



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**APLICACIÓN ESTÁNDAR SOMA A INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA
DEL NIVEL DE TRANSPORTE PRINCIPAL DE LA MINA SUBTERRÁNEA
DE DIVISIÓN EL TENIENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL ELÉCTRICA

LAURA ZÚÑIGA PALMA

PROFESOR GUÍA:
Augusto Lucero Alday

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Paulina Ramírez Del Barrio
Nelson Morales Osorio

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL ELÉCTRICA
POR: LAURA ZÚÑIGA PALMA
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: AUGUSTO LUCERO ALDAY

**APLICACIÓN ESTÁNDAR SOMA A INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA
DEL NIVEL DE TRANSPORTE PRINCIPAL DE LA MINA
SUBTERRÁNEA DE DIVISIÓN EL TENIENTE**

En el presente trabajo de memoria de título se analizan los procesos de mantenimiento de los activos que conforman la infraestructura eléctrica del ferrocarril de extracción de rocas de la mina El Teniente de Codelco. La corporación cuenta con un sistema operativo de mantenimiento interno (SOMA), el cual se debe aplicar a todos los activos de todas las divisiones de la empresa. Dicho sistema cuenta con ocho fases de estudio, sin embargo, en el presente trabajo se aplican tres fases, las cuales son las que están directamente relacionadas con el tipo y cantidad de mantenciones que requiere cada activo.

Para mi Yaya, donde sea que esté.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia. A mis papás Patricia y Enrique, gracias por siempre apoyarme y darme la oportunidad de vivir mi primera carrera sin la cual no estaría hoy donde estoy, el tenis. A mi hermana y mejor amiga, Montserrat, gracias por creer en mi incluso cuando ni yo lo hacía. Y a mi Bali, que llena todos los días de alegría.

A las amigas que conocí durante esta etapa: Giovanna, Consuelo, Maite, Francisca, Anastasia y Geraldine. Gracias por darle el color bonito a los días grises en la universidad, sin ustedes este camino hubiese sido mucho más difícil. Son maravillosas.

A la selección de tenis UChile y Oswaldo. Gracias por abrirme las puertas a ser parte del equipo, dejarme seguir haciendo lo que realmente me apasiona durante mi etapa universitaria y regalarme los triunfos más inolvidables del último tiempo.

Finalmente, a todas las personas que conocí durante mi tiempo en Codelco, en especial a José, Daniza, Jorge, Juan y a mi tutor Claudio Flores. Gracias por estar siempre dispuestos a ayudarme e integrarme en un mundo totalmente nuevo para mi.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Identificación y formulación del problema	1
1.3. Objetivo general	1
1.4. Objetivos específicos	2
1.5. Estructura informe	2
2. Marco teórico y estado del arte	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. Infraestructura eléctrica Teniente 8	3
2.1.1.1. Subestaciones Rectificadoras	3
2.1.1.2. Trolley	3
2.1.1.3. Red de 600[V]	3
2.1.1.4. Subestaciones Unitarias	3
2.1.1.5. Sentinas	4
2.1.2. Sistema Operativo de Mantenimiento	4
2.1.2.1. Fase A. Mantenibilidad y Confiabilidad en Proyectos de In- versión (NCC N°30)	4
2.1.2.2. Fase B. Estudio de criticidad y metas de desempeño	5
2.1.2.3. Fase C. Plan estratégico y plan matriz	9
2.1.2.4. Fase D. Ciclo de mantenimiento	10
2.1.2.5. Fase E. Decisiones de fin de vida útil.	10
2.1.2.6. Fase F. Sinergias con áreas relacionadas	12
2.1.2.7. Fase G. Sistemas de gestión, estructura organizacional y com- petencias	12
2.1.2.8. Fase H. Análisis de desempeño	13
2.1.3. Sistema de Gestión C+.	13
2.1.3.1. Lean Management	14
2.1.4. SAP	14
2.1.5. Diagrama de Pareto	15
2.2. Estado del arte	16
3. Metodología	18
4. Resultados y Análisis	20
4.1. Fase B	20
4.1.1. Árboles de ubicaciones técnicas	20
4.1.2. Criticidad de los sistemas y subsistemas	23

4.1.2.1.	Subestaciones rectificadoras	23
4.1.2.2.	Trolley - Superficie	24
4.1.2.3.	Trolley - Túnel	24
4.1.2.4.	Trolley - Cruzados de produccion	25
4.1.2.5.	Trolley - Retornos	26
4.1.2.6.	Red 600V de alimentación controladores	26
4.1.2.7.	Subestaciones unitarias	26
4.1.2.8.	Sentinas	27
4.1.3.	Metas de desempeño	27
4.1.3.1.	Subestaciones rectificadoras	27
4.1.3.2.	Trolley - Superficie	28
4.1.3.3.	Trolley - Túnel	29
4.1.3.4.	Trolley - Cruzados de producción	30
4.1.3.5.	Red 600V OC	32
4.1.3.6.	Subestaciones unitarias	32
4.1.3.7.	Sentinas	33
4.2.	Fase C	33
4.3.	Fase E	35
4.3.1.	Subestaciones rectificadoras	35
4.3.2.	Trolley - Superficie	40
4.3.3.	Trolley - Túnel y Cruzados de Producción	41
4.3.4.	Red 600 V	42
4.3.5.	Subestaciones Unitarias	42
4.3.6.	Sentinas	44
5.	Conclusiones	45
5.1.	Cumplimiento de los objetivos del proyecto	45
5.2.	Justificación del proyecto	45
5.3.	Recomendaciones	45
	Bibliografía	47
	Anexos	48
A.	. . . . .	48
B.	. . . . .	55
C.	. . . . .	59
D.	. . . . .	64
E.	. . . . .	65
F.	. . . . .	68

Índice de Tablas

4.1.	Disponibilidades de las subestaciones rectificadoras.	28
4.2.	Disponibilidades tramos de trolley en superficie.	28
4.3.	Disponibilidades del trolley en el túnel.	29
4.4.	Disponibilidades de los tramos del trolley en los cruzados de producción. Parte 1.	30
4.5.	Disponibilidades de los tramos del trolley en los cruzados de producción. Parte 2.	31
4.6.	Disponibilidad de los controladores de objetos.	32
4.7.	Disponibilidad de las subestaciones unitarias.	32
4.8.	Disponibilidad de las sentinas.	33
4.9.	Resultados SS/EE T8A.	36
4.10.	Resultados SS/EE T8B.	36
4.11.	Resultados SS/EE T8C.	37
4.12.	Resultados SS/EE T8D.	38
4.13.	Resultados SS/EE T8E.	38
4.14.	Resultados SS/EE T8H.	39
4.15.	Resultados SS/EE T8I.	39
4.16.	Resultados SS/EE T8J.	40
4.17.	Resultados Trolley Superficie.	41
4.18.	Resultados Trolley Túnel y Cruzados de Producción.	42
4.19.	Resultados Subestación Unitaria 1.	43
4.20.	Resultados Subestación Unitaria 9.	44

Índice de Ilustraciones

2.1.	Fases del SOMA. Fuente (Codelco, 2022).	4
2.2.	Estándar de evaluación de dimensiones. Fuente (Codelco, 2022).	6
2.3.	Indicador de consecuencia en base a la suma de valores de las distintas dimensiones evaluadas. Fuente (Codelco, 2022).	6
2.4.	Indicador de frecuencia en base a la frecuencia de falla del equipo. Fuente (Codelco, 2022).	7
2.5.	Tabla de criticidad por la consecuencia de una falla y su frecuencia de ocurrencia. Fuente (Codelco, 2022).	7
2.6.	Metas de desempeño establecidas para equipos críticos. Fuente (Codelco, 2022).	8
2.7.	Estándar de análisis de estrategia. Fuente (Codelco, 2022).	10
2.8.	Estructura organizacional propuesta. Fuente (Codelco, 2022).	12
2.9.	Fases del SOMA. Fuente (Codelco, 2022).	13
2.10.	Diagrama de Pareto del tiempo de inactividad no planificado de una pala eléctrica. Fuente (Knights, 2004).	15
3.1.	Metodología de trabajo.	19
4.1.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8A.	21
4.2.	Árbol de ubicaciones técnicas del trolley.	22
4.3.	Diagrama de Pareto de la subestación T8D.	34
4.4.	Diagrama de Pareto del trolley.	34
4.5.	CAUE Subestación Rectificadora T8A.	35
4.6.	CAUE Subestación Rectificadora T8B.	36
4.7.	CAUE Subestación Rectificadora T8C.	37
4.8.	CAUE Subestación Rectificadora T8D.	38
4.9.	CAUE Subestación Rectificadora T8E.	38
4.10.	CAUE Subestación Rectificadora T8H.	39
4.11.	CAUE Subestación Rectificadora T8I.	39
4.12.	CAUE Subestación Rectificadora T8J.	40
4.13.	CAUE Trolley Superficie.	41
4.14.	CAUE Trolley Túnel y Cruzados de Producción.	42
4.15.	CAUE Subestación Unitaria 1.	43
4.16.	CAUE Subestación Unitaria 9.	43
A.1.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8B.	49
A.2.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8C.	50
A.3.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8D.	51
A.4.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8E.	52
A.5.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8H.	53
A.6.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8I.	54
A.7.	Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8J.	55

B.1.	Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T8A, T8B y T8C.	56
B.2.	Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T9D, T8E y T8H-1.	57
B.3.	Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T8H-2, T8I y T8J.	58
C.1.	Fase B aplicada a la superficie del trolley.	60
C.2.	Fase B aplicada al túnel del trolley.	61
C.3.	Fase B aplicada a los cruzados de producción del trolley.	62
C.4.	Fase B aplicada a los retornos del trolley.	63
D.1.	Fase B aplicada a red de 600V que alimenta a los controladores de objetos. . .	64
E.1.	Fase B aplicada a las subestaciones unitarias. (Parte 1)	66
E.2.	Fase B aplicada a las subestaciones unitarias. (Parte 2)	67
F.1.	Fase B aplicada a los retornos del trolley.	68

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Chile es uno de los principales productores de cobre a nivel mundial, contando con la mina subterránea más grande del mundo perteneciente al estado por medio de la Corporación Nacional del Cobre. Codelco es una empresa conformada por siete centros de trabajo a lo largo de todo el país, siendo la División El Teniente (DET) la de mayor producción, con un total de 351.874 toneladas de cobre fino durante el año 2023. Dado esto, es de gran importancia que el proceso productivo no se detenga, y para lograr dicho objetivo la corporación creó un estándar de mantención llamado SOMA (Sistema Operativo de Mantenimiento). Dicho estándar se debe aplicar a todos los procesos productivos de la empresa de manera de optimizar la mantención y minimizar los tiempos de detención de los procesos. El proceso productivo a abarcar en el presente trabajo corresponde a la infraestructura eléctrica que permite el acarreo del mineral mediante el ferrocarril Teniente 8 en la DET. Se destaca que mediante dicho ferrocarril es que se extrae el 100 % del mineral de la división y por lo tanto, la detención por fallas se traduce en grandes pérdidas económicas para la corporación y el estado.

1.2. Identificación y formulación del problema

El ferrocarril Teniente 8 corresponde al transporte principal de la mina y, como se mencionó anteriormente, es la única vía de extracción de mineral, por lo tanto, se debe asegurar su constante funcionamiento de manera que no se detenga la producción en la DET. Para evitar la detención del ferrocarril, se deben realizar mantenciones constantes, de manera de evitar las posibles fallas.

Para esto Codelco cuenta con un estándar interno de mantenimiento, el cual se aplica en todos los procesos productivos de todas las divisiones. Dicho estándar corresponde al Sistema Operativo de Mantenimiento (SOMA) (Codelco, 2022).

1.3. Objetivo general

El objetivo general del trabajo realizado corresponde a la aplicación de las fases B, C y E del estándar SOMA a la infraestructura eléctrica del nivel de transporte principal de la mina subterránea de División El Teniente.

1.4. Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general, se cuenta con los siguientes objetivos específicos:

- Crear árbol de ubicaciones técnicas de los subsistemas de las subestaciones rectificadoras y el trolley.
- Realizar análisis de criticidad en los componentes de la infraestructura eléctrica del ferrocarril.
- Analizar metas de desempeño.
- Analizar estrategias de mantenimiento.
- Analizar decisiones de fin de vida útil.

1.5. Estructura informe

En la sección *Marco teórico y estado del arte* se presenta una descripción de los conceptos teóricos relacionados con el estándar SOMA que son aplicados en el trabajo. Por otro lado, se realiza una revisión del estado del arte de técnicas de mantenimiento en sistemas de tracción eléctrica.

Luego, en la sección *Metodología*, se describen los procesos y estrategias a utilizar para llevar a cabo los objetivos del trabajo. También se muestra un diagrama mediante el cual se espera un mejor entendimiento de los puntos a seguir.

Finalmente, en el capítulo *Resultados y Análisis* se muestran los resultados obtenidos, el análisis de estos y la contribución que significa el presente trabajo para la corporación.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1. Marco teórico

En esta sección se introducen las técnicas de ingeniería y conceptos ocupados en este proyecto, con la finalidad de entender el desarrollo y contexto.

2.1.1. Infraestructura eléctrica Teniente 8

La infraestructura eléctrica del nivel de transporte principal de la mina subterránea El Teniente está conformada por ocho subestaciones rectificadoras, el trolley, la red de 600[V] que alimenta el sistema de control, las subestaciones unitarias y los variadores de frecuencia de las sentinas.

2.1.1.1. Subestaciones Rectificadoras

Una subestación rectificadora corresponde a una subestación eléctrica en la cual se convierte un señal de corriente alterna en corriente continua, con la finalidad de poder alimentar un sistema de corriente continua mediante una red de corriente alterna.

2.1.1.2. Trolley

El trolley corresponde al circuito de tracción del ferrocarril, conformado por la catenaria y los retornos (rieles). Este se divide en 3 sectores: la superficie, el túnel y los cruzados de producción.

2.1.1.3. Red de 600[V]

Es la red que alimenta los controladores de objetos (OC por sus siglas en inglés, *Object Controller*), los cuales son cruciales para el funcionamiento del ferrocarril ya que son los encargados de controlar el movimiento de las máquinas de cambio y los medidores de voltaje de trolley.

2.1.1.4. Subestaciones Unitarias

Son subestaciones eléctricas encargadas de bajar el voltaje para alimentar el circuito de enchufes en el cual se conectan distintas máquinas y aparatos para realizar mantenciones y trabajos dentro del trolley.

2.1.1.5. Sentinas

Una sentina corresponde a una bomba de agua, que tiene como finalidad extraer el agua en distintos sectores del trolley.

2.1.2. Sistema Operativo de Mantenimiento

Corresponde a un sistema interno de Codelco definido como un conjunto de estándares y procesos soportados en el Sistema de Gestión C+, que apoya a mantenedores y mantenedoras a lograr la mejora de indicadores de proceso para, consecuentemente, aumentar el coeficiente de marcha y reducir costos. Esto a partir de una optimización en la gestión de activos que tiene siempre presente como valor, lograr una accidentabilidad cero y apalancar sustentabilidad del medioambiente en cada acción ejecutada. Dicho sistema se divide en 8 fases, presentes en la figura 2.1, las cuales se detallan a continuación.



Figura 2.1: Fases del SOMA. Fuente (Codelco, 2022).

2.1.2.1. Fase A. Mantenibilidad y Confiabilidad en Proyectos de Inversión (NCC N°30)

En esta primera fase del estándar SOMA, se tiene como objetivo asegurar la correcta y oportuna aplicación de la norma NCC30. Para esto se establecen mecanismos globales que contribuyan a asegurar que los proyectos de Codelco incorporen adecuadamente los análisis de mantenibilidad, confiabilidad, ciclo de vida y apoyo logístico en cada una de las etapas de desarrollo.

NCC30 es una norma interna de la corporación que tiene como objetivo aplicar análisis de Mantenibilidad y Confiabilidad en los proyectos de inversión, con la finalidad de asegurar que en las fases de pre-inversión e inversión se establezcan los parámetros necesarios para que los activos cumplan su función durante todo su ciclo de vida, a través del mantenimiento.

2.1.2.2. Fase B. Estudio de criticidad y metas de desempeño

Esta fase tiene como objetivo establecer la criticidad y las metas de desempeño de los equipos de la Corporación para posteriormente definir una estrategia de mantenimiento. Para lograr el objetivo se cuenta con cuatro grandes pasos:

- Levantamiento de datos.
- Definición de nivel de criticidad de equipos.
- Definición de nivel de criticidad de repuestos.
- Establecimiento de metas de desempeño.

La definición de nivel de criticidad se lleva a cabo mediante una metodología de evaluación de criticidad de equipos, la cual cuenta con tres pasos básicos:

- Identificar dimensiones: entender cuáles son los parámetros a considerar al evaluar las consecuencias o impactos de las fallas en seguridad, medioambiente, producción y costos de mantenimiento.
- Evaluar dimensiones: calificar cada dimensión según un peso específico relativo, definido según estándar.
- Cuantificar impacto total: la consecuencia de la falla será la sumatoria de los puntajes obtenidos por dimensión.

En la figura 2.2, se muestra el estándar mediante el cual se califica cada una de las dimensiones a tomar en cuenta para el análisis de criticidad. Dichas dimensiones corresponden a:

- Seguridad (P1).
- Medioambiente (P2).
- Producción (P3).
- Costos de mantenimiento (P4).

El puntaje final de evaluación se obtiene según la fórmula 2.1.

$$\text{Puntaje de evaluación} = P1 + P2 + P3 + P4 \quad (2.1)$$

	P1 Seguridad ¹	P2 Medioambiente	P3 Producción	P4 Costos de mantenimiento
Definición	Consecuencias potenciales que podría tener una falla para la seguridad de las personas hasta las comunidades vecinas.	Consecuencias sobre el medioambiente – en las instalaciones de Codelco o en áreas próximas – para el aire, el agua y/o la tierra.	Pérdidas o paradas de producción que pueden ocurrir como consecuencias potenciales de una falla.	Costos de mantenimiento en los cuales se incurre para restituir la función afectada por la ocurrencia de la falla.
Evaluación de impacto	40 pts. | Riesgo de accidente con fatalidades múltiples.	40 pts. | Riesgo de daño medioambiental severo y de largo plazo.	12 pts. | Pérdida de producción mayor a un día.	10 pts. | Costos muy altos (ej.: sobre los US\$ 500.000)
	38 pts. | Riesgo de accidente con una fatalidad.	32 pts. | Riesgo de daño de largo plazo.	8 pts. | Pérdida de producción entre 12 horas y un día.	8 pts. | Costos altos (ej.: entre US\$ 100.000 y US\$ 500.000)
	30 pts. | Riesgo de accidente con discapacidad permanente.	28 pts. | Riesgo de daño de corto plazo.	4 pts. | Pérdida de producción de entre dos y 12 horas.	5 pts. | Costos medios (ej.: entre US\$ 50.000 y US\$ 100.000)
	12 pts. | Riesgo de accidente con tiempo perdido.	10 pts. | Riesgo de daño medioambiental menor.	2 pts. | Pérdida de producción de hasta dos horas.	2 pts. | Costos bajos (ej.: entre US\$ 10.000 y US\$ 50.000)
	0 pts. | Sin riesgo para las personas.	0 pts. | Sin daño al medioambiente.	0 pts. | Sin pérdida de producción.	1 pt. | Costos muy bajos (ej.: US\$ 10.000)

Puntaje de evaluación: P1 + P2 + P3 + P4

Figura 2.2: Estándar de evaluación de dimensiones. Fuente (Codelco, 2022).

