UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

PROPUESTA DE MEJORA BASADA EN CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE TRENES DE METRO REGIONAL DE VALPARAÍSO S.A.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

FRANCO ARIEL JORQUERA PEZOA

PROFESOR GUÍA

SR. FREDY KRISTJANPOLLER

VALPARAÍSO, 12 de Octubre, 2017.

ÍNDICE

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 1
2. OBJETIVOS 3
2.1 Objetivo General 3
2.2 Objetivos Específicos 3
3. MARCO TEÓRICO 4
3.1 ANTECEDENTES GENERALES 5
3.1.1 Transporte en Chile 5
3.1.2 EFE 5
3.1.3 Merval 6
3.1.4 Sistemas de Energía 6
3.1.5 Sistemas de Alimentación Eléctrica de Trenes (SAET) 8
3.2 Mantenimiento 9
3.2.1 Mantenimiento Correctivo 9
3.2.2 Mantenimiento Preventivo 10
3.2.3 Mantenimiento Predictivo 10
3.3 Análisis de los modos de falla, sus efectos y su criticidad (FMECA) 11
3.3.1 Descripción de la metodología 12
3.4 Confiabilidad 13
3.4.1 Funciones de Confiabilidad 14
3.4.2 Tasa de falla 15
3.4.3 Funciones de Confiabilidad a nivel continuo y tasa de falla instantánea 17
3.4.4 Modelación de las funciones de confiabilidad 19
3.4.5 Confiabilidad de sistemas 23
3.4.6 Metodología RBD (Reliability Blocks Diagram) 35
3.5 Ley de Weibull 35
3.5.4 Estimación de los parámetros de la Ley de Weibull 37
3.5.4.2 Determinación de función de falla acumulada 37
3.5.5 Determinación de los parámetros de la ley de Weibull 39
3.6 Disponibilidad de componentes y sistemas 40
3.7 Configuraciones de Disponibilidad en Sistemas 43
3.7.1 Disponibilidad en Serie 43

3.7.2 Disponibilidad en Redundancia Total 43
3.7.3 Disponibilidad en Stand-by 44
3.8 Aspecto financiero 45
3.8.1 Cuantificar los costos del Mantenimiento Preventivo 45
3.8.2 Programación del Mantenimiento y Optimización de asignación de recursos 47
3.8.3 Costos globales 48
3.8.4 Indicadores Económicos 51
4. METODOLOGÍA 54
4.1 Descripción de Metro Valparaíso 56
4.1.1 Consideraciones 62
4.2 Obtención y Revisión de Programa de Mantenimiento Anual de los Sistemas de Energía de Metro Valparaíso. 64
4.3 Recopilación de intervenciones preventivas y correctivas de los sistemas de Energía. 66
4.4 Elaboración y diseño de planilla resumen de intervenciones de equipos eléctricos. 68
4.5 Elaboración de planilla de intervenciones cronológicas por subsistema. 70
4.6 Elaboración de planilla con tiempos de reparación y cálculo de tiempo de funcionamiento de cada equipo. 71
4.6.1 Construcción de planilla con tiempos de reparación 71
4.6.2 Cálculo de tiempo de funcionamiento de cada equipo 78
4.7 Cálculo de indicadores MTBF y MTTR. 81
4.7.1 Cálculo de indicadores de Tiempo Medio de Reparación MTTR 81
4.7.2 Cálculo de indicadores de Tiempo Medio Entre Fallas MTBF 82
4.7.2 Resultados 87
4.8 Cálculo de modeladores de tasa de falla y disponibilidad. 88
4.8.1 Obtención de modeladores de tasa de falla 88
4.8.2 Obtención de modeladores de disponibilidad 93
4.8.3 Disponibilidad en el año 2016 98
4.8.4 Resultados 99
4.9 Elaboración de Diagramas de Bloques. 100
4.10 Cálculo de Disponibilidad del sistema. 101
4.10.1 Resultados 104
4.11 Análisis económico. 104

4.11.1 Costos de Mantención y Reparación de los subsistemas.....104
4.11.2 Costos de Inversión de los Subsistemas 108
4.11.3 Cálculo de Costos de Ineficiencia 108
4.12 Propuestas de mejoras..... 109
4.12.1 El Plan de Mantenimiento 109
4.12.2 Mantenimiento Preventivo y Correctivo 110
4.12.3 Mantenimiento Predictivo 110
4.12.4 Calidad del Mantenimiento 110
4.12.5 Datos de información de mantenimiento.....111
4.12.6 Software de Mantenimiento 111
4.12.7 Insumos y Repuestos 112
4.12.8 Equipos en espera o redundancia.....113
4.12.9 Seguridad.....114
5. CONCLUSIONES..... 116
6. REFERENCIAS 119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Marco Teórico. 4

Figura 2: Mapa de Estaciones de Merval. 6

Figura 3: Sistemas de Energía. 7

Figura 4: Pasos a seguir de FMECA. 12

Figura 5: Tasa de fallas de una población, homogénea en función de su edad. 16

Figura 6: Periodo en el ciclo de vida de sistemas reparables. 19

Figura 7: Esquemas de bloques. 25

Figura 8: Sistema en paralelo. 28

Figura 9: Sistema Stand-by. 32

Figura 10: A funciona, B funciona. 33

Figura 11: Ley de Weibull. 36

Figura 12: Curva de costos globales 48

Figura 13: Diagrama explicativo de la metodología 54

Figura 14: Extracto de Programa anual de Mantenimiento de Sistema de Energía. 65

Figura 15: Extracto de Plataforma Informática Siria. 67

Figura 16: Tiempo medio entre fallas MTBF de SEAT. 84

Figura 17: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER VA. 85

Figura 18: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER ES. 85

Figura 19: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER PO. 86

Figura 20: Tiempo medio entre fallas MTBF de Catenarias. 86

Figura 21: Tasa de Fallas de SEAT. 90

Figura 22: Tasa de Fallas de SER VA. 90

Figura 23: Tasa de Fallas de SER ES. 91

Figura 24: Tasa de Fallas de SER PO. 92

Figura 25: Tasa de Fallas de Catenarias. 92

Figura 26: Disponibilidad de SEAT. 96

Figura 27: Disponibilidad de SER VA. 96

Figura 28: Disponibilidad de SER ES. 97

Figura 29: Disponibilidad de SER PO. 97

Figura 30: Disponibilidad de Catenarias. 98

Figura 31: Diagrama Físico del Sistema de Alimentación de Trenes. 100

Figura 32: Diagrama Lógico del Sistema de Alimentación de Trenes. 101

Figura 33: Diagrama Lógico Resumido del Sistema. 103

Figura 34: Costos de Mantención Anuales de SEAT. 105

Figura 35: Costos de Mantención Anuales de SER VA. 106

Figura 36: Costos de Mantención Anuales de SER ES. 106

Figura 37: Costos de Mantención Anuales de SER PO. 107

Figura 38: Costos de Mantención Anuales de Catenarias. 107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de las funciones de densidad de probabilidad. 22

Tabla 2: Probabilidades de sistemas..... 29

Tabla 3: Extracto de planilla resumen de intervenciones de mantenciones preventivas no programadas y correctivas de sistemas de alimentación eléctrica de trenes. 68

Tabla 4: Extracto de planilla resumen de intervenciones de mantenciones preventivas de sistemas de alimentación eléctrica de trenes..... 69

Tabla 5: Planilla de intervenciones cronológicas de SEAT. 70

Tabla 6: Disposición de datos inicial de SEAT..... 71

Tabla 7: Disposición de datos inicial de SER VA..... 72

Tabla 8: Disposición de datos inicial de SER ES..... 72

Tabla 9: Disposición de datos inicial de SER PO. 73

Tabla 10: Disposición de datos inicial de Catenarias..... 74

Tabla 11: Días y horas trimestrales durante funcionamiento de los sub-sistemas. 78

Tabla 12: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SEAT..... 79

Tabla 13: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER VA..... 80

Tabla 14: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER ES..... 80

Tabla 15: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER PO. 80

Tabla 16: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de Catenarias..... 80

Tabla 17: Tiempo medio de reparación MTTR de SEAT..... 81

Tabla 18: Tiempo medio de reparación MTTR de SER VA..... 82

Tabla 19: Tiempo medio de reparación MTTR de SER ES..... 82

Tabla 20: Tiempo medio de reparación MTTR de SER PO. 82

Tabla 21: Tiempo medio de reparación MTTR de Catenarias..... 82

Tabla 22: Tiempo medio entre fallas MTBF de SEAT. 83

Tabla 23: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER VA. 83

Tabla 24: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER ES. 83

Tabla 25: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER PO. 84

Tabla 26: Tiempo medio entre fallas MTBF de Catenarias. 84

Tabla 27: Tasa de Falla de SEAT. 88

Tabla 28: Tasa de Falla de SER VA. 88

Tabla 29: Tasa de Falla de SER ES. 89

Tabla 30: Tasa de Falla de SER PO. 89

Tabla 31: Tasa de Falla de SER PO. 89

Tabla 32: Disponibilidad de SEAT. 93

Tabla 33: Disponibilidad de SER VA. 93

Tabla 34: Disponibilidad de SER ES. 94

Tabla 35: Disponibilidad de SER PO. 94

Tabla 36: Disponibilidad de Catenarias. 94

Tabla 37: Disponibilidad de los Subsistemas. 95

Tabla 38: Disponibilidad Anual de Subsistemas. 99

Tabla 39: Disponibilidad del Sistema. 103

Tabla 40: Disponibilidad del Sistema 105

Tabla 41: Costos de Inversión de Subsistemas. 108

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En la Región de Valparaíso, Chile, existe la empresa Metro Valparaíso S.A., que cuenta con un sistema de transporte de pasajeros, satisfaciendo parte de la demanda de los habitantes de la región, a lo largo de sus 43 kilómetros de recorrido, comprendidos entre las comunas de Limache a Valparaíso. Transportando alrededor de 20 millones de pasajeros al año en su flota de 35 trenes, 28 automotores X'trapolis 100 y 8 X'trapolis modulares (Metro Valparaíso, 2016).

La flota, para su funcionamiento hace uso de electricidad, dado que emplean un sistema de tracción en corriente continua DC (Hill, 1994a; Jiang & Ekström, 1997; Oura, Mochinaga, & Nagasawa, 1998). Al utilizar niveles de tensión del orden de los 3000 Vdc, es necesario emplear catenarias para evitar el riesgo de accidentes de personas (Singh, Gairola, Singh, Chandra, & Al-Haddad, 2008). Las cuales, al entrar en contacto con el pantógrafo de cada tren, permiten la alimentación eléctrica de éste.

Las catenarias a su vez son alimentadas por las subestaciones eléctricas rectificadoras, las que están dispuestas en la zona de Portales, El Salto y Villa Alemana, que alimentan dos conjuntos de tramos cada una.

La existencia del doble conjunto de alimentación obedece a la necesidad de aumentar la confiabilidad y la disponibilidad del sistema de tracción, ya que en caso de fallas o rutinas de mantenimiento, los conjuntos de alimentación se respaldan entre sí y, a su vez, ofrecen respaldo a las subestaciones adyacentes en una línea (Hill, 1994b).

Se sabe que las subestaciones eléctricas son un componente importante de los sistemas de potencia, además de ser los de mayor costo económico, y que la continuidad

del servicio depende en gran parte de ellas; es necesario aplicar a estos sistemas (subestaciones) una adecuada gestión de operación y mantenimiento (Gonzalez & Ochoa, 2005).

Es decir, que las subestaciones eléctricas rectificadoras, al fallar, tienen un gran impacto, tanto para la empresa, como para la sociedad, considerando la masa de personas que utiliza ese medio de transporte para llegar a sus diversos destinos.

En la actualidad, la empresa Siemens presta servicios de mantenimiento a estos sistemas de alimentación eléctrica, servicios que fueron externalizados por Metro Valparaíso. Se desconoce por parte de este último si el plan de mantenimiento es adecuado, tomando en consideración que en los últimos años han ocurrido gran cantidad de fallas relacionadas con estos sistemas (y sus elementos) e impactando directamente en costos operacionales y de mantenimiento.

Las características de este problema han motivado que diversos autores busquen soluciones de modelos de gestión del mantenimiento y sus herramientas, como por ejemplo, en la implementación de indicadores de confiabilidad y disponibilidad (Hernández & Navarrete, 2001; Mora, 2009; Viveros, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013), incluyendo mantenimiento en subestaciones eléctricas (Arriagada, 1994; Gonzalez & Ochoa, 2005)(Arriagada, 1994; González et al., 2015) e incluso la relación con los sistemas ferroviarios (Lee, Kim, Oh, Jang, & Kwon, 2006; León & Martínez, 2007).

Por lo que se busca, en primer lugar, y como paso previo a cualquier actividad, realizar una evaluación de la situación inicial (Viveros et al., 2013). Dando evidencia qué elementos fallan de los sistemas de catenarias y subestaciones, y que tan seguido sucede esto, y el costo potencial.

Para dar respuesta a ¿Se estará realizando un mantenimiento correcto? ¿Qué se podría hacer para mejorar? ¿Se podrían disminuir los costos?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento para los sistemas de alimentación eléctrica de trenes mediante técnicas de ingeniería de confiabilidad para generar propuestas de mejora del mantenimiento en Metro Regional de Valparaíso.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y Analizar los modelos confiabilidad para proporcionar una base teórica.

- Revisar las buenas prácticas en el mantenimiento, para contrastar las propuestas con lo existente.

- Identificar la estructura de sistemas de alimentación eléctrica de los trenes, definiendo los elementos y sus interrelaciones.

- Evaluar la disponibilidad de los diferentes elementos que componen el sistema de alimentación eléctrica de trenes, para la toma de decisiones en base a los índices.

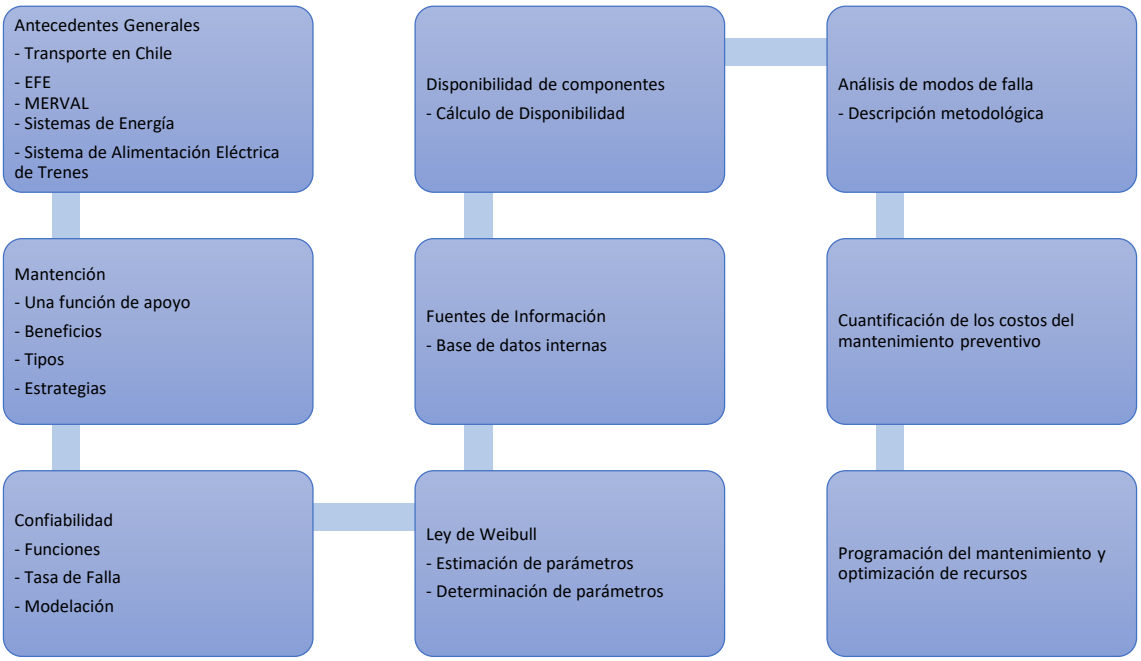
- Proponer políticas de mantenimiento para los sistemas de alimentación eléctrica de trenes en base a los datos y antecedentes recopilados.

- Evaluar el plan de mantenimiento mediante flujos de caja, para determinar la conveniencia de llevar a cabo la propuesta.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se entregan antecedentes de una empresa de transporte de la V Región, MERVAL, de sus sistemas de energía y más en profundidad el sistema de alimentación eléctrica de trenes. Además, se profundizarán las temáticas de mantención, confiabilidad, disponibilidad, análisis de modos de falla, cuantificación de costos asociados a la mantención preventiva, como se muestra en el diagrama de la Figura 1.

Figura 1: Marco Teórico.



Fuente: Elaboración propia.

3.1 ANTECEDENTES GENERALES

3.1.1 Transporte en Chile

En Chile, el área trasporte entrega un 7% del producto interno bruto (PIB). Dichas actividades utilizan en torno al 25% de la energía consumida por el país.

Por otro lado, el modo ferrocarril, carretera y aéreo significan el 27,5%, 60,9% y 11,5% respectivamente del transporte interurbano de la población (Investigación en Transporte en Chile: Áreas de investigación y capacidades, 2009).

3.1.2 EFE

La Empresa de los Ferrocarriles del Estado, EFE, es una empresa autónoma propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es establecer, desarrollar, impulsar, mantener y explotar servicios de transporte de pasajeros y de carga, a realizarse por medio de vías férreas o sistemas similares y servicios de transporte complementarios (Empresa de Ferrocarriles del Estado, 2016).

EFE provee servicios de transporte de pasajeros a través de 3 filiales, los principales servicios en operación son los siguientes:

- Metro Valparaíso, a través de su servicio Merval.
- Tren Central, a través de sus servicios Metrotren, Talca-Constitución y Victoria Temuco.
- Fesur, a través de sus servicios Biotren, Corto Laja y Victoria-Temuco.

3.1.3 Merval

Metro Valparaíso, también conocido como Merval, es empresa privada filial de EFE, la cual se dedica a establecer, desarrollar, impulsar, mantener y explotar servicios de transporte de pasajeros, a realizarse por medio de vías férreas o sistemas similares y servicios de transporte complementarios (Metro Valparaíso, 2016).

La empresa cuenta con 43 kilómetros de doble vía ferroviaria electrificada y 20 estaciones que unen las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache (Ver Figura 2), en donde mueve alrededor de 20 millones de pasajeros al año.

Figura 2: Mapa de Estaciones de Merval.

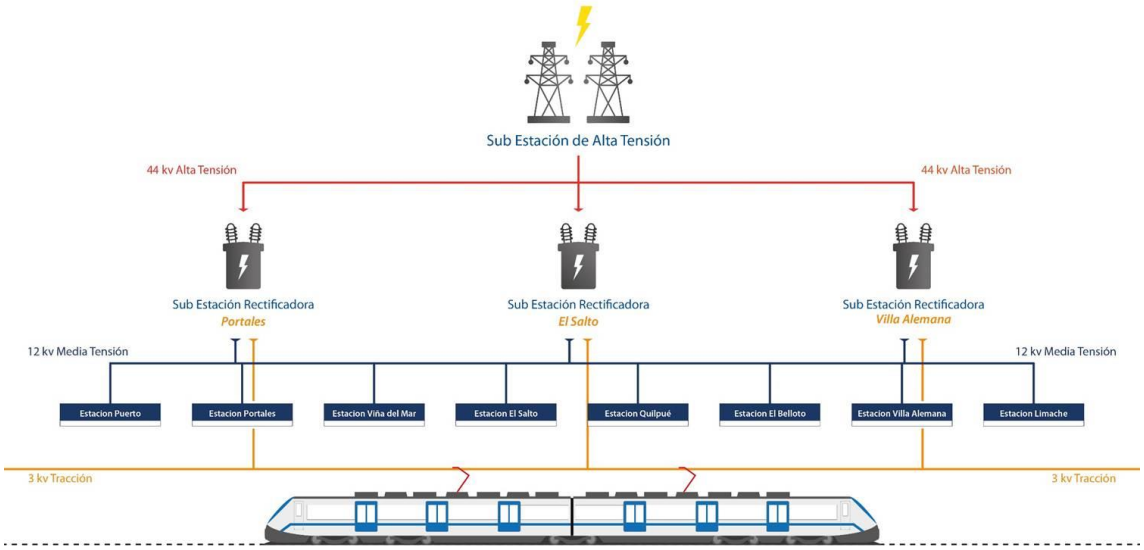
Fuente: Metro Valparaíso.

3.1.4 Sistemas de Energía

Metro Valparaíso para su operación requiere de suministro eléctrico, ya sea, para el movimiento de los trenes propiamente tal, peaje, radiocomunicaciones, redes informáticas, sistemas de control, sistemas de bombeo, iluminación, entre otros.

Para lo cual cuenta, como se puede ver en la Figura 3, con una subestación eléctrica de alta tensión (SEAT) en el sector El Sol, la cual recibe suministro de la empresa distribuidora de energía eléctrica Chilquinta. Dicho suministro llega a una tensión de 220KV, los cuales son convertidos a 44KV para la transmisión a las subestaciones eléctricas rectificadoras de Villa Alemana (SER VA), EL Salto (SER ES) y Portales (SER PO). Cada Subestación Rectificadora a su vez transforma los 44KV a 3000Vdc, para a alimentación de trenes mediante la catenaria. A su vez, también lo convierte los 44KV a 12KV, los cuales son distribuidos a las estaciones, las que cuentan con una subestación que permite convertir los 12KV a 380V y 220V para los consumos propios de la estación.

Figura 3: Sistemas de Energía.



Fuente: Metro Valparaíso.

3.1.5 Sistemas de Alimentación Eléctrica de Trenes (SAET)

El Sistema de alimentación de trenes está inmerso dentro de los sistemas de energía, y este consta principalmente en los siguientes subsistemas previamente señalados:

- Subestación Eléctrica de Alta Tensión (SEAT).
- Subestación Eléctrica Rectificadora Villa Alemana (SER VA).
- Subestación Eléctrica Rectificadora El Salto (SER ES).
- Subestación Eléctrica Rectificadora Portales (SER PO).
- Catenarias.

Estos 5 subsistemas básicamente contemplan el paso de la recepción de la energía, transformación y el suministro a los trenes.

En los últimos años se han generado polémicas por interrupción de servicio, las que han sido principalmente por fallas de origen casual, como rayos, marejadas, temblores y terremotos. Sin embargo, también han existido problemas del servicio a raíz de desperfectos en los sistemas de alimentación de trenes por la falla de componentes e incluso por errores en las mantenciones.

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 (Torres, 2016). En busca de asegurar la calidad de servicio del transporte de pasajeros o mercancías, incrementando al máximo la disponibilidad de los recursos para lograr mejores niveles de seguridad y confort. Dado que todo sistema de transporte repercute en la población y las empresas, dado que mueven y/o apoyan a gran parte del mercado, tanto directa como indirectamente.

3.2 Mantenimiento

Mantenimiento es el conjunto de acciones que permiten mantener o restablecer un bien a un estado especificado o en capacidad de asegurar un servicio determinado. Hay que agregar a este concepto las nociones de acciones a tomar antes del montaje de los bienes (etapa de diseño) y la de la vida útil nominal del equipo, que determina también las acciones a tomar.

Dentro de las principales formas de hacer mantenimiento se destaca el mantenimiento de correctivo o de operación hasta la falla, el mantenimiento predictivo y el predictivo o sintomático.

3.2.1 Mantenimiento Correctivo

Es la serie de trabajos que es necesario ejecutar en las instalaciones, aparatos o maquinas a nuestro cuidado, cuando estás dejan de proporcionar el servicio para el cual han sido concebidos. Este tipo de trabajos debe efectuarse de inmediato para que la interrupción del servicio o producción sea lo más corta posible y así evitar que las pérdidas se eleven. También este mantenimiento se divide en mantenimiento correctivo ligero y mantenimiento correctivo a fondo, según la importancia de los trabajos que hay que desarrollar para corregir la falla; el primero puede ser atacado con personal de escasa preparación y el segundo tipo de mantenimiento debe ser atendido por personal especializado (Gonzalez & Ochoa, 2005).

3.2.2 Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo consiste en la serie de trabajos que se desarrollan en alguna maquina o instalación para evitar interrumpir el servicio que proporciona. Esta serie de trabajos generalmente se derivan de las instrucciones que dan los fabricantes al respecto, y los puntos de vista que se tienen de los técnicos de mantenimiento según la especialidad (Gonzalez & Ochoa, 2005).

Algunos trabajos de mantenimiento preventivo se pueden derivar de los datos históricos de las fallas. El mantenimiento preventivo permite detectar fallos repetitivos, disminuir los puntos muertos por paradas, aumentar la vida útil de equipos, disminuir costos de reparaciones, detectar puntos débiles en la instalación entre una larga lista de ventajas.

Cabe mencionar que el detener un equipo para realizar las tareas anteriores puede resultar muy negativo para la producción. Con lo cual, se debe negociar para fijar fechas para realizar mantenimiento de este tipo.

Por otro lado, la aplicación de mantenimiento preventivo a equipos nuevos puede ser difícil de implementar por la falta de historial y la falta de similitud con equipos antiguos.

3.2.3 Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo se apoya en la estrategia es que una parte solo debe ser cambiada si muestra deterioro que pueda afectar su performance. Existen técnicas que

son de amplio uso en la industria actualmente como Vibración y ruido, Temperatura, Análisis de aceite, entre otros.

3.3 Análisis de los modos de falla, sus efectos y su criticidad (FMECA)

El FMECA es una herramienta de análisis que permite conocer los modos de falla de un sistema y de esta forma evitarlos, ya sea por la incorporación de:

- Sistemas redundantes
- Tecnología más especializada
- Métodos de vigilancia
- Mantención Preventiva más eficaz
- Diagnóstico de falla más eficiente

Esta metodología es de especial importancia en sistemas complejos, los cuales a su vez están compuestos por subsistemas en distintos niveles de desagregación.

