



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Jonathan Eduardo Chávez Ramos

Estudio de falla en pórtico de vía aérea y efectos secundarios

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 28 de junio de 2018



Estudio de falla en pórtico de vía aérea y efectos secundarios

Jonathan Eduardo Chávez Ramos

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Medina Hanke
Profesor Guía

Sr. Patricio Robles Calderón
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 28 de junio de 2018

Esto es para D-D.

Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y finalización de este trabajo. En primer lugar, a mi profesor titular Jorge Medina Hanke y mi profesor correferente Patricio Robles Calderón, por haberme entregado el apoyo y ser mis guías en el proceso de ésta investigación.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica, la cual me entregó las herramientas para llevar a cabo este proceso con éxito y poder emprender una nueva etapa, no solo en el ámbito laboral sino también en lo personal.

A mis padres por ser el pilar fundamental en mi formación como persona, por la paciencia y el cariño entregado a lo largo de este proceso. Que a pesar de la distancia siempre confiaron en mí sin dejar de lado la preocupación por mi aprendizaje.

A mi hermano por su fortaleza, por los reencuentros, por cada sonrisa entregada y cada dota jugado. Gracias por los grandes momentos de felicidad y emociones que me has entregado.

A mi familia por todo el apoyo incondicional a lo largo de los años. Gracias por tanta comida.

A mis amigos, que no importa la situación que se presente, siempre dispuestos a ofrecer una mano y una cerveza.

A mi compañera, por ser mi apoyo emocional en todo sentido, gracias por acompañarme en este proceso y recordarme que la lectura abre infinitas posibilidades. Me ayudaste en todo lo que necesitaba e incluso más que eso.

Valparaíso, 28 de junio de 2018

Jonathan Chávez Ramos.

Resumen

El presente documento contiene el estudio de falla que tuvo lugar en el Local Técnico Ex Estación Maule, perteneciente a la empresa de Ferrocarriles del Estado, la cual se encuentra ubicada en la VII Región de Chile, en donde se explican los detalles de la falla además de exponer un registro fotográfico de los daños provocados por el siniestro.

Debido a la falla de la estructura aisladora de cerámica ubicada en el pórtico PK260/5, se inició una circulación indebida de corriente provenientes del sistema de alimentación de catenarias hacia los soportes triangulares del pórtico y posteriormente desviándose en dirección a las instalaciones del Local Técnico antes mencionado. Lo anterior sumado a que el sistema de protección puesta a tierra no se encontraba en funcionamiento debido al robo por parte de terceros de las barras cobre pertenecientes a la protección, generó un incendio en las instalaciones del Local Técnico, interrupciones en el funcionamiento del sistema, pérdidas de equipos, dispositivos y disminución de la calidad de servicio mantenida por la empresa estatal.

Se detallan antecedentes técnicos utilizados por la empresa, como son: nivel de voltaje, corriente y sistemas contactores. Características presentes al momento de la falla para exponer las condiciones de funcionamiento del sistema.

Se identifican las causas principales y secundarias que dieron lugar a la ocurrencia de la falla eléctrica. Se determinan las condiciones de operación e infraestructura presentes en la zona de falla.

Se definen y analizan los elementos aisladores de cerámica, dispositivos que influyeron en forma directa en la ocurrencia de la falla eléctrica, explicando características, propiedades y formas de degradación que sufren éstos tipos de aisladores.

Se realiza una cronología de eventos y acciones realizadas que tuvieron lugar desde el inicio de la falla en el pórtico PK260/5 hasta el momento en que se llevó a cabo el corte de suministro eléctrico por parte de funcionarios de EFE.

Se utilizó el software de DigSilent PowerFactory, para efectuar una simulación que permitiera demostrar la magnitud de corriente generada por el siniestro. Con los resultados anteriores se logró determinar de forma estimativa el valor temperatura alcanzada en la zona de falla.

El concepto de confiabilidad es detallado con sus respectivos índices y parámetros, cuyos datos pueden ser implementados a planes de mantenimiento orientados a aumentar la vida útil de elementos y dispositivos. Además, se presentan una serie de recomendaciones para evitar que la falla vuelva a repetirse, aumentando la confiabilidad y seguridad del sistema.

En base a estos datos se puede implementar planes de mantenimiento orientados a aumentar la vida útil de los elementos y evitar cortes en el funcionamiento del sistema.

Palabras claves: Falla eléctrica, Empresas de Ferrocarriles del Estado, Aisladores de cerámica, Efecto joule, Conexión puesta a tierra, Mantenimiento centrado en confiabilidad.



Abstract

This document contains the fault study occurred at the Ex Estación Maule, belonging to the Empresas de Ferrocarriles del Estado, which is located in the VII Region of Chile, where the details of the fault are explained. Also a photographic is exposed of the damage caused by the incident.