Una vez realizada la calificación por dimensión y habiendo obtenido el puntaje de evaluación, se procede a identificar el indicador de consecuencia. Para esto, se utiliza la figura 2.3, en la cual se puede ver que se otorga un indicador según el valor obtenido para el puntaje de evaluación.

Puntaje de evaluación de consecuencias	Indicador de consecuencias
Consecuencia total sobre 38	6
Consecuencia total mayor o igual a 28 y menor a 38 o consecuencia en producción igual a 12	5
Consecuencia mayor o igual a 20 y menor a 28	4
Consecuencia mayor o igual a 10 y menor a 20	3
Consecuencia total mayor o igual a 4 y menor a 10	2
Consecuencia total inferior a 4	1

Figura 2.3: Indicador de consecuencia en base a la suma de valores de las distintas dimensiones evaluadas. Fuente (Codelco, 2022).

Por otro lado, se tiene la figura 2.4, la cual otorga un indicador de frecuencia según la frecuencia de ocurrencia de falla del equipo.

Frecuencia de ocurrencia de falla	Indicador de frecuencia
Ocurren fallas diariamente	6
Ocurren fallas una vez por semana	5
Ocurren fallas una vez al mes	4
Ocurren fallas una vez cada seis meses	3
Ocurren fallas una vez al año	2
Ocurren fallas una vez cada 10 años	1

Figura 2.4: Indicador de frecuencia en base a la frecuencia de falla del equipo.
Fuente (Codelco, 2022).

Finalmente, el índice de criticidad queda definido según la figura 2.5, como el producto entre el indicador de consecuencia y el indicador de frecuencia. Con valores entre 1 y 4 se tiene una criticidad baja del equipo, entre 5 y 10 la criticidad es media y, entre 12 y 36, la criticidad es alta.



Figura 2.5: Tabla de criticidad por la consecuencia de una falla y su frecuencia de ocurrencia. Fuente (Codelco, 2022).

Es importante mencionar que la corporación declara algunos **equipos esenciales**, los

cuales de por sí son de criticidad alta debido a sus características de salud y seguridad. Estos se definen en cinco familias:

- Captadores y supresores de polvo.
- Sistemas contra incendios.
- Puentes grúa.
- Ascensores y elevadores de carga y personas.
- Equipos de respaldo en sistemas eléctricos.

Luego, si el resultado de la evaluación de un equipo resulta ser de criticidad alta, entonces se procede a hacer el cálculo de las metas de desempeño, las cuales se pueden ver en la figura 2.6.

METAS DE DESEMPEÑO - EQUIPOS CRITICIDAD ALTA	
Disponibilidad (%)	› Porcentaje de horas nominales en que el activo se encuentra en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operados.
Disponibilidad aspiracional (%)	› Disponibilidad desafiante pero alcanzable, este valor es menor o igual que el límite técnico y mayor al Plan Anual (PO) establecida para proceso, flota o línea productiva.
TMEF/MTBF (hr)	› Tiempo medio entre fallas.
TMPR/MTTR (hr)	› Tiempo medio para reparar.
Límite teórico	› Rendimiento de diseño de un equipo productivo multiplicado por el tiempo nominal (normalmente 24 horas). No considera actividades propias de la operación.
Límite técnico	› Es la máxima producción que puede entregar un equipo de forma sostenible según sus condiciones operacionales. Para alcanzarlo se requiere una ejecución según diseño, de todas las actividades de planificación, operación y mantenimiento.
OEE	› Razón porcentual que mide la eficiencia productiva de un equipo o sistema. Busca medir en un único indicador la disponibilidad, la utilización y el rendimiento.

Figura 2.6: Metas de desempeño establecidas para equipos críticos. Fuente (Codelco, 2022).

Finalmente, a todos los equipos definidos con criticidad alta se les debe aplicar el *Estándar corporativo de criticidad de repuestos* para definir así los repuestos críticos. Mediante dicho estándar se busca analizar el impacto y la probabilidad del escenario de falla del repuesto sin tener existencias en reserva. Se deben considerar las acciones mitigadoras del evento como enviar a reparar, realizar reparaciones temporales y obtener repuesto de otro equipo.

Por otro lado, se solicita indicar la cantidad requerida con el objeto de disponer una estimación de monto de inventario a mantener. La cantidad definitiva final se acordará con el área de abastecimiento de acuerdo a la estrategia de suministro que disponga. El listado final de repuestos críticos deberá ser validado por el Superintendente respectivo y deberá ser enviado vía nota interna por el Gerente de mantenimiento.

2.1.2.3. Fase C. Plan estratégico y plan matriz

El objetivo de la Fase C consiste en establecer la estrategia óptima de mantenimiento para cada equipo de acuerdo a su criticidad, y plasmarla en la plataforma SAP. Para cumplir con dicho objetivo, el desarrollo de la Fase C está compuesta por cuatro grandes pasos:

1. Selección de estrategia de mantenimiento a utilizar según criticidad del activo.
2. Diseño y propuesta de plan de mantenimiento.
3. Creación, modificación o eliminación de *Datos Maestros* en SAP.
4. Plan de mantenimiento cargado en SAP.

Como resultado de esta fase, se obtienen los siguientes entregables:

- Planes de mantenimiento a ser implementados mediante el Ciclo de mantenimiento, fase D.
- La estrategia de mantenimiento como base para generar el presupuesto.
- Planificación de largo plazo trienal y quincenal.

Finalmente se debe elegir la estrategia de mantenimiento según la criticidad del activo, los métodos propuestos son:

- RCM: Mantenimiento basado en confiabilidad.
- RCM Agilizado: conocido también como análisis de criticidad, efectos y modos de falla (FMECA).
- PMO: Optimización de mantenimiento preventivo.
- Experiencia del personal de Mantenimiento y Operaciones.
- Análisis del historial del equipo.
- Recomendación del fabricante OEM.

En la figura 2.7 se puede ver un diagrama en donde se explicita el tipo de mantenimiento a escoger dependiendo de la criticidad del activo. Según el estándar SOMA, todos los activos de criticidad alta deben tener planes matrices de carácter preventivo y predictivo.

El mantenimiento preventivo corresponde a una estrategia que interviene el equipo periódicamente para inspeccionar y reemplazar componentes, incluso cuando el equipo está funcionando correctamente. Por otro lado, el mantenimiento predictivo corresponde a una estrategia en la cual se busca anticiparse a la ocurrencia de una falla, esto se logra mediante un seguimiento de un síntoma o falla potencial y/o modelos de predicción estadísticos de analítica avanzada. Finalmente, el mantenimiento reactivo corresponde a una estrategia en la cual se permite la ocurrencia de una falla, sin ningún intento de evitarla o anticiparla.

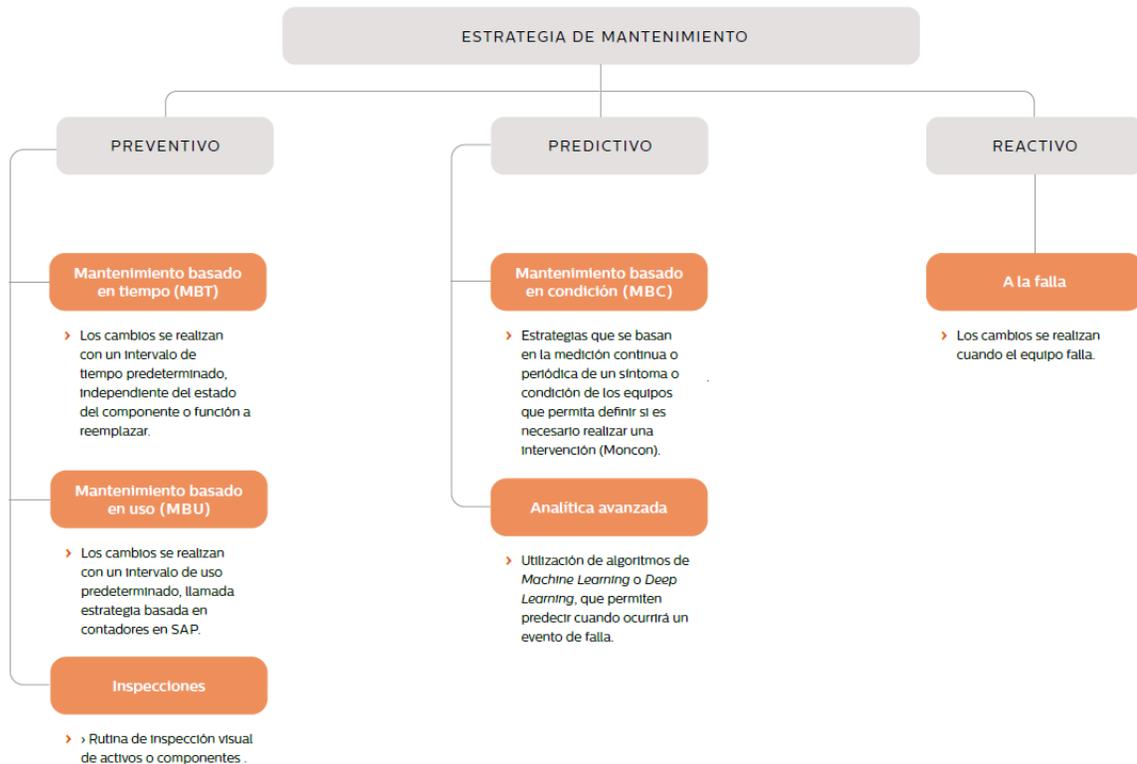


Figura 2.7: Estándar de análisis de estrategia. Fuente (Codelco, 2022).

2.1.2.4. Fase D. Ciclo de mantenimiento

El objetivo de esta fase consiste en describir las etapas obligatorias que permitan llevar a cabo un ciclo de mantenimiento con calidad, seguridad y eficiencia; monitorear resultados y fomentar la mejora continua.

El principal entregable corresponde a los resultados de la gestión del mantenimiento: estabilización del proceso, mayor adherencia a planes y detección de oportunidades de mejora.

2.1.2.5. Fase E. Decisiones de fin de vida útil.

El objetivo de esta fase es poner alertas en el momento óptimo del ciclo de vida de un activo, con tal que minimice el costo, a través de una metodología que defina su fin de vida útil, es importante destacar que esta fase solo se aplica a los activos que resultaron con criticidad alta de la Fase B. El proceso a llevar a cabo consta de tres grandes partes:

1. Preguntarse si el equipo/activo crítico se encuentra o no al término de su vida útil¹, sufre algún tipo de obsolescencia² o alguna falla catastrófica.
2. Si la respuesta es positiva se debe aplicar el estándar corporativo de Reemplazo y Fin de Vida Útil, a través del cálculo de parámetros operacionales y generación de caso de

¹ El término de vida útil corresponde a un periodo igual o menor a tres años o su equivalente en horas productivas

² La obsolescencia puede producirse por: requerimientos de autonomía, fuentes de energía verde, productividad, entre otros.

negocio.

- Finalmente, en función de la rentabilidad, se debe comunicar la alerta de manera oportuna a través de una nota interna a la gerencia que lidere la adquisición de equipos o se posterga la inversión transfiriendo las nuevas metas de desempeño y planes de mantención en las fases B y C respectivamente.

Una vez que el equipo de criticidad alta cumple con los parámetros descritos anteriormente, se aplica un método para calcular la rentabilidad del equipo. Dicho método consiste en calcular el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) de la ecuación (2.2).

$$CAUE = CRF_n \left(I - VR_n F_n + \left(VR_n - \left(I - \sum_{i=1}^n D_i \right) \right) F_n t + \sum_{i=1}^n (C_i - (C_i + D_i) t) F_i \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- **n** Periodos de operación del equipo (años, horómetro, etc.).
- **I** Inversión por adquisición del equipo.
- **VR_n** Valor de reventa del equipo a los **n** periodos de uso.
- **D_i** Depreciación del equipo en el periodo **i**.
- **F_n** Factor de actualización al periodo **n**.
- **r** Tasa de descuento.
- **t** Tasa de impuesto.
- **C_i** Costo de operación y mantención del equipo en el periodo **i**.
- **CRF_n** Factor cuota anual **r**.

Las ecuaciones (2.3) y (2.4) corresponden al factor de actualización al periodo n, y el factor cuota anual r respectivamente.

$$F_n = \frac{1}{(1+r)^n} \quad (2.3)$$

$$CRF_n = \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (2.4)$$

Luego, seleccionando el año en el cual el equipo posee el menor CAUE, se deben calcular dos valores de VAN. Uno corresponde al *VAN Retador* y otro al *VAN Postergar*, la ecuación de cada uno de ellos se puede ver a continuación:

$$VAN(Postergar) = (C_{q+1} - VR_{q+1})F_1 \quad (2.5)$$

$$VAN(Retador) = CAUE^{**}F_1 - VR_q \quad (2.6)$$

Donde:

- q Periodos de operación del equipo al evaluar su reemplazo.
- C_{q+1} Costo de operación y mantenimiento del equipo en uso, para el próximo periodo de operación.
- VR_{q+1} Valor de reventa del equipo en operación, en el próximo periodo.
- F_1 Factor de actualización para un periodo.
- $CAUE^{**}$ Costo Anual Uniforme Equivalente mínimo del mejor Retador.
- VR_q Valor de reventa del equipo en operación.
- r Tasa de descuento.

El factor de actualización para un periodo corresponde a:

$$F_1 = \frac{1}{(1 + r)} \quad (2.7)$$

Finalmente, si el $VAN(Retador)$ es menor que $VAN(Postergar)$, se debe alertar el requerimiento de la inversión, es decir, realizar el reemplazo del equipo. En caso contrario, la decisión es postergar la inversión, concluyendo el estudio.

2.1.2.6. Fase F. Sinergias con áreas relacionadas

El objetivo de esta fase es identificar las áreas que están relacionadas con el mantenimiento en las diferentes fases del SOMA, con la finalidad de buscar una mejora continua, eficiencia y eficacia del ciclo de gestión de activos. Se definen tres áreas claves que deben interactuar con el mantenimiento: operaciones, abastecimiento y seguridad.

2.1.2.7. Fase G. Sistemas de gestión, estructura organizacional y competencias

El objetivo de este capítulo consiste en definir estándares y mejores prácticas de gestión, estructuras y competencias que permitan cumplir de forma óptima con el ciclo de mantenimiento. No se cuenta con un proceso definido ya que la utilización de estándares y mejores prácticas se lleva a cabo en forma permanente en las distintas etapas del ciclo de mantenimiento. La estructura organizacional del mantenimiento en cualquier área, se puede observar en la figura 2.8.



Figura 2.8: Estructura organizacional propuesta. Fuente (Codelco, 2022).

La confiabilidad busca maximizar el ciclo de vida del activo, asegurando la capacidad para cumplir con las funciones para las que fue diseñado. Por otro lado, la planificación tiene como

objetivo generar y habilitar planes de mantenimiento basados en las estrategias seleccionadas, de esta manera se mantiene el equipo en un nivel que responde al desempeño para el cual fue diseñado. Finalmente, la ejecución tiene la finalidad de llevar a cabo de forma eficaz las actividades del programa de mantenimiento creado por la planificación, al igual que gestionar correctamente las actividades no planificadas que pueden surgir en el camino.

2.1.2.8. Fase H. Análisis de desempeño

Esta última fase del estándar SOMA tiene como objetivo la resolución de los problemas que impiden alcanzar las metas productivas. Se describen herramientas y procesos que generan el análisis de desempeño de los equipos para reducir las desviaciones productivas que se presentan durante la vida útil del activo.

2.1.3. Sistema de Gestión C+.

Corresponde a un conjunto integrado de principios, disciplinas y prácticas relacionadas entre sí de forma ordenada, que establece la manera en cómo se desea administrar el negocio. Basado en la metodología *Lean Management*, busca alcanzar la excelencia operacional a través del trabajo en equipo, el empoderamiento y el desarrollo de las personas, junto con la participación y el involucramiento de la primera línea y el apoyo de la gerencia a esta (Álvares, 2022).

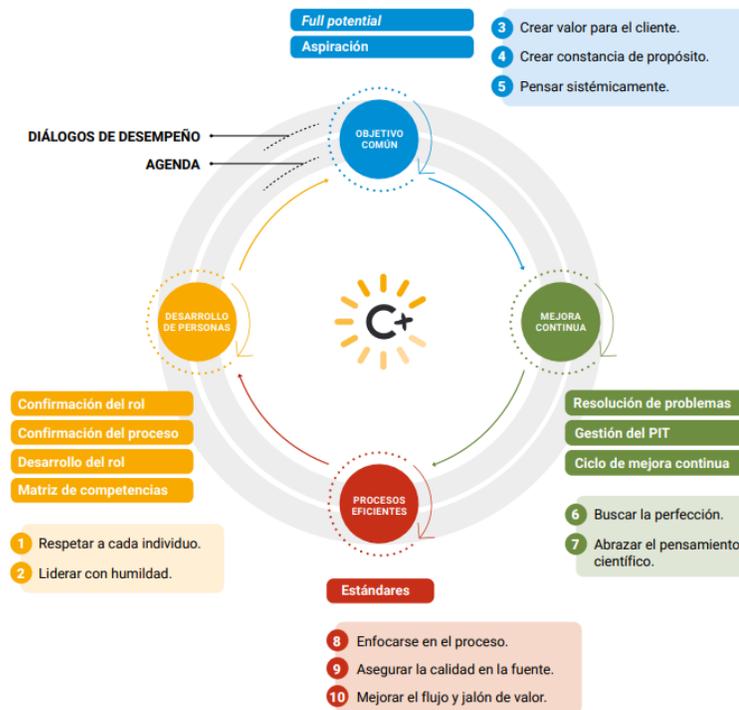


Figura 2.9: Fases del SOMA. Fuente (Codelco, 2022).

- Objetivo Común: disciplina C+ que busca lograr que todas las personas trabajen hacia un mismo objetivo común y que puedan comprender cómo cada uno de ellos contribuye a la aspiración, mediante su rol e indicadores relevantes de su ámbito de gestión.

- Mejora Continua: disciplina C+ que busca mejorar continuamente el desempeño mediante la resolución de problemas, con un enfoque en identificar las causas raíz de los problemas, de forma que estos no se vuelvan a repetir.
- Procesos Eficientes: disciplina C+ que busca asegurar la calidad, eficiencia y uniformidad de los procesos mediante la estandarización de tareas críticas.
- Desarrollo de Personas: disciplina C+ que busca mejorar las competencias de las personas, de forma de que habiliten su liderazgo y contribuyan en su máximo potencial.