El FMECA como herramienta de análisis va más allá de prestar utilidad exclusiva para el mantenimiento, la utilización sistemática en proyectos de diseño el FMECA entrega una ayuda considerable en las etapas de:

- La modelación
- La concepción
- La calidad
- La controlabilidad

3.3.1 Descripción de la metodología

Debido a la forma cualitativa del análisis, para el desarrollo de este es necesario:

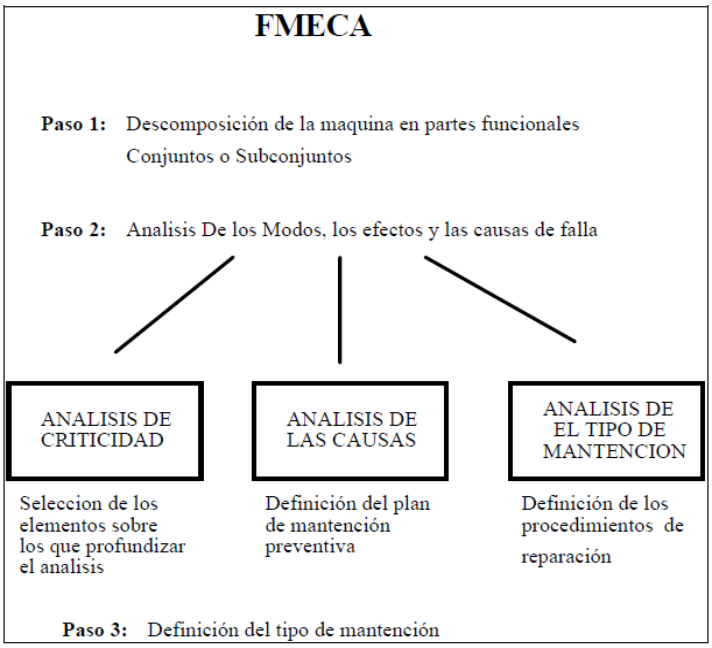
- La experiencia de la persona o grupo de personas que estén desarrollando el análisis para la prescripción de las recomendaciones.

- La descomposición del sistema en subsistemas.

Cada componente es considerado en forma separada, se vislumbran diversos modos de falla, los que son analizados y jerarquizados en los distintos subniveles del sistema.

De este análisis se concluyen recomendaciones que apuntan a mejorar el mantenimiento del sistema, lo que se puede ver esquematizado en la Figura 4.

Figura 4: Pasos a seguir de FMECA.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

3.4 Confiabilidad

El diseño de un plan de mantenimiento eficiente, en términos de su costo global según Stegmaier & Arata (2014), implica la comprensión de los fenómenos de falla de equipos. Dado que las fallas de los equipos son eventos aleatorios, se estudiarán los conceptos y modelos estadísticos, que nos permiten controlar y mejorar la confiablidad y con ello los costos.

La mayor dificultad que enfrentaremos será el alto grado de incertidumbre de los estudios y los efectos de condiciones cambiantes ambientales y de operación en el comportamiento de los equipos.

La confiabilidad de un elemento es la probabilidad de que dicho elemento funcione sin fallas durante un tiempo "t" determinado bajo condiciones ambientales dadas (Stegmaier & Arata, 2014).

A todo elemento es posible asignarle dos estados, que lo caracterizan en todo instante de su vida: el de buen funcionamiento, y el de funcionamiento defectuoso; a dicho elemento puede asociársele la probabilidad de encontrarse en uno u otro estado.

La definición de confiabilidad antes adoptada presupone:

1. Que sea fijado en forma inequívoca el criterio que determina si el elemento funciona o no funciona. Es posible que esta suposición parezca excesiva, pero muchas veces, el estado de falla se puede definir solamente con la concreción de un límite admisible en las prestaciones del aparato en cuestión, más allá del cual se hablará de falla (ejemplos son, el motor de un automóvil, intensidad luminosa de una fuente de luz, órganos de soporte de una válvula, etc.), casos en los que es posible la identificación de efectos intermedios entre los de buen funcionamiento

y el de falla, correspondiendo cada uno de ellos a distintos niveles de prestaciones funcionales.

2. Que sean establecidas exactamente las condiciones ambientales y de utilización, y que se mantengan constantes en el período de tiempo en cuestión.
3. Que sea definido el intervalo de tiempo t durante el cual se requiere que el elemento funcione.

Fijadas las dos primeras condiciones, la confiabilidad de un elemento es función solamente del tiempo, cuya forma depende de la ley probabilística con la que el no funcionamiento o falla pueda darse en el tiempo.

3.4.1 Funciones de Confiabilidad

Definamos las funciones de confiabilidad, en una primera etapa a nivel discreto, para lo cual consideremos la siguiente notación:

N_0 : Número de elementos buenos al instante to (instante inicial)

N_i : Número de elementos buenos al instante ti

n_i : Número de elementos que fallaron entre ti y $t(i+1)$, equivalente a ΔNi.

Δti : Intervalo de tiempo observado igual a $t(i+1) - ti$.

Función de falla $f(t)$ o función de densidad de probabilidad, es decir, la probabilidad de que el elemento falle en el intervalo de tiempo Δti, viene dada como:

$$f(ti)x\ \Delta ti = \frac{ni}{N_0}$$

La función de fallas acumuladas F (t), es decir la probabilidad de que el elemento falle en el intervalo Δti o antes viene dada por:

$$F(ti) = \sum_{0}^{i} f(ti) \cdot \Delta ti = \frac{\sum_{0}^{i} ni}{No} = 1 - \frac{Ni}{No}$$

La función de confiabilidad R (t), es decir, que el elemento sobreviva hasta el intervalo Δti, de acuerdo a lo anterior viene dado por:

$$R(ti) = \frac{Ni}{No} = 1 - F(ti)$$

3.4.2 Tasa de falla

Consideremos ahora otra función de interés fundamental para el análisis de confiabilidad, su relación con las funciones vistas anteriormente y su comportamiento a través del tiempo.

De una manera muy general el fenómeno de falla o de degradación de los elementos y materiales es posible clasificarla en dos categorías principales, las fallas espontáneas; por ejemplo, la ruptura inesperada de una pieza mecánica, el cortocircuito de un sistema eléctrico o electrónico, para los cuales es casi imposible la puesta en marcha de un sistema de mantenimiento de tipo condicional. Y por otro lado están las fallas producto del desgaste: donde es posible visualizar el progreso de la degradación como son los fenómenos de desgaste en mecánica, el aumento del roce, o el aumento de la resistencia para los sistemas eléctricos o electrónicos, para los cuales es posible definir políticas de mantenimiento de tipo preventivo o de tipo condicional.

Al elemento con el cual cuantificaremos la aparición de las fallas lo denotaremos por tasa de falla (λ (t)), que se define como la probabilidad de tener una falla del sistema

o del elemento entre los instantes t y (t+Δt) a condición de que el sistema haya sobrevivido hasta el tiempo "t".

Por otra parte, esta función probabilística tiene una forma característica a lo largo de la vida de los elementos (Figura 5), comúnmente llamada curva en bañera, donde son claramente distinguibles tres períodos:

- Fallas de juventud (rodaje)

  Caracterizadas por una tasa de falla descendente en el tiempo.

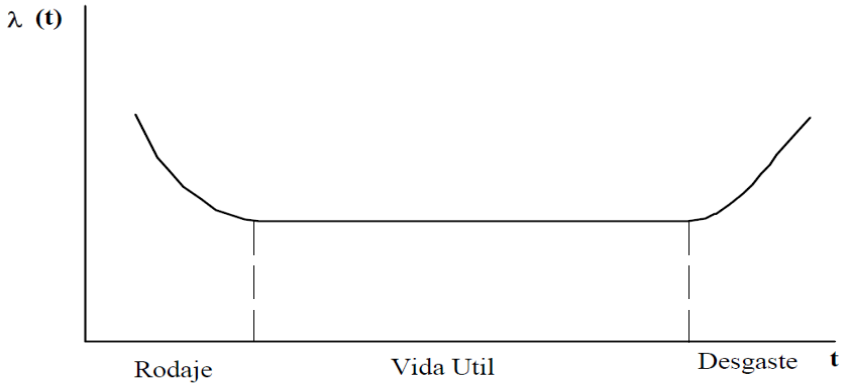
- Fallas de madurez (vida útil)

  A tasa de falla sensiblemente constante en el tiempo.

- Fallas de vejez (desgaste)

  Con tasa de falla creciente (período de desgaste).

Figura 5: Tasa de fallas de una población, homogénea en función de su edad.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

El análisis de esta curva (Figura 5), permite sacar las siguientes conclusiones:

- En lo que concierne al período de rodaje, la tasa de falla va disminuyendo, esto se explica por el hecho que algunos componentes son montados y puestos en funcionamiento estando defectuosos.

- A modo de precaución se practica:
    - Poner en funcionamiento durante un cierto período de tiempo los componentes que se quieren dar a un cliente. Esto tiene por efecto eliminar aquellos que presenten debilidades, y de esta forma tratar de llevar la tasa de falla a nivel de vida útil, a modo de ejemplo el rodaje efectuado a un automóvil.
    - Controles muy concentrados (controles no destructivos).
- El segundo período o período de vida útil, se caracteriza por mantener una tasa de falla sensiblemente constante, común en componentes electrónicos y ligeramente creciente para los equipos mecánicos (efecto de desgaste).
- El tercer período presenta importantes fenómenos de degradación. La tasa de falla es creciente (estado donde es necesario vigilar el material). Esto corresponde a fenómenos de fatiga y de desgaste mecánico, un mantenimiento preventivo puede ser puesto en marcha.

3.4.3 Funciones de Confiabilidad a nivel continuo y tasa de falla instantánea

El desarrollo presentado en los puntos anteriores representa una visión a nivel discreto de las funciones de confiabilidad y sus relaciones, analicemos ahora su comportamiento a nivel instantáneo debido a la ventaja que esto presenta, a partir de las herramientas matemáticas factibles de utilizar.

Por hipótesis se dice que:

$$\lambda(t)dt = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

Donde F(t) y R(t) son respectivamente la función acumulada de fallas y la función de confiabilidad, que es la que deseamos conocer a partir de la tasa de falla λ(t), para esto se integran los dos miembros de la expresión anterior, considerando como restricción de contorno, la condición inicial F(t=0) =0, se obtiene:

$$\int_0^t l(t)dt = \int_0^t \frac{dF(t)}{1-F(t)}; -\int_0^t \lambda(t)dt = \int_0^t \frac{-dF(t)}{1-F(t)}\ ; -\int_0^t \lambda(t)dt = \ln(1-F(t))$$

Aplicando la exponencial, tenemos:

$$e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} = 1 - F(t$$

Si formalizamos lo anterior, tenemos:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \qquad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \qquad f(t) = \lambda(t)\, e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

Es así como se acaban de presentar las expresiones generales que relacionan las leyes de confiabilidad y la relación de estas con la tasa instantánea de fallas, estaría dada por:

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

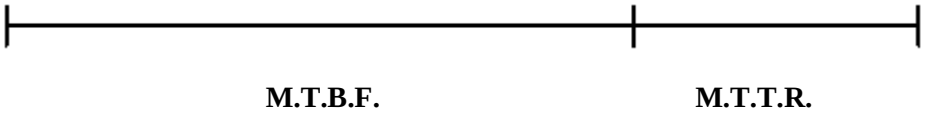
Definamos ahora otro indicador de seguridad de funcionamiento, el tiempo medio hasta la falla **MTTF** (**M**ean **T**ime **T**o **F**ailure), que por definición viene dado por:

$$MTTF = \int_0^\infty t \cdot f(t)dt = \int_0^\infty R(t)dt$$

En el caso de sistemas reparables (generalmente sistemas mecánicos, Figura 6) es propio hablar de tiempo medio entre fallas **MTBF** (**M**ean **T**ime **B**etween **F**ailures), es decir, el tiempo comprendido entre el instante en que el elemento entra (o vuelve a entrar)

en servicio (una vez finalizado el mantenimiento), excluyendo el intervalo de tiempo necesario para el mantenimiento.

Figura 6: Periodo en el ciclo de vida de sistemas reparables.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

3.4.4 Modelación de las funciones de confiabilidad

Como se vio anteriormente existe una relación entre las funciones f (t), R (t), F (t), λ (t), es decir, conociendo una de ellas, vienen dadas inmediatamente las otras tres.

Veamos ahora el modelamiento de la función λ (t), para cada uno de sus tres estados decreciente (rodaje), constante (vida útil), creciente (desgaste) presentados en la Figura 6.

3.4.4.1 Metodología Weibull

Para algunos elementos, el período de rodaje se caracteriza por ser decreciente. El modelo matemático que se adapta a esta situación se representa con la distribución de Weibull de dos parámetros:

$$\lambda(t) = (\beta/\alpha) \cdot t^{\beta-1}$$

Donde para valores de α=ß=1/2 se cumple la descripción dada anteriormente para λ (t) decreciente, además tenemos:

$$MTBF = \alpha^{1/\beta}\Gamma\left(1 + {}^{1}/_{\beta}\right)$$

Donde:

$$\Gamma\left(1 + {}^{1}/_{\beta}\right) = \int_{0}^{\infty} e^{-t}\, t^{1/\beta} dt \quad ; \quad \beta < 0$$

3.4.4.2 Exponencial negativa

Durante el período de vida útil, la tasa de fallas es sensiblemente constante. En este caso la función de confiabilidad toma la forma:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Que es una exponencial negativa, y también tendremos:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

En el caso de tasa de fallas constante, tendremos:

$$MTBF = \int_{0}^{\infty} R(t)dt = \int_{0}^{\infty} e^{-\lambda t} dt = {}^{1}/_{\lambda}$$

En confiabilidad, la distribución exponencial correspondiente a tasas de fallas constantes tiene una importancia fundamental.

Esta importancia deriva esencialmente de dos hechos: el primero es que los cálculos, para este caso, son notablemente sencillos, hecho de gran importancia al tratar sistemas complejos; el segundo es que esta distribución es la ley típica de ocurrencia de

los fenómenos puramente casuales; esto es, de aquellos cuyas causas son exclusivamente accidentales.

3.4.4.3 Distribución normal

Es la distribución utilizada normalmente para modelar las fallas producidas por desgaste.

El modelo matemático que describe el período en el cual entra en juego el desgaste, parte de la hipótesis que f (t) tiene una distribución normal con media μ y varianza σ^2. Por lo tanto, las funciones f (t), R (t), λ (t), vienen dadas por:

$$f(t) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) e^{-1/2\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2}$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt$$

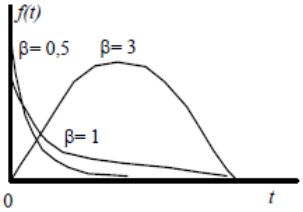
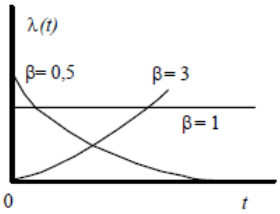
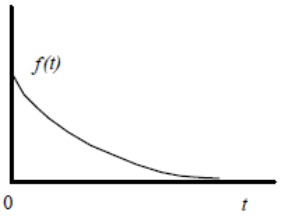
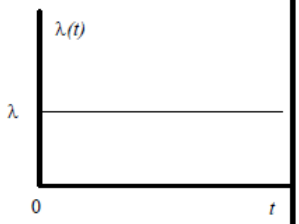
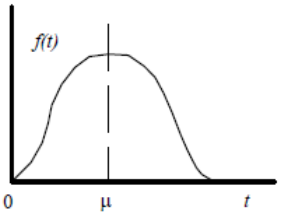
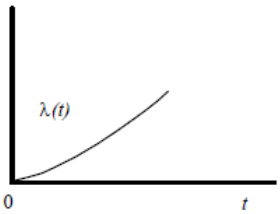
$$MTBF = \mu$$

$$\lambda(t) = \frac{e^{-1/2\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2}}{\int_t^{\infty} e^{-1/2\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2} dt}$$

Los modelos matemáticos considerados, las distribuciones Weibull, exponencial, normal, se adaptan más o menos a los tres períodos de la vida de un elemento respectivamente: rodaje, vida útil, desgaste.

En la tabla siguiente se presenta un resumen de las funciones de densidad de probabilidad comúnmente usadas para modelar la confiabilidad de componentes y sistemas.

Tabla 1: Resumen de las funciones de densidad de probabilidad.

DISTRIBUCION	MEDIA	FORMA GRAFICA	TASA DE FALLA
WEIBULL $f(t)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\times e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$ $R(t)=e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$ Donde: α:parámetro de escala β:parámetro de forma γ:decálogo de origen con t ≥ γ	$E(t)=\gamma+\alpha\times\Gamma\left(\frac{\beta+1}{\beta}\right)$		 $\lambda(t)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$
EXPONENCIAL NEGATIVA $f(t)=\lambda\, e^{-\lambda t}$ $R(t)=e^{-\lambda t}$ con $t\geq 0$	$E(t)=1/\lambda$		
NORMAL $f(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ $R(t)=1-\int_0^t f(t)dt$	$E(t)=\mu$		 $\lambda(t)=\frac{e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{t-\mu}{\sigma}\right]^2}dt}$

Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

3.4.5 Confiabilidad de sistemas

Es importante para el estudio de sistemas complejos, establecer la relación que existe entre el sistema y la confiabilidad de los componentes individuales, en otras palabras, se trata de definir una función tal como:

$$R_s = f(R_i); i = 1, 2, 3, \ldots,$$

Donde Rs representa la confiabilidad del sistema y R_i la de los n elementos componentes del sistema. La importancia del análisis de la confiabilidad del conjunto se pone en evidencia al considerar los siguientes factores:

1. Para la deducción de las características de seguridad de funcionamiento de un conjunto, partiendo de los datos históricos de falla de los elementos que componen el sistema.
2. Dar indicaciones útiles para establecer una política de mantenimiento preventivo a través del conocimiento del efecto producido por la intervención de un determinado elemento sobre las características del sistema en conjunto.
3. Analizar y disponer las acciones correctivas más eficaces.
4. Proyectar los sistemas con características óptimas mediante la duplicación de algunas funciones.

La confiabilidad de un sistema no es otra cosa que la probabilidad acumulada del acontecimiento "no hay falla" que, a su vez, es el resultado del comportamiento de los componentes individuales.

En consecuencia, las reglas aplicables a la combinación de confiabilidad en sistemas son las aplicables a la combinación de probabilidades de elementos cualesquiera.

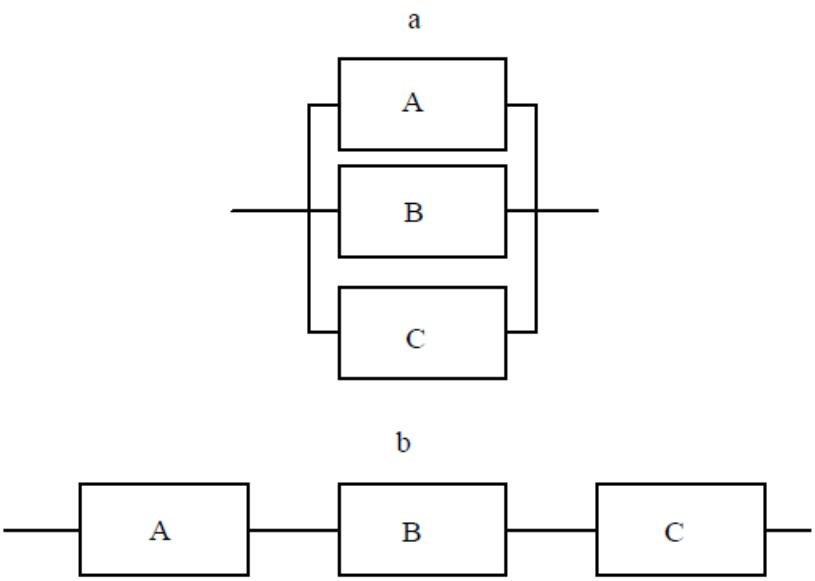
Es importante para el análisis de sistemas el grado de independencia o de dependencia entre los distintos elementos que lo componen, para lo cual consideremos los siguientes casos:

1. El que se produzca una falla de un elemento constituyente de un sistema es casual y estadísticamente independiente (o no) del hecho de que se produzca una falla en otro elemento del sistema, es decir, la falla de un elemento no altera la posibilidad de falla en otro.
2. La definición entre el estado de funcionamiento y el de falla es dependiente o no del modo en que funcionen las otras partes del sistema.

Lo anterior es una restricción clara para la subdivisión conveniente de un sistema para su posterior análisis.

El funcionamiento de un sistema desde el punto de vista de confiabilidad se representa gráficamente mediante esquemas de bloque adecuadamente conectados entre sí, en los que cada bloque representa un subsistema o un componente, como se observa en la siguiente Figura:

Figura 7: Esquemas de bloques.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014)

Estos esquemas normalmente no corresponden a los esquemas funcionales de instalación (flow-sheet). De hecho, representan gráficamente la dependencia lógica del acontecimiento "falla del sistema" con el acontecimiento "falla de un determinado componente" lo que, no necesariamente tiene correspondencia con el despiece físico y la función desarrollada por los elementos individuales. Visualizar mejor lo mencionado sobre las posibles diferencias existentes entre los diagramas lógicos de análisis de confiabilidad y los correspondientes a la disposición física de los elementos mencionada anteriormente, consideremos el siguiente ejemplo:

Imaginemos una batería de condensadores conectados en paralelo como la Figura 7-a.

Las fallas que pueden producirse en un sistema de este tipo pueden ser de dos clases: fallas por circuito abierto y fallas por cortocircuito. En el primer caso el esquema lógico

para el cual sería conveniente la evaluación se representa en la figura 7-a , dado que al fallar uno de los elementos, el sistema continúa en operación, total o parcialmente.

En el segundo caso si se produce la falla de un sólo elemento de los tres condensadores, no importando cual, se produce la falla del sistema, por lo tanto, el esquema lógico será entonces del tipo indicado en la ilustración 3-b.

En definitiva, podemos decir que, si un elemento de una instalación se representa en paralelo en el esquema lógico, su falla no conlleva a que el sistema en su conjunto quede fuera de servicio, lo que si ocurriría si el sistema estuviese conectado en serie.

Analicemos a continuación tres configuraciones básicas, configuración en serie, paralelo y stand-by. Los sistemas complejos de cualquier género son posibles de reducir a combinaciones de los tres casos mencionados.

3.4.5.2 Sistemas en serie

Son aquellos en los que la falla de uno de sus elementos (cualquiera), que ha de considerarse como un acontecimiento independiente, determina la falla del sistema en su conjunto (Arata et al., 2005; Stegmaier & Arata, 2014).

La confiabilidad del sistema en serie corresponde a la probabilidad de que todos los elementos (o subsistemas) no fallen en un tiempo determinado. Esta probabilidad viene dada por la multiplicación de las probabilidades de buen funcionamiento de todos los subsistemas en el período de tiempo dado. Si consideramos un sistema compuesto por n elementos, tenemos:

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t) \dots \dots \dots R_n(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)$$

Donde $R_s(t)$ y R_i (t) indican la confiabilidad del sistema y de cada elemento o subsistema respectivamente. Desarrollando la expresión podemos escribir:

$$R_s(t) = e^{-\int \lambda_s(t)dt} = \prod_{i=1}^{n} R_i(t) = \prod_{i=1}^{n} e^{-\int \lambda_i(t)dt} = e^{-\int \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)dt}$$

Donde $\lambda_s(t)$ y $\lambda_i(t)$ representan respectivamente la tasa de falla del sistema y de cada elemento o subsistema en particular.

De la relación anterior se puede deducir lo siguiente:

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)$$

Si las tasas de falla de los subsistemas o elementos fuesen constantes también lo sería la del sistema completo, pudiéndose escribir:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s(t)} = e^{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)}$$

Donde:

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(t)$$

Además, para λ_i=constante, tenemos:

$$MTBF_i = {}^{1}/_{\lambda_i} \qquad MTBF_s = {}^{1}/_{\lambda_s}$$

Como se pudo apreciar, el hecho de considerar algunas veces la tasa de falla constante facilita en gran medida los cálculos.

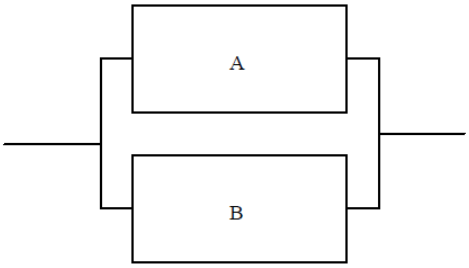
3.4.5.3 Sistemas en paralelo

En estos sistemas llamados también sistemas redundantes, algunas funciones están duplicadas o triplicadas (en general multiplicadas) con el fin de obtener una mayor confiabilidad de los sistemas (Arata et al., 2005; Arata, Arata, Kristjanpoller, & Stegmaier, 2009; Stegmaier & Arata, 2014) .

A modo de ejemplo se podría considerar para este tipo de configuraciones los siguientes casos:

1. Las soldaduras eléctricas dobles.
2. Las reservas rodantes, como por ejemplo dos bombas funcionando a la vez, cada una de las cuales puede otorgar la capacidad requerida por sí sola.
3. Dos de los motores de un avión cuadrimotor, en el que bastan dos motores para evitar la caída del aparato.

Figura 8: Sistema en paralelo.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

Existen en términos generales dos tipos de redundancia en paralelo:

- La redundancia total, es decir, el sistema en el cual un elemento por sí solo es capaz de soportar la carga del sistema.
- La redundancia parcial en la cual un grupo de elementos es capaz de soportar la carga del sistema.

Para determinar la confiabilidad del sistema con redundancia total, al igual que los sistemas en serie, se basa en las leyes del cálculo de las probabilidades.

El diagrama lógico correspondiente a estos sistemas es el mostrado en la Figura 8.

Consideremos, por ejemplo, un sistema compuesto por dos elementos A y B en paralelo (Figura 8).

La confiabilidad del sistema R_s vendrá dada por:

$$R_S = R_A + R_B - R_A R_B$$

Esto es debido a que el sistema falla cuando fallan ambos elementos.

Consideremos la siguiente tabla:

Tabla 2: Probabilidades de sistemas

A	B	Probabilidad del sistema
1.- Funciona	Funciona	Funciona $R_A R_B$
2.- Funciona	No funciona	Funciona R_A $(1-R_B)$
3.- No funciona	Funciona	Funciona$(1-R_A)$ R_B

Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014)

Debido a que estas situaciones son mutuamente excluyentes, por lo que la probabilidad de buen funcionamiento del sistema que, definida por la suma de los eventos antes mencionados, es decir las situaciones favorables:

$$R_s = R_A R_B + R_A(1 - R_B) + R_B(1 - R_A) = R_A + R_B - R_A R_B$$

Una forma de simplificar estos cálculos y de mucha utilidad cuando existen más de dos subsistemas, es analizar la probabilidad de falla del sistema.