Due to the failure of the ceramic insulating structure located in the PK260/5 rail gantry, an improper circulation of current from the catenary supply system to the triangular supports of the gantry was initiated and later it was diverted in the direction of the facilities of the Technical Premises before mentioned. The aforementioned, added to the fact that the ground protection system was not in operation due to the theft by third parties of the copper bars belonging to the protection, generated a fire in the facilities of the Technical Site, interruptions in the operation of the system, losses of equipment, devices and decrease in the quality of service maintained by the state company.

Detailed technical used by the company, such as: voltage level, current and contactor systems. Characteristics present at the time of failure to expose the operating conditions of the system.

The main and secondary causes that led to the occurrence of the electrical fault are identified. The operating conditions and infrastructure present in the fault zone are determined.

The ceramic insulating elements are defined and analyzed, devices that directly influenced the occurrence of electrical failure, explaining characteristics, properties and forms of degradation suffered by these types of insulators.

A chronology of events and actions carried out that took place from the beginning of the failure in the PK260 / 5 portico to the moment in which the power supply cut by EFE officials was carried out.

The DigSilent PowerFactory software was used to carry out a simulation that would demonstrate the magnitude of the current generated by the incident. With the previous results it was possible to determine in an estimated way the temperature value reached in the fault zone.

The concept of reliability is detailed with its respective indexes and parameters, whose data can be implemented to maintenance plans aimed at increasing the useful life of elements and devices.

In addition, a series of recommendations are presented to prevent the failure from happening again, increasing the reliability and security of the system.

Keywords: Electrical failure, Empresas de Ferrocarriles del Estado, ceramic insulators, Joule effect, ground connection, maintenance centered on reliability.

Índice general

Introducción	1
Objetivos generales	2
Objetivos específicos.....	2
1 Antecedes generales.....	3
1.1 Descripción detallada del problema.	3
1.2 Empresa de Ferrocarriles del Estado.....	6
1.3 Estudio de la red de suministro de corriente continua de EFE en la zona de falla.(sistema de electrificación ferroviaria).	7
1.3.1 Voltaje.....	7
1.3.2 Corriente.	8
1.3.3 Sistema de contacto.....	8
2 Causas de falla y condiciones de trabajo.	10
2.1 Causas Principales.....	10
2.1.1 Destrucción del aislador de cerámico.	10
2.1.2 Ausencia del cable puesta a tierra.	12
2.2 Causas Secundarias.....	13
2.2.1 No interrupción del suministro eléctrico.....	13
2.2.2 Estructura de la red de EFE.....	13
2.3 Condiciones de Operación.....	13
2.4 Condiciones de Infraestructura.....	14
3 Simulaciones en DigSilent.....	16
3.1 Análisis de corriente en la zona de falla.....	16
3.2 Efecto Joule y temperatura alcanzada por falla.....	22
4 Análisis de Confiabilidad.....	28
4.1 Índices de confiabilidad.....	29
4.2 Parámetros de confiabilidad.....	30
5 Recomendaciones para el sistema.....	32
5.1 Recomendaciones para resolver falla en Empresas de Ferrocarriles del Estado.....	32

5.1.1 Aisladores de vitroresina	32
5.1.2 Capacitación a operadores ferroviarios.....	33
5.1.3 Conexión puesta a tierra.	33
5.2 Recomendaciones para aumentar confiabilidad en el sistema.....	33
5.2.1 Pruebas Hi-Pot.	33
5.2.2 Análisis Termográficos.	34
5.2.3 Mantenimiento centrado en confiabilidad.....	35
Discusión y conclusiones.....	37
Bibliografía.....	39
A Apéndices.....	41
A.1 Plano de operación de tráfico eléctrico.	41
A.2 Modelo usado en software DigSilent PowerFactory.	43
A.3 Propiedades de la cerámica y consideraciones	45
A.3.1 Características de los aisladores de cerámico.	45
A.3.2 Material Hidrofílico.	45
A.3.3 Propiedades Térmicas.....	45
A.3.4 Propiedades Mecánicas.	46
A.3.5 Propiedades Dieléctricas.	48
A.3.6 Degradación y desgaste de Aisladores de Cerámico.....	50
A.4 Cronología temporal de eventos.	52
A.5 Imágenes registradas del evento de falla en Empresas de Ferrocarriles del Estado.....	61

Introducción

En los futuros proyectos que tiene considerado Empresas de Ferrocarriles del Estado para sus usuarios, existe la idea del transporte de cien millones de pasajeros para el año 2020. Esta meta debe ser realizada cumpliendo un alto estándar de funcionamiento, asegurando la calidad de servicio del sistema y estando a merced de las distintas necesidades que posee su público en general.