2.1.3.1. Lean Management

Corresponde a una metodología de gestión que se basa en cinco principios identificados y claves, los cuales fueron singularizados por Taiichi Ohno, un ejecutivo de Toyota. Los principios son (Brieva, 2018):

1. Valor: la mira se debe enfocar en los procesos que agregan valor al cliente para lo cual se debe saber quién es el cliente, de donde proviene, reconocer sus exigencias, necesidades, expectativas y requerimientos de modo que los procesos incorporen los mismos.
2. Cadena de valor: busca observar los procesos que conforman el sistema productivo desde la perspectiva del cliente. Por un lado, se toma la postura de cliente del proceso anterior y la vez, proveedores del proceso siguiente (como eslabones de una cadena). La finalidad de este principio es minimizar la intervención del eslabón o eliminar los eslabones que no agregan valor.
3. Flujo de valor: el afán de lograr continuidad en los procesos se alimenta de la idea de reducir o eliminar, en la medida de lo posible, la manufactura de bienes por lotes, de manera de alcanzar un movimiento continuo en el proceso productivo sin detenciones. Es decir la finalidad de este principio es eliminar los desperdicios en los procesos.
4. *Pull* a las actividades: una vez logrado o alcanzado el flujo continuo de los procesos productivos en toda la cadena, se tiene el denominado sistema de producción *Pull*. Este es una forma de producción que obedece a la demanda presentada por el cliente cuyo objetivo es dar una respuesta rápida a la misma, buscando evitar la sobreproducción y la acumulación de stock o inventario.
5. Mejora continua: la metodología de gestión *LEAN Management* se encuentra orientada hacia la perfección entendida no como la producción libre de defectos, sino que una forma de gestión que tiende a la entrega *justo-a-tiempo* de productos que cumplan las expectativas de los clientes, a un precio bajo o competitivo, y una calidad determinada. En resumen, este principio tiende a la reducción o eliminación de desperdicios.

2.1.4. SAP

SAP es un programa de gestión empresarial fundado en 1972 por antiguos empleados de IBM, actualmente es el software de gestión empresarial más utilizado en todo el mundo. Funciona mediante módulos que integran todos los departamentos de una empresa, permitiendo compartir datos en tiempo real entre ellos gracias a una misma base de datos, facilitando la coordinación entre departamentos.

En resumen, SAP permite a las empresas trabajar de manera coordinada, eficiente y productiva al reducir errores y ahorrar tiempo gracias a la integración de todos los procesos en una misma plataforma. (Naya, 2009).

2.1.5. Diagrama de Pareto

El Diagrama de Pareto es una herramienta útil para enfocar los esfuerzos hacia la búsqueda de la causa o causas que ocasionan un problema, entre un gran número de posibilidades, con la finalidad de identificar cuáles de ellas son las verdaderamente importantes (las pocas causas vitales) y cuáles no son relevantes (las muchas causas triviales). El inicio del diagrama de Pareto viene del razonamiento ejercido por el economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923) quien realizó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en el cual descubrió que la minoría de la población poseía la mayor parte de la riqueza y la mayoría de la población poseía la menor parte de la riqueza, lo que hoy se conoce como la regla 80/20 (Valdivia, 2018).

Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, se puede decir que el 20 % de las causas resuelven el 80 % del problema, mientras que el 80 % de las causas solo resuelven el 20 % del problema. Por lo tanto, el Análisis de Pareto es una comparación cuantitativa de elementos según su contribución a un determinado efecto. Esta comparación se realiza para diferenciar los elementos en dos categorías: los que son muy importantes en la contribución del problema y los que son poco importantes. Por esto, el Diagrama de Pareto es muy utilizado para determinar cuales son las fallas del equipo o activo que más influyen respecto a su costo o tiempo de indisponibilidad. En la figura 2.10 se tiene un ejemplo del diagrama, en este se pueden ver las causas de detención no planificada de una pala eléctrica. Se observa que aquellas con código de falla 1, 2, 11, 3, 10, 7, 12, 8 y 5 abarcan el 80 % del tiempo de detención.

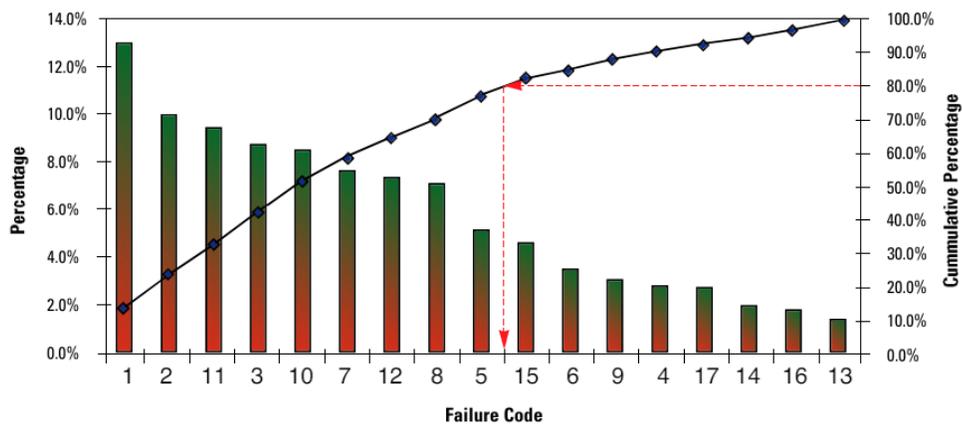


Figura 2.10: Diagrama de Pareto del tiempo de inactividad no planificado de una pala eléctrica. Fuente (Knights, 2004).

En el presente trabajo de memoria, se aplicó el Diagrama de Pareto en algunos activos críticos que resultaron interesantes para hacer un estudio más acabado y evaluar mejoras en las pautas de mantenimiento (fase C).

2.2. Estado del arte

En primer lugar, en el documento "*Mantenimiento Sistema Eléctrico Línea 4-4A-5EXT del Metro de Santiago*" (Metro, 2016) se hace una definición de los sistemas y de los equipos instalados, para luego presentar las especificaciones técnicas para la mantención. El objetivo es describir los tipos de intervenciones, períodos, requerimientos y condiciones de trabajo mínimos exigidos por Metro S.A. A diferencia del presente trabajo, no se hace mención a las fallas y como disminuir los tiempos de mantención correctiva.

Por otro lado, en la tesis titulada "*Propuesta de un sistema de control de gestión empresa ferrocarril de Antofagasta*" (Fredes, 2022), se propone un sistema de control de gestión que mitigue los problemas de alineamiento que ocurren al interior de la organización. Dichos problemas de alineamiento impactan directamente en el cumplimiento de los objetivos del negocio, las partes involucradas corresponden a la gerencia comercial, la gerencia de operaciones y la gerencia de mantenimiento. El problema de la gerencia comercial se produce debido a que no cumple con lo acordado en los contratos con los clientes, trasladando menos volúmenes de carga. El transporte de la carga es responsabilidad de la gerencia de operaciones, el cual puede fallar por motivos de conducción, fallas en los equipos y restricciones en las vías férreas. Finalmente, la gerencia de mantención es la encargada de entregar los activos para el transporte de carga en buenas condiciones, situación que no se cumple como lo esperado y repercute directamente en las otras dos gerencias. Si bien se hace mención a las fallas, no se trata el tema de disminución de los tiempos de mantención, ni de sus mejoras. Mas bien se hace referencia a una coordinación entre las distintas partes de la empresa para una mejor gestión de los activos.

Otro documento estudiado corresponde al informe de actividades profesionales para obtener el trabajo de título "*Mantenimiento de equipos de tracción eléctrica de aplicación ferroviaria*" (Ilmadrel, 2019). En este se realiza un trabajo en los trenes del metro de la Ciudad de México que tiene como objetivo garantizar la correcta ejecución de las mantenciones preventivas, maximizando el tiempo de explotación de los trenes y minimizando el tiempo y número de paros. *Alstom* es la empresa encargada de prestar los servicios de los trenes del metro de la Ciudad de México pertenecientes al Sistema de Transporte Colectivo (STC). *Alstom* se organiza de acuerdo a regiones y funciones o áreas de competencia de la siguiente manera:

- TIS (*Transport Information Solutions*, principalmente encargado de soluciones llave en mano).
- TLS (*Train Life Services*, encargado de servicios a lo largo de la vida de los trenes).
- System & infra (Sistemas e infraestructura encargado de instalaciones fijas como vías y señalización).

Sin embargo, el trabajo se desarrolla solo en el área TLS, debido a que se enfoca en la mantención de los activos que no son nuevos, y específicamente, los sistemas de puertas, generación de aire, tracción y frenado eléctrico. Se diferencia con el presente trabajo ya que se hace un estudio de pocos sistemas del ferrocarril y además, dentro de estos, solo se ven aquellos que son antiguos.

Finalmente, en el trabajo de titulación "*Propuesta de un GMAO para la gestión del mantenimiento de un sistema ferroviario*" (Berrezueta & Sigüencia, 2016), se propone una Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) para los nuevos sistemas de transporte masivo que se están desarrollando en Ecuador. La GMAO es una herramienta computacional encargada de la gestión de actividades de mantenimiento que consiste en una base de datos con información sobre la empresa, activos, trabajadores, almacén de repuestos y operaciones que se llevan a cabo en el departamento de mantenimiento. Es importante destacar que esta herramienta no realiza el mantenimiento, sino que lo facilita mediante una mejora en la gestión. La diferencia entre el documento recién definido con el presente trabajo radica en que en el primero se propone una gestión del mantenimiento, mientras que en el presente, ya se cuenta con una gestión del mantenimiento, la cual es aplicada mediante el SOMA.

Capítulo 3

Metodología

La metodología de trabajo se divide en tres grandes bloques para su mejor entendimiento, como se puede ver en la figura 3.1.

En primer lugar se estudia el estándar SOMA, luego se organiza cada sistema a evaluar mediante subsistemas, formando de esta forma los árboles de las ubicaciones técnicas.

A continuación, cada uno de los componentes es evaluado según la Fase B del libro SOMA (figuras 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5) definido en la sección *Marco teórico*. Si resulta que el activo estudiado es crítico, este avanza a la evaluación de las metas de desempeño según la figura 2.6, mientras que si no es crítico, avanza a la fase C. Una vez obtenidas las metas de desempeño de los activos críticos, estos avanzan a la fase C y a la fase E del estándar.

La fase C cuenta con cuatro etapas. En la primera se crea una estrategia de mantenimiento de los activos dependiendo de su nivel de criticidad y el resultado de las metas de desempeño. Según la estrategia de mantenimiento, se avanza a la etapa de diseño y propuesta de mantenimiento. Finalmente, para terminar con la fase C, los datos que se obtienen son ingresados a la plataforma SAP.

El paso a seguir después de la fase C, corresponde a la aplicación de la fase D pero esta no se ejerció durante este trabajo.

Por otro lado, se tiene la fase E, en la cual, como se mencionó anteriormente, solo participan los activos con criticidad alta. Se parte por la pregunta "*¿activo se encuentra cercano al fin de su vida útil, posee una falla catastrófica u obsolescencia?*" si la respuesta es "No" entonces estos son traspasados a la fase H. Por otro lado, si la respuesta es "Sí", se debe hacer el cálculo de los parámetros de estudio para seguir con la evaluación. Una vez obtenidos los parámetros, se debe generar un caso de negocio, en el cual, se debe evaluar si la rentabilidad es positiva o no. Si la rentabilidad es positiva, termina el estudio y se determina el fin de vida útil de activo, alertando el requerimiento de inversión. Si la rentabilidad es negativa, se posterga la inversión, concluyendo el estudio y rediseñando las metas de desempeño y planes de mantención.

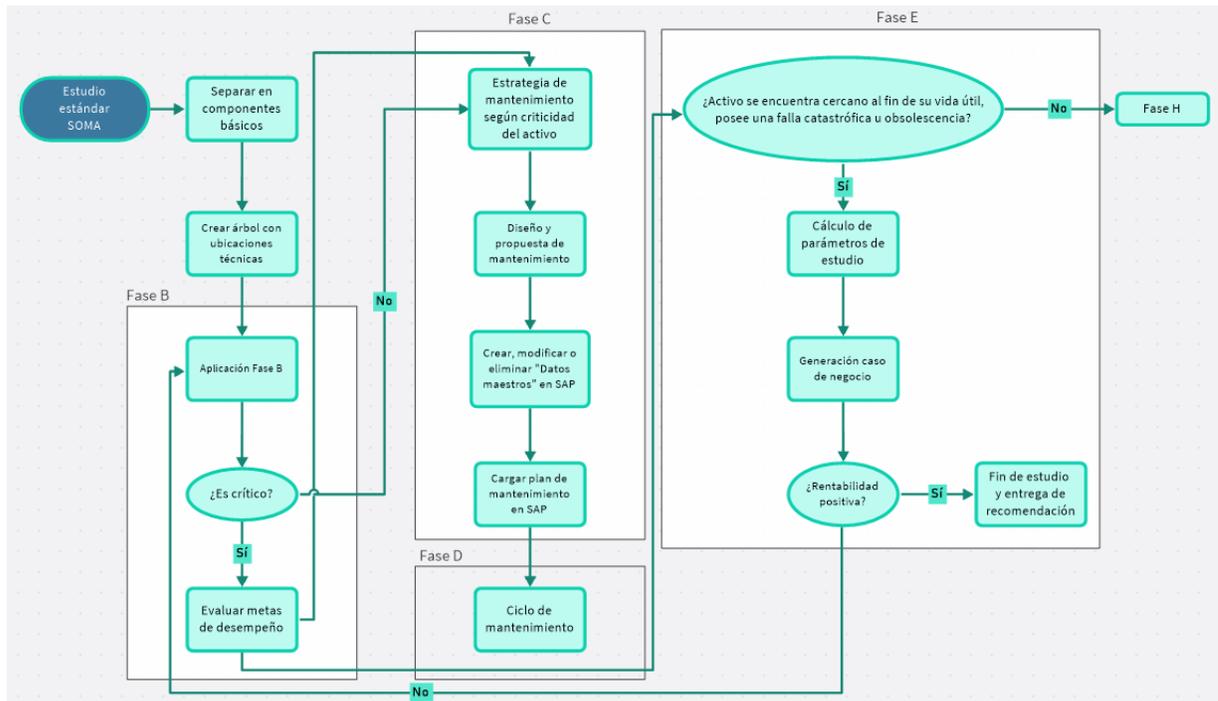


Figura 3.1: Metodología de trabajo.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

El presente trabajo significa una gran contribución para Codelco debido a que es necesario aplicar el estándar SOMA a todos los equipos/activos de la corporación. Además se destaca la especial importancia de aplicarlo en el ferrocarril Teniente 8 ya que es el único camino de extracción del mineral, por lo tanto, al lograr un mantenimiento eficiente y evitar fallas mediante la predicción de estas, se evita caer en pérdidas por detención de la producción. Se resalta nuevamente que las fases del estándar SOMA aplicadas en el presente trabajo corresponden a las fases B, C y E.

Los resultados obtenidos corresponden a:

- Árboles de ubicaciones técnicas de los sistemas y subsistemas (fase B).
- Criticidad de los sistemas y subsistemas (fase B).
- Metas de desempeño de los activos críticos (fase B).
- Análisis del mantenimiento ejercido (fase C).
- Análisis económico de los activos críticos (fase E).

4.1. Fase B

4.1.1. Árboles de ubicaciones técnicas

En esta sección se muestran los árboles de ubicaciones técnicas de las subestaciones rectificadoras y del trolley. Para el caso de las subestaciones rectificadoras, se realizaron inspecciones visuales en las subestaciones, un estudio de los diagramas unilineales de cada una de ellas y también se estudió un informe de la subestación T8A realizado por la empresa *Worley* (Worley, 2022). El árbol de la subestación T8A se puede ver en la figura 4.1

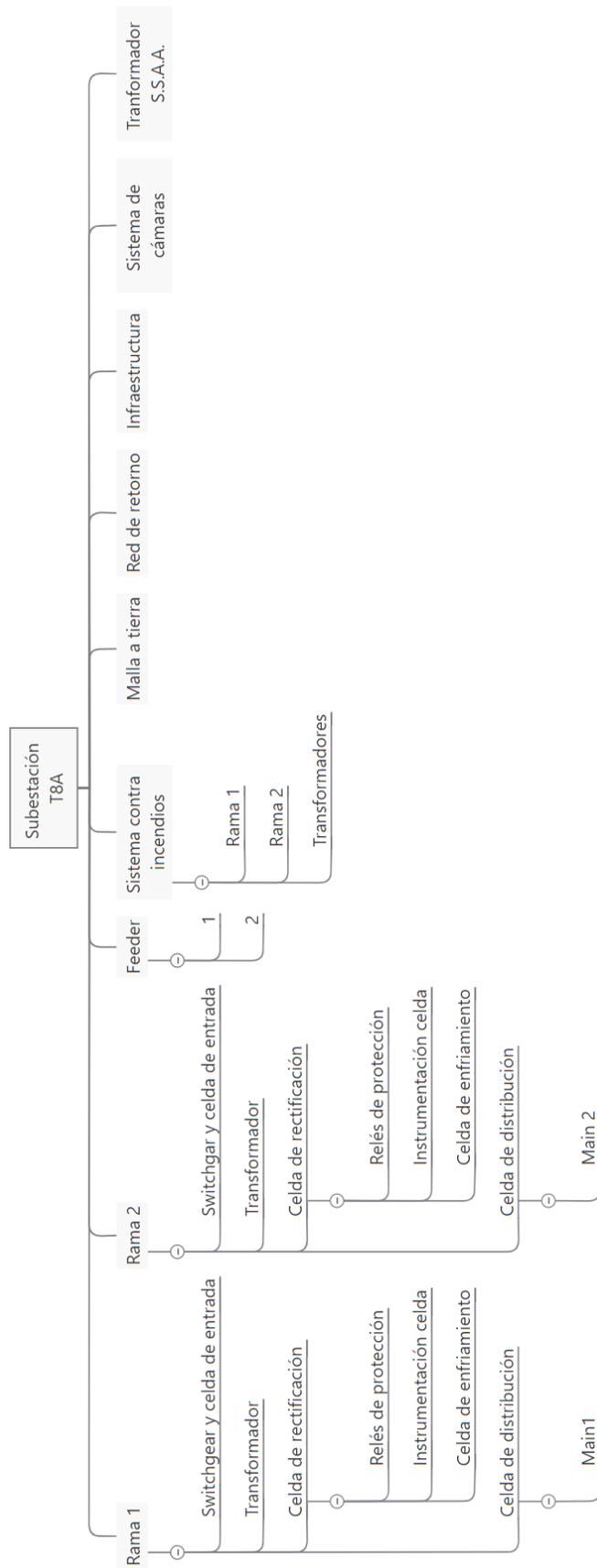


Figura 4.1: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8A.

Los árboles de ubicaciones técnicas del resto de las subestaciones rectificadoras se pueden ver en el anexo A.

Por otro lado, en la figura 4.2 se tiene el árbol de ubicaciones técnicas del trolley.