La probabilidad de falla Q_s=1-R_s, de un sistema en paralelo de acuerdo a las definiciones dadas anteriormente (considerando independencia entre los elementos de un sistema), considera que, para que falle el sistema deben fallar simultáneamente todos los subsistemas. Por lo tanto, tenemos:

$$Q_s(t) = Q_1(t)Q_2(t) \dots \dots Q_n(t) = \prod_{i=1}^{n} Q_i(t)$$

De acuerdo a lo anterior la confiabilidad del sistema se puede escribir como:

$$R_s(t) = 1 - Q_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} Q_i(t)$$

En el caso particular que se cumpla que:

$$R_A = R_B = e^{-\lambda t}$$

$$R_s(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$MTBF_s = \int_0^{\infty} R_s(t)dt = {}^{3}/_{2}\,\lambda$$

Por lo tanto, el tiempo medio entre falla del sistema es superior en un 50% al de sus componentes individuales.

En el caso de los sistemas con redundancia parcial, a diferencia del anterior que considera que para que el sistema falle debe fallar todos los elementos componentes del sistema, una cierta combinación mínima de los elementos debe estar en operación para que el sistema funcione, consideremos la siguiente situación, un aeroplano de cuatro motores, sólo dos deben operar para mantenerse en vuelo, considerando lo anterior la confiabilidad del sistema viene dada por:

$$R_s = \binom{4}{2} p^2 (1-p)^2 + \binom{4}{3} p^3 (1-p) + \binom{4}{4} p^4$$

Donde p representa la probabilidad de buen funcionamiento para un determinado tiempo "t" de operación de los motores, de la relación anterior puede observarse que representa todas las combinaciones de éxito para el sistema, generalizando se tiene:

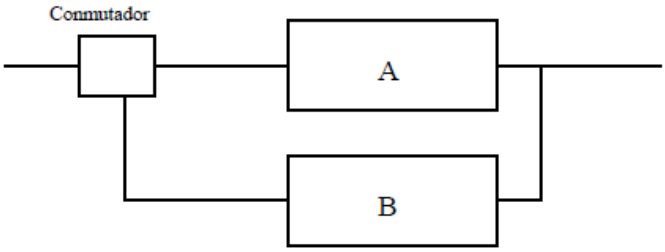
$$R_s = P(r \leq j \leq n) = \sum_{j=r}^{n} \binom{n}{j} p^j (1-p)^{n-j}$$

Donde la relación anterior representa la confiabilidad de un sistema compuesto por n elementos, de los cuales se requiere r en buen funcionamiento para que el sistema funcione.

3.4.5.4 Sistema Stand-by

El otro caso de sistemas redundantes es el stand-by, es decir, en un instante determinado funciona sólo uno de los elementos o subsistemas, mientras que los restantes permanecen en reserva en estado de espera (stand-by). En consecuencia, en este caso la conexión funcional varía en el tiempo en función de la aparición de la falla.

Figura 9: Sistema Stand-by.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

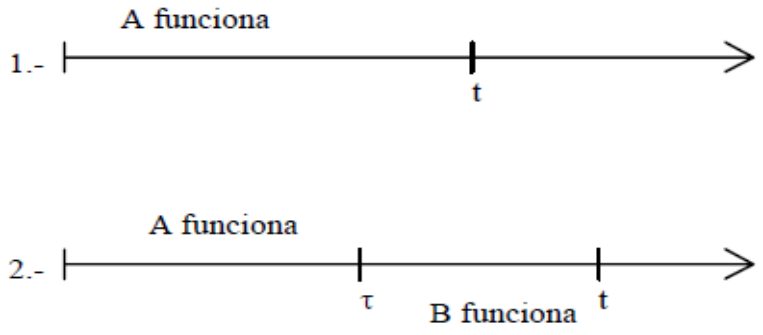
La variación de la conexión está a cargo de un órgano, llamado órgano de decisión conmutación (representada por el conmutador en la Figura 9), que cambia la conexión de un componente a otro, y que podría ser, por ejemplo, la intervención de un operador.

Entre los ejemplos de sistemas de este tipo se encuentran con abundancia en las instalaciones industriales, donde frecuentemente las máquinas de vital importancia para el sistema productivo tienen otra de reserva, mencionemos algunos ejemplos:

1. Los generadores de energía eléctrica de emergencia en hospitales y otras instalaciones.
2. Los sistemas dobles de alimentación de combustible en los generadores de vapor.
3. Los frenos manuales de emergencia en los vehículos.

Consideremos ahora un sistema como el mostrado en la Figura 10, compuesto por dos elementos A y B, y evaluemos su confiabilidad $R_s(t)$.

Figura 10: A funciona, B funciona.



Fuente: Teoría de la Confiabilidad (Stegmaier & Arata, 2014).

A se encuentra normalmente bajo carga, mientras que B interviene solamente cuando A falla. Suponiendo que la confiabilidad del elemento de conmutación es del 100%. Para analizar la confiabilidad del sistema, en el tiempo "t", veamos los casos en que el sistema se encuentra en buen funcionamiento.

1. A funciona en el tiempo "t"
2. A esta en falla durante el tiempo τ comprendido entre t=0 y t=τ, y B, que ha intervenido en el tiempo τ, este funcionando aún en el tiempo "t".

Ambas situaciones se encuentran esquematizadas en la ilustración 6.

La probabilidad que corresponde a cada uno de los eventos descritos anteriormente (mutuamente excluyentes), está dada por:

$$R_A(t)$$

$$\int_0^t f_A(\tau) R_s(t-\tau) d\tau$$

En consecuencia, se puede establecer la confiabilidad del sistema Rs(t) como:

$$R_s(t) = R_A(t) + \int_0^t f_A(\tau) R_s(t-\tau) d\tau$$

Si consideramos además la situación particular $\lambda_A=\lambda_B=\lambda$=constante, tendremos:

$$R_s(t) \ = \ e^{-\lambda\, t\, (1+\lambda t)}$$

Como consecuencia lógica de lo anterior el tiempo medio entre fallas, estaría dado:

$$MTBF_S = \frac{2}{\lambda}$$

Con lo que se obtiene un MTBF que duplica (para este caso de dos elementos) el correspondiente a cada uno de los integrantes de este sistema.

Consideremos ahora que el elemento conmutador no posee confiabilidad igual a 1, el diagrama lógico correspondiente sería el de una configuración en serie del elemento conmutador con el sistema evaluado anteriormente (stand-by de dos elementos), esto es debido a que la falla de cualquiera de estos dos subsistemas provocaría la falla del sistema total, por lo tanto, la confiabilidad del sistema quedaría expresada como:

$$R_{s'}(t) \ = \ R_c(t) \ \times \ R_s(t)$$

Donde:

$R_s'(t)$: Confiabilidad global del sistema

$R_c(t)$: Confiabilidad del órgano conmutador

$R_s(t)$: Confiabilidad del sistema considerando $R_c(t)=1$

3.4.6 Metodología RBD (Reliability Blocks Diagram)

La metodología comúnmente utilizada que corresponde a Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD), mediante la cual cada equipo es representado por un bloque, el que forma parte de sistema bajo diversas configuraciones lógico-funcionales, que buscan representar la seguridad de funcionamiento de un proceso industrial.

3.5 Ley de Weibull

La ley de Weibull es ampliamente utilizada para el análisis de confiabilidad debido a que con este modelo es posible representar todo el ciclo de vida de un elemento.

Las relaciones para este modelo son las siguientes:

$$R(t) = e^{-}(t - \gamma/\alpha)^{\beta}$$

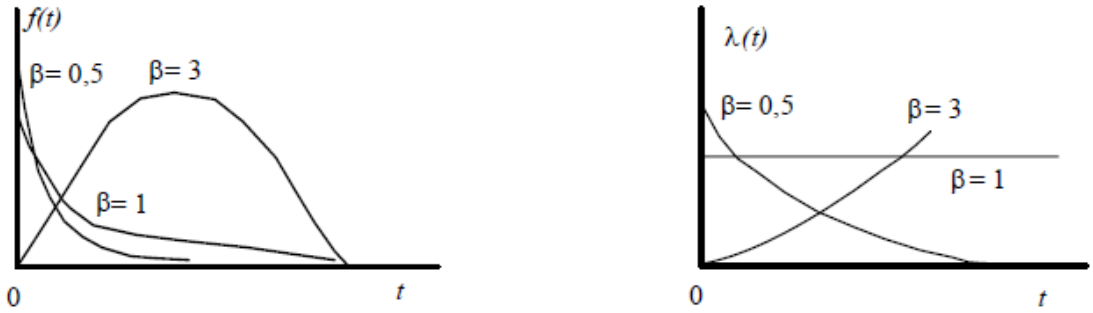
$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} x e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\alpha}\left(t - \frac{\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$

$$E(t) = \gamma + \alpha\Gamma\left(\beta + {}^{1}/_{\beta}\right)$$

Esta ley se puede representar de las dos formas siguientes (Figura 11), según función de densidad y tasa de falla:

Figura 11: Ley de Weibull.



Fuente: Ley de Weibull (Stegmaier, 2007).

Donde:

γ : La constante de localización, es expresada en las mismas unidades de t y define el punto de partida o el origen de la distribución.

α: Es la constante de escala, alargamiento de la distribución en el eje del tiempo. Cuando t - γ = α la confiabilidad es constante igual R(t) = 36.8%; esta constante representa el tiempo, medido desde γ, para el cual el 63.3% de la población puede haber fallado, esto para cualquier valor de β. Por esta razón, α es también llamado la característica de vida.

β: Es la constante de forma; este parámetro controla la forma de la distribución.

Si β < 1, λ(t) es decreciente.

β = 1, λ(t), es constante.

β > 1, λ(t) es creciente.

3.5.4 Estimación de los parámetros de la Ley de Weibull

Para la estimación de los parámetros es necesario seguir los pasos siguientes:

1. Construir a partir de los datos experimentales la función de falla acumulada del sistema o componente.
2. Determinar los parámetros de la ley.

Para estas opciones se tiene:

3.5.4.2 Determinación de función de falla acumulada

3.5.4.2.1 Método de rangos promedio

La función de falla acumulada puede ser obtenida utilizando el método de rangos promedio a través de la aproximación de Benard:

$$F(t_j) = \frac{K_j - 0.3}{No + 0.4}$$

Donde:

$F(t_j)$: Probabilidad de fallas acumulada al tiempo t_j.

K_j: Nº de eventos (fallas) que han ocurrido hasta t_j.

No: Nº total de eventos.

3.5.4.2.2 Cálculo del ranking ajustado con datos censurados a la derecha

Es muy común que los datos experimentales de los que se dispongan tengan además de la información de tiempo en la que un elemento operó hasta la falla, de tiempos en los cuales dicho electo fue reemplazado en un momento previo a que este evidenciara una falla (por ejemplo, frente a una política de mantenimiento preventivo cíclico FTM). Esto significa que en este último caso estamos frente a tiempos censurados a la derecha, es decir, el tiempo de operación del elemento fue suspendido, por la acción preventiva, sin conocer cuánto tiempo adicional habría funcionado hasta fallar.

Por este motivo los eventos asignables a la falla y su ranking deben ser ajustados considerando el hecho de que no se conoce cuanto habría funcionado hasta la falla al momento de la suspensión preventiva un elemento, pero no es menos cierto que si se conoce el hecho de que el elemento funciono sin fallar hasta el momento de la suspensión preventiva.

El ajuste de la posición de las fallas se realiza determinando la posición media de estos eventos (median rank position). La metodología consiste en ajustar el ranking de fallas, considerando las posiciones probables de los datos suspendidos y asociando la posición media a las fallas observadas.

Para el cálculo de la posición media ajustada de cada falla se utiliza la formulación siguiente:

$$\boldsymbol{r_j = r_{j-1} + \frac{N + 1 - r_{j-1}}{N + 1 - (k_j - 1)}}$$

Donde:

$\boldsymbol{r_j}$: Posición Media de la falla j (Median Rank Position).

$\boldsymbol{k_j}$: Ranking Global de eventos.

$\boldsymbol{N}$: Número de eventos totales (Correctivas y Preventivas).

$\boldsymbol{r}_0 = 0$

Con el nuevo ranking de fallas ajustado se obtiene la probabilidad de falla acumulada utilizando la ecuación anterior.

3.5.5 Determinación de los parámetros de la ley de Weibull

Utilizando el análisis de regresión de ranking sobre Y para calcular los parámetros de la distribución de Weibull, el procedimiento es el siguiente:

El primer paso es construir la función en su forma lineal. Para la distribución de Weibull de dos parámetros (Alpha y Beta), la distribución acumulada de fallas es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}}$$

Aplicando logaritmo natural a ambos lados:

$$Ln\left(1 - F(t)\right) = -\left(\frac{t}{\alpha}\right)$$

Aplicando logaritmo natural nuevamente a ambos lados:

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

$$Ln\left\{-Ln\left(1 - F(t)\right)\right\} = -\beta \cdot Ln\,(\alpha) + \beta * Ln\,(t)$$

Luego consideramos:

$$y = Ln\{-Ln[1 - F(t)]\}$$

$$a = -\beta\, Ln(\alpha)$$

$$b = \beta$$

Que forma la ecuación de la recta el tipo:

$$y = a + bx$$

3.6 Disponibilidad de componentes y sistemas

Un indicador muy utilizado y de fácil comprensión es la disponibilidad. La disponibilidad refleja la posibilidad de utilización de una instalación desde el punto de vista técnico, es decir excluyendo las detenciones no originadas por fallas del sistema. La disponibilidad se define como la razón o cociente del tiempo en que la instalación se puede ocupar y el tiempo total que incluye al anterior más el tiempo de reparación.

De acuerdo a lo anterior, la disponibilidad viene dada por la relación porcentual entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total. Lo que se expresa de la forma:

$$A = 1 - \frac{TR}{HT}$$

Donde:

TR es el tiempo utilizado en la reparación o mantención, en donde se consideran además de las horas por mantenciones preventivas, las horas por mantenciones correctivas. HT corresponde al total de horas del mes o periodo en estudio. Consideremos ahora un factor de gran importancia para sistemas que durante su vida útil cumplen una serie de ciclos (sistemas reparables), en estos los parámetros de confiabilidad también son

calculables, aunque con mayor dificultad matemática. El factor al cual nos referiremos a continuación considera dos términos, uno es la frecuencia de falla y el otro el tiempo necesario para la reparación. A este indicador se le denomina disponibilidad, que también es posible calcular con la siguiente ecuación:

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

La disponibilidad está relacionada directamente con la posibilidad de utilización de una instalación, vista desde el punto de vista técnico, es decir, excluyendo las detenciones no originadas por falla del sistema. La disponibilidad puede definirse como: El porcentaje de tiempo de buen funcionamiento del sistema productivo, calculada sobre un período de tiempo lo suficientemente largo, es decir, referido a un valor de régimen.

De acuerdo a lo anterior, el valor de disponibilidad es constante en el tiempo y viene dado por la relación porcentual entre el tiempo de funcionamiento y el tiempo total. Lo que se puede expresar de la forma:

$$\boldsymbol{A} = \frac{\boldsymbol{UT}}{(\boldsymbol{UT} + \boldsymbol{DT})}$$

Donde UT (up-time) representa el tiempo en que el sistema está realmente disponible para el funcionamiento, esto es, puede ponerse en servicio (independientemente del hecho de hacerlo funcionar o no); DT (Down-time) representa el tiempo fuera de servicio imputable a causas técnicas.

El tiempo fuera de servicio de una instalación debido a fallas es el resultado de numerosos factores, entre los cuales es posible considerar:

- Tiempo de preparación

- Tiempo de localización de la falla

- Tiempo de desmontaje

- Tiempo de obtención de las piezas y materiales necesarios

- Tiempo de reparación propiamente tal

- Tiempo de ajuste y calibración

- Tiempo de montaje

- Tiempo de comprobación del buen funcionamiento del componente reparado

- Tiempo de limpieza

Los factores están asociados específicamente a la intervención en el caso de la falla. En el caso más general, el tiempo fuera de servicio de una instalación industrial durante cierto período de tiempo es el resultado de la suma del tiempo debido a las intervenciones de mantenimiento preventivo y del tiempo debido a las operaciones de mantenimiento correctivo.

Se indica ahora con:

Nc: El número de operaciones de mantenimiento correctivo en el período analizado.

Np: El número de operaciones de mantenimiento preventivo en el mismo período.

$MTTRc$: El tiempo medio de reparación correctiva (Mean Time To Repair).

$MTTRp$: El tiempo medio de reparación preventiva.

En consecuencia, el tiempo de reparación total viene dado por:

$$MTTRp \cdot Np + MTTRc \cdot Nc$$

3.7 Configuraciones de Disponibilidad en Sistemas

A continuación se presentan las distintas configuraciones que pueden existir en los sistemas.

3.7.1 Disponibilidad en Serie

Respecto a la configuración en serie y basado en la dependencia total de los elementos en el subsistema que los reúne, el análisis del subsistema se realiza de la siguiente manera (Kristjanpoller, Crespo, Barbera, & Viveros, 2017):

$$A_{serie} = \prod_{i=0}^{n} A_i$$

3.7.2 Disponibilidad en Redundancia Total

Para un subsistema en una configuración lógica de redundancia total (paralelo) que se caracteriza por el funcionamiento simultáneo de los elementos del subsistema y por el hecho de que cada elemento puede soportar el 100% de la carga requerida para el mismo, se utiliza el siguiente análisis para un sistema redundante no reparable(Kristjanpoller et al., 2017):

$$MTTF_{paralelo} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

Donde λ_1 representa la tasa de fracaso promedio de cada uno de los equipos que participan en el sistema. Generalizando utilizando un modelo Weibull, esto es representado por:

$$\lambda_1 = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$$

$$MTTR_{paralelo} = promedio(MTTR_i)$$

Finalmente,

$$A_{paralelo} = \frac{MTTF_{paralelo}}{MTTF_{paralelo} + MTTR_{paralelo}}$$

3.7.3 Disponibilidad en Stand-by

Para un subsistema en una configuración stand-by, se considerado. En esta configuración, en cada momento, sólo funciona una unidad, y en el caso de fallo de esa unidad, se sustituye por la siguiente. Con respecto a la mantenibilidad, ambas unidades se mantienen simultáneamente. En este caso, se utiliza el siguiente análisis(Kristjanpoller et al., 2017):

$$MTTF_{standby} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}$$

$$MTTR_{standby} = minimo(MTTR_i)$$

Finalmente,

$$A_{standby} = \frac{MTTF_{standby}}{MTBF_{standby} + MTTR_{standby}}$$

3.7.4 Disponibilidad en redundancia parcial

El subsistema de redundancia parcial caracterizado por la capacidad para responder a un requisito de carga en una fracción de los elementos disponibles, pero con la obligación de cumplir con el 100% de la solicitud, el modelo utilizado es una extensión del modelo de fiabilidad (Kristjanpoller et al., 2017):

$$A_{parcial} = \sum_{j=r}^{n} \binom{n}{j} A^{j} (1 - A)^{n-j}$$

Donde:

n: Número total de elementos.

r: Número mínimo de elementos para cumplir la carga requerida.

3.8 Aspecto financiero

3.8.1 Cuantificar los costos del Mantenimiento Preventivo

Antes de iniciar el programa de Mantenimiento Preventivo, será necesario que tenga una idea completa de cuál será su costo, ya que hay varios requerimientos a considerar:

- Puesta en marcha: Siempre existen costos asociados con la puesta en marcha de cualquier programa; en el inicio de su programa de mantenimiento preventivo necesitará:
- Tiempo extra: Para seleccionar la maquinaria y equipo que será incluido en el programa de mantenimiento preventivo y reunir todos los datos necesarios, tales como manual del fabricante y sus recomendaciones, historiales del equipo, partes, repuestos, refacciones críticas, datos de placa, etc. Este tiempo también debe ser tomado en cuenta para ordenar los datos y hacer los manuales de mantenimiento, así como escribir los procedimientos del mantenimiento preventivo y determinar los valores de la frecuencia y uso que utilizará en el disparo de las órdenes de trabajo.
- Tiempo de ayudantes: Se necesita transferir esa información a su forma final, ya sea en un programa de mantenimiento preventivo manual o en su sistema informático. Normalmente este tipo de trabajo es manejado mejor por alguien con experiencia en el área.
- Mano de obra (técnicos de mantenimiento): Si requiere recabar información de la maquinaria y equipo, como datos de placa, refacciones utilizadas, materiales, y otros, considere la mano de obra para este trabajo.
- Las herramientas especiales que se requieren: Muchos programas de Mantenimiento Preventivo se ven afectados negativamente por no considerar las herramientas especiales o específicas. Si ha decidido que el análisis de aceite o de algún otro sub-programa especial de mantenimiento predictivo será incluido en su mantenimiento preventivo, requerirá contratar una firma especializada de acuerdo a la programación.

- El inventario de repuestos: A medida que se incrementa el Mantenimiento Preventivo, se aumenta el número de repuestos a almacenar, por lo que se debe asegurar que el stock sea sólo el justo y necesario para soportar los programas de confiabilidad de cada equipo. También es necesario conocer los tiempos de respuestas y costos de los proveedores, entre otros. De esta forma, se podrá determinar el más adecuado stock de lubricantes, filtros, sellos y otros elementos usados en el programa.

3.8.2 Programación del Mantenimiento y Optimización de asignación de recursos

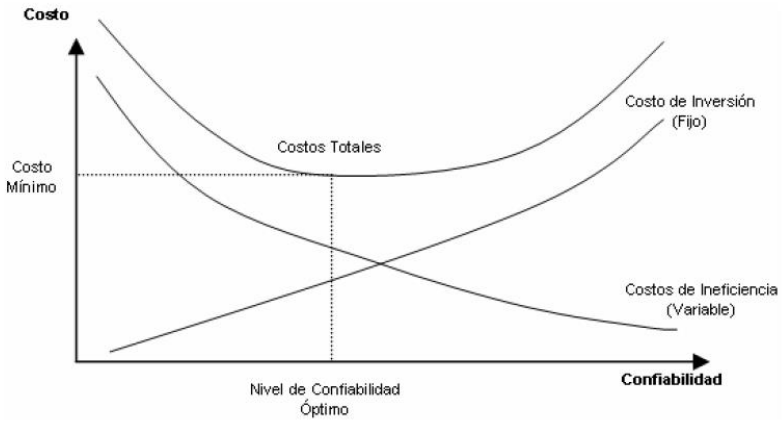
En esta etapa se debe realizar una programación detallada de todas las actividades de mantenimiento, considerando para ello las necesidades de producción en la escala temporal y el coste de oportunidad para el negocio durante la ejecución de las tareas. La programación de las actividades de mantenimiento pretende optimizar la asignación de recursos tanto humanos como materiales, así como minimizar el impacto en la producción. La programación del mantenimiento debe efectuarse a corto (< 1 año), medio (1-5 años) y largo plazo (> 5 años). (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, & Barbera, 2012).

3.8.3 Costos globales

Todo sistema tiene un indicador de disponibilidad condicionado por la confiabilidad y mantenibilidad del mismo. La falta de disponibilidad genera costos de ineficiencia por dejar de producir en condiciones normales. En algunos procesos industriales estos costos de ineficiencia son sumamente elevados, a tal punto que es conveniente tener equipos de respaldo o en redundancia, para lograr la disponibilidad "óptima" del sistema que lleva a cabo el proceso, estos equipos adicionales respaldan a los equipos más críticos del sistema.

Para decidir cuál o cuáles equipos deben ser cambiados o bien apoyados mediante redundancia es útil obtener la Curva de Costos Globales (Ver gráfico 2).

Figura 12: Curva de costos globales



Fuente: Aspectos Financieros del Mantenimiento (Espinoza, 2008).

Los costos globales (Espinoza, 2008) son la cuantificación de todos los costos incurridos en el ciclo de vida de un proyecto o instalación, y pueden ser descritos mediante la siguiente relación:

$$Costo\ Global = C_{inversión} + C_{operacional} + C_{ineficiencia}$$

3.8.3.1 Costo de inversión

Los costos de inversión quedan determinados por el costo de los equipos e instalaciones asociados al proyecto. También puede considerarse el capital de trabajo requerido para la operación. Se puede representar como:

$$C_{inversión} = \sum_{i=1}^{n} (N \cdot C_e)_i$$

Donde $(N \cdot C_e)_i$ el costo de inversión para el equipo *i* (C_e, costo del equipo y *N,* número de equipos comprados).

3.8.3.2 Costo operacional

Se define mediante la cuantificación de todos aquellos elementos propios de la operación de un sistema: insumos, repuestos, energía, etc.

3.8.3.3 Costo de ineficiencia

Es el costo asociado a la indisponibilidad de la instalación durante el periodo de evaluación.

Se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_{ineficiencia} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{(1+i)^k} \cdot H \cdot C_i \cdot (1 - A_{sistema})$$

Donde:

C_i= Costo de ineficiencia horario = Costo productivo – Costos variables

H = Periodo de evaluación dentro del horizonte del proyecto

$A_{sistema}$ = Disponibilidad del sistema

i = Tasa de capital de la empresa

n = Años de operación

La sumatoria es la actualización de los flujos de dinero producto de los costos de ineficiencia por cada periodo H de análisis. Si se tiene que los periodos son iguales se puede utilizar un factor:

$$f = \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i}$$

Una vez definidos los costos globales se pueden analizar distintas alternativas de equipos, donde la más conveniente será aquella que tenga el mínimo costo global.

3.8.4 Indicadores Económicos

3.8.4.1 Tasa de descuento o costo de capital

La Tasa de descuento es la rentabilidad exigida por el inversionista a los recursos involucrados, porque renuncia al uso alternativo de esos fondos en proyectos con niveles de riesgo similares. La tasa de descuento o costo de capital debe reflejar el costo de oportunidad de los recursos invertidos en un proyecto (Sullivan, Wicks, & Luxhoj, 2004).