Para lograr este objetivo la empresa debería implementar y mejorar medidas tanto de mantenimiento y protocolo ante fallas para que el escenario ocurrido el día 27 de Julio del año 2014 no vuelva a suceder, considerando las consecuencias que ésta falla conllevó, como fueron la disminución en la calidad de servicio, múltiples elementos y dispositivos totalmente destruidos y el daño en su totalidad a las instalaciones del local técnico ubicado en la ex estación Maule de la VII Región de Chile.

Dada la ocurrencia de la falla nombrada anteriormente, no es posible desarrollar de manera eficiente la misión y visión que tiene Empresas de Ferrocarriles del Estado, entregar conectividad y soluciones de transporte tanto de carga como pasajeros. Es por ésta razón que se generó la necesidad de realizar el estudio y análisis de lo ocurrido en el pórtico PK260/5, al momento que el aislador de cerámica presente en la estructura cedió e inicio la circulación indebida de corriente proveniente desde el sistema de alimentación de catenarias, hasta la entrada de las instalaciones del local técnico comprometido.

Con la búsqueda, análisis y explicación de las múltiples condiciones que se presentaron y favorecieron el siniestro en la ex estación Maule, se logran aclarar las razones de la falla. Sus principales motivos, tanto de desgaste de material y ausencia de protecciones correspondientes y las fallas humanas que tuvieron lugar en el desarrollo del incidente.

Se pretende generar un completo reporte y definición de características que estaban presentes en el sistema al momento que inició el incidente, dando paso a estudios y simulaciones para lograr tener una idea previa de la magnitud de corriente que llegó a alcanzar la falla a lo largo de los 53 minutos que se mantuvo energizado el sistema, donde con cada minuto transcurrido la magnitud de corriente se incrementaba, lo que generó a su vez un aumento en la temperatura de la zona comprometida en el pórtico PK260/5.

Empresas de Ferrocarriles del Estado está presente en la zona norte, centro y sur del territorio nacional, entregando conectividad al país desde 1884. Dado su nivel de trayectoria es que se ofrecen una serie de recomendaciones para evitar que ésta falla se vuelva a repetir, además se detallan métodos y recomendaciones para prevenir fallas de tipo generales, aumentar la seguridad y confiabilidad del sistema.

Con todas las sugerencias entregadas en este informe, se pretende producir una mejora en las medidas de seguridad y funcionamiento de la red ferroviaria, además sus componentes. En el siguiente trabajo se pretende demostrar que existen medidas que pueden ser aplicadas para generar una optimización en el servicio ofrecido por la empresa.

La organización de Empresas de Ferrocarriles del Estado posee proyecciones de trabajo y logros a ser alcanzados en un corto, mediano y largo plazo, pero para lograr los objetivos propuestos de la empresa estatal, deben ser considerados una serie de cambios que influyan e impacten en el desarrollo diario de actividades, desde funcionarios que se encuentren capacitados para desarrollar sus actividades hasta tener un nivel de infraestructura y materiales acorde a los nuevos retos y desafíos que pueda exigir el campo de transporte de pasajeros.

Objetivos generales

- Estudiar y evaluar las causas que condujeron a la destrucción de un centro de control de tráfico ferroviario.

Objetivos específicos.

- Estudiar la estructura de la red de suministro de EFE en la zona de falla.
- Estudiar la secuencia de eventos que condujo a la destrucción del centro de control de tráfico, así como las condiciones del sistema que posibilitaron lo anterior.
- Modelar la red en condiciones de falla y análisis de resultados obtenidos.
- Análisis de aisladores de cerámico, características, propiedades, vida útil y causas de degradación de elementos.
- Recomendaciones para evitar situación de falla del sistema y observaciones para evitar fallas de tipo generales en la red.

1 Antecedentes generales.

Con el fin de estudiar la falla eléctrica generada en el pórtico PK260/5, además de la posterior destrucción y pérdida de dispositivos del local técnico, se definen los siguientes datos a considerar.

1.1 Descripción detallada del problema.

El día 27 de julio del año 2014, aproximadamente a las 12:34 minutos en la VII Región del Maule se produjo la falla de un aislador de cerámica de soporte en el pórtico PK260/5, perteneciente a la red Sur de la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE).

Según observación y declaraciones del personal que se encontraba realizando labores de mantenimiento en la vía férrea de la zona de la ex estación Maule, se percataron de arcos eléctricos y chisporroteo provenientes de un pórtico del sector (pórtico PK260/5), con oportunidad del paso de un vehículo ferroviario por las instalaciones antes mencionadas con dirección Noreste. Con posterioridad, miembros del mismo equipo de trabajo percibieron la aparición de humo en el sector, revelando que el humo tenía origen en la parte superior del pórtico PK260/5.



Figura 1-1: Pórtico humeando en sector ex estación Maule – Registro fotográfico Empresa SSEC.