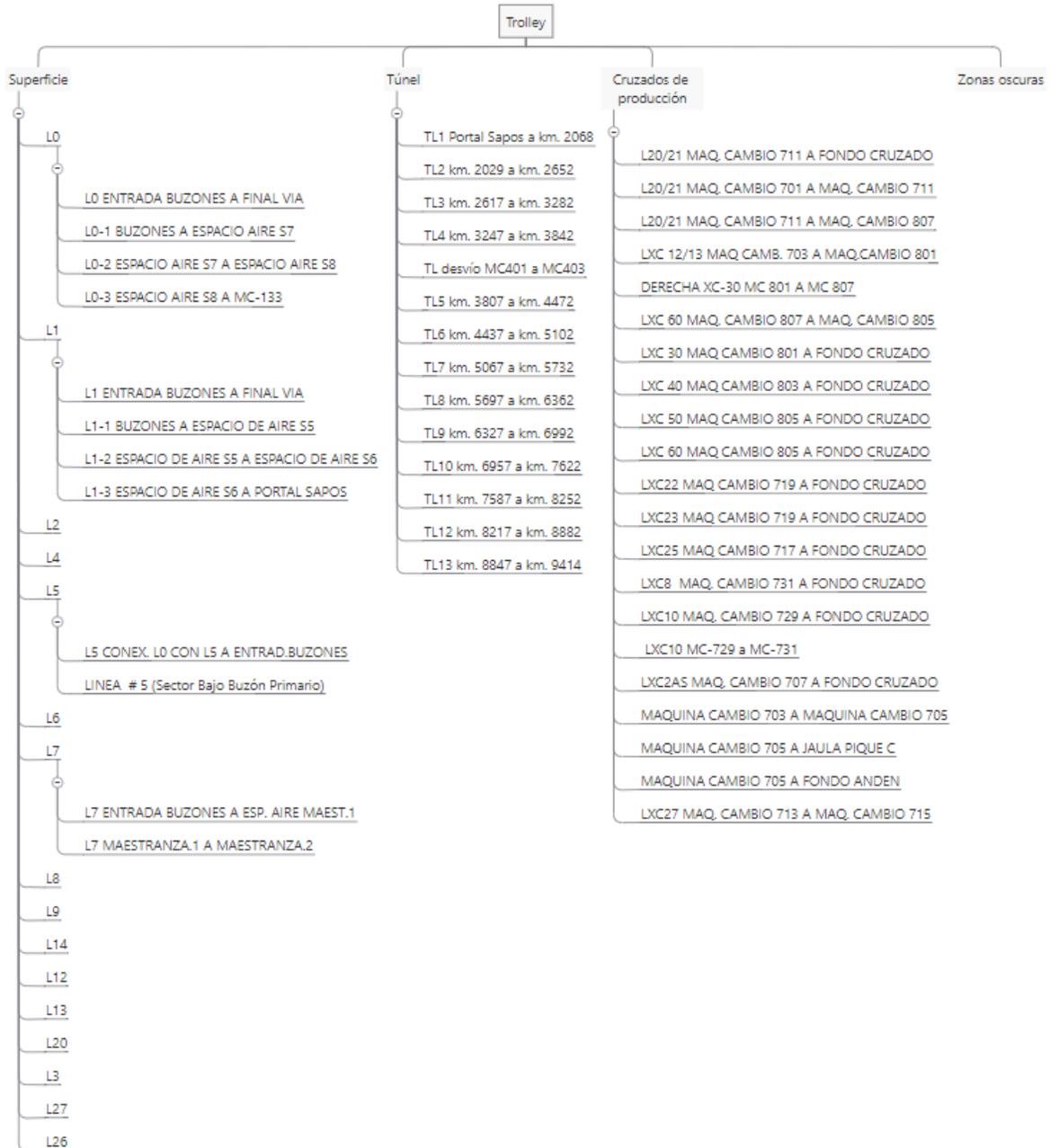


Figura 4.2: Árbol de ubicaciones técnicas del trolley.

Es importante destacar que para la correcta aplicación del estándar SOMA se utilizaron las ubicaciones técnicas ya existentes en la plataforma SAP, ya que, era la única forma de poder encontrar la información necesaria sobre las fallas y mantenencias de los activos. Los árboles de ubicaciones técnicas creados quedan como recomendación para la empresa.

4.1.2. Criticidad de los sistemas y subsistemas

Al aplicar la fase B del estándar SOMA en la infraestructura eléctrica del ferrocarril Teniente 8, se obtuvieron las criticidades de los sistemas y subsistemas que la conforman. Las tablas de Excel con los resultados se pueden ver en el anexo B, sin embargo, a continuación se muestran solo los activos con criticidad alta:

4.1.2.1. Subestaciones rectificadoras

- Teniente 8A
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
- Teniente 8B
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
- Teniente 8C
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
- Teniente 8D
 1. Sistema corriente continua
 2. Sistema contra incendios - detección
 3. Sistema contra incendios - extinción
 4. Sistema de media tensión
- Teniente 8E
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
- Teniente 8H-1
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
- Teniente 8H-2
 1. Sistema contra incendios - detección
 2. Sistema contra incendios - extinción
 3. Sistema de rectificación
- Teniente 8I

1. Sistema corriente continua
2. Sistema contra incendios - detección
3. Sistema contra incendios - extinción

- Teniente 8J

1. Sistema contra incendios - detección
2. Sistema contra incendios - extinción

Si bien no todos los subsistemas de las subestaciones rectificadoras resultaron críticos, se tomó la decisión de dejar todas las subestaciones críticas por conveniencias de la empresa. De esta forma se tiene mejor control sobre los repuestos necesarios en caso de fallas y se evita que una subestación quede inhabilitada, afectando el funcionamiento del ferrocarril.

4.1.2.2. Trolley - Superficie

- L5 conexión L0 con L5 (entrada buzones).
- L6 conexión L0 con L6 (entrada buzones).
- L0 entrada buzones a final vía.
- L1 entrada buzones a final vía.
- L4 conexión L0 a entrada buzones.
- L7 maestranza 1 a maestranza 2.
- L12 maestranza a MC.
- L13 maestranza a MC.
- L14 fin vía a conexión línea 7B.

4.1.2.3. Trolley - Túnel

- TL1 portal sapos a km 2068.
- TL2 km 2029 a km 2652.
- TL3 km 2617 a km 3282.
- TL4 km 3247 a km 3842.
- TL5 km 3807 a km 4472.
- TL6 km 4437 a km 5102.
- TL7 km 5067 a km 5732.
- TL8 km 5697 a km 6362.
- TL9 km 6327 a km 6992.
- TL10 km 6957 a km 7622.

- TL11 km 7587 a km 8252.
- TL12 km 8217 a km 8882.
- TL13 km 8847 a km 9414.

4.1.2.4. Trolley - Cruzados de produccion

- L20/21 MC 711 a fondo cruzado.
- LXC 30 MC 801 a fondo cruzado.
- LXC 40 MC 803 a fondo cruzado.
- LXC 50 MC 805 a fondo cruzado.
- LXC 60 MC 805 a fondo cruzado.
- LXC23 MC 719 a fondo cruzado.
- LXC25 MC 717 a fondo cruzado.
- XC-2AS entre MC 707 a fondo cruzado.
- L20/21 MC 701 a fondo cruzado (seccionador).
- L20/21 MC 701 a MC 711 (seccionador).
- L20/21 MC 711 a MC 807 (seccionador).
- LXC 12/13 MC 703 a MC 801 (seccionador).
- LXC 30 MC 801 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC 40 MC 803 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC 50 MC 805 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC 60 MC 805 a fondo cruzado (seccionador).
- Línea túnel curva 21-21 a XC22-23-25 (seccionador).
- LXC23 MC 719 a fondo cruzado (seccionador)
- LXC25 MC 717 a fondo cruzado (seccionador).
- Línea túnel XC-8 y 10 AC, PR. Reno (seccionador).
- LXC8 MC 731 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC10 MC 729 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC10 MC 729 a MC 731 (seccionador).
- LXC27 MC 713 a MC 715 (seccionador).
- LXC2AS MC 707 a fondo cruzado (seccionador).
- LXC 12/13 MC 703 a MC 801.
- LXC 60 MC 807 a MC 805.
- Entre MC 703 y MC 705.

4.1.2.5. Trolley - Retornos

- Superficie.
- Portal Sapos.
- La Junta - MC 713.
- Cruzados de producción.

4.1.2.6. Red 600V de alimentación controladores

- OC1.
- OC2.
- OC3.
- OC4.
- OC5.
- OC6.
- OC7.
- OC8.
- OC10.
- OC11.
- OC12.
- OC13.
- OC14.
- OC15.

4.1.2.7. Subestaciones unitarias

- U1.
- U3.
- U9.
- U11.
- U13.

4.1.2.8. Sentinas

- Sentina 00.
- Sentina 01.
- Sentina 02.
- Sentina 03.
- Sentina 04.
- Sentina 05.
- Sentina 06.

4.1.3. Metas de desempeño

Las metas de desempeño se estudian solo para los activos críticos con la finalidad de evaluar los tiempos de disponibilidad y de esta forma, de ser necesario, hacer mejoras en las pautas de mantenimiento con tal de disminuir los tiempos de indisponibilidad. Las metas de desempeño esperadas de cada activo crítico y los resultados de la disponibilidad obtenida para el año 2023 se ven a continuación.

4.1.3.1. Subestaciones rectificadoras

Para el caso de las subestaciones rectificadoras se espera que estén disponibles el 100 % del tiempo, pero como es necesario realizar mantenciones preventivas, se fija la meta de desempeño en 99 %. En la tabla 4.1 se pueden ver dos cálculos de dos tipos de disponibilidades distintas para cada subestación. Una de ellas considera las mantenciones planificadas y las no planificadas, mientras que la otra solo considera las mantenciones planificadas. Estos cálculos se hicieron con la finalidad de hacer una comparación y evaluar la necesidad de realizar cambios en las pautas de mantenimiento, punto a evaluar en la Fase C. La comparación se realiza mediante la siguiente lógica: mientras mayor sea la diferencia entre los dos tipos de disponibilidad, en el activo se realizaron una mayor cantidad de mantenciones no planificadas, es decir, tuvo más fallas.

De dicha tabla se puede ver que para las subestaciones T8A y T8D se tienen las mayores diferencias entre las disponibilidades calculadas, esto se puede mejorar aumentando la cantidad de mantenciones planificadas o mejorando las pautas de mantención para evitar fallas. Como por ejemplo lo que se ve de la subestación T8E, la cual tiene una mayor cantidad de mantenciones planificadas en comparación a las demás subestaciones y de esta forma, la diferencia entre las disponibilidades es más chica, es decir, hay menos cantidad de eventos que produzcan mantenciones no planificadas.

Tabla 4.1: Disponibilidades de las subestaciones rectificadoras.

Subestación	Disponibilidad con mantenencias planificadas y no planificadas	Disponibilidad con mantenencias planificadas
T8A	99,83 %	99,91 %
T8B	99,97 %	99,98 %
T8C	99,92 %	99,93 %
T8D	99,67 %	99,92 %
T8E	99,73 %	99,78 %
T8H	99,96 %	99,98 %
T8I	99,89 %	99,96 %
T8J	99,99 %	100 %

4.1.3.2. Trolley - Superficie

Para la sección "superficie" del trolley se obtuvieron los resultados expuestos en la tabla 4.2. De estos, se puede observar que hay pocos eventos que requieren de mantenencias no planificadas, por lo tanto, se puede concluir que las pautas que se aplican en la superficie del trolley, responden bien a las metas de desempeño en el 2023.

Tabla 4.2: Disponibilidades tramos de trolley en superficie.

Tramo del trolley	Disponibilidad con mantenencias planificadas y no planificadas	Disponibilidad con mantenencias planificadas
L5 conexión L0 con L5 (entrada buzones)	99,93 %	99,97 %
L6 conexión L0 con L6 (entrada buzones)	99,92 %	99,97 %
L0 entrada buzones a final vía	100 %	100 %
L1 entrada buzones a final vía	99,99 %	100 %
L4 conexión L0 a entrada buzones	99,92 %	99,97 %
L7 maestranza 1 a maestranza 2	99,97 %	99,98 %
L12 maestranza a MC	99,86 %	99,95 %
L13 maestranza a MC	99,91 %	99,97 %
L14 fin vía a conexión línea 7B	99,92 %	99,99 %

4.1.3.3. Trolley - Túnel

La meta de desempeño para el túnel del trolley es de un mínimo de 93 % de disponibilidad. En la tabla 4.3 se tienen los resultados para el año 2023, durante el cual se tuvo un total de 414,53 horas de ventanas (espacio de tiempo dispuesto para realizar mantenciones planificadas) en un total de 8.760 horas del año. Con esto se tiene una disponibilidad del 95,27 % sin considerar las mantenciones no planificadas. Sin embargo, considerando el total de las mantenciones, en ningún caso se obtuvo una disponibilidad menor al 93 %. Por lo tanto, se puede concluir que las pautas de mantenimiento cumplieron con las metas de desempeño.

Tabla 4.3: Disponibilidades del trolley en el túnel.

Tramo del trolley	Disponibilidad con mantenciones planificadas y no planificadas	Disponibilidad con mantenciones planificadas
TL1 portal sapos a km 2068	95,27 %	95,27 %
TL2 km 2029 a km 2652	95,27 %	95,27 %
TL3 km 2617 a km 3282	95,26 %	95,27 %
TL4 km 3247 a km 3842	95,25 %	95,27 %
TL5 km 3807 a km 4472	95,27 %	95,27 %
TL6 km 4437 a km 5102	95,25 %	95,27 %
TL7 km 5067 a km 5732	95,27 %	95,27 %
TL8 km 5697 a km 6362	95,09 %	95,27 %
TL9 km 6327 a km 6992	95,23 %	95,27 %
TL10 km 6957 a km 7622	95,26 %	95,27 %
TL11 km 7587 a km 8252	95,23 %	95,27 %
TL12 km 8217 a km 8882	95,25 %	95,27 %
TL13 km 8847 a km 9414	95,12 %	95,27 %

4.1.3.4. Trolley - Cruzados de producción

Las metas de desempeño para los cruzados de producción también consisten en tener una disponibilidad del 93%. Y al igual que en el caso del túnel, se tiene que se cumplió con dicha meta de desempeño durante el año 2023. En las tablas 4.4 y 4.5 se pueden ver las disponibilidades de los distintos tramos de los cruzados de producción, en los cuales es destacable mencionar que ninguno disminuye del 95% de disponibilidad.

Tabla 4.4: Disponibilidades de los tramos del trolley en los cruzados de producción. Parte 1.

Tramo del trolley	Disponibilidad con mantenciones planificadas y no planificadas	Disponibilidad con mantenciones planificadas
L20/21 MC 711 a fondo cruzado	95,20 %	95,27 %
LXC 30 MC 801 a fondo cruzado	95,16 %	95,27 %
LXC 40 MC 803 a fondo cruzado	95,22 %	95,27 %
LXC 50 MC 805 a fondo cruzado	95,08 %	95,27 %
LXC 60 MC 805 a fondo cruzado	95,20 %	95,27 %
LXC23 MC 719 a fondo cruzado	95,24 %	95,27 %
LXC25 MC 717 a fondo cruzado	95,19 %	95,27 %
Trolley XC-2AS entre MC 707 a fondo cruzado	95,26 %	95,27 %
L20/21 MC 701 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
L20/21 MC 701 a MC 711	95,27 %	95,27 %
L20/21 MC 711 a MC 807	95,27 %	95,27 %
LXC 12/13 MC 703 a MC 801	95,27 %	95,27 %

Tabla 4.5: Disponibilidades de los tramos del trolley en los cruzados de producción. Parte 2.

Tramo del trolley	Disponibilidad con mantenciones planificadas y no planificadas	Disponibilidad con mantenciones planificadas
LXC 30 MC 801 a fondo cruzado	95,25 %	95,27 %
LXC 40 MC 803 a fondo cruzado	95,26 %	95,27 %
LXC 50 MC 805 a fondo cruzado	95,26 %	95,27 %
LXC 60 MC 805 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
Línea túnel curva 21-21 a XC22-23-25	95,27 %	95,27 %
LXC23 MC 719 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
LXC25 MC 717 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
Línea túnel XC-8 y 10 AC, PR. Reno	95,21 %	95,27 %
LXC8 MC 731 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
LXC10 MC 729 en fondo cruzado	95,22 %	95,27 %
LXC10 MC 729 a MC 731	95,27 %	95,27 %
LXC27 MC 713 a MC 715	95,27 %	95,27 %
LXC2AS MC 707 a fondo cruzado	95,27 %	95,27 %
LXC 12/13 MC 703 a MC 801	95,24 %	95,27 %
LXC 60 MC 807 a MC 805	95,26 %	95,27 %
Trolley entre MC 703 y MC 705	95,26 %	95,27 %

4.1.3.5. Red 600V OC

Por la función que cumplen los controladores de objetos, se espera que tengan una disponibilidad del 100 %, por lo tanto, se espera lo mismo de la red de 600V que los alimenta. En la tabla 4.6 se puede ver la disponibilidad de los OC y es importante destacar que se realizó el cálculo con la información de los controladores como tal, ya que no se encontró información de la red que los alimenta. Además, no se especifica ningún tipo de mantenimiento para los OC 8 y 10 por lo tanto, se asume que cumplen con disponibilidad de 100 %. Es importante destacar que se calculó solo la disponibilidad con mantenciones planificadas ya que no hubo ninguna falla en los OC durante el 2023.

Tabla 4.6: Disponibilidad de los controladores de objetos.

Controlador de objetos	Disponibilidad
OC 1	99,98 %
OC 2	99,98 %
OC 3	99,99 %
OC 4	99,99 %
OC 5	99,99 %
OC 6	99,99 %
OC 7	99,99 %
OC 8	100 %
OC 10	100 %
OC 11	99,98 %
OC 12	99,99 %
OC 13	99,99 %
OC 14	99,99 %
OC 15	99,97 %

4.1.3.6. Subestaciones unitarias

Al igual que para el caso de las subestaciones rectificadoras, se espera que estén disponibles el 100 % del tiempo, pero como es necesario realizar mantenciones preventivas, se fija la meta de desempeño en 99 %. En la tabla 4.7 se tienen las disponibilidades de las subestaciones unitarias que son críticas. Se destaca que ninguna baja del 99 % de disponibilidad, cumpliendo con la meta de desempeño. Nuevamente, se calcula solo la disponibilidad con mantenciones planificadas ya que no se presentaron fallas durante el 2023.

Tabla 4.7: Disponibilidad de las subestaciones unitarias.

Subestaciones unitarias	Disponibilidad
U01	99,77 %
U09	99,86 %
U11	99,82 %
U12	99,83 %

4.1.3.7. Sentinas

En la tabla 4.8 se muestra la disponibilidad con mantenciones planificadas de las sentinas durante el año 2023, solo se realizó este cálculo ya que no se reportaron fallas durante dicho año. Para esto se trabajó con la información encontrada para las sentinas como tal, ya que no existe información específica sobre los variadores de frecuencia de estas, ni tampoco de sus metas de desempeño. Por lo tanto, se fija una meta de desempeño mínima del 99 %, la cual se cumple.

Tabla 4.8: Disponibilidad de las sentinas.