3.8.4.2 Valor Actual Neto (VAN)

El VAN consiste en actualizar a tiempo presente todos los flujos de un proyecto, es decir, corresponde al valor monetario de la diferencia entre los flujos de ingresos y egresos de caja, restada la inversión inicial, todo descontado al momento de inicio del proyecto (Otero, Andalaft, & Vásquez, 2008).

Interpretación:

$$VAN > 0 \text{ Alternativa Recomendable}$$

$$VAN \leq 0 \text{ Alternativa No Recomendable}$$

Mientras mayor sea el VAN de una alternativa, mejor es desde el punto de vista económico.

Para utilizar el VAN se debe utilizar la misma tasa de descuento y el mismo número de períodos en todos los proyectos.

Se asume que los flujos netos de fondos son valores conocidos desde el momento inicial, puesto que se desconocen las alteraciones que podrían tener los flujos debido a las adaptaciones que podría tener el proyecto a lo largo del tiempo.

El VAN trabaja bajo el supuesto que la tasa de descuento es conocida y constante para todo el horizonte de evaluación.

Además, asume que en el proyecto que se reinvierten todos los beneficios obtenidos.

$$VAN = \sum_{j=0}^{n} \frac{FN_j}{(1+i)^j}$$

$FN_j =$ Flujo Neto período j

i = Tasa de interés Efectiva en el período (Tasa de Descuento).

n = Número de períodos Payment

3.8.4.3 Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)

El CAUE, también conocido como costo anual uniforme equivalente, es un indicador económico que se utiliza para comparar alternativas. La función del CAUE es que todos los ingresos y desembolsos deben convertirse en una cantidad anual equivalente que es la misma para cada período, la alternativa a seleccionar será aquella que presente el menor CAUE (Sullivan et al., 2004).

Para calcular el CAUE se lleva el VAN a anualidades, mediante la siguiente fórmula:

$$CAUE = VAN \cdot \left(\frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - i}\right)$$

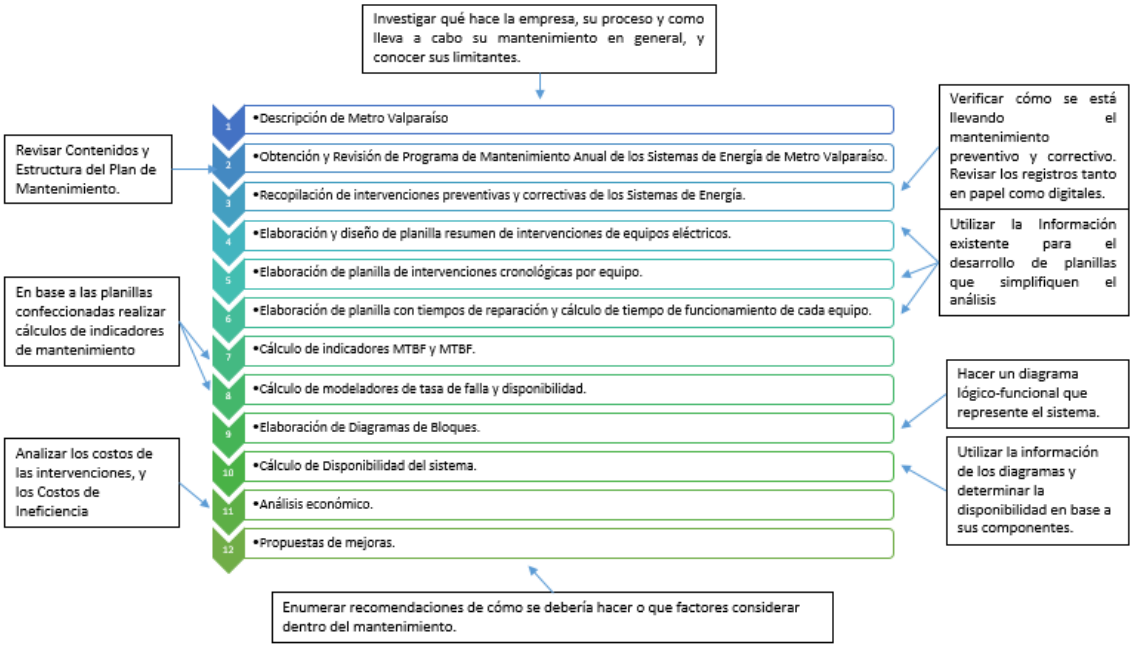
n = Número de períodos

i = Tasa de descuento

4. METODOLOGÍA

La metodología de análisis se realizará como se muestra en el diagrama de la Figura 14:

Figura 13: Diagrama explicativo de la metodología



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la Figura 13, la metodología parte en base a Describir Metro Valparaíso, indicando qué hace y cómo lo lleva a cabo, tanto en términos de su operación como del mantenimiento.

Luego, se enfoca a la obtención del Plan de Mantenimiento, para su posterior revisión, para así, ver los componentes que están presentes en él y cómo está estructurado.

Posteriormente, se recopila información sobre las mantenciones de los sistemas de energía, donde se encuentran los datos relevantes para los sistemas de alimentación de trenes. Estos serán extraídos de medios físicos y/o digitales, con el fin de usar la

información de mantenimientos preventivos y correctivos para la elaboración de planillas que contengan la información de intervenciones de los subsistemas, intervenciones cronológicas, los tiempos de funcionamiento y los de reparación.

Para así, poder determinar indicadores MTBF y MTBF, tasa de falla y la disponibilidad, tanto trimestral como anual.

Una vez realizadas las planillas y cálculos, se procede a confeccionar el diagrama de bloques, tanto para el diagrama físico como el lógico funcional, para entender cómo se relacionan las disponibilidades de los subsistemas. Una vez entendido esto, se procede a determinar la disponibilidad del sistema.

Se realiza una evaluación económica sencilla, en donde se toman en cuenta los costos de mantenimiento, la inversión de los subsistemas y los posibles costos de ineficiencia, dada la disponibilidad del sistema.

Finalizando, se realizan propuestas en base a los antecedentes presentados y recomendaciones sobre el mantenimiento.

4.1 Descripción de Metro Valparaíso

En el año 2000 se confirma la decisión de realizar el Proyecto IV Etapa, que permite al ferrocarril de la Quinta Región entrar al siglo XXI con estándares acorde al desarrollo urbano y social de la zona, con una visión de largo plazo.

Durante la construcción del nuevo Metro, el servicio ferroviario se mantuvo operativo, a excepción de un periodo de seis meses, durante el cual se capacitó a toda la organización para enfrentar los nuevos desafíos de la transición del nuevo servicio. También se desarrolló un programa de reingeniería que permitió dotar a la empresa de una estructura organizacional altamente eficiente.

En el año 2005 concluyen las obras de modernización del Proyecto IV Etapa y se da inicio a la operación del nuevo servicio de pasajeros de la empresa Metro Valparaíso, que ofrece tiempos de viaje menores, con altos estándares de seguridad y eficiencia y brinda al corredor Puerto a Limache una alternativa de transporte público de calidad para los habitantes de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache.

Desde el inicio de la operación del servicio, Metro Valparaíso ha experimentado un crecimiento sostenido de su demanda.

En 2007, la empresa alcanza la meta de un millón de pasajeros transportados mensualmente, que la escogen reconociendo la excelencia de su servicio, caracterizado por la seguridad, eficiencia, rapidez y un valor atractivo que considera tarifas diferenciadas por horarios de viaje, trayecto y rebajas tarifarias para segmentos específicos como estudiantes, tercera edad y discapacitados.

Conscientes de su rol como eje del transporte público regional, en el año 2008 se inicia con gran éxito el sistema de combinación Bus+Metro. Gracias a esta iniciativa es posible integrar la comuna de Quillota, La Calera, La Cruz y la zona de Limache Viejo al servicio de Metro Valparaíso, permitiendo el acceso de más personas al servicio de Metro Valparaíso.

Los favorables resultados de los sistemas integrados permiten a Metro Valparaíso crecer en su demanda y abrir un amplio campo de desarrollo a nivel empresarial y generar una nueva y mejor alternativa para los usuarios del transporte público. De esta manera, espera continuar y ampliar la integración con otras zonas, para consolidar a Metro Valparaíso como eje central del transporte regional.

En el año 2006 fue la partida de MERVAL, tren que une Valparaíso con Limache en sólo 22 minutos, y que se entregó con una renovación total de la flota, incorporando 27 automotores nuevos Xtrapolis, con un rediseño completo de la línea y de las estaciones, incluyendo tres estaciones subterráneas en Viña del Mar. Para ello, contando con sistemas y equipos de alta tecnología que operan bajo estrictos sistemas de control y supervisión de la seguridad operacional. Entre otros sistemas y equipos se pueden destacar:

- Dotación de 27 trenes ALSTOM, modelo Xtrapolis que se integraron completamente a la operación durante el año 2006. El tren Xtrapolis es un complejo equipo electromecánico dotado además de sistemas eléctricos y electrónicos que permiten tanto su operación como la prestación de diversos servicios y facilidades a los pasajeros.
- Subestaciones en alta tensión que permiten las distribuciones de la energía eléctrica, a través de redes internas, en todos los niveles de tensión requeridos.

- Sistema de comunicación multiservicio que cubre todas las prestaciones de comunicación requeridas para la operación de servicio. En éste radican las comunicaciones de datos y de voz, tanto alámbricas como inalámbricas.
- Sistemas electromecánicos de gran envergadura, como lo son el equipamiento para ventilación de túnel, generadores de apoyo, múltiples sistemas de bombeo y otros.
- Sistema de control y adquisición de datos (SCADA) asociado a todas las instalaciones de la empresa, cubriendo desde las subestaciones de alta tensión hasta recintos de estaciones.
- Sistema de supervisión de tráfico centralizado (CTC) que cubre la supervisón completa del material rodante, incluyendo estrictos algoritmos de seguridad aplicado tanto a los trenes como a la señalización de la vía.
- Sistema de comunicación a público basado en difusión vía megafonía y paneles electrónicos (LEDS).
- Un equipamiento por primera vez usado en la Quinta Región es el sistema de Peajes y Boleterías, el cual se expresa a través de la tarjeta sin contacto METROVAL y en los torniquetes de entrada y salida de andenes.

La empresa basa su operación global en la componente de energía eléctrica. De hecho, del costo directo total, por este concepto, el 85% aproximadamente corresponde a la movilización del material rodante. El resto es imputable a los distintos servicios de apoyo a la operación ferroviaria tales como sistema de peaje, sistemas electromecánicos, sistemas de comunicaciones y otros consumos en baja tensión. En este esquema operacional, la energía eléctrica, tanto en su costo como en su disponibilidad constituye

el factor de riesgo fundamental en el ejercicio del negocio durante el año 2007(Metro Valparaíso, 2007).

En efecto, ya a comienzos del segundo semestre se visualizó que la componente de costo por este concepto (precio nudo) iba a ser objeto de reajustes mucho mayores que los previstos y proyectados en el período anterior, básicamente debido a externalidades generadas por la inestabilidad en el suministro de gas natural al país, así como por períodos de sequía que se estiman de ocurrencia en el mediano plazo. Todo ello comprometió entonces la situación de la reserva energética nacional al nivel de generación.

Al inicio del segundo semestre, con indicadores claros que ratifican el escenario negativo en cuanto a suministro y costos de la energía eléctrica, se tomaron medidas mitigadoras logrando alcanzar un ahorro, en términos del consumo mensual que alcanzó en promedio una cifra cercana al 6%. Por sobre lo anterior se iniciaron, con recursos de ingeniería internos, los estudios y análisis orientados a proyectar mejoras en la gestión operacional que a su vez tenían como resultado ahorros en el corto y mediano plazo. Con todo se logra establecer lineamientos específicos, incluyendo situaciones más críticas tales como racionamiento y cortes no programados.

A fines del año 2015, se hace incorporación de 8 nuevos trenes (Xtrapolis Modular) bajo la expectativa de cambiar una frecuencia de 12 minutos en durante el día, a los 6 y 3 minutos en horario peak para el 2016 y 2017 respectivamente.

En cuanto a estructura organizacional, Metro Valparaíso en sus inicios parte teniendo sólo 3 gerencias (Operaciones, Comercial, y Adm.y Finanzas). Posteriormente, sufre una leve reestructuración, hasta que el año 2017 logra una estructura más horizontal en donde existen 6 gerencias:

- Gerencia de Gestión y Control.

- Gerencia de Administración, Finanzas y Personas.
- Gerencia Comercial y Atención al Cliente.
- Gerencia de Operaciones y Mantenimiento.
- Gerencia de Tecnología de la Información.
- Gerencia de Ingeniería y Obras.

Dicho cambio, demuestra una preocupación por atender a las necesidades internas de la empresa y brindar un mejor servicio al usuario. Incluyendo así una subgerencia netamente abocada a la mantención. Naciendo a raíz de que Metro Valparaíso ha sido golpeado por innumerables acontecimientos a lo largo de su vida, que ha impactado fuertemente en la continuidad del servicio. Tanto es así, que tras las marejadas del inverno del año 2015, que dejaron inoperativa la estación Barón por meses, teniendo una disminución en la cantidad considerable de pasajeros.

Como política de gestión de la empresa, se indica que busca dar un servicio de calidad y satisfaciendo al cliente. Para ello asumen los siguientes compromisos:

- Establecer mecanismos efectivos para el control de operaciones, evaluación de desempeño, preparación y respuestas ante potenciales incidentes, accidentes y situaciones de emergencia que provoque discontinuidad operacional y/o peligro a las personas.
- Cumplir con los requisitos y expectativas de los clientes, a favor de obtener una retroalimentación, que a su vez permita la mejora y satisfacción continúa.
- Cumplir los requerimientos legales y reglamentarios aplicables a la organización.

Uno de los sistemas que más conflicto a traído, a nivel mantenimiento y operación (e incluso imagen de la empresa), es el sistema de alimentación de trenes. Debido a que los usuarios, perciben la detención de los trenes tras su falla (paralización del servicio),

generándole un retraso a sus destinos y desconfianza en el servicio, además de la perdida de pasajeros que llegan a las estaciones a abordar los trenes. Si bien, se cuenta con un sistema de respaldo mediante grupos electrógenos dispuestos en puntos estratégicos, estos no pueden ser contabilizados como un medio de redundancia para continuar con el servicio, dada sus bajas potencias nominales, que solo permiten evacuar a los pasajeros en las estaciones más cercanas.

Todos los equipos tienen un probabilidad de fallar (Mago & Vall, 2014; Torres, 2016), con esto se hace necesario realizar mantenimiento a dichos sistemas. Para ello, se realizan procesos de externalización de los servicios de mantenimiento en base a licitación, en donde se detallan aspectos esenciales del cómo realizar la mantención (instructivo) y las frecuencias con que se deben realizar (sin fechas).

En la actualidad, el cumplimiento del contrato con Siemens, quien es encargado del mantenimiento de los sistemas de Energía, es representado por el Administrador de Contratos de Metro Valparaíso, quien, a su vez realiza constantes evaluaciones del desempeño, buscando algunas mejoras. Sin embargo, como la subgerencia de mantenimiento es relativamente nueva, la forma de operar ha sido basada en “cómo siempre se ha hecho”.

Finalmente, y sumándose lo anterior, el plan anual de Mantenimiento Anual es el mismo del año 2005, los mantenimientos tanto preventivos como correctivos no cuentan con fichas de mantención e información agregada, lo que impide obtener información relevante para la gestión del mantenimiento futuro. Para ello, se propone el diseño y evaluación de un plan preventivo en un marco de acción preventiva y mejoramiento continuo.

4.1.1 Consideraciones

4.1.1.1 Sistema

Para la explotación del servicio se requiere de gran cantidad de elementos en sus procesos:

Entrada:

- Materia Prima (Energía Eléctrica).
- Recursos Humanos (Operadores, Administrativos, Técnicos, etc)
- Capital (Infraestructura, Equipos de radiocomunicación, Sistemas de Respaldo, Subestaciones, Catenarias, Trenes, etc)
- Recursos Tecnológicos.
- Recursos Financieros.

Proceso:

- Transformar la energía eléctrica en tracción de trenes mediante las subestaciones, pasando por catenarias y el contracto de pantógrafo que permite el equipo motor se pueda desplazar.

Salida:

- Servicio de trasporte de pasajeros mediante trenes en vía férrea en los tramos Limache a Puerto y viceversa.

4.1.1.2 Horario de Funcionamiento y de Mantenimiento.

El servicio de pasajero funciona en los siguientes horarios:

- Lunes a viernes de 6:00 a 23:00 hrs en intervalos de 12 minutos en horario de baja y 6 minutos en horario de peak.
- Sábado, Domingo y Festivos de 7:30 a 22:00 hrs en intervalos de 18 minutos.

Siendo el tiempo restante el destinado para realizar mantenciones preventivas, generalmente durante la semana de 23:30 a 6:00 hrs. En donde se puede hacer corte del suministro eléctrico para intervenir la catenaria y subestaciones, no influyendo en el tráfico de trenes.

4.1.1.3 Funcionamiento Normal

La operación normal del servicio considera que el sistema pueda tener trenes circulando a 12 minutos a lo largo de los 43 kilómetros del tramo (Limache a Puerto). Para lo cual requiere de al menos 2 de las 3 subestaciones rectificadoras en funcionamiento. A esto se le suma, que a un sub-sistema se le considera en fallo, si este no permite el paso de energía a los trenes. Por otro lado, por falta de información del mantenimiento de qué elemento de la catenaria se intervino, se le considera como un todo, puesto que basta que un elemento de ésta falle para que repercuta en la paralización del servicio o su funcionamiento parcial.

4.2 Obtención y Revisión de Programa de Mantenimiento Anual de los Sistemas de Energía de Metro Valparaíso.

El plan anual de mantenimiento de los sistemas de energía de Metro Valparaíso (Figura 14) está enfocado en brindar un guía confiable de los tipos y frecuencias de mantenimiento. En esta ficha se detalla:

- Tipo de intervención (Inspección, Pruebas o Mantención).
- Frecuencia.
- Horario (Diurno o Nocturno).
- Descripción de las tareas.
- Cantidad de Equipos o Instalaciones.

Dicha información está determinada por las bases técnicas de la respectiva Licitación adjudicada por la empresa Contratista. En la actualidad, que a la fecha es la empresa es Siemens.

El administrador de contrato de Sistemas de Energía de la Gerencia de Mantención y Operaciones es quien vela por el cumplimiento del plan de mantenimiento anual. Por otro lado, el contratista tiene la responsabilidad de llenar la ficha y/u órdenes de trabajo con la información verídica y fidedigna de los técnicos por tarea que se utilizan, tiempo que demora en desarrollarse cada actividad, las horas hombre implicadas, la cantidad de equipos intervenidos en los respectivos meses, y porcentaje de ocupación en el mantenimiento diurno y nocturno.

Figura 14: Extracto de Programa anual de Mantenimiento de Sistema de Energía.

Programa anual de Mantenimiento Instalaciones de Sistema de Energia Metro de Valparaiso 2017

ÍTEM	Tipo.	Código.	Horario.	Descripción.	Cantidad De Equipos o Instalación	Numero De Técnicos.	Hora Por Actividad.	Total H.H. Por Una Actividad.	Periodo Mes.	Unidad De Medida.	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total De Actividades	Total H.H. Plan.	% Ocupado Mantención Diurno.	% Ocupado Mantención Nocturno.
1	Inspección.	2 VECES AL MES	Diurno.	Inspección General SER. Incluye Iluminación y Fuerza. Incluye mediciones y registros de variables eléctricas. Medición y registro de temperatura sala, nivel de aceite transformadores, temperatura transformadores y equipos, etc.	6																					
2	Inspección.	2 VECES AL MES	Diurno.	Inspección General SAF. Incluye Iluminación y Fuerza. Incluye medición y registro de variables eléctricas, medición y registro temperatura sala, temperatura transformadores, nivel de aceite, etc.	24																					
3	Inspección.	MENSUAL	Diurno.	Inspección General SEAT. Incluye Iluminación y Fuerza. Incluye medición y registro de variables eléctricas. Medición y registro de temperatura sala, nivel de aceite transformadores, temperatura transformadores y equipos, etc.	2																					
4	Inspección.	MENSUAL	Diurno.	Inspección Iluminación y Fuerza Recintos Estaciones. Salas técnicas, servicios, oficinas, etc.	20																					
5	Inspección.	MENSUAL	Diurno.	Inspección Iluminación y Fuerza Edificios: Edificio Corporativo/Edificio PCC/Edificio Vigilancia/Taller Infraestructura/Cocheras/Bodegas/Otros	10																					
6	Inspección.	MENSUAL	Nocturno.	Inspección Iluminación y fuerza faja de vía. Túnel y Superficie	6																					
7	Inspección.	ANUAL	Nocturno.	Inspección y Control Desgaste y Altura Hilo De Contacto.	6																					
8	Inspección.	SEMESTRAL	Nocturno.	Inspección y Control Dispositivos de Puesta a Tierra	6																					
9	Inspección.	TRIMENSUAL	Nocturno.	Inspección Tramo Línea De Contacto.	6																					
10	Inspección.	TRIMESTRAL	Nocturno.	Inspección Líneas aéreas 12 y 44 kV	1																					
11	Inspección.	SEMESTRAL	Nocturno.	Inspección y Líneas Subterráneas 12 y 44 kV	1																					
12	Pruebas.	TRIMESTRAL	Nocturno.	Pruebas Sistema de disparo transferido RFL	3																					
13	Pruebas.	SEMESTRAL	Nocturno.	Pruebas cargador de Baterías	4																					
14	Pruebas.	TRIMESTRAL	Nocturno.	Prueba Tranferencias 380 V Estaciones y SER/SEAT. Empalmes CHQ	16																					
15	Pruebas.	CUATRIMESTRAL	Nocturno.	Prueba Protecciones 12Kv SEAT/SERS/SAFS.	1																					
16	Pruebas.	CUATRIMESTRAL	Nocturno.	Prueba Protecciones 44Kv SEAT/SERS.	1																					
17	Pruebas.	CUATRIMESTRAL	Nocturno.	Prueba Protecciones 110Kv SEAT.	1																					
18	Mantención.	SEMESTRAL	Diurno.	Cambio Hora En Equipos SER/SEAT	4																					
19	Mantención.	SEMESTRAL	Nocturno.	Mantención estructuras metálicas SER y SEAT	4																					
20	Mantención.	SEMESTRAL	Nocturno.	Mantención y Pruebas Sistema De Incendio SEAT/SER.	3																					
21	Mantención.	SEMESTRAL	Nocturno.	Mantención y Pruebas Sistema De Incendio SAF.	23																					
22	Mantención.	SEMESTRAL	Nocturno.	Mantención estructuras metálicas Catenarias por tramo	6																					

Fuente: Programa anual de Mantenimiento de Sistema de Energía, Metro Valparaíso.

En el plan de mantención anual, cabe señalar que no se evidencia una fecha o una carta Gantt asociada al cuándo realizar la mantención, sólo se menciona la frecuencia. Por dar un ejemplo exagerando, en el caso de indicarse una frecuencia semestral, esta se puede llevar a cabo en días muy cercanos o incluso continuos, es decir, el último día del primer semestre y el primer día del segundo semestre, pudiendo produciéndose una ambigüedad y un mantenimiento poco efectivo.

Además, cabe señalar, que el plan de mantención anual actual está centrado en las actividades y no en los equipos, con ello se hace difícil hacer un seguimiento.

4.3 Recopilación de intervenciones preventivas y correctivas de los sistemas de Energía.

La información sobre intervenciones, por parte de Metro Valparaíso, no es rigurosamente registrada. Se delega al contratista la ejecución y registro de éstas. Sin embargo, se exige un informe mensual en donde se detallan las actividades realizadas asociadas a órdenes de ingreso al trabajo (OIT) y de Averías. Estas pueden ser visualizadas en la plataforma informática Siria (Ver Figura 15).

Figura 15: Extracto de Plataforma Informática Siria.

Nº	Fecha	Solicitado Por	Tipo de Faena	Contratista	Área	Sistema	Ubicación	Estado
10048	03/07/2017 15:15:26	ELEAZAR PONCE	coneccion de alimentadores a tdf3 racks scada	Siemens	Energía	BAJA TENSION	SO	✖
10014	02/07/2017 17:01:51	ANTONY RIVAS	operador emergencia	Siemens	Energía	SER-SEAT	SER ES	✔
10011	02/07/2017 06:53:20	ANTONI RIVAS	SIEMENS SSEE : OPERADOR EMERGENCIA SERES	Siemens	Energía	SER-SEAT	SER ES	✔
10005	01/07/2017 16:54:17	ANTONI RIVAS	operador seres	Siemens	Energía	SER-SEAT	SER ES	✔
9996	01/07/2017 06:55:17	ANTONY RIVAS	operador de emergencia en seres	Siemens	Energía	SER-SEAT	SER ES	✔
9990	30/06/2017 23:38:51	ALEJANDRO MELIÑAN	CAMBIO DE AISLADORES QU A SO POR VIA 2 CORTE DE 3 KV AMBAS VIAS TRAMO SERES A LI INGRESO POR EB	Siemens	Energía	CATENARIA	QU - SO	✔
9987	30/06/2017 23:24:26	JORGE AGUILAR	OPERACION DE LINEA DE 12 KV POR TRABAJOS EN SERVA PARA INSTALACION DE MANGAS AISLANTES A SOLICITUD DE EMPRESA BRIONES	Siemens	Energía	SER-SEAT	SEAT SO	✔
9981	30/06/2017 22:30:20	MARCO SILVA	APOYO EN LA OPERACION DE CORTE DE 12 KV EN SERVA PARA EMPRESA BRIONES	Siemens	Energía	Líneas AT-MT	SER VA	✔
9980	30/06/2017 22:25:26	ANTONY RIVAS	REPARAR CIRCUITO QUE SE ENCUENTRAN EN FALLA EN ANDEN 2 DE RE	Siemens	Energía	BAJA TENSION	RE	✔
9947	30/06/2017 09:17:19	ELEAZAR PONCE	SIEMENS BT : Mantención de sala técnica PU - LI	Siemens	Energía	BAJA TENSION	PU - LI	✔
9929	29/06/2017 23:53:03	RUBEN CASTILLO	roce de vegetación del pk 30 al pk 42 por via 2 ingreso desde corralon LI a la via 2 coordina con ctc	Siemens	Energía	CATENARIA	30-1 / 42-1 / Vía 2	✔

Fuente: Plataforma Informática Siria, Metro Valparaíso.