En el momento que el personal se acercó a las instalaciones del pórtico, se logró comprobar lo anteriormente descrito. El humo provenía de la parte superior de la estructura, específicamente de los ductos que no se encontraban en uso y que correspondían originalmente a una canalización de corriente de C.A. usada para la alimentación de sistema de señales, que quedaron instalados cuando se modernizó la red ferroviaria.

De la misma forma, se puede observar una parte del aislador destruido sobre el que pasa la barra del triángulo de soporte, la que, a su vez, hace contacto con el soporte vertical de la estructura metálica del pórtico.

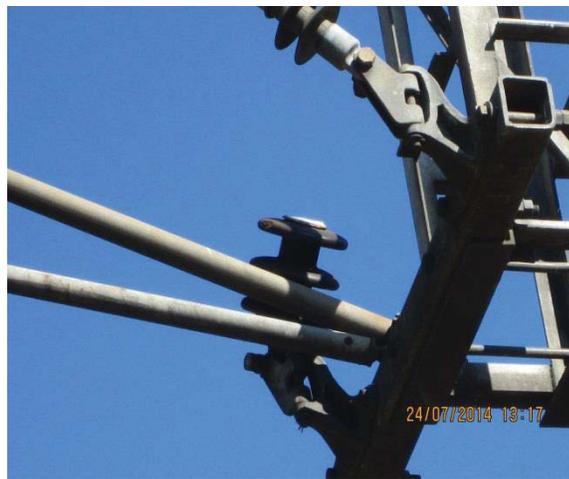


Figura 1-2: Aislador de cerámica operando incorrectamente – Registro fotográfico Empresa SSEC.

En el momento en que el aislador de cerámica cede, la barra tensora se liberó de su sujeción e hizo contacto con la estructura metálica, dejando energizado completamente al pórtico a un potencial de 3000[V] de corriente continua. Cuando se produce la electrificación del pórtico, la corriente circuló hacia tierra, (donde el negativo de la red de alimentación de suministro de C.C. se encuentra conectado al riel e instalados a tierra en la salida de la subestación rectificadora). También se debe considerar que el pie de la estructura del pórtico se encuentra instalado y apernado a la composición de concreto donde el contacto entre ambas estructuras es conductivamente precario.

Además, el conexionado de puesta a tierra de dicha estructura había sido sustraído, razón que facilitó la conductividad ofrecida por el ducto en desuso y de la estructura del ducto de bajada del pórtico, los cuales fueron una alternativa para la corriente de falla hacia tierra.

Si se toma en cuenta la época del año en que tuvo lugar la falla eléctrica, estación de invierno, el valor de la resistividad que ofrecía el terreno es un valor razonablemente bajo, en comparación a

otra estación del año. Dada esta razón el nivel de caída de tensión en las partes metálicas involucradas resultó con un valor considerable y por consiguiente el efecto térmico de la corriente de falla se concentró inicialmente en los tubos de fierro instalados en el pórtico que además de elevar su temperatura, fueron capaces de actuar como calefactores. En primer lugar, actuando sobre los conductores alojados en su interior y luego colaborando al calentamiento del terreno circundante, fenómeno que actuó como sumidero de la corriente de falla, elevando su temperatura a un valor tal, que generó la fusión del cableado y conductores al interior de la tubería de bajada del pórtico PK260/5.

Cuando la temperatura al interior de la tubería de bajada alcanzó el punto de fusión del termoplástico que forma parte de la aislación del conductor de baja tensión de C.A. de 220[V] proveniente del transformador tipo mochila adosado al pórtico, el conductor quedó al potencial de 3000[V] de la red de C.C. y por lo tanto, toda la red de alimentación del local técnico afectado quedó expuesta a una tensión considerablemente mayor para la cual fue diseñada en óptimas condiciones de trabajo.

1.2 Empresa de Ferrocarriles del Estado.

Empresa de los Ferrocarriles del Estado [1] [2], EFE, es una empresa estatal chilena encargada del transporte de carga y pasajeros por ferrocarril. Se encuentra presente entre Santiago y Chillán, en la región de Valparaíso y en la región del Biobío, con filiales como Metro Valparaíso, Tren Central, Ferrocarril Arica-La Paz, Biotren e INVIA.

Esta entidad tiene como misión proveer al país de soluciones para el transporte de pasajeros como también de carga, teniendo en cuenta la integración urbana y haciendo uso eficiente de los recursos con estándares de seguridad, calidad y confiabilidad. Su visión es ser referente nacional en transporte ferroviario de personas y mercancías, contribuyendo al progreso del país con soluciones que aporten valor agregado y calidad de vida a la comunidad, amigable con medio ambiente e innovadores.

EFE es la empresa pública con más historia en el país. Una historia que comenzó hace más de 130 años, cuando el Estado decide, en 1884, estatizar la mayoría de las vías particulares. Es así como nace la Empresa de los Ferrocarriles del Estado, cuyo principal rol era unir las obras ferroviarias que existían a lo largo de Chile, dando conectividad al territorio nacional.