Sentinas	Disponibilidad
00	99,75 %
01	99,92 %
02	99,91 %
03	99,79 %
04	99,8 %
05	99,87 %
06	99,88 %

4.2. Fase C

Como se puede ver en la sección anterior, las subestaciones rectificadoras tienen en general una disponibilidad de entre 99 % y 100 % durante el año 2023, lo que representa una buena planificación y ejecución de los planes de mantenimiento. Sin embargo, se puede buscar una mejora de manera de evitar al máximo las detenciones no planificadas.

Para esto se tomó la subestación T8D, que además de ser la que tiene la mayor diferencia entre las disponibilidades calculadas, también es la que presenta más sistemas críticos, habiendo una clara relación entre esos dos descubrimientos. Por esto resulta útil hacer un estudio más acabado en dicha subestación. En la figura 4.3 se tiene el Diagrama de Pareto de la subestación, en el cual se puede ver que las categorías *Sistema de corriente continua* y *General*, son las que abarcan alrededor del 80 % de las fallas de la subestación, y por lo tanto, para buscar una mejora en las metas de desempeño, las mantenciones se deben enfocar en esas categorías.

Cabe destacar que la categoría *General* consiste en la información recolectada en la cual se detiene el funcionamiento de la subestación debido a revisiones o inspecciones que se realizan por fallas en otros sectores externos a la subestación como por ejemplo un retiro de RISes (Residuos Industriales Sólidos).

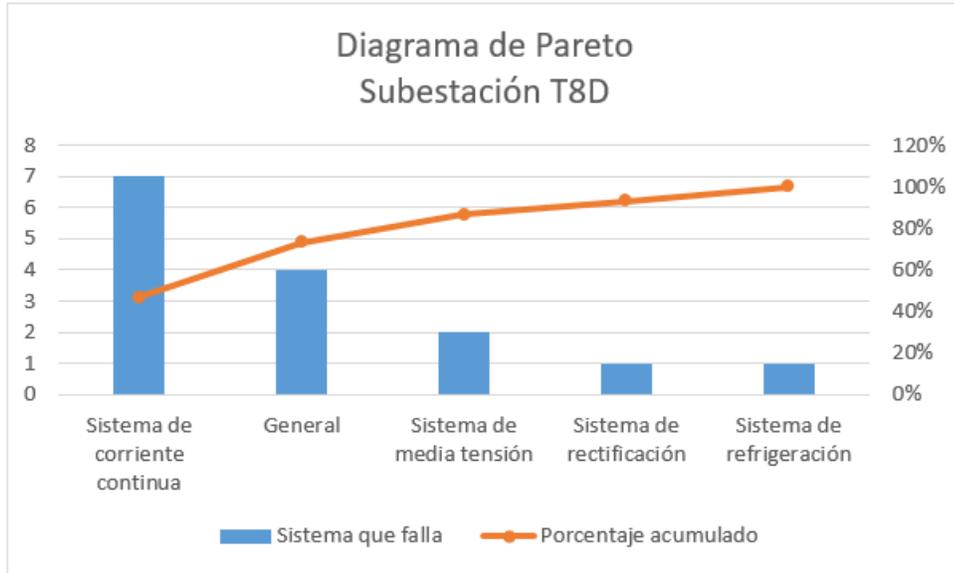


Figura 4.3: Diagrama de Pareto de la subestación T8D.

Por otro lado, de los resultados obtenidos para el trolley, se seleccionan todos los tramos donde se realizaron avisos de fallas y se hace el diagrama de Pareto de la figura 4.4. En este se puede ver que las fallas se concentran en los tramos del túnel TL8, TL11 y TL13 y también en el cruzado de producción LXC25. Esto implica que para buscar una eventual mejora, conviene enfocarse en las fallas encontradas en dichas ubicaciones.

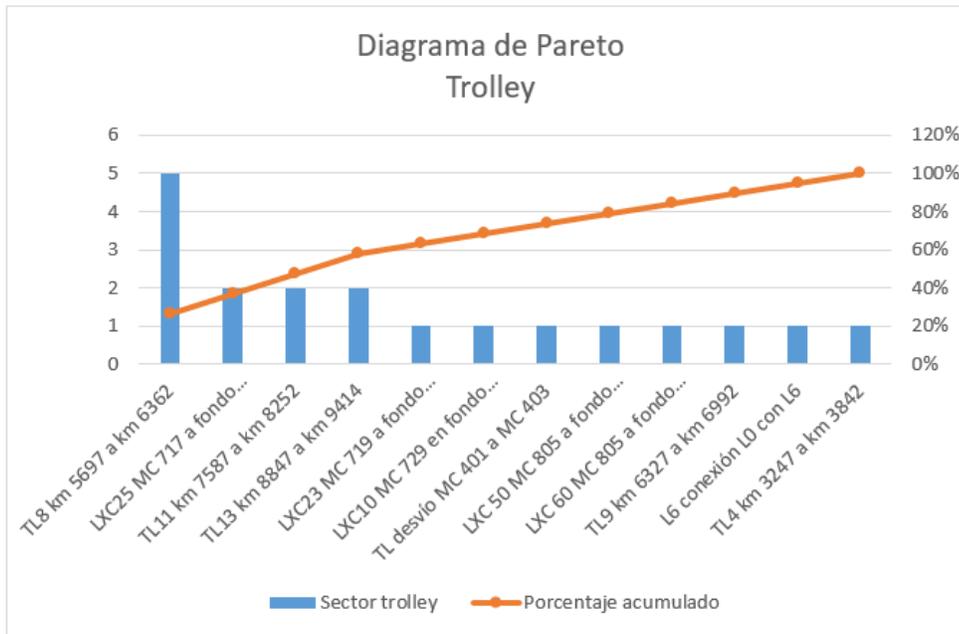


Figura 4.4: Diagrama de Pareto del trolley.

Para el caso de la red de 600 [V] de los OC, las subestaciones unitarias y las sentinas, se tienen disponibilidades cercanas al 100%. Lo que implica que los planes de mantenimiento existentes cumplen con su objetivo. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos son una aproximación estimada debido a la falta de información.

4.3. Fase E

De los activos críticos obtenidos en la Fase B, se calcula el índice CAUE, de manera de evaluar el momento óptimo de reemplazo. Luego se evalúa el VAN en el momento óptimo de reemplazo, llamado VAN Retador, y se compara con el VAN Postergar. Si el VAN del Retador es menor a la opción de postergar, se debe alertar de manera oportuna el requerimiento de la inversión. En caso contrario, se concluye el estudio y se rediseñan las metas de desempeño y plan matriz.

4.3.1. Subestaciones rectificadoras

Para el estudio de las subestaciones rectificadoras, se tiene información desde el año 2013, por lo tanto se toma dicho año como el inicial y se procede a calcular el CAUE, VAN del Retador y VAN Postergar. Al tomar el año 2013 como el año inicial de la inversión se tiene un supuesto conservador ya que, las subestaciones tienen más tiempo real de utilización y por lo tanto, se tendrán más fallas de las que se tendrían al inicio de las operaciones real. Además, se usó un valor de inversión aproximado, el cual se obtuvo del estudio realizado por la empresa *Worley* para el reemplazo de las subestaciones.

En el gráfico de la figura 4.5 se tiene el índice CAUE de la subestación rectificadora T8A y en la tabla 4.9 se tienen los resultados del VAN postergar y VAN retador de la misma subestación. Del gráfico se puede ver que el momento óptimo de reemplazo es al año 6, lo que corresponde a un resultado conservador dado lo explicado anteriormente. Por otro lado, se puede ver que hay algunos años que tienen un índice CAUE negativo, lo que implica que los egresos son mayores que los ingresos y por lo tanto, se hace necesario realizar la inversión para cambiar la subestación. Finalmente al revisar los resultados obtenidos de los VAN de la subestación, también se concluye que debe realizarse la inversión, ya que el VAN postergar es mayor que el VAN retador.

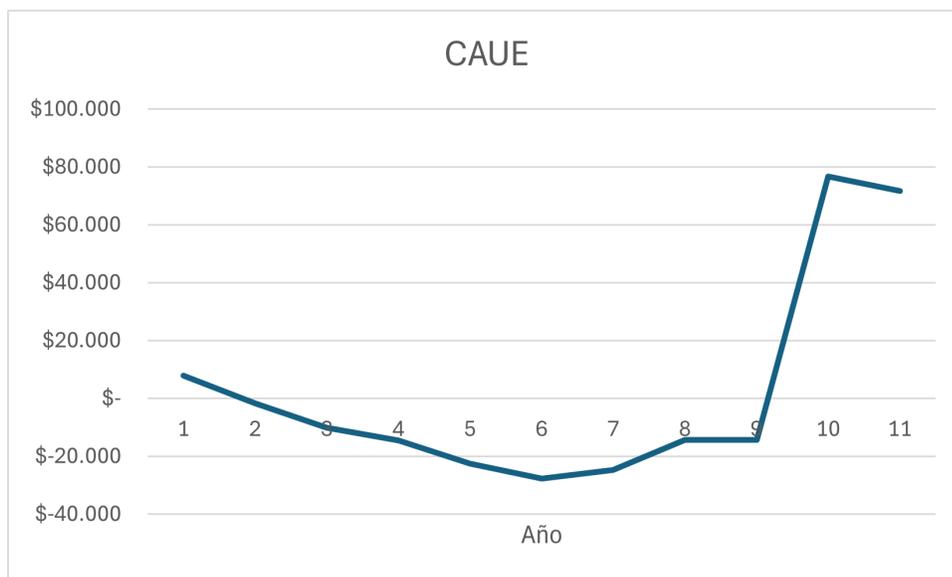


Figura 4.5: CAUE Subestación Rectificadora T8A.

Tabla 4.9: Resultados SS/EE T8A.

VAN Postergar	VAN Retador
29.034	-46.482

Para la subestación rectificadora T8B se tiene el gráfico de la figura 4.6 y la tabla 4.10. Del gráfico se puede ver que el momento óptimo de reemplazo es nuevamente al año 6. Y al igual que para la subestación T8A, se puede ver que hay años que tienen un índice CAUE negativo y, por lo tanto, se hace necesario realizar la inversión para cambiar la subestación. Finalmente al revisar los resultados obtenidos de los VAN de la subestación, también se concluye que debe realizarse la inversión.

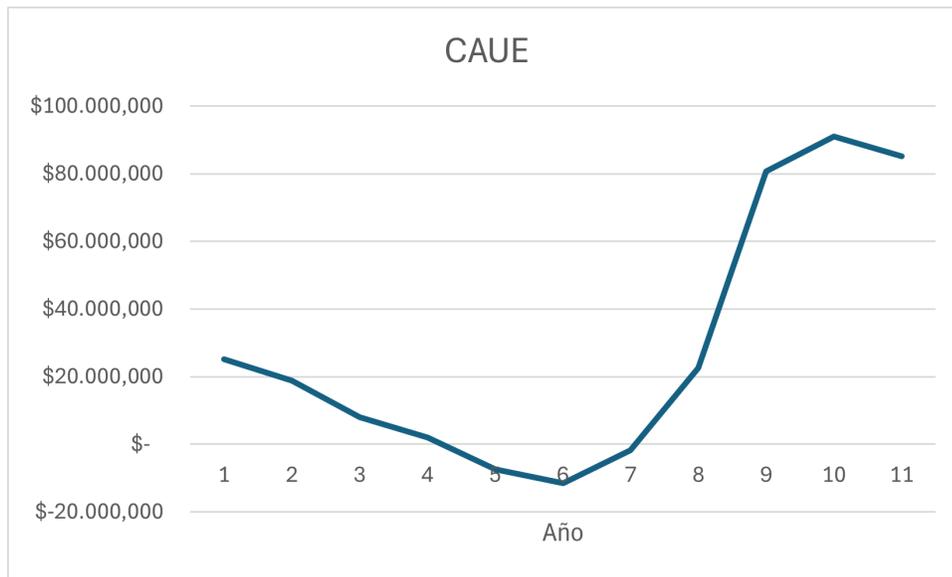


Figura 4.6: CAUE Subestación Rectificadora T8B.

Tabla 4.10: Resultados SS/EE T8B.

VAN Postergar	VAN Retador
47.150	-35.718

Para el caso de la subestación rectificadora T8C, se tiene el gráfico de la figura 4.7 y los resultados del VAN en la tabla 4.11. A diferencia de los casos anteriores, se tiene que el CAUE llega a su punto mínimo durante el año 1, lo cual es erróneo y se debe a que no se cuenta con datos anteriores al año 2013. Por lo tanto, se puede tomar un supuesto distinto y considerar el año 1 como el año 2015. Con este supuesto se obtiene que el año de reemplazo óptimo correspondería al año 7 del gráfico, y con dichos valores se hace el cálculo de los VAN. En este caso no se tiene ningún año con el índice CAUE negativo, es decir, los ingresos son mayores a los egresos. Pero esto no implica que se deba descartar la inversión para reemplazar, falta comparar los VAN.

Como se puede ver en la tabla 4.11 el VAN retador es menor que el VAN postergar, lo que implica que para los supuestos tomados, los cuales son conservadores, es necesario hacer la inversión de reemplazo de la subestación.

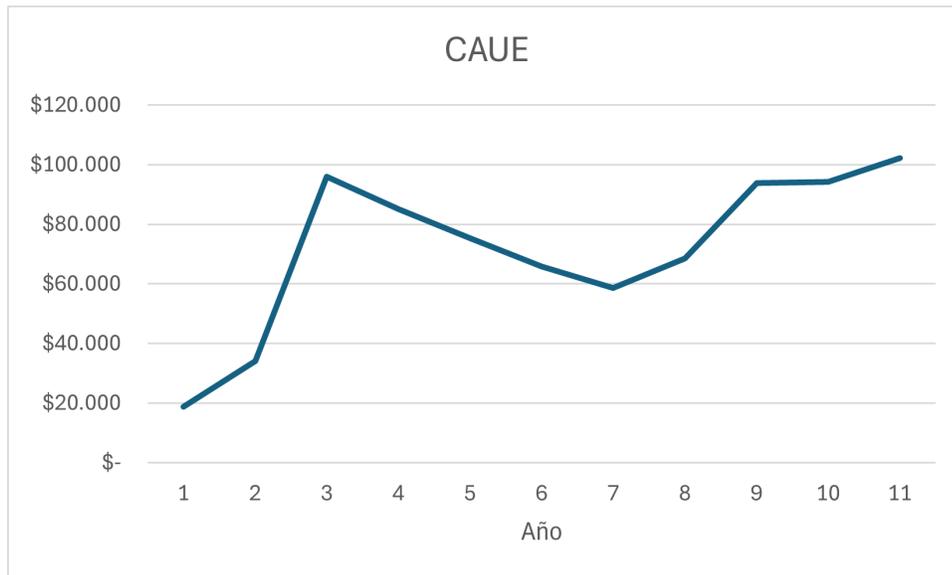


Figura 4.7: CAUE Subestación Rectificadora T8C.

Tabla 4.11: Resultados SS/EE T8C.

VAN Postergar	VAN Retador
-137.926	-213.523

Para las restantes subestaciones rectificadoras T8D (figura 4.8 y tabla 4.12), T8E (figura 4.9 y tabla 4.13), T8H (figura 4.10 y tabla 4.14), T8I (figura 4.11 y tabla 4.15) y T8J (figura 4.12 y tabla 4.16) se tienen las mismas conclusiones que para las subestaciones T8A y T8B. El momento óptimo de reemplazo corresponde al año 6 y se tienen algunos años con índice CAUE negativo. Además, en todos los casos se tiene que el VAN postergar es mayor que el VAN retador, por lo tanto se debe realizar la inversión de reemplazo de las subestaciones.

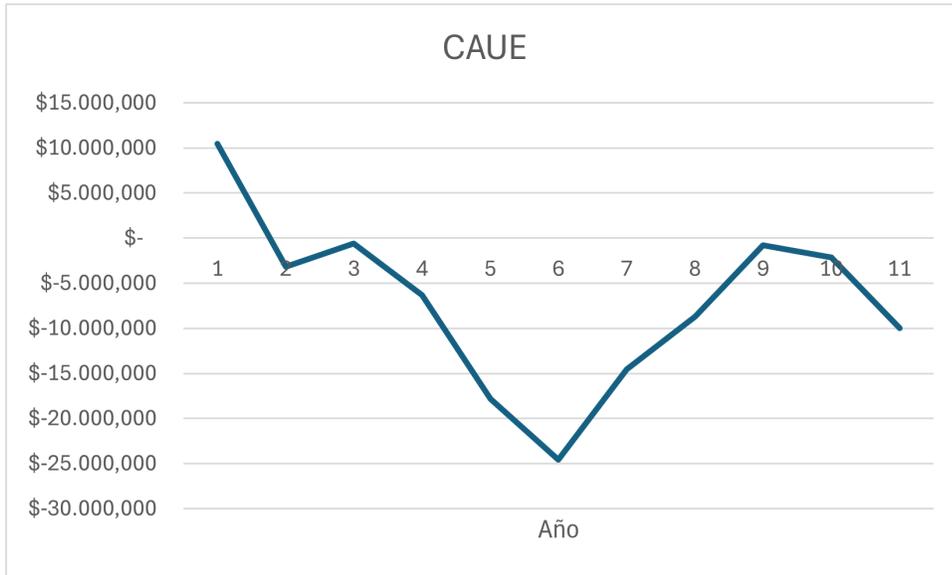


Figura 4.8: CAUE Subestación Rectificadora T8D.

Tabla 4.12: Resultados SS/EE T8D.

VAN Postergar	VAN Retador
56.659	-56.001

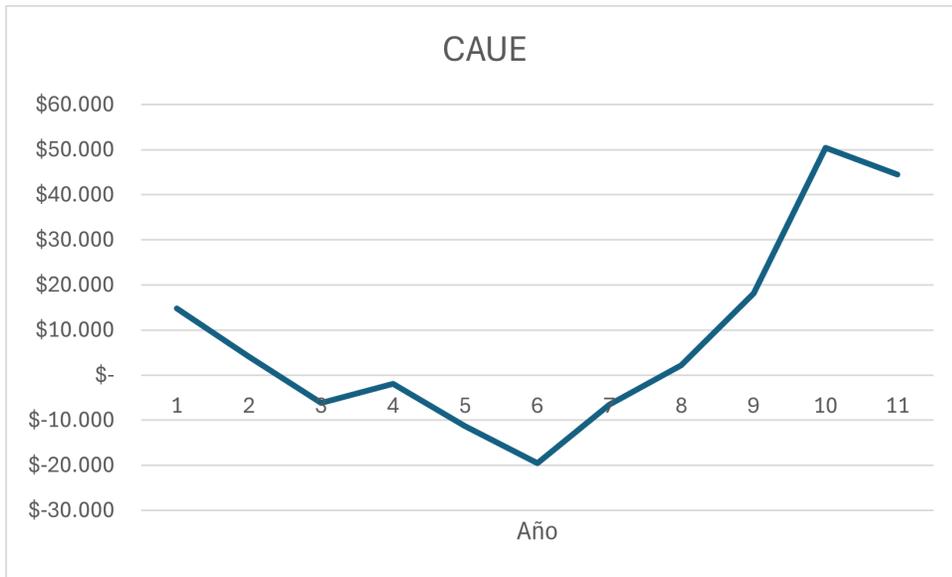


Figura 4.9: CAUE Subestación Rectificadora T8E.