La plataforma permite obtener información relevante de OIT's y Averías, como lo son:

- Número de Registro.
- Fecha y Hora de ejecución/falla.
- El encargado/declarador.
- Tipo de Faena/Falla.
- Área.
- Sistema.
- Ubicación.
- Comentarios.
- Hora de cierre
- Estado de Flujo.

4.4 Elaboración y diseño de planilla resumen de intervenciones de equipos eléctricos.

Tras la recolección de información de intervenciones preventivas y correctivas, corroboración de órdenes de ingreso al trabajo (OIT) y averías (de Enero de 2016 a Diciembre de 2016), se procedió a crear una planilla general en donde se detallan las respectivas mantenciones realizadas a los sistemas de energía, específicamente a los implicados a la alimentación eléctrica de trenes. Resultando la siguiente planilla de mantenciones preventivas no programadas y correctivas, mostrada como extracto para ejemplo a continuación en la Tabla 5:

Tabla 3: Extracto de planilla resumen de intervenciones de mantenciones preventivas no programadas y correctivas de sistemas de alimentación eléctrica de trenes.

Tipo de Falla	Fecha	Sub-Sistema	Descripción de Falla	Acción correctiva
Correctiva	04/01/16	SER ES	DISPARO POR DI/DT F4A2 SERES, SE INFORMA A DON ROMAN PARA RESCATE DE EVENTOS, EN LA ZONA CIRCULABAN 2 XT MODULAR DOBLES	Atendido por personal UCI, retira eventos para análisis de falla
Correctiva	05/01/16	CATENARIA	POSTE DE HORMIGóN, PK14 P3 POR VIA 1 SE ENCUENTRA DESAPLOMADO	Se ingresa a vía 1 a traspaso de catenaria a poste metálico existente, instalando soportaciones para cable mensajero, hilo de contacto y segundo mensajero (alimentador), además corrección de suspensores, altura y Zig -Zag . Se retira de poste de concreto triangulo, solo se ocupa el balancín y centradores de este. Como pendiente queda el corte de hebras de cable mensajero en triangulo, lo cual se tendrá que programar para su reparación en forma pronta. El poste no se puede enderezar por que permanece el tronco de gran peso cargando su tirante el cual lo hace devolverse.
Preventiva no programada	20/01/16	SER-SEAT	seccionador F3a3 de seres no responde en forma remota	Se hace revisión el día 20, se hacen pruebas internas en SER funcionando normalmente, Se continuan las pruebas el día 21 detectado una falla en Scada.
Correctiva	24/01/16	CATENARIA	Mensajero de catenaria via 1 en PK04 P04, se encuentra cortado	Se realiza la instalación de cable de 300 MCM con prensas crosby, reinstalando el aislador de sección, se continuan los trabajos de montaje de seccionador y reinstalación de cables día lunes 25-01
Correctiva	25/01/16	SER PO	En SER PO se abren sin intervención del operador D12a0, G2a2 y F2a2	Se hace revisión de equipos sin detectarse nada anormal.

Preventiva no programada	29/01/16	CATENARIA	AISLADOR DE SECCION DE PK 04/04 SE ENCUENTRA SUELTO GOLPEA PANTOGRAFOS.	Se hace revisión y medición de altura de aislador de sección, se nivela.
Preventiva no programada	04/02/2016	CATENARIA	pk 25 C09 existe defleccion enlace, esta descentrada hilo contacto, toca el cuerno del pantografo modular.	En desvío 1 cocheras el belloto con vía 1 se efectúa correcciones de altura en deflexiones y elevaciones, ajuste de suspensores, correcciones de zig-zag, nivelación de seccionador, pasada de revisión con XT-Modular (n° 34), ajuste y aplome de hilo y mensajero, reparación de puente eléctrico, ajuste de centradores y alineación de triángulos.
Correctiva	05/02/2016	SER-SEAT	Cambiador de tap de trafo 1 de seat el sol no responde. trafo 1 tap 14 y trafo 2 tap 9	Falla correspende relé tapcon que se encuentra fuera de servicio, se programara la revisión por parte de especialista. Atendida con avería 532

Fuente: Elaboración propia en base a datos de planilla de mantención preventiva no programada y correctiva

A continuación, en la Tabla 6 se muestra un extracto de la planilla de mantención preventiva:

Tabla 4: Extracto de planilla resumen de intervenciones de mantenciones preventivas de sistemas de alimentación eléctrica de trenes.

Tipo de Falla	Fecha	Sub-Sistema
Preventivo	05/01/2016	Catenarias
Preventivo	05/01/2016	SER VA
Preventivo	05/01/2016	SER ES
Preventivo	06/01/2016	Catenarias
Preventivo	06/01/2016	SER PO
Preventivo	09/01/2016	Catenarias
Preventivo	11/01/2016	SER PO
Preventivo	12/01/2016	Catenarias
Preventivo	12/01/2016	SER VA
Preventivo	13/01/2016	Catenarias
Preventivo	13/01/2016	SER VA
Preventivo	14/01/2016	Catenarias
Preventivo	15/01/2016	Catenarias
Preventivo	16/01/2016	Catenarias
Preventivo	18/01/2016	SEAT
Preventivo	19/01/2016	Catenarias
Preventivo	19/01/2016	SEAT
Preventivo	20/01/2016	Catenarias
Preventivo	20/01/2016	SER ES
Preventivo	23/01/2016	Catenarias

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de mantención preventiva.

4.5 Elaboración de planilla de intervenciones cronológicas por subsistema.

Luego, se crea pestaña en Excel por equipo para así obtener planilla para cada sub-sistema, resultando la siguiente para la SEAT:

Tabla 5: Planilla de intervenciones cronológicas de SEAT.

Tipo de Falla	Fecha	Sub-Sistema	Descripción de Falla	Acción correctiva
Preventivo	18/01/2016	SEAT		
Preventiva no programada	20/01/16	SEAT	seccionador F3a3 de seres no responde en forma remota	Se hace revisión el día 20, se hacen pruebas internas en SER funcionando normalmente, Se continuan las pruebas el día 21 detectado una falla en Scada.
Preventivo	02/02/2016	SEAT		
Preventiva no programada	05/02/2016	SEAT	cambiador de tap de trafo 1 de seat el sol no responde. trafo 1 tap 14 y trafo 2 tap 9	Falla correspende relé tapcon que se encuentra fuera de servicio, se programara la revisión por parte de especialista. Atendida con avería 532
Preventiva no programada	22/02/2016	SEAT	diferencia de corriente elevada entre trafos 1 y 2 de SEAT. cuando están en vació, su consumo normal trifasico es de 6a, ahora trafo 1 en 6a, tap 8 y trafo 2 18a, tap 9. dato de I es el mismo en scada y rsview, en terreno es diferente.	Falla correspende relé tapcon que se encuentra fuera de servicio, se programara la revisión por parte de especialista.
Correctiva	**06/03/2016**	**SEAT**	23:47 hrs dia 06 de marzo en seat el sol operacion intempestiva de interruptor 52-7 (proteccion operada) se normaliza sin inconveniente a las 23:48 hrs	Se hace revisión de línea aérea de 44 kV, no se detecta nada extraño en la línea, como tampoco arboles que rocen la línea
Preventivo	12/03/2016	SEAT		
Preventivo	19/03/2016	SEAT		
Preventivo	23/03/2016	SEAT		
Preventiva no programada	13/07/2016	SEAT	INDICA QUE FUSIBLE DE CUADRO DE FILTRO DE 600 HZ ESTA DISPARADO.	cambio de fusible filtro armónica FA1 por uno nuevo de iguales características es decir 40 a 4200 v.
Preventiva no programada	12/08/2016	SEAT	En medidores E1-P7, E2-P7 (110 Kvca), E3-P7 y H2P7 (44 Kvca) SEAT SO, no se registra variación en los valores de consumo registrados entre las 07:30 y las 09:30 horas	Se verifican mediciones, se verifica el registro normal de los valores en la linea de 110 kV, en el caso de la línea de 44 kV esta no registra variación por estar alimentado desde SER Villa Alemana.
Preventiva no programada	12/09/2016	SEAT	instrumento de medida en tablero H2-P7 esta con lectura congelada 77477746 kwh	Se verifica medida, esta es fija debido a que actualmente se esta alimentando desde SER Villa Alemana
Preventivo	23/12/2016	SEAT		

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de mantenciones cronológica de SEAT.

4.6 Elaboración de planilla con tiempos de reparación y cálculo de tiempo de funcionamiento de cada equipo.

Los 5 sub-sistemas tienen más de un dato de mantenimiento correctivo y/o preventivo no programado, con lo cual se procede hacer un análisis más profundo de sus tiempos de reparación y de funcionamiento.

4.6.1 Construcción de planilla con tiempos de reparación

Para el tratamiento de datos de los sub-sistemas, se generará una nueva planilla en la que se detalla la fecha de la mantención, su duración y el tipo de falla.

Tabla 6: Disposición de datos inicial de SEAT.

Fecha	Hora	Duración [h]	Tipo de Falla
18/01/2016	23:30	4,5	Preventivo
20/01/16	**23:30**	**5**	**Preventiva no programada**
02/02/2016	23:30	6,5	Preventivo
05/02/2016	**23:30**	**2**	**Preventiva no programada**
22/02/2016	**1:45**	**2**	**Preventiva no programada**
06/03/2016	**23:45**	**4**	**Correctiva**
12/03/2016	23:30	6,25	Preventivo
19/03/2016	23:30	5	Preventivo
09/05/2016	23:30	5,5	Preventivo
23/03/2016	23:30	6,5	Preventivo
13/07/2016	**23:30**	**3,5**	**Preventiva no programada**
12/08/2016	**23:30**	**5**	**Preventiva no programada**
12/09/2016	**23:30**	**4,25**	**Preventiva no programada**
23/12/2016	23:30	4	Preventivo

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de SEAT con intervenciones por fallas preventivas, preventivas no programadas y correctivas.

Tabla 7: Disposición de datos inicial de SER VA.

Fecha	Hora	Duración [h]	Tipo de Falla
05/01/2016	23:30	5	Preventivo
12/01/2016	23:30	5,75	Preventivo
13/01/2016	23:30	6,25	Preventivo
26/01/2016	23:30	6,25	Preventivo
24/02/2016	**23:30**	**4**	**Preventiva no programada**
25/02/2016	**23:30**	**3**	**Preventiva no programada**
29/02/2016	23:30	6,5	Preventivo
19/03/2016	23:30	6,25	Preventivo
21/03/2016	23:30	6,25	Preventivo
29/03/2016	23:30	4,5	Preventivo
13/04/2016	23:30	6	Preventivo
19/04/2016	23:30	6,25	Preventivo
26/04/2016	23:30	5,25	Preventivo
28/04/2016	23:30	6	Preventivo
10/05/2016	23:30	5,25	Preventivo
11/05/2016	23:30	5	Preventivo
31/05/2016	23:30	6,5	Preventivo
05/06/2016	**23:30**	**3,25**	**Preventiva no programada**
08/06/2016	23:30	5	Preventivo
10/06/2016	**10:30**	**0,5**	**Correctiva**
14/06/2016	23:30	6,5	Preventivo
30/06/2016	**23:30**	**4**	**Preventiva no programada**
14/07/2016	23:30	6,5	Preventivo
23/07/2016	**23:30**	**0,25**	**Correctiva**
25/07/2016	**12:00**	**0,5**	**Correctiva**
02/08/2016	**3:00**	**3,5**	**Correctiva**
12/08/2016	23:30	6	Preventivo
08/09/2016	23:30	5,5	Preventivo
21/09/2016	**23:00**	**0,25**	**Correctiva**
15/10/2016	**14:30**	**1833,5**	**Correctiva**

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de SERVA con intervenciones por fallas preventivas, preventivas no programadas y correctivas.

Tabla 8: Disposición de datos inicial de SER ES.

Fecha	Hora	Duración [h]	Tipo de Falla
04/01/16	**23:30**	**2**	**Preventiva no programada**
05/01/2016	23:30	6	Preventivo
20/01/2016	23:30	6,5	Preventivo
25/01/2016	23:30	6,5	Preventivo
12/02/2016	23:30	6,5	Preventivo
22/02/2016	15:00	0,25	Correctiva
12/03/2016	23:30	6,25	Preventivo
14/03/2016	**10:45**	**0,5**	**Correctiva**
19/03/2016	23:30	5	Preventivo
23/03/2016	23:30	6,5	Preventivo
04/04/2016	23:30	6,5	Preventivo
06/04/2016	23:30	5,5	Preventivo

13/04/2016	23:30	5,5	Preventivo
17/04/2016	**23:30**	**2**	**Preventiva no programada**
21/04/2016	23:30	5,5	Preventivo
25/04/2016	23:30	5,25	Preventivo
28/04/2016	23:30	6,25	Preventivo
26/06/2016	5:45	1	Correctiva
04/07/2016	23:30	6,5	Preventivo
06/07/2016	23:30	6,25	Preventivo
23/08/2016	**23:30**	**3**	**Preventiva no programada**
27/09/2016	**23:30**	**1**	**Preventiva no programada**
03/10/2016	**0:15**	**5**	**Correctiva**
24/10/2016	23:30	5,5	Preventivo
26/10/2016	23:30	5,75	Preventivo
07/11/2016	23:30	6	Preventivo
09/11/2016	7:30	0,5	Correctiva
14/11/2016	23:30	6,25	Preventivo
16/11/2016	23:30	6,75	Preventivo
17/11/2016	**7:30**	**1**	**Correctiva**
17/11/2016	23:30	5,5	Preventivo
22/11/2016	23:30	6	Preventivo
14/12/2016	23:30	6,25	Preventivo
20/12/2016	23:30	5,25	Preventivo
23/12/2016	23:30	4	Preventivo

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de SER ES con intervenciones por fallas preventivas, preventivas no programadas y correctivas.

Tabla 9: Disposición de datos inicial de SER PO.

Fecha	Hora	Duración [h]	Tipo de Falla
06/01/2016	23:30	6,5	Preventivo
11/01/2016	23:30	6,75	Preventivo
25/01/16	4:15	1,5	Correctiva
28/01/2016	23:30	7,5	Preventivo
02/02/2016	23:30	6,5	Preventivo
05/04/2016	23:30	6,5	Preventivo
18/04/2016	23:30	6,5	Preventivo
29/04/2016	23:30	3	Preventivo
16/05/2016	23:30	6,5	Preventivo
18/05/2016	23:30	6	Preventivo
23/05/2016	23:30	6,75	Preventivo
30/05/2016	23:30	7	Preventivo
13/06/2016	23:30	4,75	Preventivo
22/06/2016	23:30	6,5	Preventivo
20/07/2016	23:30	4,5	Preventivo
07/09/2016	23:30	5,75	Preventivo
10/09/2016	**13:30**	**0,25**	**Correctiva**
11/09/2016	**23:30**	**3**	**Preventiva no programada**
13/09/2016	23:30	2	Preventiva no programada
15/11/2016	23:30	5	Preventivo
23/11/2016	23:30	6,5	Preventivo
06/12/2016	23:30	5,75	Preventivo
12/12/2016	**0:15**	**3,25**	**Correctiva**

13/12/2016	23:30	6,25	Preventivo
15/12/2016	23:30	3,75	Preventivo
19/12/2016	23:30	5	Preventivo

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de SER PO con intervenciones por fallas preventivas, preventivas no programadas y correctivas.

Tabla 10: Disposición de datos inicial de Catenarias.

Fecha	Hora	Duración [h]	Tipo de Falla
05/01/2016	23:30	4,75	Preventivo
06/01/2016	23:30	5	Preventivo
09/01/2016	23:30	4	Preventivo
12/01/2016	23:30	3,5	Preventivo
13/01/2016	23:30	4,25	Preventivo
14/01/2016	23:30	4,5	Preventivo
15/01/2016	23:30	4	Preventivo
16/01/2016	23:30	3,75	Preventivo
19/01/2016	23:30	4	Preventivo
20/01/2016	23:30	3,75	Preventivo
23/01/2016	23:30	5	Preventivo
24/01/16	**23:30**	**6**	**Preventiva no programada**
26/01/2016	23:30	5,25	Preventivo
27/01/2016	23:30	5	Preventivo
28/01/2016	23:30	5,25	Preventivo
29/01/2016	23:30	5,75	Preventivo
02/02/2016	23:30	5,5	Preventivo
03/02/2016	23:30	5	Preventivo
04/02/2016	23:30	5	Preventivo
06/02/2016	**23:30**	**4,25**	**Preventiva no programada**
08/02/2016	23:30	5	Preventivo
09/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
10/02/2016	23:30	4,75	Preventivo
11/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
12/02/2016	23:30	4,75	Preventivo
15/02/2016	23:30	5	Preventivo
16/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
18/02/2016	23:30	5	Preventivo
19/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
22/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
24/02/2016	23:30	6	Preventivo
25/02/2016	23:30	5,25	Preventivo
26/02/2016	23:30	5	Preventivo
01/03/2016	**17:45**	**1**	**Correctiva**
01/03/2016	23:30	5	Preventivo
02/03/2016	23:30	5	Preventivo
03/03/2016	23:30	6	Preventivo
05/03/2016	23:30	3	Preventivo
08/03/2016	**23:30**	**5**	**Preventiva no programada**
09/03/2016	23:30	5,25	Preventivo
11/03/2016	23:30	5	Preventivo
11/03/2016	**23:30**	**3**	**Preventiva no programada**
12/03/2016	23:30	4,75	Preventivo
14/03/2016	23:30	5	Preventivo

15/03/2016	**8:00**	**1,5**	**Correctiva**
17/03/2016	23:30	5,25	Preventivo
19/03/2016	23:30	5,25	Preventivo
22/03/2016	23:30	5,25	Preventivo
24/03/2016	23:30	4,75	Preventivo
29/03/2016	23:30	3,75	Preventivo
30/03/2016	23:30	5	Preventivo
31/03/2016	23:30	5,5	Preventivo
31/03/2016	**23:30**	**2,5**	**Preventiva no programada**
01/04/2016	23:30	5	Preventivo
05/04/2016	23:30	5	Preventivo
07/04/2016	23:30	4,5	Preventivo
08/04/2016	23:30	5	Preventivo
12/04/2016	23:30	6,5	Preventivo
13/04/2016	23:30	5	Preventivo
15/04/2016	23:30	4	Preventivo
17/04/2016	**23:30**	**3,25**	**Preventiva no programada**
18/04/2016	23:30	5	Preventivo
20/04/2016	23:30	3,25	Preventivo
21/04/2016	23:30	5,25	Preventivo
23/04/2016	23:30	4,75	Preventivo
25/04/2016	23:30	5	Preventivo
26/04/2016	23:30	5	Preventivo
28/04/2016	23:30	5	Preventivo
29/04/2016	23:30	4,5	Preventivo
30/04/2016	23:30	5,25	Preventivo
03/05/2016	23:30	8	Preventivo
04/05/2016	**23:30**	**3,5**	**Preventiva no programada**
05/05/2016	23:30	5	Preventivo
06/05/2016	23:30	5	Preventivo
07/05/2016	23:30	4,25	Preventivo
10/05/2016	23:30	3,5	Preventivo
11/05/2016	23:30	4,5	Preventivo
12/05/2016	23:30	5	Preventivo
13/05/2016	23:30	5,25	Preventivo
14/05/2016	**23:30**	**2,5**	**Preventiva no programada**
16/05/2016	23:30	3,5	Preventivo
17/05/2016	23:30	5,25	Preventivo
18/05/2016	23:30	3,25	Preventivo
20/05/2016	23:30	4,5	Preventivo
21/05/2016	23:30	4	Preventivo
23/05/2016	23:30	6	Preventivo
24/05/2016	23:30	4,5	Preventivo
25/05/2016	**23:30**	**2,75**	**Preventiva no programada**
26/05/2016	23:30	5	Preventivo
27/05/2016	23:30	4	Preventivo
28/05/2016	23:30	4	Preventivo
30/05/2016	23:30	5,25	Preventivo
01/06/2016	23:30	5	Preventivo
02/06/2016	23:30	6,5	Preventivo
03/06/2016	23:30	5,25	Preventivo
04/06/2016	23:30	5,25	Preventivo
07/06/2016	23:30	4,25	Preventivo
08/06/2016	23:30	4,5	Preventivo

09/06/2016	23:30	5	Preventivo
11/06/2016	23:30	5,5	Preventivo
13/06/2016	23:30	5	Preventivo
15/06/2016	23:30	5,25	Preventivo
16/06/2016	23:30	5,25	Preventivo
17/06/2016	23:30	4,75	Preventivo
21/06/2016	23:30	4,75	Preventivo
22/06/2016	23:30	5	Preventivo
23/06/2016	23:30	4,5	Preventivo
28/06/2016	**23:30**	**3**	**Preventiva no programada**
30/06/2016	23:30	5,75	Preventivo
07/07/2016	23:30	5	Preventivo
08/07/2016	23:30	4,75	Preventivo
12/07/2016	23:30	3,5	Preventivo
13/07/2016	**23:30**	**5**	**Preventiva no programada**
14/07/2016	23:30	5,25	Preventivo
15/07/2016	23:30	5	Preventivo
18/07/2016	**1:30**	**4**	**Correctiva**
19/07/2016	23:30	2,5	Preventivo
20/07/2016	23:30	6	Preventivo
22/07/2016	23:30	4	Preventivo
26/07/2016	23:30	4,75	Preventivo
27/07/2016	23:30	5,5	Preventivo
29/07/2016	23:30	3,5	Preventivo
01/08/2016	23:30	5	Preventivo
02/08/2016	**4:00**	**2**	**Correctiva**
02/08/2016	23:30	5,25	Preventivo
03/08/2016	23:30	6,25	Preventivo
04/08/2016	23:30	5,25	Preventivo
09/08/2016	23:30	5,25	Preventivo
10/08/2016	23:30	5,5	Preventivo
11/08/2016	23:30	5	Preventivo
16/08/2016	23:30	5	Preventivo
17/08/2016	23:30	5	Preventivo
18/08/2016	23:30	5,5	Preventivo
19/08/2016	**17:00**	**2**	**Correctiva**
22/08/2016	**23:30**	**3,25**	**Preventiva no programada**
23/08/2016	23:30	4,5	Preventivo
24/08/2016	23:30	4,75	Preventivo
26/08/2016	23:30	4,25	Preventivo
27/08/2016	23:30	4,5	Preventivo
30/08/2016	23:30	5,25	Preventivo
31/08/2016	23:30	5,25	Preventivo
01/09/2016	23:30	5,25	Preventivo
02/09/2016	23:30	5	Preventivo
05/09/2016	23:30	5,25	Preventivo
07/09/2016	23:30	6	Preventivo
08/09/2016	23:30	5	Preventivo
09/09/2016	23:30	5	Preventivo
12/09/2016	23:30	4,75	Preventivo
13/09/2016	23:30	4,5	Preventivo
15/09/2016	23:30	5	Preventivo
18/09/2016	**23:30**	**1,5**	**Preventiva no programada**
20/09/2016	23:30	5	Preventivo
21/09/2016	23:30	5	Preventivo

22/09/2016	17:00	2,5	Correctiva
23/09/2016	23:30	5,5	Preventivo
26/09/2016	23:30	5,25	Preventivo
27/09/2016	**10:00**	**3,25**	**Correctiva**
27/09/2016	23:30	5	Preventivo
28/09/2016	23:30	5	Preventivo
29/09/2016	23:30	5,25	Preventivo
30/09/2016	23:30	5,5	Preventivo
01/10/2016	**23:30**	**2,75**	**Preventiva no programada**
03/10/2016	23:30	5	Preventivo
04/10/2016	23:30	4,5	Preventivo
05/10/2016	23:30	5,75	Preventivo
06/10/2016	23:30	4,75	Preventivo
07/10/2016	23:30	6,5	Preventivo
09/10/2016	18:15	0,5	Correctiva
10/10/2016	23:30	5	Preventivo
11/10/2016	23:30	5,25	Preventivo
12/10/2016	23:30	5	Preventivo
13/10/2016	23:30	5	Preventivo
14/10/2016	23:30	5	Preventivo
16/10/2016	**0:30**	**2,5**	**Correctiva**
18/10/2016	23:30	4,5	Preventivo
20/10/2016	23:30	5	Preventivo
21/10/2016	23:30	5	Preventivo
23/10/2016	**12:15**	**0,75**	**Correctiva**
24/10/2016	23:30	5,25	Preventivo
25/10/2016	23:30	5,5	Preventivo
27/10/2016	23:30	1	Preventivo
28/10/2016	23:30	4,75	Preventivo
01/11/2016	23:30	5,25	Preventivo
02/11/2016	23:30	5	Preventivo
04/11/2016	23:30	4,75	Preventivo
06/11/2016	**23:30**	**1,5**	**Preventiva no programada**
07/11/2016	23:30	5	Preventivo
08/11/2016	23:30	5,5	Preventivo
09/11/2016	**7:30**	**0,5**	**Correctiva**
10/11/2016	23:30	2	Preventivo
11/11/2016	23:30	5,25	Preventivo
13/11/2016	**19:00**	**1**	**Correctiva**
14/11/2016	23:30	4,75	Preventivo
15/11/2016	23:30	5	Preventivo
16/11/2016	23:30	4,5	Preventivo
18/11/2016	**6:30**	**0,5**	**Correctiva**
18/11/2016	**10:45**	**0,5**	**Correctiva**
18/11/2016	23:30	5,25	Preventivo
21/11/2016	23:30	5	Preventivo
22/11/2016	23:30	5,5	Preventivo
23/11/2016	23:30	5	Preventivo
25/11/2016	23:30	4,75	Preventivo
29/11/2016	23:30	5	Preventivo
30/11/2016	23:30	4,75	Preventivo
01/12/2016	23:30	4,75	Preventivo
02/12/2016	23:30	4,5	Preventivo
05/12/2016	23:30	5	Preventivo
06/12/2016	23:30	5	Preventivo
07/12/2016	23:30	5,5	Preventivo

09/12/2016	**23:30**	**1,75**	**Preventiva no programada**
12/12/2016	23:30	4,75	Preventivo
14/12/2016	23:30	4,5	Preventivo
15/12/2016	23:30	5,25	Preventivo
16/12/2016	23:30	4,75	Preventivo
20/12/2016	23:30	4,75	Preventivo
21/12/2016	23:30	5	Preventivo
22/12/2016	23:30	4,75	Preventivo
23/12/2016	23:30	5,75	Preventivo
26/12/2016	23:30	4,5	Preventivo
27/12/2016	23:30	5	Preventivo
29/12/2016	23:30	5,25	Preventivo
30/12/2016	23:30	4,25	Preventivo

Fuente: Elaboración propia en base a planilla de Catenarias con intervenciones por fallas preventivas, preventivas no programadas y correctivas.