Algunos proyectos a futuro, si se toman en consideración el crecimiento de ciudades, concentración de población, el aumento del parque automotriz y otros factores, estos generan niveles de congestión muy altos, por lo que hoy en día existe una necesidad y oportunidad para los ferrocarriles. Es por esto que la empresa EFE se puso como meta transportar 100 millones de pasajeros al 2020. Para ello, la empresa se encuentra desarrollando una serie de proyectos en las regiones de Valparaíso, Metropolitana, de O'Higgins y del Biobío.



Figura 1-3: Primeros vehículos ferroviarios de Empresas de Ferrocarriles del Estado, año 1884 – Memoria Empresas de Ferrocarriles del Estado, 2004.

1.3 Estudio de la red de suministro de corriente continua de EFE en la zona de falla.(sistema de electrificación ferroviaria).

El Sistema de alimentación [3], correspondiente al sistema de tracción de Empresas de Ferrocarriles del Estado, incluido los sistemas de trenes de sus cercanías, se caracteriza por el tipo de alimentación que posee, la tensión, la configuración de la red del sistema de alimentación, el tipo de conductor de alimentación (catenaria, tercer riel, conductor rígido aéreo. [4] A continuación, se presentan las características generales que están presentes en el servicio y desarrollo de actividades de EFE.

1.3.1 Voltaje.

Los distintos niveles de tensión comprendidos son sistemas de 110[kV], 66[kV]y 44[kV], donde se encuentran incluidos los pórticos de alta tensión además de los sistemas de generación y sistemas transmisores de energía provenientes de empresas generadoras, sistemas de distribución de media tensión y los distintos sistemas de rectificación y subestaciones de alta tensión.

Se tienen también niveles de 3[kV] en corriente continua, a las salidas de las subestaciones, incluidas las barras y pórticos de los sistemas de alimentación de catenarias y tracción de los vehículos de transporte.

Además se tienen niveles de tensión de 2,3[kV] correspondientes a los sistemas de servicios auxiliares de la red.

Para la alimentación de ferrocarriles son empleados niveles de tensión cercanos a 3 [kV] por la facilidad de uso de los motores de corriente continua (fuerte toque de arranque, fácil regulación). Si se desea tener velocidades mayores es necesario el uso de corriente alterna, de ésta manera se aumenta la tensión del sistema, existe menor caída de voltaje, reduce pérdidas y permite el uso de catenarias más ligeras.

Transporte o Aplicación	Voltaje de Alimentación
Metro - tranvía	600-750 [VCC]
Suburbano, metros	1200-1500 [VCC]
Líneas convencionales	3000 [VCC]
Líneas de alta velocidad	25000[VCA]

Tabla 1: Voltajes aplicados en sistemas de transporte.

Donde en este caso de estudio (Empresas de Ferrocarriles de Estado) son usados los niveles de tensión de líneas convencionales correspondientes a 3000 [V].

1.3.2 Corriente.

Los distintos tipos de suministros empleados en los distintos niveles de tensión que se tienen presente en los sistemas ferroviarios son: corriente alterna y corriente continua.

Al ser utilizados los niveles de 110, 66, 44 [kV] se usa corriente alterna para el transporte de la energía presente en los distintos sistemas.

La alimentación de los vehículos ferroviarios es suministrada en media tensión, lo que significa que la corriente usada es de tipo continuo.

La energía que consume todo el sistema de tracción se alimenta a través de las líneas de distribución de corriente alterna provenientes de las centrales generadoras que llegan a subestaciones de tracción para su transformación en corriente continua y permitir la alimentación de las redes ferroviarias, sistemas de catenarias, y otros. Se alimentan redes de cercanía, y se emplean niveles de tensión bajos, los cuales corresponden a niveles de 2.3 y 3 kV, en estas aplicaciones es usada corriente continua en la aplicación directa de sistemas de tracción y servicios auxiliares.

1.3.3 Sistema de contacto.

El sistema de contacto define como son alimentados eléctricamente las distintas unidades y vehículos de tracción existentes en la red ferroviaria.

La catenaria es el elemento encargado de la distribución de la energía en corriente continua a los vehículos ferroviarios. Esencialmente está formada por cables e hilos conductores, mensajero e hilo de contacto, conectadores, aisladores, elementos de seccionamiento y protección, así como de los componentes necesarios a su sustentación, tales como: postes, pórticos metálicos rígidos y flexibles, cables de acero, tensores y de sustentación, además de fijaciones especiales utilizadas en puentes, viaductos y túneles. Según su tecnología constructiva, puede ser fija o auto compensada, con contrapesos, que garanticen el nivelamiento del hilo de contacto y consecuentemente el contacto con los pantógrafos, para las diferentes temperaturas.



Figura 1-4: Catenaria - Tecnología de la catenaria [16].