Tabla 4.13: Resultados SS/EE T8E.

VAN Postergar	VAN Retador
53.367	-43.150

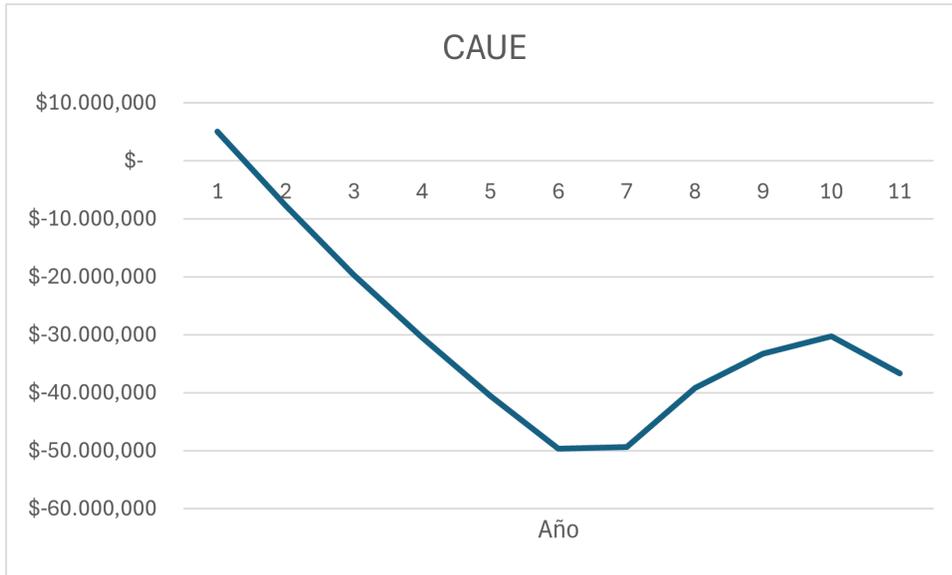


Figura 4.10: CAUE Subestación Rectificadora T8H.

Tabla 4.14: Resultados SS/EE T8H.

VAN Postergar	VAN Retador
30.553	-73.038

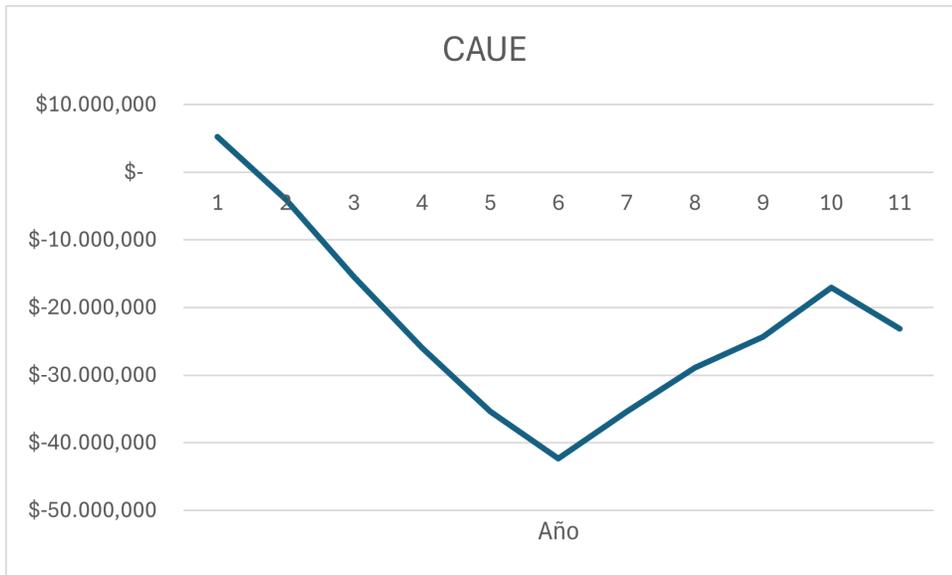


Figura 4.11: CAUE Subestación Rectificadora T8I.

Tabla 4.15: Resultados SS/EE T8I.

VAN Postergar	VAN Retador
42.158	-64.970

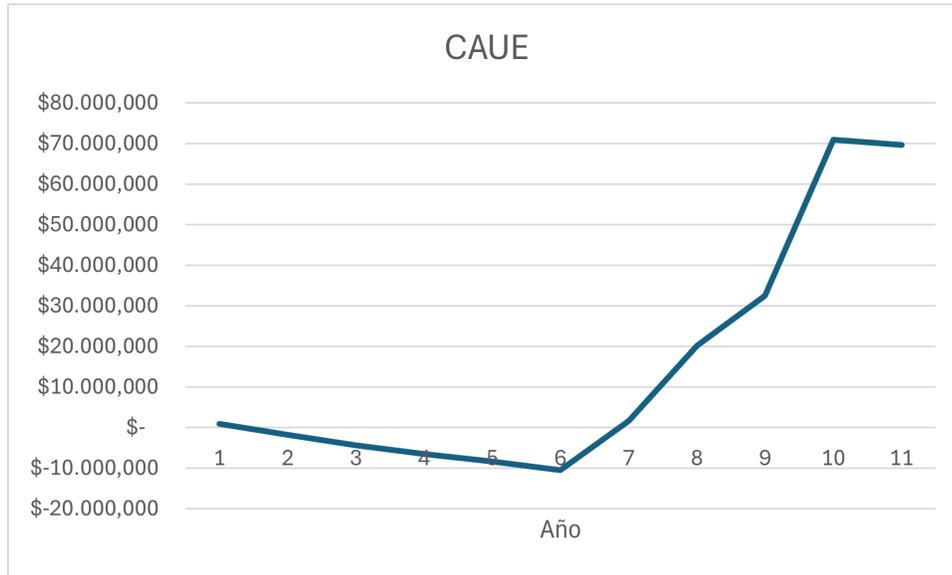


Figura 4.12: CAUE Subestación Rectificadora T8J.

Tabla 4.16: Resultados SS/EE T8J.

VAN Postergar	VAN Retador
30.380	-15.531

4.3.2. Trolley - Superficie

Para el cálculo del índice CAUE y los VAN en el sector de la superficie del trolley, se tomó el tramo L7 como referencia para todos los tramos, dado que se conoce la fecha de cambio, es decir, la fecha de inversión inicial. Por otro lado, se asume que toda la superficie del trolley se comporta de manera similar, por lo tanto, los resultados se pueden aplicar para todos los tramos.

Con los supuestos explicados se obtuvo el gráfico de la figura 4.13, en el cual se ve que el momento óptimo de reemplazo corresponde al año 6. Luego, comparando los VAN de la tabla 4.17, se puede ver que el VAN postergar es mayor que el VAN retador, por lo tanto, se hace necesario realizar la inversión para reemplazar el activo.

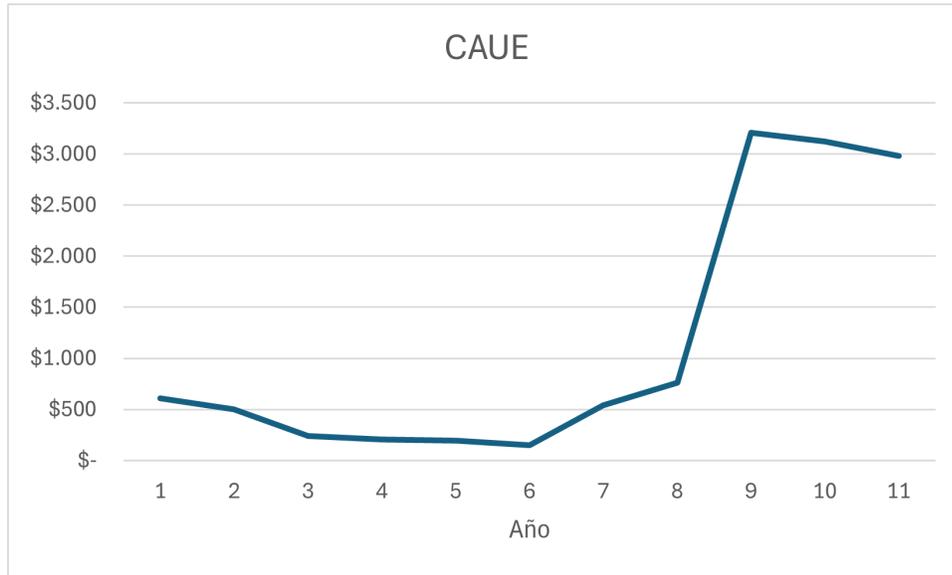


Figura 4.13: CAUE Trolley Superficie.

Tabla 4.17: Resultados Trolley Superficie.

VAN Postergar	VAN Retador
1.443	-463

4.3.3. Trolley - Túnel y Cruzados de Producción

Para el caso del trolley en el túnel y los cruzados de producción se utiliza el tramo TL11, ya que se conoce la fecha de inversión inicial y se asume que es similar a todos los demás tramos del trolley en el túnel y en los cruzados de producción.

De dicho tramo se obtuvo el gráfico de la figura 4.14 y la tabla 4.18. A diferencia del caso anterior, la curva del CAUE es más constante pero de todas formas se tiene un mínimo en el año 4, el cual correspondería al momento óptimo de reemplazo. En este punto se obtiene que el VAN retador es mayor que el VAN postergar, por lo tanto, se recomienda postergar la inversión para reemplazar el activo.

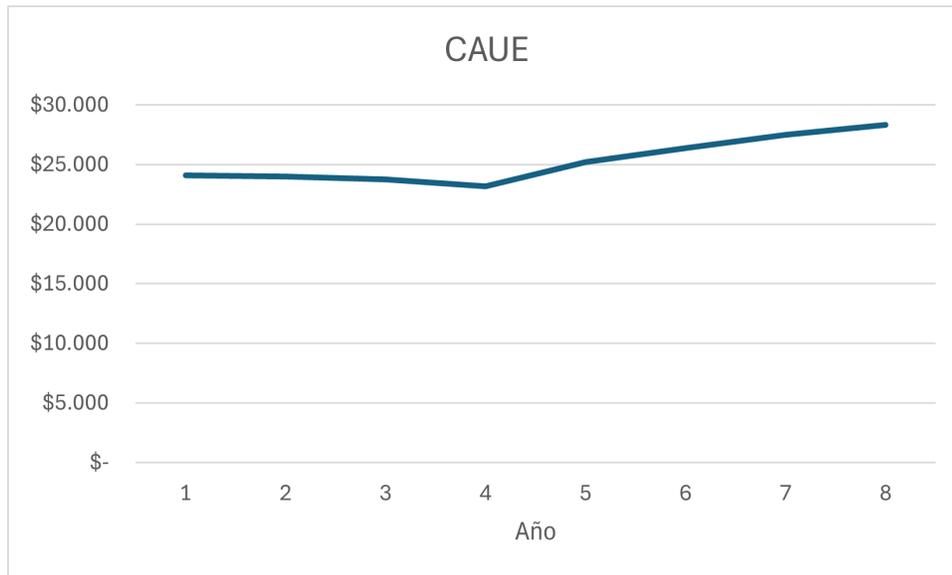


Figura 4.14: CAUE Trolley Túnel y Cruzados de Producción.

Tabla 4.18: Resultados Trolley Túnel y Cruzados de Producción.

VAN Postergar	VAN Retador
-1.574	9.459

4.3.4. Red 600 V

En la red 600V de los controladores no se tiene información suficiente para poder calcular o estimar un CAUE.

4.3.5. Subestaciones Unitarias

En la gráfico de la figura 4.15 y en la tabla 4.19 se tienen los resultados para la subestación unitaria 1. El año que representa el momento óptimo de reemplazo corresponde al 8, por lo tanto se toma dicho año para el cálculo de los VAN. De la comparación entre el VAN postergar y el VAN retador, se tiene que el VAN postergar es mayor, por lo tanto, se recomienda realizar la inversión de reemplazo de la subestación.

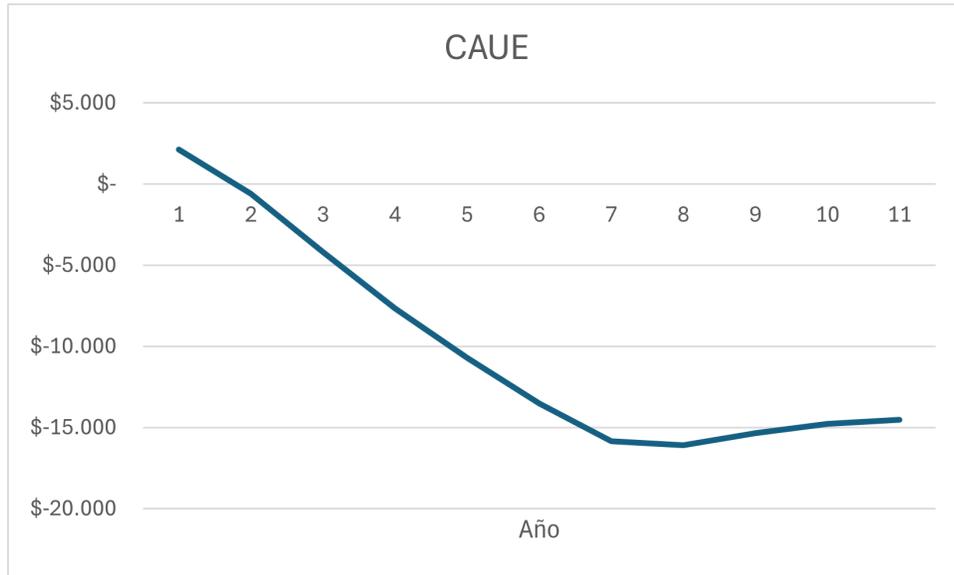


Figura 4.15: CAUE Subestación Unitaria 1.

Tabla 4.19: Resultados Subestación Unitaria 1.

VAN Postergar	VAN Retador
36.582	3.117

Por otro lado, para la subestación unitaria 9 se tienen el gráfico de la figura 4.16 y la tabla 4.20. En el gráfico se puede ver que el año que representa el momento óptimo de reemplazo corresponde al año 8, por lo tanto se toma dicho año para el cálculo de los VAN. De la comparación entre el VAN postergar y el VAN retador, se tiene que el VAN postergar es mayor, por lo tanto, al igual que para la subestación unitaria 1, se recomienda realizar la inversión de reemplazo de la subestación.

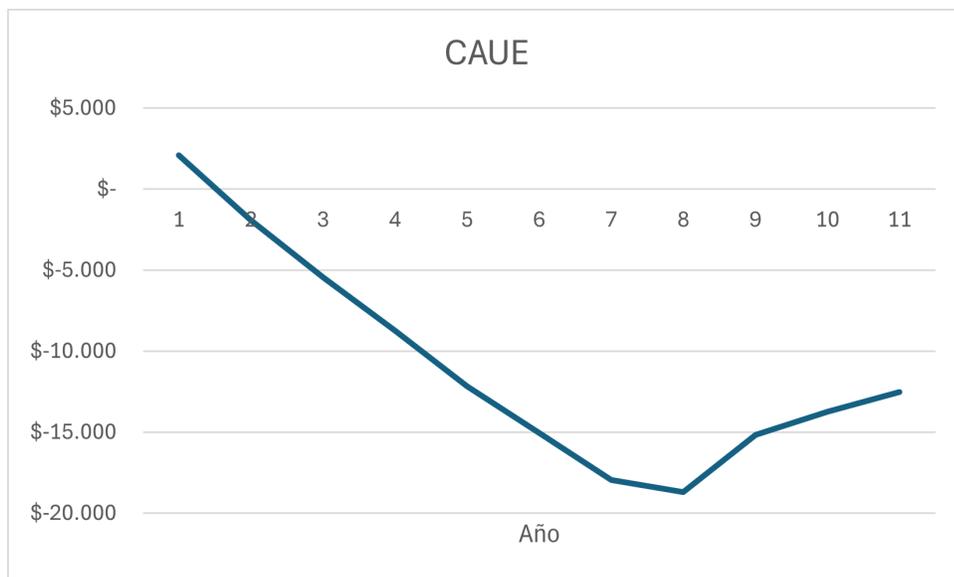


Figura 4.16: CAUE Subestación Unitaria 9.

Tabla 4.20: Resultados Subestación Unitaria 9.

VAN Postergar	VAN Retador
43.090	697

Para las otras dos subestaciones unitarias que resultaron críticas (11 y 13) no se tiene la información suficiente como para calcular o estimar el índice CAUE, sin embargo, se pueden tomar los resultados anteriores como una buena aproximación.

4.3.6. Sentinas

En las sentinas y los variadores de frecuencia de las sentinas no se tiene información suficiente para poder calcular o estimar un CAUE.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Cumplimiento de los objetivos del proyecto

La aplicación de las fases B, C y E del estándar SOMA a la infraestructura eléctrica del nivel de transporte principal de la mina se pudo llevar a cabo con éxito. Sin embargo, se presentaron algunos inconvenientes en el proceso debido a falta de información sobre los avisos de detenciones y/o fallas ingresados en la plataforma SAP. Como es el caso de la fase E para los variadores de frecuencia de las sentinas y la red de 600 [V] que alimenta los OC. No se pudo realizar el cálculo del CAUE ni tampoco un estimado como en otros casos ya que no se encontró nada de información sobre ellos.

5.2. Justificación del proyecto

Codelco tiene la necesidad de mejorar constantemente, y dentro de esto es que se creó el estándar SOMA, el cual busca reducir los tiempos de detención de los equipos y así maximizar las ganancias de la corporación. El estándar se debe aplicar a todos los equipos y/o activos de todas las divisiones de Codelco, es por esto que el presente trabajo es de gran importancia para la corporación.

5.3. Recomendaciones

Si bien se logró la aplicación del estándar SOMA, es importante mencionar que la información que se obtuvo desde SAP, primero se tuvo que ordenar y luego verificar que la descripción del lugar donde ocurrió la falla coincidía con la ubicación técnica ingresada. Por ejemplo, para el caso de la subestación rectificadora T8D, varios ingresos de detenciones de la subestación fueron realizados bajo la ubicación técnica *TMIN-PRO-FT8-SER-R04*, la cual corresponde a la subestación entera. Siendo que las detenciones fueron provocadas por fallas en subsistemas de la subestación, como por ejemplo, la ubicación técnica del subsistema de corriente continua es *TMIN-PRO-FT8-SER-R04-SCC*. Este proceso significó una demora en la aplicación del estándar y también implicó una falta de certeza ya que, al tener ingresos que nos contaban con una descripción de los sucedido, no se podía asegurar que la ubicación técnica fuera la correcta.

Dentro de la misma problemática del ingreso de información, se tiene el caso de los varia-

dores de frecuencia de las sentinas. Como se vio en el capítulo 4, las metas de desempeño de que se obtuvieron fueron calculadas con información de las sentinas como tal ya que no se encontró nada sobre los variadores de frecuencia de estas. Lo mismo se repite para el caso de la red de 600 [V] que alimenta a los controladores de objetos, se trabajó con información de los OC pero no de la red de 600 [V].