4.6.2 Cálculo de tiempo de funcionamiento de cada equipo

Para calcular el tiempo de funcionamiento de cada sub-sistema se considerarán los días mensuales (DM) y luego los días trimestrales (DT), considerando los meses de enero, febrero y marzo como primer trimestre (1T), abril, mayo y junio como segundo trimestre (2T), julio, agosto y septiembre como tercer trimestre (3T) y octubre, noviembre y diciembre como cuarto trimestre (4T).

A continuación, se muestra planilla de cálculo de las horas trimestrales de funcionamiento de los sub-sistemas en general:

Tabla 11: Días y horas trimestrales durante funcionamiento de los sub-sistemas.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]
Enero	Marzo	2016	91	2184
Abril	Junio	2016	91	2184
Julio	Septiembre	2016	92	2208
Octubre	Diciembre	2016	92	2208

Fuente: Elaboración propia en base a días y horas de cada mes del año 2016.

Para el cálculo de las horas trimestrales, se consideran los días totales del trimestre, por las 24 horas del día, resultando 2184 horas durante el trimestre de enero a marzo del año 2016, y así para el resto de trimestres que se le hizo seguimiento a la mantención de los sub-sistemas.

Para el cálculo del tiempo de funcionamiento de cada sub-sistema se utiliza la siguiente ecuación:

$$TF = HT - TR$$

En donde:

TF : Tiempo Trimestral de Funcionamiento

HT: Horas trimestrales.

TR: Tiempo de Reparación Trimestral (duraciones en Tablas 8-12).

Resultando las siguientes planillas de tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento TF para los sub-sistemas, que incluye además el número de reparaciones (R) por trimestre:

Tabla 12: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SEAT.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]	Reparaciones	TR [h]	TF
Enero	Marzo	2016	91	2184	8	41,75	2142,25
Abril	Junio	2016	91	2184	1	5,5	2178,5
Julio	Septiembre	2016	92	2208	3	12,75	2195,25
Octubre	Diciembre	2016	92	2208	1	4	2204

Fuente: Elaboración propia en base a duración de reparaciones y de funcionamiento de SEAT.

Tabla 13: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER VA.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]	Reparaciones	TR [h]	TF
Enero	Marzo	2016	91	2184	10	53,75	2130,25
Abril	Junio	2016	91	2184	12	59,5	2124,5
Julio	Septiembre	2016	92	2208	7	22,5	2185,5
Octubre	Diciembre	2016	92	2208	1	1833,5	374,5

Fuente: Elaboración propia en base a duración de reparaciones y de funcionamiento de SER VA.

Tabla 14: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER ES.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]	Reparaciones	TR [h]	TF
Enero	Marzo	2016	91	2184	10	46	2138
Abril	Junio	2016	91	2184	8	40,5	2146,5
Julio	Septiembre	2016	92	2208	4	16,75	2191,25
Octubre	Diciembre	2016	92	2208	13	63,75	2144,25

Fuente: Elaboración propia en base a duración de reparaciones y de funcionamiento de SER ES.

Tabla 15: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de SER PO.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]	Reparaciones	TR [h]	TF
Enero	Marzo	2016	91	2184	5	28,75	2155,25
Abril	Junio	2016	91	2184	9	53,5	2130,5
Julio	Septiembre	2016	92	2208	5	15,5	2192,5
Octubre	Diciembre	2016	92	2208	7	35,5	2172,5

Fuente: Elaboración propia en base a duración de reparaciones y de funcionamiento de SER PO.

Tabla 16: Tiempo de reparación TR y tiempo de funcionamiento de Catenarias.

Meses		Año	DT [días]	HT [horas]	Reparaciones	TR [h]	TF
Enero	Marzo	2016	91	2184	53	247,25	1936,75
Abril	Junio	2016	91	2184	56	264,25	1919,57
Julio	Septiembre	2016	92	2208	52	242	1966
Octubre	Diciembre	2016	92	2208	61	260,5	1947,5

Fuente: Elaboración propia en base a duración de reparaciones y de funcionamiento de Catenarias.

4.7 Cálculo de indicadores MTBF y MTTR.

Se procede a la realización de cálculo de indicadores de tiempo medio de reparación y tiempo medio entre fallas, considerando una base de tiempo trimestral.

4.7.1 Cálculo de indicadores de Tiempo Medio de Reparación MTTR

Para calcular el MTTR se utilizará la siguiente ecuación:

$$MTTR = \frac{TR}{R}$$

En donde:

TR= Tiempo de reparación trimestral en horas.

R= Número de reparaciones trimestrales.

Resultando las siguientes planillas de MTTR para los sub-sistemas:

Tabla 17: Tiempo medio de reparación MTTR de SEAT.

Trimestre	R	TR [h]	MTTR
T1-2016	8	41,75	5,22
T2-2016	1	5,5	5,50
T3-2016	3	12,75	4,25
T4-2016	1	4	4,00

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de reparaciones de SEAT.

Tabla 18: Tiempo medio de reparación MTTR de SER VA.

Trimestre	R	TR [h]	MTTR
T1-2016	10	53,75	5,38
T2-2016	12	59,5	4,96
T3-2016	7	22,5	3,21
T4-2016	1	1833,5	1833,50

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de reparaciones de SER VA.

Tabla 19: Tiempo medio de reparación MTTR de SER ES.

Trimestre	R	TR [h]	MTTR
T1-2016	10	46	4,60
T2-2016	8	37,5	4,69
T3-2016	4	16,75	4,19
T4-2016	13	63,75	4,90

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de reparaciones de SER ES.

Tabla 20: Tiempo medio de reparación MTTR de SER PO.

Trimestre	R	TR [h]	MTTR
T1-2016	5	28,75	5,75
T2-2016	9	53,5	5,94
T3-2016	5	15,5	3,10
T4-2016	7	35,5	5,07

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de reparaciones de SER PO.

Tabla 21: Tiempo medio de reparación MTTR de Catenarias.

Trimestre	R	TR [h]	MTTR
T1-2016	53	247,25	4,67
T2-2016	56	264,25	4,72
T3-2016	52	242	4,65
T4-2016	61	260,5	4,27

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de reparaciones de Catenarias.

4.7.2 Cálculo de indicadores de Tiempo Medio Entre Fallas MTBF

Para calcular el MTBF se utilizará la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{TF}{R}$$

En donde:

TF= Tiempo de funcionamiento trimestral en horas.

R= Número de reparaciones trimestrales.

Resultando las siguientes planillas de MTBF para los sub-sistemas:

Tabla 22: Tiempo medio entre fallas MTBF de SEAT.

Trimestre	R	TF [h]	MTBF
T1-2016	8	2142,3	267,78
T2-2016	1	2178,5	2178,50
T3-2016	3	2195,3	731,75
T4-2016	1	2204	2204,00

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de funcionamiento de SEAT.

Tabla 23: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER VA.

Trimestre	R	TF [h]	MTBF
T1-2016	10	2130,3	213,03
T2-2016	12	2124,5	177,04
T3-2016	7	2185,5	312,21
T4-2016	1	374,5	374,50

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de funcionamiento de SER VA.

Tabla 24: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER ES.

Trimestre	R	TF [h]	MTBF
T1-2016	10	2138	213,80
T2-2016	8	2146,5	268,31
T3-2016	4	2191,3	547,81
T4-2016	13	2144,3	164,94

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de funcionamiento de SER ES.

Tabla 25: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER PO.

Trimestre	R	TF [h]	MTBF
T1-2016	5	2155,3	431,05
T2-2016	9	2130,5	236,72
T3-2016	5	2192,5	438,50
T4-2016	7	2172,5	310,36

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de funcionamiento de SER PO.

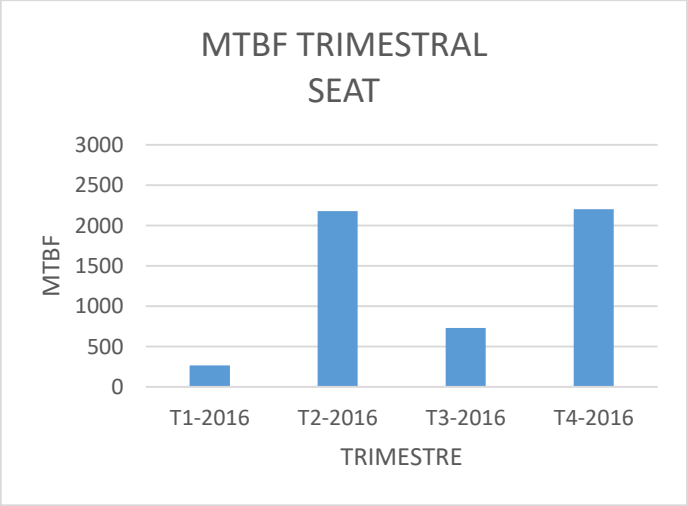
Tabla 26: Tiempo medio entre fallas MTBF de Catenarias.

Trimestre	R	TF [h]	MTBF
T1-2016	53	1936,8	36,54
T2-2016	56	1919,8	34,28
T3-2016	52	1966	37,81
T4-2016	61	1947,5	31,93

Fuente: Elaboración propia en base a número y tiempo de funcionamiento de Catenarias.

A continuación, se pueden observar los indicadores trimestrales de MTBF de cada sub-sistema:

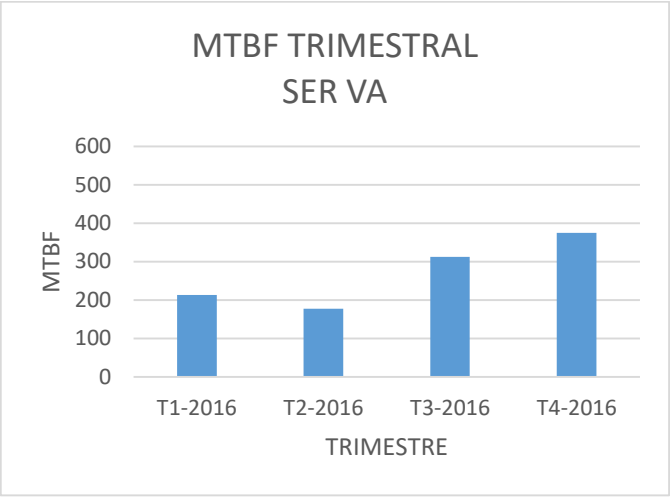
Figura 16: Tiempo medio entre fallas MTBF de SEAT.



Fuente: Elaboración propia en base a MTBF trimestral de SEAT.

En la Figura 16 se distingue que en los trimestres 2 y 4 existen tiempos medios entre fallas similares, sin embargo, el trimestre 1 es el más bajo, el cual tuvo un disparo muy abrupto en el siguiente periodo, parecido es a lo que sucede al trimestre 3, no siendo este tan bajo como el primero.

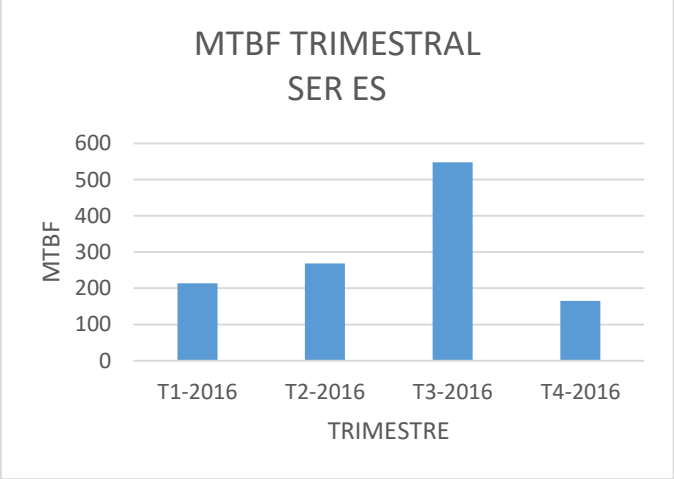
Figura 17: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER VA.



Fuente: Elaboración propia en base a MTBF trimestral de SER VA.

En la Figura 17 se puede observar que los MTBF en el primer trimestre sufre una leve caída en el periodo inmediatamente siguiente, posteriormente se evidencian alzas en el trimestre 3 y nuevamente en el cuarto.

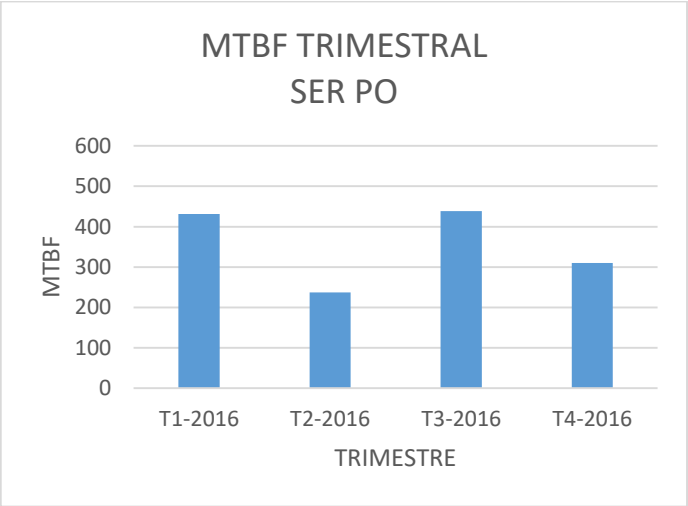
Figura 18: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER ES.



Fuente: Elaboración propia en base a MTBF trimestral de SER ES.

Se observa que los MTBF se encuentran entre 150-250 unidades por hora, escapándose el trimestre 3 a este rango, y siendo el mayor (Ver Figura 18).

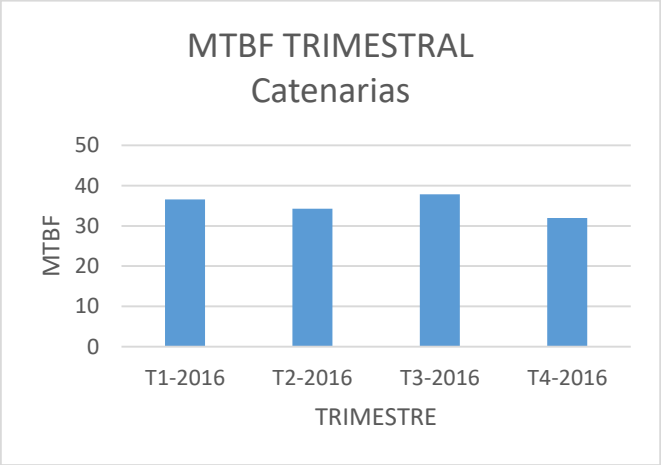
Figura 19: Tiempo medio entre fallas MTBF de SER PO.



Fuente: Elaboración propia en base a MTBF trimestral de SER PO.

En la Figura 19 se aprecia que el trimestre 1 y 3 son muy similares en magnitud de MTBF, observándose que el menor valor se encuentra en el segundo trimestre. Se ve la secuencia (aunque son pocos datos para ver un patrón) de una baja del primer a segundo trimestre, posteriormente un alza y finalmente una baja.

Figura 20: Tiempo medio entre fallas MTBF de Catenarias.



Fuente: Elaboración propia en base a MTBF trimestral de Catenarias.

Se observan índices de MTBF muy parejos, encontrándose en el rango de las 30-40 unidades por hora, sin embargo, son muy bajos, debido a la gran cantidad de intervenciones que sufren las catenarias (Ver Figura 20).

4.7.2 Resultados

Los resultados obtenidos entre los subsistemas resultan muy diferentes entre sí, sin embargo, los tiempos medios de reparación de los distintos sub-sistemas rondan las 4-5 horas aproximadamente, existe un dato muy escapado correspondiente a la SER VA en el trimestre 4 de 2016, la cual quedó fuera de servicio en esas fechas. Por otro lado, se distingue que la SEAT tiene los mayores MTBF. Esto solo en los trimestres 1 y 2, dado que en los trimestres 3 y 4 se le dio énfasis a sus mantenciones preventivas.

Por otro lado, las SER´s tienen un rango parecido de MTBF, rondando los 200-400, escapándose un solo dato de la SER portales, el cual llega a los 547,81 como máximo.

Además, se aprecia que las catenarias poseen los más bajos MTBF, del orden de los 30-40 horas, dado que a este sub-sistema se le da gran énfasis en la mantención preventiva. Se debe considerar que se está evaluando como un todo y que la disposición de la catenaria cubre 43 Kms de Largo, con lo que existen muchos puntos y elementos con susceptibilidad a fallar. Por motivos de escaza información se trata como un todo, dado que basta que falle un elemento falla.

4.8 Cálculo de modeladores de tasa de falla y disponibilidad.

4.8.1 Obtención de modeladores de tasa de falla

En base a los valores del punto anterior, se pueden determinar los modeladores de tasas de fallas de cada subsistema. Para simplificar los cálculos, se considera que λ es constante. Utilizando la siguiente ecuación:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

A continuación, en las Tablas 29-31, se muestran las tasas de fallas de la SEAT, SER VA, SER ES, SER PO y Catenarias respectivamente:

Tabla 27: Tasa de Falla de SEAT.

Trimestre	MTBF	Tasa de Falla (λ)
T1-2016	267,78	0,003734
T2-2016	2178,50	0,000459
T3-2016	731,75	0,001367
T4-2016	2204,00	0,000454

Fuente: Elaboración propia en base a Tasa de Falla trimestral de SEAT.

Tabla 28: Tasa de Falla de SER VA.

Trimestre	MTBF	Tasa de Falla (λ)
T1-2016	213,03	0,004694
T2-2016	177,04	0,005648
T3-2016	312,21	0,003203
T4-2016	374,50	0,002670

Fuente: Elaboración propia en base a Tasa de Falla trimestral de SER VA.

Tabla 29: Tasa de Falla de SER ES.

Trimestre	MTBF	Tasa de Falla (λ)
T1-2016	213,80	0,004677
T2-2016	268,31	0,003727
T3-2016	547,81	0,001825
T4-2016	164,94	0,006063

Fuente: Elaboración propia en base a Tasa de Falla trimestral de SER ES.

Tabla 30: Tasa de Falla de SER PO.

Trimestre	MTBF	Tasa de Falla (λ)
T1-2016	431,05	0,002320
T2-2016	236,72	0,004224
T3-2016	438,50	0,002281
T4-2016	310,36	0,003222

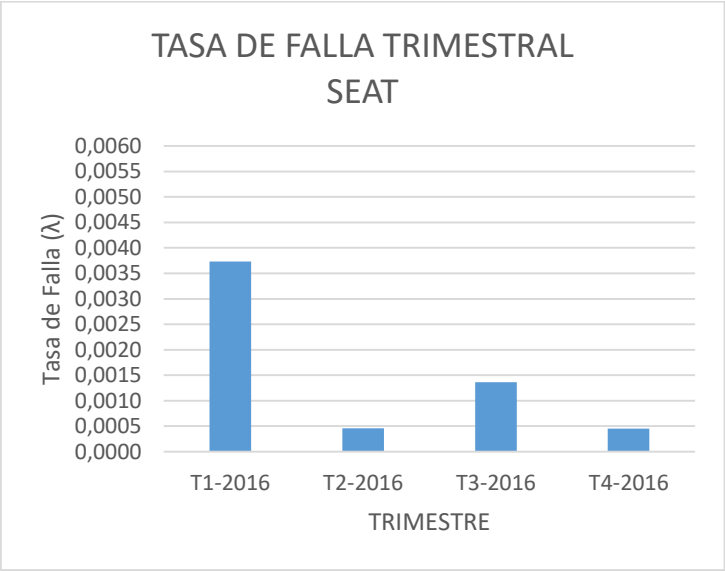
Fuente: Elaboración propia en base a Tasa de Falla trimestral de SER PO.

Tabla 31: Tasa de Falla de SER PO.

Trimestre	MTBF	Tasa de Falla (λ)
T1-2016	36,54	0,027365
T2-2016	34,28	0,029170
T3-2016	37,81	0,026450
T4-2016	31,93	0,031322

Fuente: Elaboración propia en base a Tasa de Falla trimestral de Catenarias.

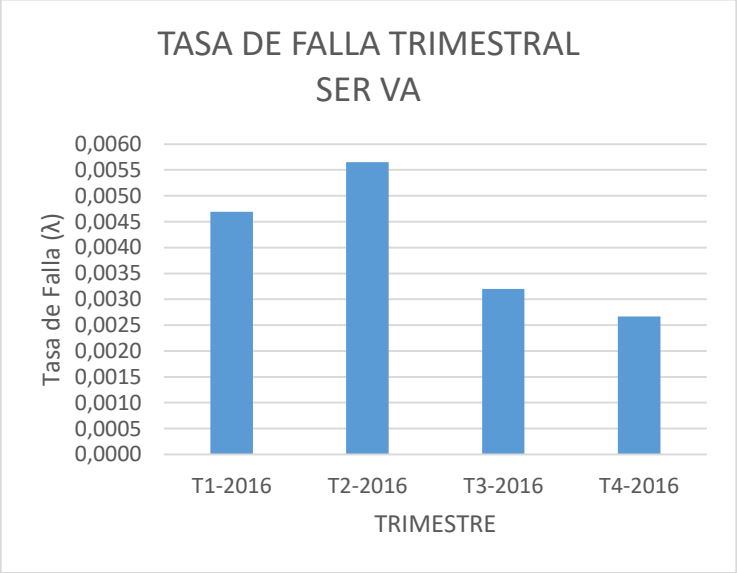
Figura 21: Tasa de Fallas de SEAT.



Fuente: Elaboración propia en base a tasa de falla trimestral de SEAT.

La tasa de falla del primer trimestre del año 2016 es mayor, debido a que la mayor cantidad de fallas ocurrieron en dicho periodo.

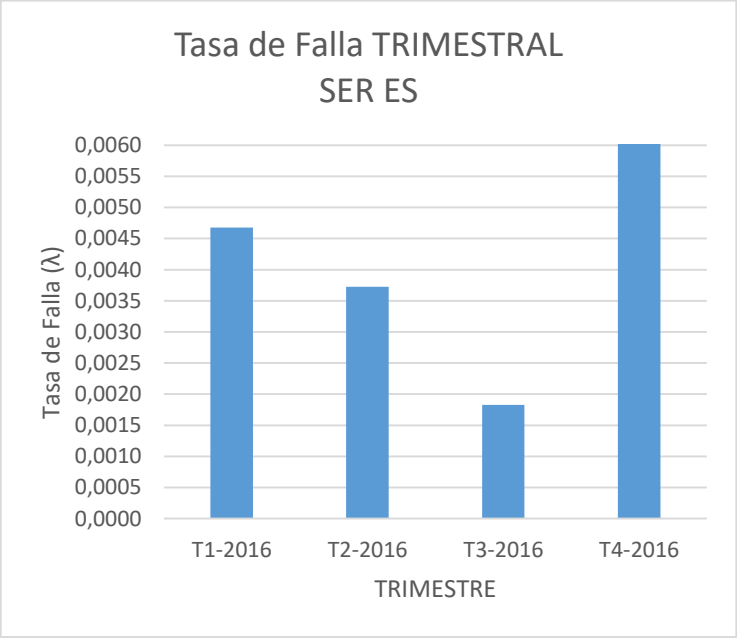
Figura 22: Tasa de Fallas de SER VA.



Fuente: Elaboración propia en base a tasa de falla trimestral de SER VA.

Se logra apreciar magnitudes similares en el trimestre 1 y 2 del año 2016, siendo este último la mayor tasa de falla de la SER VA. Así como también, una similitud en los trimestres 3 y 4.

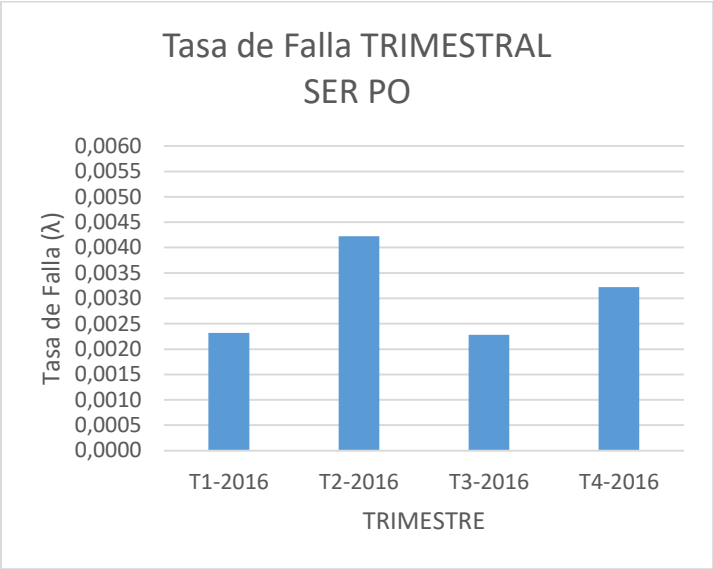
Figura 23: Tasa de Fallas de SER ES.



Fuente: Elaboración propia en base a tasa de falla trimestral de SER ES.

Se logra visualizar que hay una tendencia a la disminución en la tasa de falla en los primeros 3 trimestres del año 2016, siendo este último el menor valor. Por otro lado, en el cuarto trimestre existe un salto, en el cuál se evidencia el valor máximo que alcanza en este año.