Es definido como pantógrafo el dispositivo presente en los vehículos ferroviarios responsable por la captación de la energía de tracción. Es esencialmente constituido por un arco, donde son fijados los elementos de contacto, preso de una forma elástica a un cuadro formando un conjunto cuya masa está equilibrada por resortes, de forma de garantizar un determinado esfuerzo estático, cuando está en contacto con la catenaria, que se mantiene constante gracias a una disposición cinemática adecuada. Si son obedecidos los límites climáticos operacionales y características de diseño considerado, el contacto entre la catenaria y el pantógrafo se mantiene constante por sus respectivos comportamientos dinámicos.



Figura 1-5: Pantógrafo - Tecnología de la catenaria [16].

2 Causas de falla y condiciones de trabajo.

La falla por la cual se vio afectado el local técnico y sus distintos componentes de operación, además de elementos de tipo estructurales pertenecientes al sistema de suministro eléctrico, elementos puesta a tierra de la instalación y otros, se considera que tiene una causa matriz la cual desencadenó una serie de eventos posteriores que terminaron finalmente con la inutilización de la instalación en el recinto de la ex estación Maule.

Se tiene también una combinación de factores, condiciones operativas y condiciones de infraestructura que terminaron por dañar de manera considerable los equipos de control y señalización presentes en el local técnico.

2.1 Causas Principales.

A continuación, se presentan y explican los puntos principales de la ocurrencia de falla en la ex estación Maule.

2.1.1 Destrucción del aislador de cerámico.

Según la información recopilada por los testigos presenciales en el momento del inicio de la falla en el recinto de la ex estación Maule, se produjo una secuencia de chispas y arcos eléctricos en la zona de la sección vertical de la estructura de soporte de la línea de contacto. Las chispas y el arco subsiguiente, fueron consecuencia del contacto de la barra del triángulo de soporte de la línea de contacto con la estructura de la porción vertical de soporte. Este evento se desarrolló debido a la destrucción del aislador de cerámica, elemento que debía ser capaz de separar la barra de la estructura auxiliar vertical, la cual se encuentra energizada a potencial de tierra a través del pórtico y su conexión a tierra.

El aislador de cerámica que se encontraban presente al momento de la falla eléctrica en la ex estación Maule y las condiciones medioambientales que se podrían tener en la VII Región de Rancagua, donde se presentan temperaturas muy altas durante los veranos que pueden llegar hasta $35 - 40[^\circ\text{C}]$ y una sensación térmica muy baja durante los periodos de invierno $-5[^\circ\text{C}]$ que

es por debajo del punto de congelación del agua. Se presentaron una serie de factores que llevaron al deterioro y pérdida del aislador comprometido.

Los cambios de temperatura, la contaminación medioambiental, la radiación ultra violeta, golpes y esfuerzos de envejecimiento son los factores que se desarrollaron en el momento que el aislador cedió llegando a su inutilización por la acción de micro fracturas y cambio de continuidad de la superficie del elemento.

Las microfisuras forman parte del deterioro de los aisladores de tipo cerámico. Éstas se generan en la superficie del dispositivo, en las cuales ingresa humedad por las variaciones de temperatura que se producen en la zona geográfica, frente a bajas temperaturas el agua se condensa y genera el congelamiento del líquido al interior del elemento. Cuando se congela el agua aumenta su volumen y por consecuencia, el tamaño de la fisura por el cual hizo ingreso en un inicio, al ser repetidos estos cambios de estado del agua durante los días y noches las microfisuras aumentan su tamaño y longitud a grietas.

Según la imagen, se aprecia que el aislador soportaba un esfuerzo de compresión, sin embargo, debido a la carga vertical del pantógrafo sobre la línea de contacto, es posible que el esfuerzo sobre el aislador cambiara a una fuerza de tracción. Además, la circulación constante por parte de trenes que se encontraban en la zona a una velocidad considerable, se generan oscilaciones en el sector de la cabina y el pantógrafo del transporte. A través del contacto alimentador del tren se transmite el esfuerzo oscilatorio al brazo triangular y por consiguiente al aislador. También se agrega el esfuerzo producido por el roce del material de desgaste del pantógrafo con la línea de alimentación de 3 [kV] que de igual forma aporta carga sobre el aislador.



Figura 2-1: Aislador de cerámico en zona de falla – Registro fotográfico Empresa SSEC.

Con lo expuesto anteriormente, se aprecia que el aislador se sitúa sometido a una serie de cargas de tipo dinámico que, a lo largo del tiempo de uso, exponen debilidades por parte del aislador generando puntos y zonas vulnerables. En la red de corriente continua de EFE los aisladores de cerámica en uso posiblemente forman parte de los dispositivos instalados pertenecientes al realizarse la electrificación de la antigua segunda zona de FF.CC. del Estado, en la década de 1960,

por lo que es posible que (salvo sustituciones efectuadas con posterioridad) el elemento causante de la falla en la ex estación Maule tuviera cerca de 50 años de uso por lo menos.