Es importante destacar que varios de los avisos ingresados, con los cuales se debía trabajar, no contaban con la duración del tiempo de detención. Al estudiar el por qué de esta situación, se averiguó que se debe a que cuando hay más de una detención los trabajadores suelen ingresar el tiempo solo de la detención de mayor duración, abarcando la de menor duración dentro de la misma. Si bien puede resultar más ameno para quien realiza el aviso, implica una falta de información importante para realizar los cálculos de las disponibilidades. Por lo tanto se recomienda hacer una revisión a la forma en que se ingresan los avisos en la plataforma SAP para hacer mejoras y evitar caer en errores o falta de información.

Finalmente, también se recomienda la implementación de los nuevos árboles de ubicaciones técnicas creados para las subestaciones rectificadoras y el trolley. Con estas se tendría un mayor control sobre cual es específicamente el activo que presenta problemas y/o fallas, por lo tanto, se podría recompilar con mayor precisión y de manera más ordenada la información.

Bibliografía

- Codelco. (2022). *Libro del Sistema Operativo de Mantenimiento*.
- Álvares, M. (2022). *Implementación del sistema de gestión C+ (Lean Management) durante el ramp up del proyecto planta de tratamiento de escorias, División el Teniente de Codelco*.
- Brieva, D. (2018). *Diseño de un modelo de gestión Lean Management de servicios legales para la consejería jurídica en la Corporación Nacional del Cobre de Chile*.
- Naya, R. (2009). *Introducción a SAP*.
- Valdivia, C. (2018). *Análisis de criticidad y disponibilidad para modos de falla en sistemas de distribución eléctrica*.
- Knights, P. (2004). *Downtime priorities, jack-knife diagrams, and the business cycle*.
- Metro. (2016). *Mantenimiento sistema eléctrico línea 4-4a-5ext. del metro de Santiago*.
- Fredes, C. (2022). *Propuesta de un sistema de control de gestión empresa ferrocarril de Antofagasta*.
- Ilmadrel, R. (2019). *Mantenimiento de equipos de tracción eléctrica de aplicación ferroviaria*.
- Berrezueta, F., Sigüencia, C. (2016). *Propuesta de un GMAO para la gestión del mantenimiento de un sistema ferroviario*.
- Worley. (2022). *Ingeniería de perfil. Proyecto rectificadoras ferrocarril Teniente 8*.

Anexos

Anexo A.

De la figura A.1 a la A.7, se presentan los nuevos árboles de ubicaciones técnicas de las subestaciones rectificadoras T8B a la T8J.

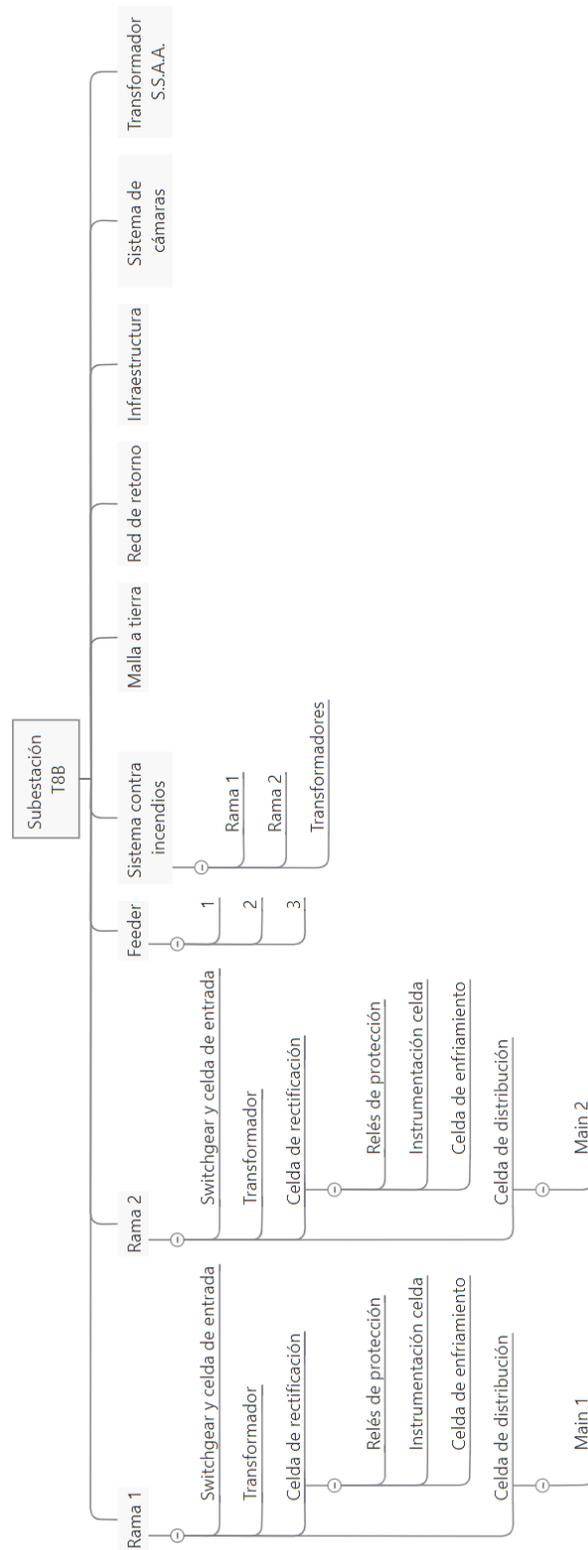


Figura A.1: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8B.

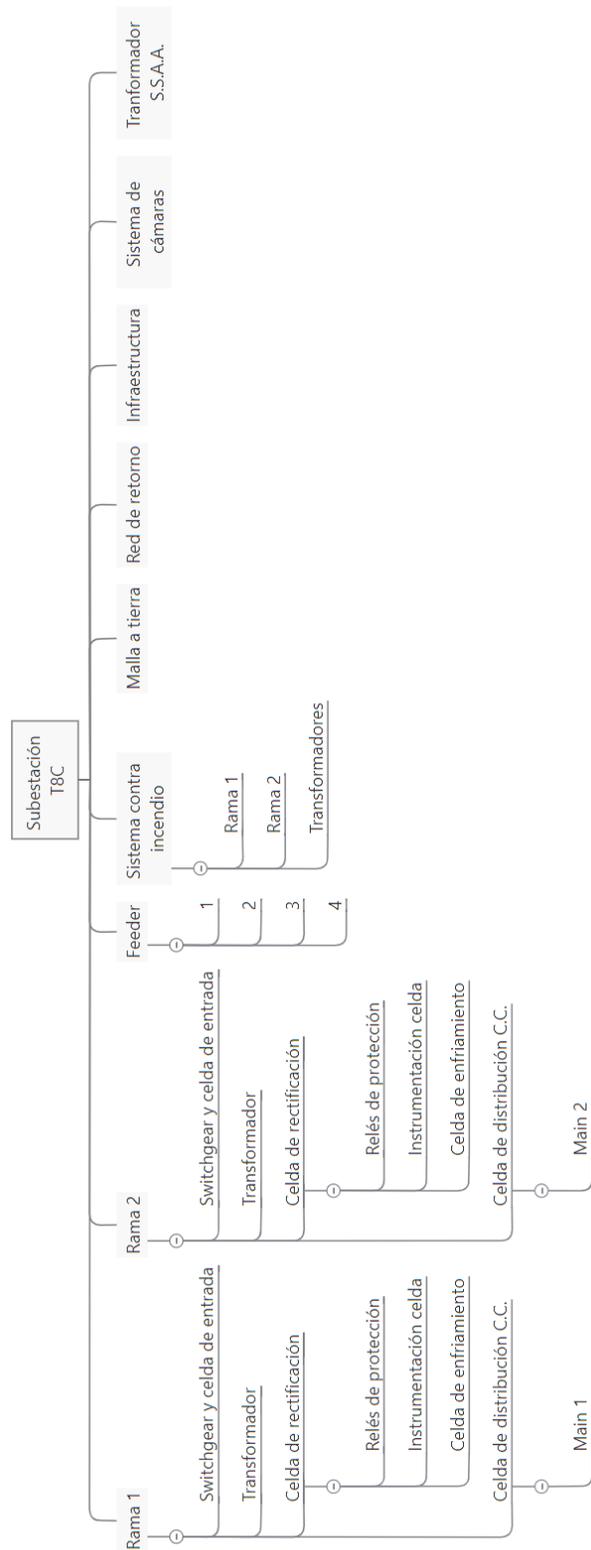


Figura A.2: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8C.

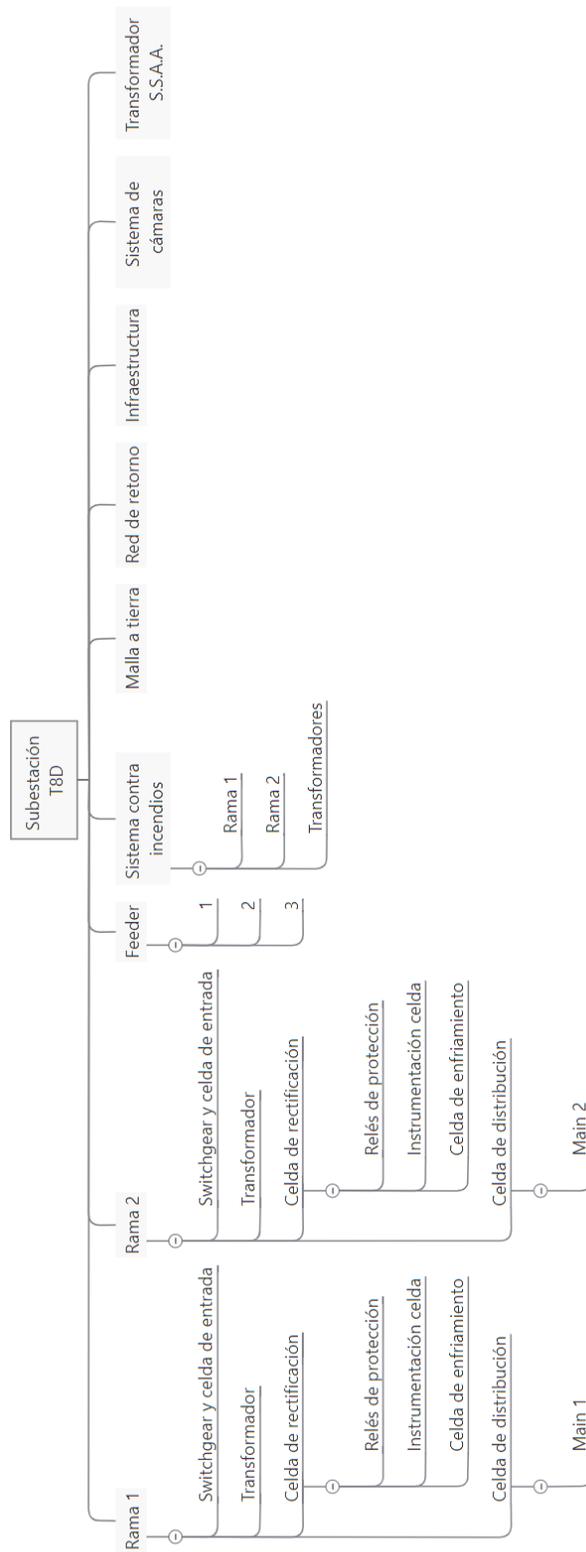


Figura A.3: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8D.

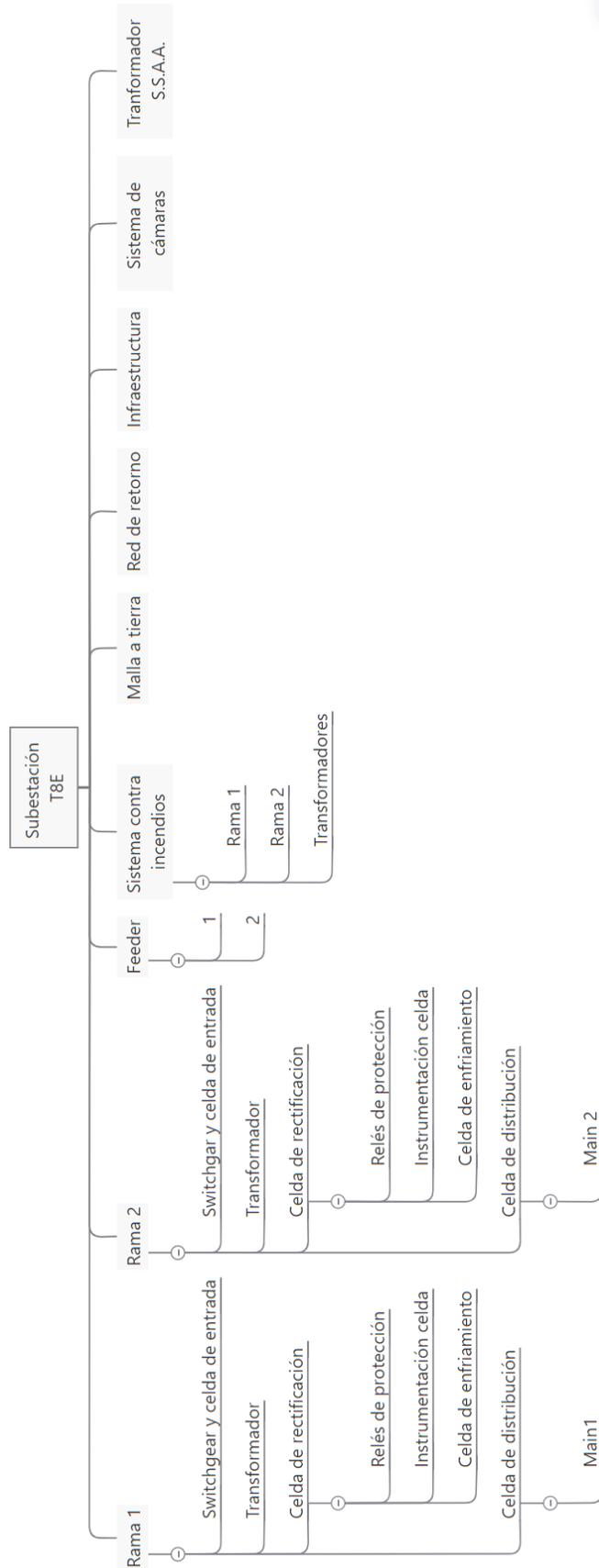


Figura A.4: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8E.

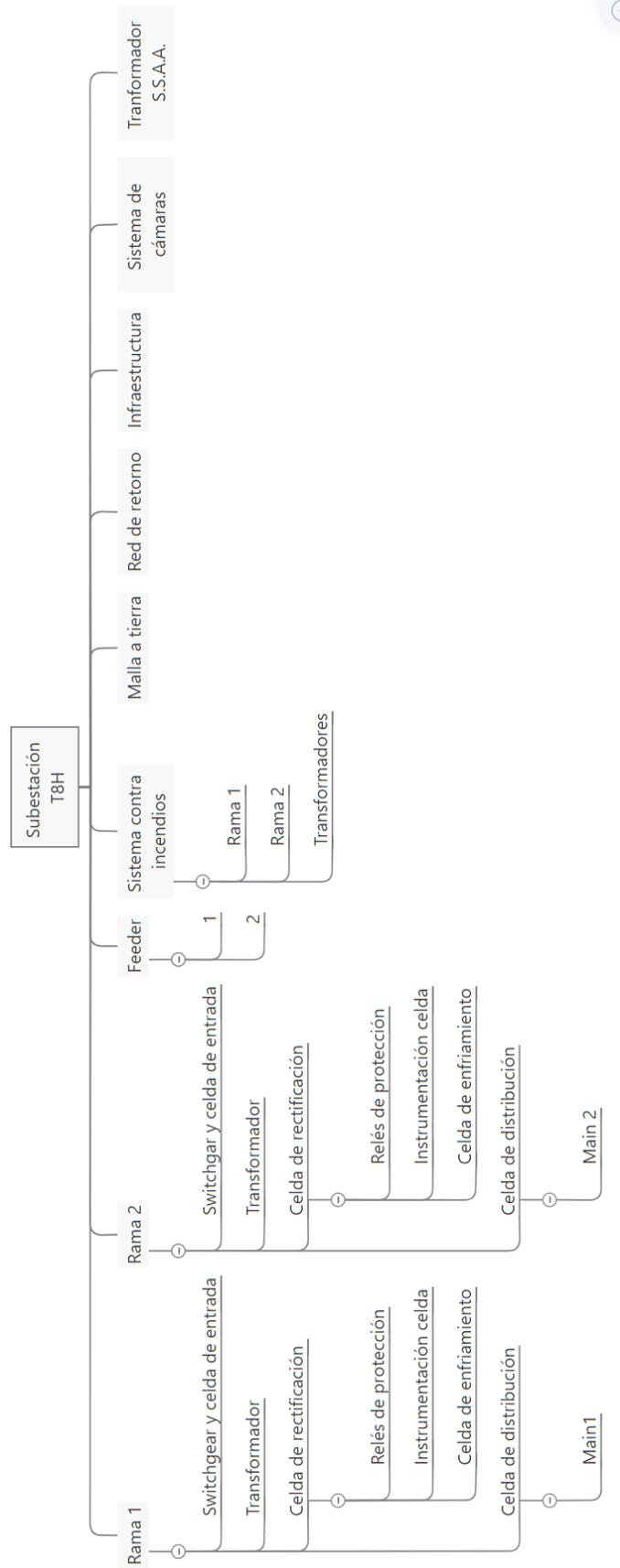


Figura A.5: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8H.

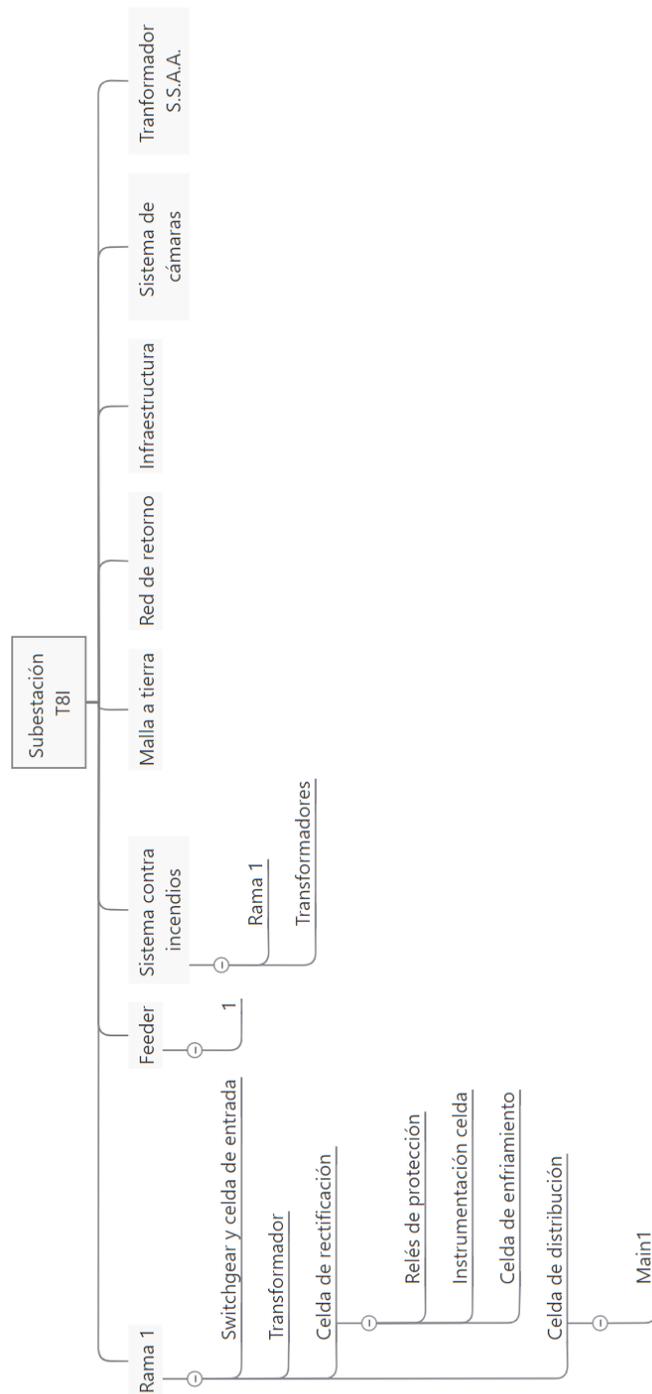


Figura A.6: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8I.