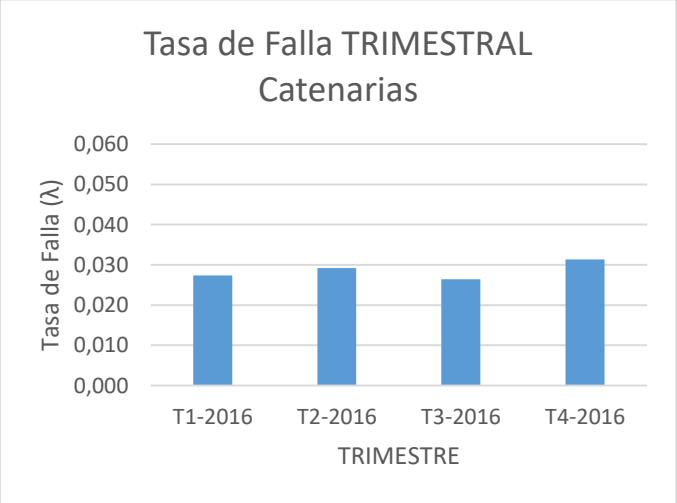
Figura 24: Tasa de Fallas de SER PO.



Fuente: Elaboración propia en base a tasa de falla trimestral de SER PO.

En la SER PO se evidencia una alternancia de la magnitud de las tasas de fallas, en el trimestre 1 y 3, se logran valores en torno a los 0,0022. Por otro lado, en los trimestres 2 y 4 se logran valores más altos, siendo el periodo 2 el de mayor magnitud.

Figura 25: Tasa de Fallas de Catenarias.



Fuente: Elaboración propia en base a tasa de falla trimestral de Catenarias.

Las Catenarias por su parte, poseen tasas de falla, muy similares en los 4 trimestres, rondando los 0,026-0,031.

4.8.2 Obtención de modeladores de disponibilidad

Haciendo uso del MTBF y MTTR calculados previamente, se pueden obtener los modeladores de disponibilidad de cada subsistema, utilizando la ecuación siguiente:

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

A continuación, en las Tablas 33-37, se muestran las disponibilidades de cada uno de los subsistemas.

Tabla 32: Disponibilidad de SEAT.

Trimestre	MTBF	MTTR	Disponibilidad
T1-2016	267,78	5,22	0,9809
T2-2016	2178,50	5,50	0,9975
T3-2016	731,75	4,25	0,9942
T4-2016	2204,00	4,00	0,9982

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SEAT.

Tabla 33: Disponibilidad de SER VA.

Trimestre	MTBF	MTTR	Disponibilidad
T1-2016	213,03	5,38	0,9754
T2-2016	177,04	4,96	0,9728
T3-2016	312,21	3,21	0,9898
T4-2016	374,50	1833,50	0,1696

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER VA.

Tabla 34: Disponibilidad de SER ES.

Trimestre	MTBF	MTTR	Disponibilidad
T1-2016	213,80	4,60	0,9789
T2-2016	268,31	4,69	0,9828
T3-2016	547,81	4,19	0,9924
T4-2016	164,94	4,90	0,9711

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER ES.

Tabla 35: Disponibilidad de SER PO.

Trimestre	MTBF	MTTR	Disponibilidad
T1-2016	431,05	5,75	0,9868
T2-2016	236,72	5,94	0,9755
T3-2016	438,50	3,10	0,9930
T4-2016	310,36	5,07	0,9839

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER PO.

Tabla 36: Disponibilidad de Catenarias.

Trimestre	MTBF	MTTR	Disponibilidad
T1-2016	36,54	4,67	0,8868
T2-2016	34,28	4,72	0,8790
T3-2016	37,81	4,65	0,8904
T4-2016	31,93	4,27	0,8820

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de Catenarias.

Otra forma de cálculo de Disponibilidad mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{UT}{DT + UT}$$

Con lo cual se obtienen los resultados:

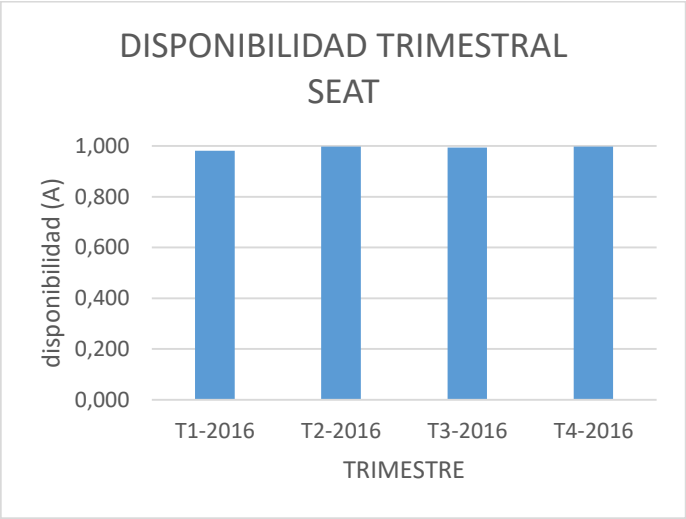
Tabla 37: Disponibilidad de los Subsistemas.

	Trim	DT	UT	A
SEAT	T1-2016	41,75	2142,25	0,9809
	T2-2016	5,5	2178,5	0,9975
	T3-2017	12,75	2195,25	0,9942
	T4-2017	4	2204	0,9982
SER VA	T1-2016	53,75	2130,25	0,9754
	T2-2016	59,5	2124,5	0,9728
	T3-2017	22,5	2185,5	0,9898
	T4-2017	1833,5	374,5	0,1696
SER ES	T1-2016	46	2138	0,9789
	T2-2016	37,5	2146,5	0,9828
	T3-2017	16,75	2191,25	0,9924
	T4-2017	63,75	2144,25	0,9711
SER PO	T1-2016	28,75	2155,25	0,9868
	T2-2016	53,5	2130,5	0,9755
	T3-2017	15,5	2192,5	0,993
	T4-2017	35,5	2172,5	0,9839
Catenarias	T1-2016	247,25	1936,75	0,8868
	T2-2016	264,25	1919,75	0,879
	T3-2017	242	1966	0,8904
	T4-2017	260,5	1947,5	0,882

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad de Subsistemas.

Resultan ser los mismos resultados que mediante MTBF y MTTR, mostrados en las Tablas 32-36, cuya información de UT (TF) y DT (TR) se pueden observar en las tablas 12-16.

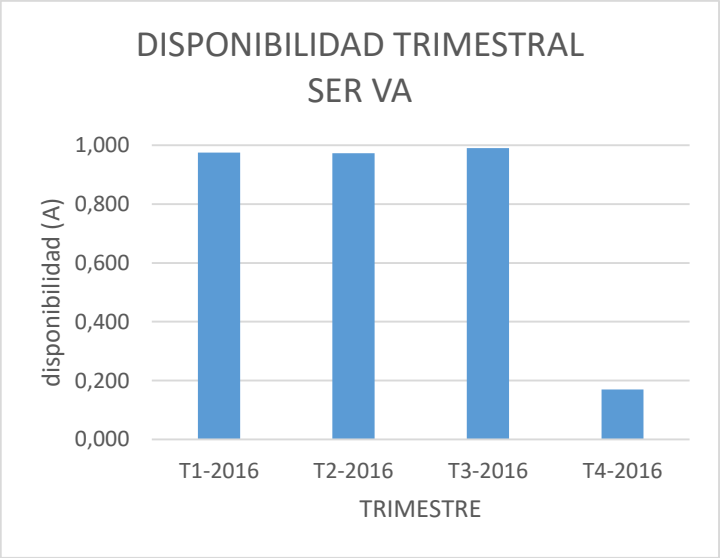
Figura 26: Disponibilidad de SEAT.



Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SEAT.

Se observa que todos los valores de disponibilidad rondan el 98-99% en los 4 trimestres del año 2016.

Figura 27: Disponibilidad de SER VA.

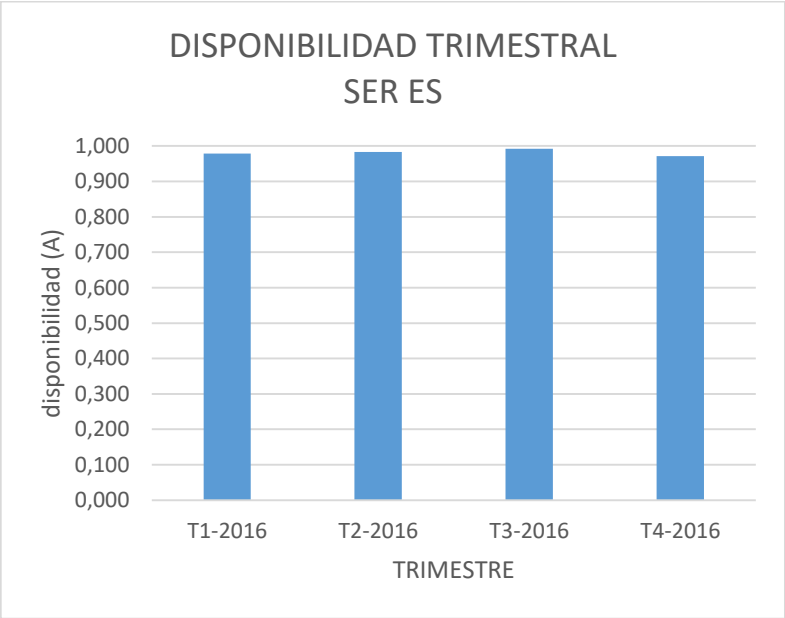


Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER VA.

En los trimestres 1, 2 y 3 del año 2016, los valores de disponibilidad están alrededor del 97-98%. Por otro lado, en el trimestre 4, se observa el menor valor de

disponibilidad, en torno al 17%. Esto se debe a que la SER VA se quemó y no se pudo reparar.

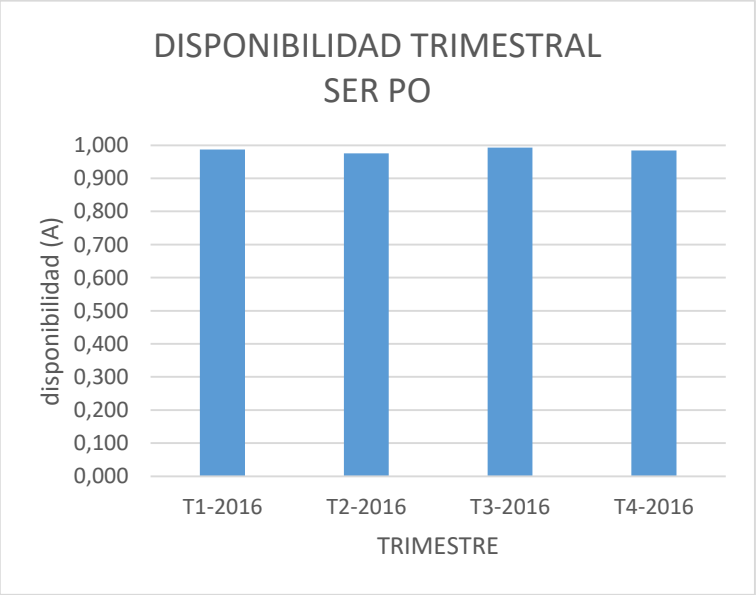
Figura 28: Disponibilidad de SER ES.



Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER ES.

Los valores de disponibilidad en la SER ES están en torno al 98% para todos los trimestres del año 2016.

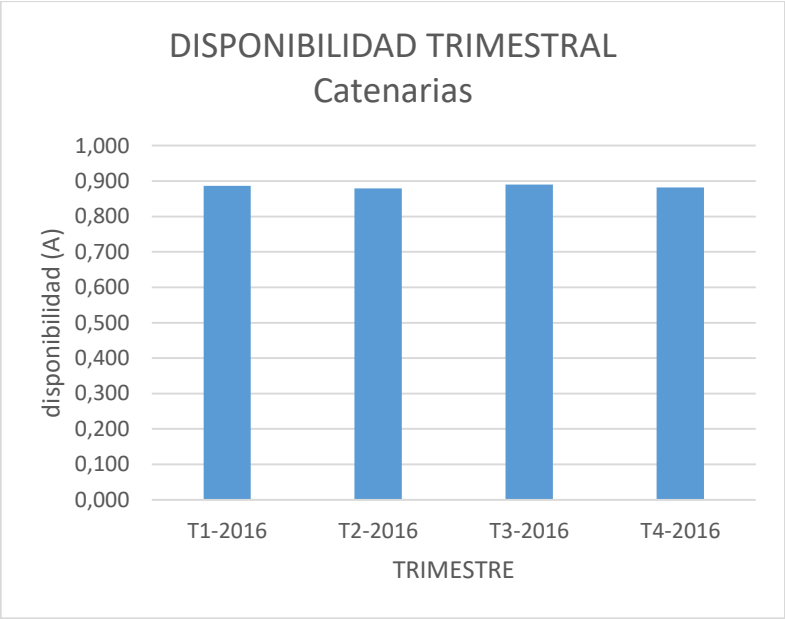
Figura 29: Disponibilidad de SER PO.



Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de SER PO.

En cuanto a su disponibilidad de la SER PO es muy similar a la SER ES, con sus valores cercanos al 98% en todos los trimestres del 2016.

Figura 30: Disponibilidad de Catenarias.



Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad trimestral de Catenarias.

Las catenarias muestran un comportamiento muy parejo en su disponibilidad en todos los trimestres del año 2016, bordeando valores del 88%.

4.8.3 Disponibilidad en el año 2016

Para la determinación de la disponibilidad anual, se hace uso de la información previamente procesada para los cálculos trimestrales (Tablas 12-16), principalmente considerando los tiempos en que el subsistema estuvo detenido reparándose (TR) y las horas que estuvo en funcionamiento (TF), para así determinar la disponibilidad en base a la siguiente ecuación:

$$A = \frac{UT}{DT + UT}$$

Resultando:

Tabla 38: Disponibilidad Anual de Subsistemas.

	DT (TR)	UT (TF)	A
SEAT	64	8720	0,9927
SER VA	1969,25	6814,75	0,7758
SER ES	164	8620	0,9813
SER PO	133,25	8650,75	0,9848
Catenarias	1014	7770	0,8846

Fuente: Elaboración propia en base a Tiempo de Reparaciones y de Funcionamiento.

4.8.4 Resultados

El mayor tiempo de detención está ligado a la SER VA, lo que se traduce en una baja disponibilidad, puesto que falló y la reparación como tal se ha ejecutado sin éxito.

Los subsistemas a nivel de disponibilidad se comportan más menos similar, teniendo similares valores en cada uno de los trimestres evaluados (2016), exceptuándose la SER VA por lo antes expuesto.

Comparando las disponibilidades de los 5 subsistemas, se tiene que:

$$A_{SEAT} = 99{,}27\% > A_{SERPO} = 98{,}48\% > A_{SERES} = 98{,}13\% > A_{cat} = 88{,}46\% > A_{SERVA} = 77{,}58\%$$

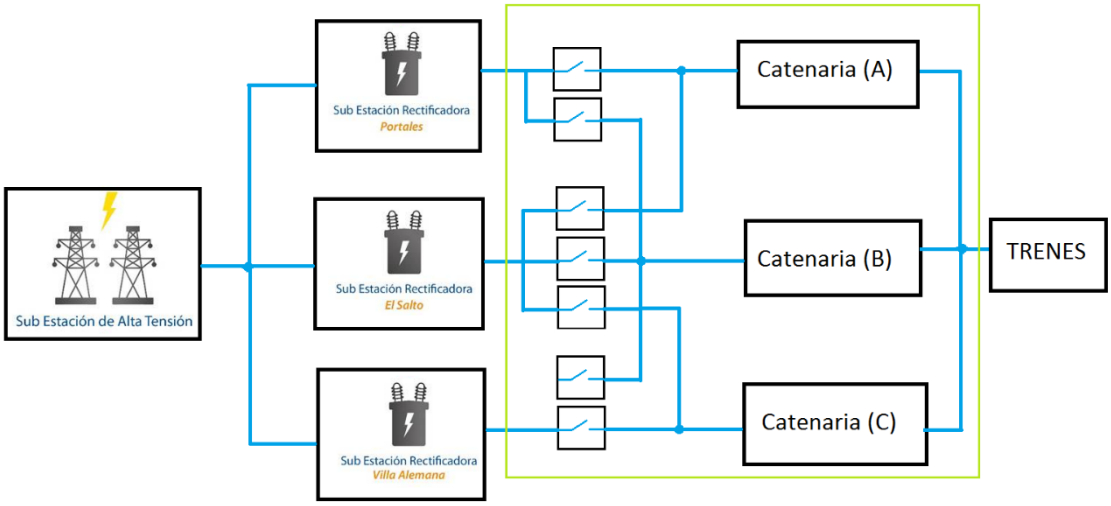
Con lo que se puede decir, que la SER VA requiere de mayor mantención, sin embargo, siendo realistas, esto no se ha podido llevar a cabo. Con lo que le sigue la Catenaria para aplicarle mayores mantenciones preventivas y controles periódicos.

4.9 Elaboración de Diagramas de Bloques.

Físicamente, el sistema funciona como se muestra en la Figura 31, viéndose que la SEAR alimenta a las 3 Subestaciones Rectificadoras, y cada una de estas alimenta un tramo de la catenaria, teniendo la posibilidad, de intercambiarse mediante un sistema de control para alimentar al tramo de la SER contigua físicamente, esto para que en caso de fallo se pueda seguir en funcionamiento el servicio de trenes.

Sin embargo, en el tratamiento de la información del mantenimiento no se discrimina a qué tramo de la catenaria se le ha hecho mantención, además que se considere falla en el sistema, algún tramo de la catenaria debe estar afectado, para que así no se pueda llegar al servicio Limache-Puerto, además de la restricción para proveer la potencia para funcionar a 12 minutos, se requieren al menos 2 subestaciones rectificadoras operativas (redundancia parcial 2:3).

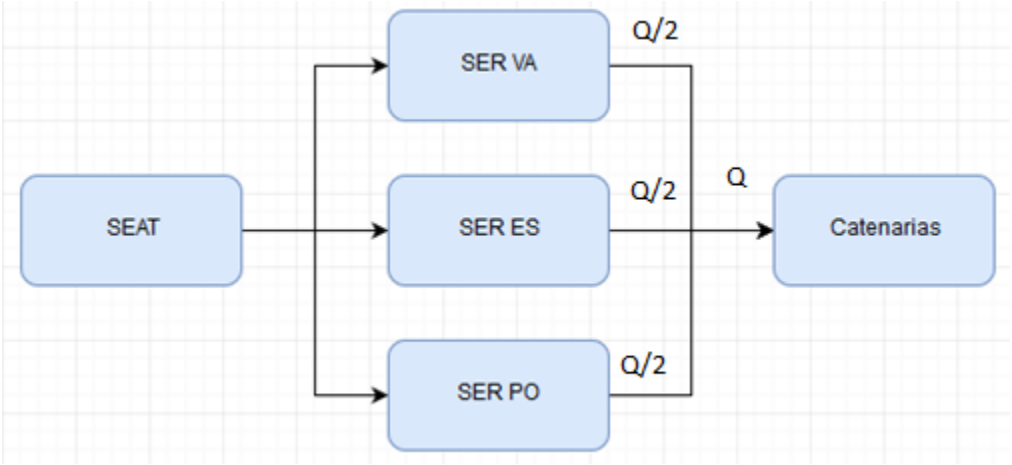
Figura 31: Diagrama Físico del Sistema de Alimentación de Trenes.



Fuente: Elaboración propia en base al proceso.

El sistema de alimentación eléctrica de trenes a nivel de diagrama lógico está representado por la Figura 32, en donde se aprecia que el subsistema SEAT está en serie con el conjunto de subestaciones eléctricas rectificadoras (SER's), las que a su vez están en redundancia parcial 2:3, es decir, que para funcionar se requieren al menos 2 SER's. Las que a su vez en su conjunto están en serie a las Catenarias.

Figura 32: Diagrama Lógico del Sistema de Alimentación de Trenes.



Fuente: Elaboración propia en base a lógica del proceso.

4.10 Cálculo de Disponibilidad del sistema.

Dada la configuración lógico-funcional que posee el sistema, se procede a realizar el cálculo del conjunto de redundancia parcial 2:3 basado en la siguiente ecuación:

$$A_{parcial} = \sum_{j=r}^{n} \binom{n}{j} A^{j} (1 - A)^{n-j}$$

Como las disponibilidades no son idénticas se procede a desarrollar las combinatorias, de la siguiente forma:

$$A_{SER's} = A_{SERVA} \cdot A_{SERES} \cdot A_{SERPO} + A_{SERVA} \cdot A_{SERES} \cdot (1 - A_{SERPO}) + A_{SERVA} \cdot (1 - A_{SERES}) \cdot A_{SERPO} + (1 - A_{SERVA}) \cdot A_{SERES} \cdot A_{SERPO}$$

Donde:

$A_{SER's}$: Disponibilidad del conjunto de subestaciones rectificadoras con redundancia parcial 2:3.

A_{SERVA}: Disponibilidad de SER VA.

A_{SERES}: Disponibilidad de SER ES.

A_{SERPO}: Disponibilidad de SER PO.

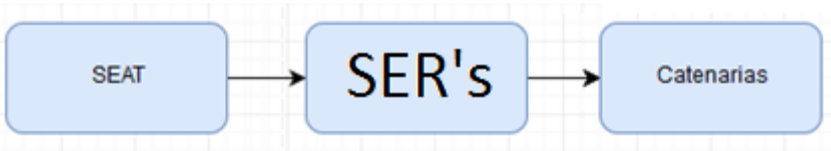
Utilizando los datos de disponibilidades de la Tabla 37, se obtiene:

$$A_{SER's} = 0{,}7758 \cdot 0{,}9813 \cdot 0{,}9848 + 0{,}7758 \cdot 0{,}9813 \cdot (1 - 0{,}9848) + 0{,}7758 \cdot (1 - 0{,}9813) \cdot 0{,}9848 + (1 - 0{,}7758) \cdot 0{,}9813 \cdot 0{,}9848$$

$$A_{SER's} = 0{,}9941$$

Quedando un sistema resumido como en la Figura 33, Cuya disponibilidad de la agrupación de SER's es 99,41%. Recordar que este año la SER VA se quemó, dependiendo prácticamente de la SER ES y SER PO para el funcionamiento desde el siniestro.

Figura 33: Diagrama Lógico Resumido del Sistema.



Fuente: Elaboración propia en base a lógica del proceso.

Luego, una vez determinado esto, sólo queda calcular el sistema como si se tratase de una configuración serie de tres componentes, siguiendo la ecuación:

$$A_{sistema} = \prod_{i} A_i \, ; i = SEAT, SER'S, Catenarias$$

Es decir:

$$A_{sistema} = A_{SEAT} \cdot A_{SER's} \cdot A_{catenarias}$$

Obteniéndose así:

$$A_{sistema} = 0{,}9710 \cdot 0{,}9941 \cdot 0{,}8846 = 0{,}8729$$

Lo que indica que el sistema tiene una disponibilidad de 87,29%, dada la las disponibilidades de los subsistemas, que en resumen queda:

Tabla 39: Disponibilidad del Sistema.

A_{SEAT}	0,9710
$A_{SER's}$	0,9941
$A_{catenarias}$	0,8846
$A_{Sistema}$	**0,8729**

Fuente: Elaboración propia en base a Disponibilidad Anual de Subsistemas.

4.10.1 Resultados

La disponibilidad del sistema resulta ser un 87,29%, debido a que considera un sistema en serie, en que cualquier falla que deba repararse y detener el proceso, lo que traerá grandes consecuencias. A lo que se suma, que dentro de la redundancia parcial hay un subsistema (SER VA) que prácticamente no funciona, pese a esto, el efecto de la catenaria es mayor.

4.11 Análisis económico.

4.11.1 Costos de Mantención y Reparación de los subsistemas

Los costos de mantención y de reparación destinados a los subsistemas. Se solicitaron datos de primera fuente, en donde se obtuvieron los datos de los costos facturados en los sistemas de energía de parte del administrador de contrato de estos Sistemas. Quien vela por el complimiento de mantenciones eléctricas, mecánicas y estructurales de la SEAT, SER VA, SER ES, SER PO y Catenarias. Obteniéndose los datos desde el 2007 al 2016, donde se gastaron alrededor de $4.057.820.000, con un costo promedio de $405.780.000 al año. El detalle de esto se muestra en la siguiente tabla:

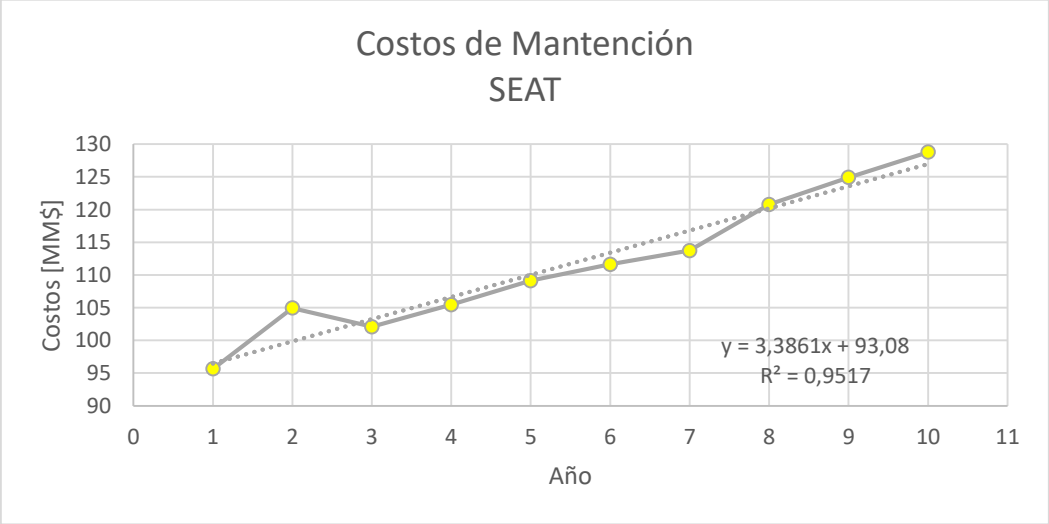
Tabla 40: Disponibilidad del Sistema

Año	SEAT [MM$]	SER VA [MM$]	SER ES [MM$]	SER PO [MM$]	Catenarias [MM$]	Total [MM$]
2007	95,63	60,52	65,22	65,77	60,54	347,68
2008	104,94	66,67	72,23	71,58	66,44	381,86
2009	102,08	64,61	70,16	69,78	64,64	371,28
2010	105,45	65,93	71,36	71,54	66,74	381,03
2011	109,14	68,93	75,20	74,59	68,37	396,21
2012	111,62	70,55	76,06	76,24	70,28	404,75
2013	113,73	72,62	77,66	77,79	72,61	414,42
2014	120,77	75,75	82,98	81,95	76,74	438,19
2015	124,90	79,52	85,56	86,13	79,03	455,14
2016	128,77	81,63	87,91	87,56	81,39	467,25
					TOTAL	**4057,82**

Fuente: Elaboración propia en base a información de gastos anuales de sistemas de energía.