En condiciones de funcionamiento normales, los aisladores de cerámica pueden tener una expectativa de vida común, pero exponiendo los elementos a todas las variables, efectos climáticos y cargas anteriormente expuestas, el funcionamiento irregular del aislador es un escenario posible.



Figura 2-2: Aislador de cerámico retirado luego de falla – Registro fotográfico Empresa SSEC.

2.1.2 Ausencia del cable puesta a tierra.

En conjunto con la degradación y destrucción del aislador comprometido, el pórtico PK260/5 se encontraba operando de manera incorrecta, ya que las barras de cobre pertenecientes al sistema de protección de malla puesta a tierra, habían sido sustraídas por terceros, lo que generó el mal funcionamiento de la protección de la zona.

La ausencia del cable puesta a tierra del pórtico PK260/5, provocó que la corriente de falla no alcanzara la magnitud suficiente para permitir la correcta operación de las protecciones de sobrecorriente de las subestaciones más cercanas al punto de falla, también se considera la velocidad de crecimiento de la corriente que dificultó la tarea de las protecciones correspondientes.

Este factor provocó la energización de la torrecilla, una tubería adosada al pilar del pórtico PK260/5 (que en su interior se ubica la línea de acometida de 220[V] que se dirige y llega a las instalaciones del local técnico Maule proveniente desde el transformador tipo mochila). Toda esta energía es descargada a tierra por la tubería energizada a 3000[V], ya que la tierra eléctrica del pórtico había sido robada por desconocidos dando paso al incorrecto funcionamiento del sistema.

2.2 Causas Secundarias.

Además de ser definidas las causas principales del siniestro, se detallan una serie de puntos que contribuyeron al mal funcionamiento y desarrollo de la falla eléctrica en la ex estación Maule.

2.2.1 No interrupción del suministro eléctrico.

En más de una ocasión se le fue comunicado y advertido al personal perteneciente a despacho eléctrico de EFE del desarrollo y existencia de una falla eléctrica en la red ferroviaria, pero por razones desconocidas y por otorgarle prioridad al paso de vehículos ferroviarios, se hizo caso omiso y no fue llevado a cabo el corte de suministro de energía en el sistema.

En los 52 minutos que duró la exposición de los conductores y elementos a las altas temperaturas no se efectuó un correcto procedimiento ante este escenario de falla hasta el momento en que se produce una explosión en las instalaciones del local técnico de la ex estación Maule, dada ésta razón, se deduce que el personal encargado de tráfico ferroviario de la red no se encontraba capacitado para desenvolverse de manera correcta ni segura ante la catástrofe ocurrida en la ex estación Maule. Donde la importancia del correcto desarrollo del servicio ferroviario no fue considerado ni tampoco el cuidado por el material existente en la zona.

2.2.2 Estructura de la red de EFE.

La morfología y estructura presentes en la red de operación de tráfico ferroviario en la zona de falla, posee una configuración de suministro empleada en las subestaciones, éstas se encuentran dispuestas y conectadas a un solo conductor, con todos los espacios de aire cerrados. Como consecuencia de lo anterior, al momento del suceso del siniestro, la corriente de falla se vio alimentada por todas las subestaciones que se encontraban en las cercanías de la zona.

Al no existir una red de trabajo segmentada por zonas, la falla no logró ser aislada en un tramo de la vía ferroviaria, por consiguiente, el desperfecto no fue localizado con rapidez ni resuelto con mayor facilidad, considerando tiempo de despeje y el corte total del funcionamiento del sistema de la zona.

2.3 Condiciones de Operación.

Con lo planteado en los puntos anteriores, se infiere que, tanto las causas principales y secundarias de la falla no llegan a ser suficientes o no son causas necesarias para la destrucción que ocasionó el acontecimiento o tema central de este estudio y que culminó con el incendio y destrucción del Local Técnico y equipos periféricos dañados.

Por datos de registro se sabe que desde el inicio del chisporroteo, humo y arcos eléctricos generados en la estructura del pórtico PK260/5, hasta el corte del suministro eléctrico a la red de Corriente Continua, transcurrieron aproximadamente 53 minutos, tiempo en donde se inició una circulación de corriente proveniente desde el sistema de alimentación hasta las instalaciones del local técnico.

Este evento fue comunicado de manera oportuna al personal de operaciones y despacho eléctrico, pero en atención a requisitos operativos no se procedió a la suspensión y corte del suministro eléctrico ya que, al momento de la ocurrencia de la falla, se encontraba en funcionamiento un tren en el sector de la zona afectada y se le dio preferencia a la circulación de vehículos ferroviarios en la vía.

