibles.

4.1.2.2.Detección y protección contra incendios

Su objetico es tener un monitoreo constante del estado del túnel.

4.1.2.2.1. Captación de señal

Por sensores por gradiente de temperatura o por temperatura máxima, o por detectores de humo. Debe asegurar una detección rápida y precisa.

4.1.2.2.2. Emisión de alarmas

Alertan de un incendio en los túneles.

4.1.2.3.Propagación del humo en túneles

Debe ser capaz de arrastrar completamente la nube de humos por el interior del túnel hasta el pozo de extracción o boca de salida.

4.1.2.4.Bombeo de aguas en líneas

Equipo de bombeo para el agua recogida por filtraciones en los túneles en emergencias.

4.1.2.5.Alumbrado de túneles

Para facilitar las evacuaciones de pasajeros en emergencias y para operaciones de mantenimiento.

4.1.3. Componente de vía

4.1.3.1.Carril

Encargado de guiar el trayecto del tren.

4.1.3.1.1. Traviesa

Soporte de los rieles, fijando y asegurando su posición en lo referente a cota, separación e inclinación, recibir cargas transmitidas por los rieles. [3]

4.1.3.1.2. Sujeciones

Fijar los rieles a los durmientes (traviesas), asegurar la invariabilidad de la vía. [3]

4.1.3.1.3. Sistema de cambio de vía

Destinado a permitir a un vehículo ferroviario cambiar de vía. [3]

4.1.3.1.3.1.Sistema mecánico o eléctrico

Mecanismo que acciona las agujas para en cambio de vía del tren.

4.1.3.1.3.2.Interfaz

Señal visual, electrónica o por medio del centro de control de operaciones que indica el cambio de vía.

4.2.Estación

4.2.1. Infraestructura

Garantiza a los pasajeros un sistema de circulación amplio y fácilmente reconocible. Está compuesta por: vestíbulo, entrepiso, andenes, bajo andén, conexiones verticales, locales técnicos, de servicio, oficinas.

4.2.2. Megafonía informativa

Permite la difusión de información a los usuarios, estos mensajes pueden ser pregrabados o bien directamente emitidos por un ente.

4.2.3. Control de ingreso

Lleva a cabo el control de la entrada de los pasajeros, comprobando mediante los equipos adecuados el pago que realiza el usuario por el derecho a utilizar el servicio de transporte.

4.2.3.1.Sistema electrónico

Permite la validación del pago por el servicio, puede ser por medio de tarjetas inteligentes que activarán el sistema mecánico, además en algunos casos realizan el conteo de usuarios.

4.2.3.2.Sistema mecánico

Permiten el paso de los usuarios, pueden ser puertas, torniquetes, etc.

4.3.Talleres y cocheras

Tiene el fin de aparcar a los trenes para actividades de mantenimiento y estacionamiento.

4.3.1. Máquinas complementarias

4.3.1.1.Sistema de drenaje

Para el drenado del agua utilizado en la limpieza exterior de los trenes.

4.3.1.2.Bancos de pruebas

Están equipados para realizar pruebas y corroborar el correcto funcionamiento de diferentes elementos.

4.3.1.3.Bancos de trabajo

Bancos que permiten acciones de mantenimiento correctivo en diferentes elementos de los trenes.

4.3.1.4.Prensa hidráulica

Multiplicador de fuerza para tareas de mantenimiento que requieran extracciones de elementos.

4.3.2. Máquinas especiales

4.3.2.1.Máquina de lavado

Permite limpiar la superficie externa de los trenes.

4.3.2.2.Gira bogies

Para permitir el desplazamiento de los bogies entre las diferentes vías del taller de mantenimiento.

4.3.2.3.Cabinas de pintura

Se realiza operaciones de pintado y secado de vehículos completos y parciales con el control constante de las características del aire.

4.3.2.4.Torno con sistema de tracción

Para realizar un re perfilado de la rueda del tren sin desmontar esta, y mantener la rueda en condiciones de funcionamiento.

4.3.2.5.Puentes grúa

Para el transporte de materiales y cargas en desplazamientos verticales y horizontales en el interior del taller.

4.3.2.6.Gatos móviles

Permiten la elevación del material rodante para efectuar operaciones de mantenimiento de la parte inferior de la caja.

4.3.2.7.Sistema de vacío para limpieza de interiores

Realiza la limpieza interior de los vehículos.

4.3.3. Máquinas herramienta

Diferentes herramientas para la realización de las operaciones de mantenimiento.