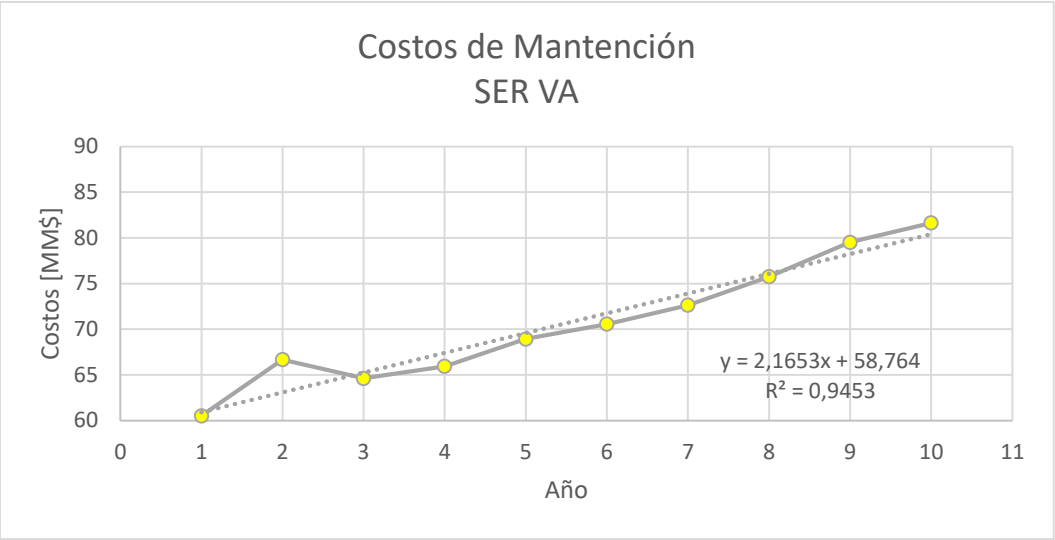
Los costos anuales de todos los subsistemas, según lo que se puede apreciar en los gráficos de las Figuras 34-38, tienden al alza a medida que pasan los años, se sospecha que se debe al efecto inflacionario.

***Figura 34*:** Costos de Mantención Anuales de SEAT.



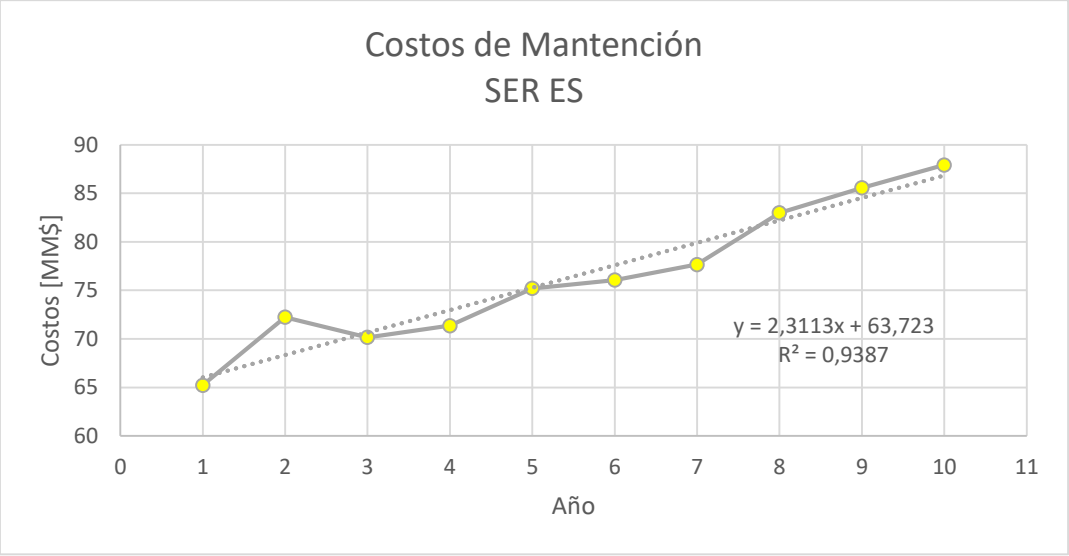
Fuente: Elaboración propia en base a costos de mantención de SEAT.

Figura 35: Costos de Mantención Anuales de SER VA.



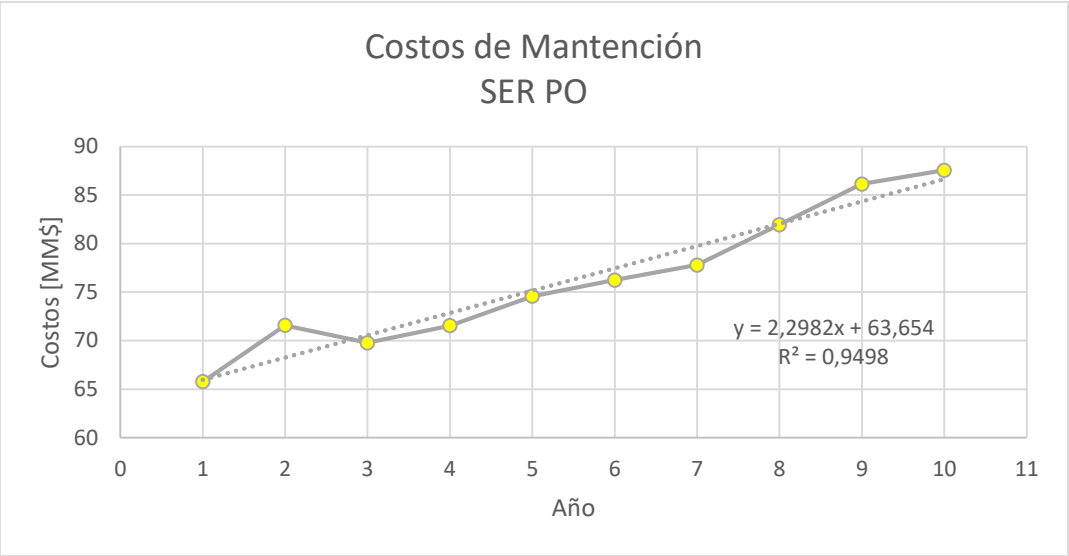
Fuente: Elaboración propia en base a costos de mantención de SER VA.

Figura 36: Costos de Mantención Anuales de SER ES.



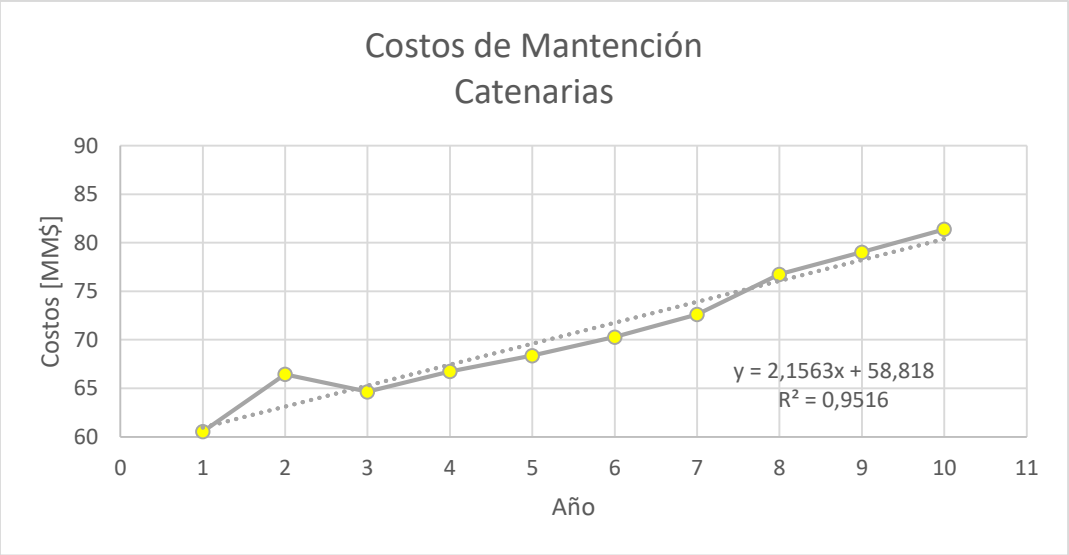
Fuente: Elaboración propia en base a costos de mantención de SER ES.

Figura 37: Costos de Mantención Anuales de SER PO.



Fuente: Elaboración propia en base a costos de mantención de SER PO.

Figura 38: Costos de Mantención Anuales de Catenarias.



Fuente: Elaboración propia en base a costos de mantención de Catenarias.

4.11.2 Costos de Inversión de los Subsistemas

Los costos de los subsistemas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 41: Costos de Inversión de Subsistemas.

Subsistema	Inversión [$]
SEAT	492.720.000
SER VA	322.000.000
SER ES	310.240.000
SER PO	296.750.000
Catenarias	281.320.000
Total	**1.703.030.000**

Fuente: Elaboración propia en base a costos de Inversión de los Subsistemas.

4.11.3 Cálculo de Costos de Ineficiencia

La indisponibilidad de los Subsistemas estudiados, tienen como consecuencia la generación de costos de ineficiencia, dado que dejan de operar en condiciones normales. Los costos variables ascienden a $2.000.000.000 al año y una facturación de aproximadamente $13.000.000.000.

La inversión en la implementación de la SEAT, SER VA, SER ES, SER PO y Catenarias fue de $1.703.030.000.

El costo de ineficiencia para estos subsistemas, con una disponibilidad del 53,19%, si el sistema operara 24/7 sería de $1.389.100.000 (cosa que está en evaluación). Sin embargo, su operación es menor a eso, y muchas de las mantenciones se realizan en horario no comercial. Así que se estima que el promedio de funcionamiento comercial es de 70% del día, lo que nos lleva a una estimación de Costos de ineficiencia del orden de los $978.670.000 al año.

4.12 Propuestas de mejoras.

A modo de mejoras, se expondrán variadas ideas y propuestas que buscan ser una guía para el administrador de contratos de los sistemas de Energía o a los futuros encargados del plan de mantenimiento de los sistemas de alimentación eléctrica de trenes.

4.12.1 El Plan de Mantenimiento

Se ha identificado que el plan de mantenimiento anual actual es idéntico al utilizado cuando inició Metro Valparaíso, lo que da un indicio que tengan oportunidades de mejorar.

Se visualiza que está centrado en las actividades en vez de los equipos y/o elementos, con lo que se recomienda que se regularice esto para poder llevar mejor seguimiento. Además, se sugiere asociar una carta Gantt a estas actividades, con fechas estimadas de intervención.

Claramente el plan de mantenimiento anual no debe de ser del todo estático, teniendo en cuenta una posterior adaptación al mantenimiento en base a fiabilidad RCM.

El plan de mantenimiento debe ser conocido por todo el personal involucrado, para así motivarlos y fomentar la polivalencia, un ejemplo, el caso de un operador que efectúe mantenimiento menor o incluso el primer diagnóstico de los equipos, pensando en un operador de subestación o ampliándose al proceso, los mismos maquinistas con inspección de vía, catenarias y presencia de tensión.

4.12.2 Mantenimiento Preventivo y Correctivo

Se utilizar planillas y/o *check list* para cada intervención que se realice según corresponda, reconociendo las tareas a aplicar e identificación de información relevante para la generación de base de datos y permitan ser un apoyo al plan de mantenimiento anual.

4.12.3 Mantenimiento Predictivo

Registrar fallas ayuda a conocer el detalle de las mismas, ya sea desde detalles como termografía, análisis de aceites, etc. Los cuales permitirían anteponerse a que los elementos fallen en base a indicios o comportamientos con cierta tendencia.

4.12.4 Calidad del Mantenimiento

La calidad es una herramienta fundamental, se recomienda realizar una evaluación técnica de los procesos de la empresa utilizando las técnicas basadas en la norma ISO 9001, siendo una buena práctica y facilitadora de los trabajos realizados, disminuyendo la posibilidad de fallas. Dicha norma, en palabras simples, indica que se debe documentar todo, documentando el qué, cómo y con qué se va hacer y documentar lo que hizo, siendo consecuente con lo previamente señalado.

4.12.5 Datos de información de mantenimiento

Seleccionar un grupo de indicadores de disponibilidad, como MTBF, el MTTR, indicadores relacionados con las órdenes de trabajo (OIT) como la relación preventiva/correctivo o indicadores relacionados con materiales y compras. Los mantenimientos se llevan a cabo, sin embargo, el registro ha sido deficiente, es recomendable documentar y llevar informes que recojan los resultados del mantenimiento de los elementos de los subsistemas, para así también poder hacerles seguimiento. Sumándole a esto, la identificación mediante un TAG a dichos elementos como en el caso de las SER's serían los rectificadores, transformadores, seccionadores, etc. Además, se debería hacer hincapié a indicar la criticidad de cada elemento (Alta, Media, Baja), en base a los históricos de comportamiento que vayan surgiendo, dadas la frecuencia y consecuencia de una falla.

4.12.6 Software de Mantenimiento

Actualmente no existe un software de mantenimiento propiamente tal, sin embargo, existe una plataforma que lleva el registro de las órdenes de trabajo y averías (Siria). Además hoy en día, los mantenimientos de los sistemas de energía, solo disponen de informes digitales archivados en los que se indican las intervenciones mensuales que se han hecho. Pero es aconsejable acceder a un software de mantenimiento adecuado o aprovechar el mismo software, añadiendo un módulo que contenga la información de las mantenciones preventivas y correctivas. Para poder disponer de información ordenada,

en donde no es necesario invertir mucho tiempo, y donde se pueda extraer informaciones para generar estadísticas e indicadores.

4.12.7 Insumos y Repuestos

Actualmente Siemens es el encargado de realizar las mantenciones de los sistemas de alimentación de trenes, y de la gestión de repuestos. Se recomienda contar con un stock de repuestos para los elementos, principalmente los más críticos. Exigir un porcentaje de disponibilidad de repuestos que ellos que los posean. Dado que ha sucedido que no disponen de los repuestos para solucionar los problemas, lo que incurre en alargamiento de los periodos en que los subsistemas están en falla.

Se pueden utilizar los datos levantados por el mantenimiento, analizando los elementos más utilizados, y que tengan gran criticidad, para generar proyecciones de demanda de estos en el tiempo, y a la vez generar un stock de seguridad.

Para ello es conveniente contar o elaborar una lista de repuestos e insumos que debe permanecer en stock, implementar un sistema de entradas/salidas, a modo de bodega, la que debe tener un inventario periódico, eliminando repuestos obsoletos. El orden y limpieza del taller es esencial, como así también, el hecho de implementar un plan de mantenimiento de las herramientas (taladros, atornilladores, martillos, prensas, etc), para así asegurar su buen desempeño y evitar accidentes.

4.12.8 Equipos en espera o redundancia

Si bien existen equipos como grupos electrógenos en las SER's, estos equipos a lo más tienen la capacidad de mover un tren hasta la estación más cercana. Así que es posible pensar que la adición de otra subestación rectificadora o generadores de mayor potencia para poder llevar el servicio a la normalidad en caso de falla. No siendo tan necesario el respaldo de la SEAT, dado que cada SER podría funcionar de forma independiente sin la necesidad de que la energía provenga de la SEAT.

La SER VA actualmente está en reparaciones, una vez que esté operativa, esta debería tener disponibilidad cercana a las de las otras 2 subestaciones rectificadoras.

Ésta, actualmente está siendo suplida por una SER portátil que se construyó recientemente dada la contingencia, la que en hipótesis podría ser movida a otros puntos para reemplazar alguna SER que quede inactiva por periodos prolongados, sirviendo como un equipo de redundancia y/o respaldo.

En cuanto a las Catenarias, tal cual como se analizó, estas poseen una disponibilidad relativamente baja (87,29%), impactando negativamente y fuertemente en la disponibilidad del sistema. Con lo cual, si se pudiese generar redundancia a esta, contando con una similar disponibilidad. Este conjunto de Catenarias en paralelo tendría aproximadamente una disponibilidad de 98,97%. Lo que se traduciría en pasar de 87,29% a 97,37% de disponibilidad del sistema, es decir, un aumento del 10,08% por el hecho de redundar la catenaria. Siendo buena medida para la mejora del sistema, además que implicaría que bajara el costo de ineficiencia a $289.300.000 en régimen 24/7, en el caso del funcionamiento actual sería de $202.510.000. Cuyo monto fácilmente alcanza para

financiar esta medida en pocos años, pese a que esos valores están dados al 2005, y aplicando una tasa de inflación de en torno al 3%, utilizando la siguiente ecuación:

$$I_b = (1+i)^{b-a} \cdot C_a$$

$$I_{2017} = (1+i)^{2017-2005} \cdot C_{2005}$$

$$I_{2017} = \$401.095.053$$

Con lo que se puede corroborar que la inversión es financieramente conveniente, dado que el costo de ineficiencia puede financiar en aproximadamente 2 años la inversión de redundancia de catenarias.

4.12.9 Seguridad

Todo trabajo se autoriza por el Puesto de Control de Despacho (PCD), siempre y cuando el personal en terreno disponga de sus charlas de seguridad vigente.

Normalmente se realizan charlas genéricas con vigencia anual por parte de Metro Valparaíso a los internos y contratistas. No se han tenido grandes problemas en seguridad y prevención, sin embargo, se recomienda, dar énfasis a se realicen charlas de 5 minutos al comienzo de cada jornada, para que los mismos trabajadores repasen y generen observaciones en cuanto a las tareas a ejecutar, los potenciales peligros a los que están expuestos y las conductas que son consideradas un riesgo, junto a esto, insistir en el correcto uso de los elementos de protección personal (EPP). Específicamente en el área de Energía, incitar el uso de bloqueos, verificación de presencia de tensión y sistemas de puestas a tierra de los equipos a intervenir.

5. CONCLUSIONES

Esta memoria ha sido desarrollada en Metro Regional de Valparaíso, específicamente en las áreas de Sistemas de Energía, donde se ha planteado como objetivo, el desarrollo de un estudio técnico del mantenimiento de los sistemas de alimentación eléctrica de trenes, determinando indicadores de confiabilidad y disponibilidad para los distintos subsistemas, para así, poder realizar un diagnóstico del plan de mantenimiento preventivo ejecutado, calculando y analizando los indicadores, para finalmente determinar posibles mejoras que implican beneficios desde la perspectiva de la mantención y la economía que se puede alcanzar en un corto o mediano plazo.

Las metodologías basadas en confiabilidad, son una buena herramienta de análisis para sistemas que involucran mantenimiento, permitiendo procesar datos y entender los sistemas bajo sus distintas configuraciones, y a la vez, obtener indicadores que dan cuenta de cuan confiable y con qué disponibilidades se cuentan. Pudiendo tomar decisiones en base a términos cuantitativos.

Se observa también que las mantenciones que implican detención de los subsistemas por periodos extensos o repetidas veces, resultan con bajos indicadores de confiabilidad y disponibilidad, llevando a la paralización del servicio, que genera un gran impacto en costos monetarios ya que se dejan de percibir clientes, por ende, los ingresos generados por los viajes. Además, que puede generar una mala imagen a la sociedad que repercute en la migración de los usuarios por servicios alternativos.

Desde el punto de la recolección de material e información recolectada para este estudio, es que se hace clave destacar que la información de las mantenciones de los subsistemas (o mejor aún, elementos) deben estar ordenadas, ser claras y precisas, tanto

en papel como en digital, ya que permiten poder tomar decisiones con mayor seguridad, es este caso se evidenciaba que la información no se era fácil de obtener, dado que hubo que ir dato a dato, y la información incompleta e incluso hasta redundante, además de desordenada, lo que repercute en que las tomas de decisiones basada en esta información sea tediosa, siendo que se requieren decisiones rápidas. Es necesario la utilización de un respaldo escrito, sea tangible o no, de las intervenciones de los mantenimientos preventivos y correctivos, con información relevante, como son tiempo, causas de las fallas, materiales utilizados, etc.

Es interesante analizar, dado que las catenarias muestran la menor disponibilidad, el efecto de los elementos o tramos de ésta por separado, si bien las mantenciones se hacen a lo largo del tramo casi en simultáneo, la información está muy agregada y puede tener diferencias, e incluso serviría para analizar funcionamientos parciales de la operación. Para aquello es necesario comenzar a levantar la información recordando el desglose deseado.

Metro Valparaíso ya cuenta con la externalización del servicio de mantención, dicha empresa responde a las eventualidades y proveyendo de repuestos para los sistemas de energía, sin embargo, si bien son especialistas, requieren de un mayor control o proyección en cuanto a la gestión de repuesto, además facilitación de mejores informes de mantención al mandante.

Dentro de las principales propuestas de mejoras, un módulo de mantención en el Software Siria sería elemental, puesto que es una herramienta sumamente útil, puesto que permite agilizar el proceso de estudio, ya que como se mencionó, se deben tener repuestas rápidas para dar soluciones definitivas a los problemas que se presenten, sin tener que entrar a un análisis de alta complejidad. Que además cualquier persona pueda entender de una manera sencilla.

Por otro lado, existe un gran potencial de mejora al realizar redundancia total a las catenarias. Consiguiendo un aumento sustancial de la disponibilidad del sistema (alrededor de un 10%), a lo que se suman los ahorros potenciales que se tienen por concepto de Costos de Ineficiencia, puesto que se está siendo más eficiente. Esos mismos ahorros pueden autofinanciar la medida, ya que según el estudio realizado, basta con aproximadamente 2 años para que se recupere la totalidad de la inversión.

6. REFERENCIAS

Arata, A., Arata, A., Kristjanpoller, F., & Stegmaier, R. (2009). *Ingeniería y Gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales: Aplicación de Plataforma R-MES*. Santiago, Chile.

Arata, A., Atzori, B., Cattaneo, M., Cuomo, E., De Marzo, B., Furlanetto, L., … Stegmaier, R. (2005). *Manual de Gestión de Activos y Mantenimiento*. Santiago, Chile.

Arriagada, A. (1994). *Evaluacion de confiabilidad en sistemas electricos de distribucion*. (Memoria de Magister inédita). Universidad Católica de Chile,Santiago, Chile.

Empresa de Ferrocarriles del Estado. (2016).

Espinoza, F. (2008). *Aspectos Financieros del Mantenimiento*. Universidad de Talca, Talca, Chile.

Gonzalez, N., & Ochoa, A. (2005). *Operación y Mantenimiento de una subestación de rectificación en el sistema de transporte eléctrico (Trolebús)*. Instituto Politécnico Nacional, México DF.

Hernández, E., & Navarrete, E. (2001). Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento . *Revista Científica CUJAE / Ing. Mecánica*, *4*, 15–20.

Hill, R. (1994a). Electric railway traction. Part 1: Electric traction and DC traction motor drives. *Power Engineering Journal*, *8*(1), 47–56. https://doi.org/10.1049/pe:19940105

Hill, R. (1994b). Electric railway traction. Part 3: Traction power supplies. *Power*

Engineering Journal, *8*(6), 275–286. https://doi.org/10.1049/pe:19940604

Investigación en Transporte en Chile: Áreas de investigación y capacidades. (2009). Retrieved from http://www.conicyt.cl/wp-content/uploads/2012/10/articles-40714_pdf.pdf

Jiang, Y., & Ekström, Å. (1997). General analysis of harmonic transfer through converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *12*(2), 287–293. https://doi.org/10.1109/63.558741

Kristjanpoller, F., Crespo, A., Barbera, L., & Viveros, P. (2017). Biomethanation plant assessment based on reliability impact on operational effectiveness, *101*, 301–310. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.065

Lee, H., Kim, G., Oh, S., Jang, G., & Kwon, S. H. (2006). Fault analysis of Korean AC electric railway system. *Electric Power Systems Research*, *76*(5), 317–326. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.08.001

León, C., & Martínez, B. (2007). *Estudio de la optimización del diseño de subestaciones para la alimentación de sistemas de tracción eléctrica*. (Memoria de Licenciatura inédita). Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña, España.

Mago, G., & Vall, L. (2014). Determinación de la confiabilidad o tiempo promedio entre fallas (TPEF) en transformadores de distribución . Determination of reliability and mean time between failures (TPEF) distribution transformer .

Melo, R., Lara, C., & Jacobo, F. (2009). 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. *Ciencia Ed. (IMIQ)*, *24*(2), 93–104.

Memoria Anual de Metro Valparaíso. (2015). Retrieved from https://www.metro-valparaiso.cl/wp-content/uploads/2016/04/Memoria_MV_2015.pdf

Metro Valparaíso. (2007).

Mora, A. (2009). *Mantenimiento: Planeación, Ejecución Y Control*. *Alfaomega* (1st ed., Vol. 1). México DF. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Otero, S., Andalaft, A., & Vásquez, E. (2008). El Método De Diferencias Finitas En Evaluación De Opciones Reales. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *16*(1), 6–9. https://doi.org/10.4067/S0718-33052008000100013

Oura, Y., Mochinaga, Y., & Nagasawa, H. (1998). Railway Electric Power Feeding Systems. *Railway Technology*, *8*(10), 48–58.

Singh, B., Gairola, S., Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2008). Multipulse AC&DC Converters for Improving Power Quality: A Review. *Ieee Transactions on Power Electronics*, *23*(1), 260–281. https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911880

Stegmaier, R. (2007). *Ley de Weibull*.

Stegmaier, R., & Arata, A. (2014). Teoría de la Confiabilidad de componentes y sistemas.

Sullivan, W., Wicks, E., & Luxhoj, J. (2004). *Ingenieria económica de DeGarmo* (12th ed.). Pearson Prentice Hall. Mexico.

Torres, C. (2016). *Desarrollo de metodología para la implementación de índices de mantenimiento CMD para sistemas ferroviarios*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Viveros, P., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un

modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista Chilena de Ingeniería*, *21*(1), 125–138. https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011

Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., & Barbera, L. (2012). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *21*(1), 125–138. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011