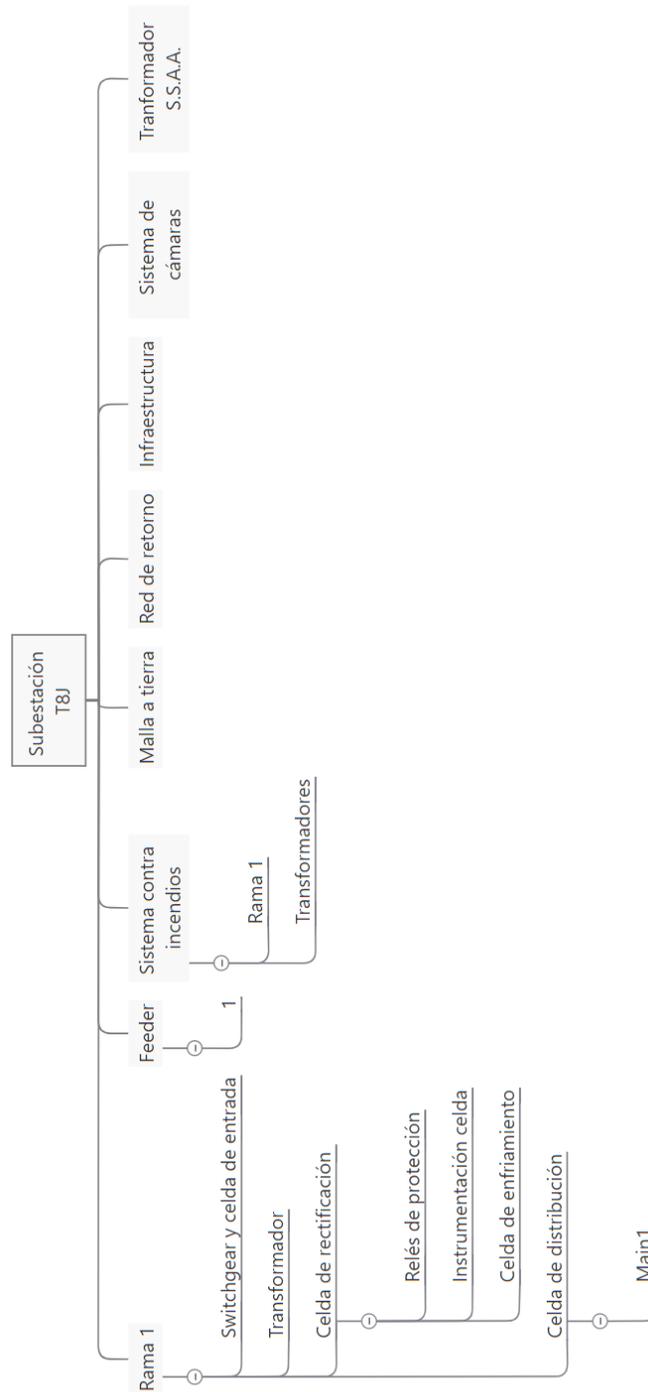


Figura A.7: Árbol de ubicaciones técnicas de la subestación rectificadora T8J.

Anexo B.

En este anexo se presenta la tabla Excel que se obtuvo al aplicar la fase B del estándar SOMA a las subestaciones rectificadoras. Por espacio, se separó en 3 partes.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad * (Consecuencia * Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)	
Subestación T8A	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Sistema de rectificación	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Subestación total	40	10	12	1	63	6	3	18	Alta	4376,875	3,125	99,83	
Subestación T8B	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Sistema de rectificación	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Subestación total	40	10	12	2	64	6	2	12	Alta	2189,5625	0,4375	99,956	
Subestación T8C	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Sistema de rectificación	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
	Subestación total	40	10	12	1	63	6	2	12	Alta	4379,72	0,28	99,924	

Figura B.1: Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T8A, T8B y T8C.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad * (Consecuencia * frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)	
Subestación T8D	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	3	18	Alta	1458,715	1,285	99,912	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	4379,335	0,665	99,9848	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	2	12	Alta	-	-	-	
Subestación total	38	0	12	1	51	6	6	1	6	Media	546,1175	1,3825	99,6676	
Subestación T8E	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	100	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
Subestación total	38	0	12	1	51	6	6	1	6	Media	4377,415	2,585	99,7256	
Subestación T8H-1	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	100	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
Subestación total	38	0	12	1	51	6	6	1	6	Media	-	-	-	

Figura B.2: Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T9D, T8E y T8H-1.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad * (Consecuencia x Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPP (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)	
Subestación T8H-2	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	2915,083333	4,916666667	99,9838	
Subestación total	40	10	12	1	63	6	2	12	Alta	2189,4375	0,5625	99,9581		
Subestación T8I	Sistema corriente continua	38	0	12	2	52	6	3	18	Alta	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	2918,806667	1,193333333	99,9591	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	100	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
Subestación total	40	10	12	1	63	6	3	18	Alta	1250,56	0,868571429	99,8878		
Subestación T8J	Sistema corriente continua	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	Sistema contra incendios crítico por definición SOMA
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta	-	-	100	
	Sistema de refrigeración	12	10	8	1	31	5	1	5	Media	-	-	-	
	Sistema de media tensión	38	0	12	1	51	6	1	6	Media	-	-	-	
Subestación total	40	10	12	1	63	6	2	12	Alta	4379,25	0,75	99,9829		

Figura B.3: Fase B aplicada a las subestaciones de rectificación T8H-2, T8I y T8J.

Anexo C.

En este anexo se pueden ver las tablas de Excel con los resultados de la aplicación de la fase B del estándar SOMA al trolley, el cual por espacio, se separo en cuatro partes: superficie, túnel, cruzados de producción y retornos. En la tabla C.1 se tiene la superficie del trolley, mientras que en las tablas C.2, C.3 y C.4 se tienen los resultados del túnel, cruzados de producción y retornos del trolley respectivamente.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad (Consecuencia * Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)	
Sector	L0 (portal sapos a buzón fino)	30	0	4	1	35	5	2	10	Media				
		30	0	4	1	35	5	2	10	Media				
		30	0	4	1	35	5	2	10	Media				
	L1 (portal sapos a buzón fino)	30	0	4	1	35	5	1	5	Media				
		30	0	4	1	35	5	1	5	Media				
		30	0	4	1	35	5	1	5	Media				
	L5, L6 (de L0 a buzón primario)	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	4378,125	1,875	99,932	
		30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	2188,73	1,27	99,916	
		30	0	0	1	31	5	2	10	Media				
	Superficie	L8, L9 (andenes superficie)	30	0	0	1	31	5	2	10	Media			
			30	0	0	1	31	5	2	10	Media			
			30	0	2	1	33	5	1	5	Media			
		L0, L1, L2 (sector buzón fino)	30	0	8	1	39	6	1	6	Alta	-	-	100
			30	0	8	1	39	6	1	6	Alta	8759,67	0,33	99,996
			30	0	0	1	31	5	3	15	Alta	4377,665	2,335	99,918
L4, L7 (sector buzón primario)		30	0	2	1	33	5	1	5	Media				
		30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	4377,67	2,33	99,968	
		30	0	2	1	33	5	1	5	Media				
L5 (sector bajo buzón primario)		L5 sector bajo buzón primario	30	0	2	1	33	5	1	5	Media			
		L12 maestranza a MC	30	0	0	1	31	5	4	20	Alta	486,2266667	0,44	99,857
		L13 maestranza a MC	30	0	0	1	31	5	3	15	Alta	2188,6475	1,3525	99,91
	L14 fin vía a conexión línea 7B	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	2188,5625	1,4375	99,923	
L3, L26, L28	L20 conexión con línea 7B a línea 14	30	0	2	1	33	5	1	5	Media				
	Línea 3 espacio de aire a conexión L26/27	30	0	0	1	31	5	1	5	Media				
	Línea 29 MC a torno Sculfort	30	0	0	1	31	5	2	10	Media				
	Línea 28 MC a torno Sculfort	30	0	0	1	31	5	1	5	Media				

Figura C.1: Fase B aplicada a la superficie del trolley.

Sector	Denominación equipo	Metas de desempeño (criticidad alta)											
		Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad (Consecuencia) * Frecuencia)	Criticidad	TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)
	Línea túnel altura del 1850 al 3720	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	-	-	95,2662
	TL1 portal sapos a km 2068	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	8759,42	0,58	95,2662
	TL2 km 2029 a km 2652	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	4376,25	3,75	95,2586
	TL3 km 2617 a km 3282	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	8759	1	95,2548
Túnel	Línea túnel altura del 3720 al 4500	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	4376,165	3,835	95,2652
	TL4 km 3247 a km 3842	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta			
	TL5 km 3807 a km 4472	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta			
	TL desvío MC 401 a MC 403	30	0	4	1	35	5	2	10	Media			
	Línea túnel altura del 4500 al 5900	30	0	12	1	43	6	3	18	Alta	4379,25	0,75	95,2529
	TL6 km 4437 a km 5102	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	8759,67	0,33	95,2662
	TL7 km 5067 a km 5732	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	546,518125	0,981875	95,09066
	TL8 km 5697 a km 6362	30	0	12	1	43	6	4	24	Alta			
	Línea túnel altura del 5900 al 7300	30	0	12	1	43	6	3	18	Alta	2189,1	0,9	95,2289
	TL9 km 6327 a km 6992	30	0	12	1	43	6	3	18	Alta			
	Línea túnel altura del 7300 a XC-12/13	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	2919,306667	0,6933333333	95,2586
	TL10 km 6957 a km 7622	30	0	12	1	43	6	3	18	Alta	1459,293333	0,706666667	95,2348
	TL11 km 7587 a km 8252	30	0	12	1	43	6	2	12	Alta	2919,03	0,97	95,252
	TL12 km 8217 a km 8882	30	0	12	2	44	6	4	24	Alta	1457,86	2,14	95,1234

Figura C.2: Fase B aplicada al túnel del trolley.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad (Consecuencia * Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)		
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)
Cruzados de producción	L20/21 MC 711 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	1250,58	0,84571	95,2024
	LXC 30 MC 801 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	1750,13	1,866	95,1635
	LXC 40 MC 803 a fondo cruzado	30	0	4	1	35	5	3	15	Alta	2918,61	1,39	95,2224
	LXC 50 MC 805 a fondo cruzado	30	0	4	1	35	5	4	20	Alta	728,625	1,375	95,0816
	LXC 60 MC 805 a fondo cruzado	30	0	4	1	35	5	3	15	Alta	2188,52	1,48	95,2024
	LXC22 MC 719 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	1	5	Media			
	LXC23 MC 719 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	4378,55	1,455	95,2368
	LXC25 MC 717 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	2917,61	2,39	95,1882
	LXC8 MC 731 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	1	5	Media			
	LXC10 MC 731 a fondo XC	30	0	2	1	33	5	2	10	Media			
	Trolley XC-2AS entre MC 707 a fondo cruzado	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	2919,58	0,41667	95,2557
	MC 705 a jaula pique C	30	0	0	1	31	5	1	5	Media			
	MC 705 a fondo andén	30	0	0	1	31	5	1	5	Media			
	L20/21 MC 701 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	L20/21 MC 711 a MC 711	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	LXC 12/13 MC 703 a MC 801	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	LXC 30 MC 801 a fondo cruzado	40	0	12	2	54	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	LXC 40 MC 803 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	8757,83	2,17	95,2452
	LXC 50 MC 805 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	8759,5	0,5	95,264
	LXC 60 MC 805 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	8759,42	0,58	95,264
	Línea túnel curva 21-21 a XC22-23-25	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	LXC23 MC 719 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	LXC25 MC 717 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	Línea túnel XC-8 y 10 AC, PR, Reno	40	0	12	1	53	6	3	18	Alta	2188,69	1,3125	95,2101
	LXC8 MC 731 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	8759,75	0,25	95,2671
	LXC10 MC 729 en fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	3	18	Alta	4378	2	95,224
	LXC10 MC 729 a MC 731	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
LXC27 MC 713 a MC 715	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27	
LXC2AS MC 707 a fondo cruzado	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27	
L20/21 MC 701 a MC 711	30	0	2	1	33	5	1	5	Media				
L20/21 MC 711 a MC 807	30	0	2	1	33	5	2	10	Media				
LXC 12/13 MC 703 a MC 801	30	0	8	1	39	6	3	18	Alta	4378,59	1,415	95,238	
Derecha XC-30 MC 801 a 807	30	0	8	1	39	6	1	6	Media				
LXC 60 MC 807 a MC 805	30	0	8	1	39	6	2	12	Alta	4379,71	0,29	95,2634	
LXC 10 MC 729 a MC 731	30	0	2	1	33	5	1	5	Media				
Trolley entre MC 703 y MC 705	30	0	2	1	33	5	3	15	Alta	8759,33	0,67	95,2624	
LXC27 MC 713 a MC 715	30	0	4	1	35	5	2	10	Media				

Figura C.3: Fase B aplicada a los cruzados de producción del trolley.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad (Consecuencia * Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)		
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad (%)
Retornos trolley	Superficie	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	100
	Portal Sapos	40	0	12	1	53	6	1	6	Alta	-	-	95,27
	La Junta - MC 713	40	0	12	1	53	6	2	12	Alta	-	-	95,27
	Cruzados de producción	40	0	12	1	53	6	1	6	Alta	-	-	95,27

Figura C.4: Fase B aplicada a los retornos del trolley.

Anexo D.

En este anexo se presenta una imagen del excel con los resultados de la fase B para la red de 600 [V] de los OC.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad *	Frecuencia (Consecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)		
												TMEF (tiempo medio entre fallas) (hr)	TMPR (tiempo medio para reparar) (hr)	Disponibilidad (%)
Red 600V Controladores de Objetos	Red alimentación controlador OC1	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8758,3	1,67	99,98
	Red alimentación controlador OC2	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8758,3	1,67	99,98
	Red alimentación controlador OC3	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759	1	99,99
	Red alimentación controlador OC4	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759	1	99,99
	Red alimentación controlador OC5	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759	1	99,99
	Red alimentación controlador OC6	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,5	0,5	99,99
	Red alimentación controlador OC7	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,3	0,67	99,99
	Red alimentación controlador OC8	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	-	-	-
	Red alimentación controlador OC10	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	-	-	100
	Red alimentación controlador OC11	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,5	0,5	99,98
	Red alimentación controlador OC12	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,5	0,5	99,99
	Red alimentación controlador OC13	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,5	0,5	99,99
	Red alimentación controlador OC14	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,6	0,42	99,99
	Red alimentación controlador OC15	30	0	12	1	43	6	1	6	6	Alta	8759,6	0,42	99,97

Figura D.1: Fase B aplicada a red de 600V que alimenta a los controladores de objetos.

Anexo E.

En este anexo se presentan los resultados de la aplicación de la fase B a las subestaciones unitarias, por espacio se decidió separar en dos partes.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad * (Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad	
Subestación unitaria edificio despacho T-8	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	2	12	Alta	8756.33	1.67	99.77	
Subestación unitaria maestraza 1	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria maestraza 2	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria (T-8 B) S-02	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria S/11	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria S/10	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria S/9	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta				Activos críticos por definición
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				

Figura E.1: Fase B aplicada a las subestaciones unitarias. (Parte 1)

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de frecuencia	Índice de criticidad (Consecuencia * Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad	
Subestación unitaria P1	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta			100	Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta			100	
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	1	6	Media				
Subestación unitaria (T-8 G) S-07	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	3	9	Media				
	Detección	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta			100	Activos críticos por definición
	Extinción	40	10	0	1	51	6	1	6	Alta			100	
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	40	10	2	1	53	6	3	18	Alta			99,86	
Subestación unitaria T-8 J	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Sistema media tensión	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
Subestación unitaria T-8 H	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	2	6	Media				
	Sistema media tensión	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	38	0	2	1	41	6	2	12	Alta	4379,335	0,67	99,82	
Subestación unitaria T-8 I	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	2	6	Media				
	Sistema media tensión	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	38	0	2	1	41	6	2	12	Alta			99,83	
Subestación unitaria T-8 C	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Sistema media tensión	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
Subestación unitaria T-8 E	Sistema baja tensión	12	0	2	1	15	3	1	3	Baja				
	Sistema media tensión	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Transformador	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				
	Subestación total	38	0	2	1	41	6	1	6	Media				

Figura E.2: Fase B aplicada a las subestaciones unitarias. (Parte 2)

Anexo F.

En este anexo se presentan los resultados de la aplicación de la fase B a las sentinas.

Sector	Denominación equipo	Seguridad (P1)	Medio Ambiente (P2)	Producción (P3)	Costo de mantenimiento (P4)	Puntaje de evaluación (P1+P2+P3+P4)	Indicador de consecuencias	Indicador de la frecuencia	Índice de criticidad* (Consecuencia x Frecuencia)	Criticidad	Metas de desempeño (criticidad alta)			Observaciones	
											TMEF (tiempo medio entre fallas)	TMPR (tiempo medio para reparar)	Disponibilidad		
Drenaje túnel ITT8	Sentina 00	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	1250,011429	1,417142857	99,75	Se usan los valores de las sentinas como tal para calcular los indicadores, ya que no se tiene información sobre los variadores de frecuencia específicamente.
	Sentina 01	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	8759	1	99,92	
	Sentina 02	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	8759,67	0,33	99,91	
	Sentina 03	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	2188,42	1,58	99,79	
	Sentina 04	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	2917,89	2,11	99,8	
	Sentina 05	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	8759,67	0,33	99,87	
	Sentina 06	Variador de frecuencia	40	2	4	2	48	6	2	12	Alta	8759,67	0,33	99,88	

Figura F.1: Fase B aplicada a los retornos del trolley.