Posteriormente, a las 12.42 horas, nuevamente es solicitado el corte de suministro energético y la petición no es atendida nuevamente debido al tráfico de trenes en la zona. Vuelve a ocurrir el mismo evento a las 13.09 horas. A las 13.20 horas se genera una explosión hasta que finalmente a las 13.22 horas se procede al corte del suministro eléctrico.

Los daños producidos en la instalación del local técnico de la ex estación Maule no mantenían características de pérdida total hasta aproximadamente las 13.10 horas. Luego a las 13.20 horas (momento en el cual se produce la explosión) se materializa toda pérdida de elementos y dispositivos del local técnico, además se deja en evidencia el poder destructivo de la falla eléctrica en cuestión.

Durante los primeros minutos de ocurrencia de la falla eléctrica resulta evidente que el nivel de destrucción y daños provocados al local técnico fueron mínimos y, posteriormente, con el transcurso del tiempo, el deterioro fue creciendo hasta ocurrir la explosión dejando consecuencias de tipo irreversibles para el sistema y su funcionamiento. Por lo tanto se deduce que, de haberse suspendido el corte de corriente con la debida oportunidad, es decir, antes de que el calor generado en el ducto que contenía los conductores de corriente alterna de 220 [V] fuese capaz de fundir el material aislante de los cables y estos quedaran al potencial de la red de corriente continua a 3000 [V], se hubiera evitado un gran daño tanto a los distintos componentes como así también al local técnico y su funcionamiento correspondiente.

2.4 Condiciones de Infraestructura.

La red de suministro de corriente de 3000 [V], encargada de la alimentación de vehículos ferroviarios en la zona de la VII Región de Maule cuenta con 15 subestaciones rectificadoras dispuestas a lo largo del tendido ferroviario.

Para la alimentación de las locomotoras y los sistemas de tracción se usa una línea de contacto sólida de cobre, que se encuentra suspendida desde la catenaria formada también por material de cobre.

Cada subestación alimenta un tramo de conductores y entre cada intervalo existen espacios de aire y equipo de maniobra que permiten a cada subestación alimentar individualmente su tramo o, mediante el equipo de maniobra, alimentar todo el sistema en forma común, distribuyendo las corrientes individuales de acuerdo a su tensión de terminales y a la distancia relativa al o los consumos requeridos en un determinado periodo. Al momento del acontecimiento de la falla, todos los espacios de aire se encontraban cerrados, lo que se simulaba una sola línea o un solo conductor mediante el cual circuló la corriente proveniente de todas las demás subestaciones aledañas al lugar de la falla donde el aislador había cedido.

Las subestaciones poseen protecciones apropiadas a su operación. Para el presente caso de estudio, las que adquieren una mayor importancia son las protecciones de sobrecorriente temporizada, éstas tienen por finalidad proteger las subestaciones cuando existen sobrecargas del sistema y protecciones de corriente súbita o instantánea cuyo objetivo es detectar cortocircuitos en base a la rapidez de crecimiento de la corriente.

Al momento en que se desarrolla la falla en la ex estación Maule, de acuerdo con la forma y la topología de la red de suministro de corriente continua, todas las subestaciones son potenciales proveedores de corriente para alimentar de corriente a la falla, con las restricciones dadas por las distancias que cada subestación que encuentre del punto de falla y eventualmente por la configuración del tap y la tensión de impedancia que los transformadores posean en cada caso. Por lo recién indicado, la corriente de falla se considera suministrada por una serie de fuentes, de las cuales las subestaciones que estaban más cercanas al punto de falla no detectaron condición de falla durante el intervalo de tiempo que duró el evento.

Si la configuración de la red hubiese sido de tipo segmentada en las subestaciones o los espacios de aire hubieran estado abiertos para su correcta operación, la detección de la corriente de falla habría sido identificada por la subestación más cercana operando su protección de sobrecorriente. Con respecto a la no operación de la protección de corriente instantánea, se considera que la falla no fue un fenómeno franco a tierra, sino que, debido al material que se encontraba presente en la estructura, la suciedad y contaminación además de la pintura de las partes estructurales involucradas, se generó una resistencia considerable al inicio de la falla, que posteriormente debido al calentamiento de las partes en contacto y los ductos enterrados con la tierra que la rodeaba, se fue reduciendo paulatinamente hasta el punto de alcanzar el valor de corriente aportado por todas las subestaciones aledañas del sector a la ex estación Maule. Este valor de corriente fue capaz de causar la elevación de temperatura del ducto de bajada de corriente alterna hasta causar la fusión y cristalización del terreno circundante y la fusión del aislante del conductor de corriente alterna de baja tensión.

Se debe considerar que el ducto de bajada del transformador (tipo mochila) se encontraba aterrizado en la entrada del local técnico, es por esto que, esta estructura ayudó a la circulación de la corriente de falla proveniente del sistema de alimentación.

3 Simulaciones en DigSilent.

3.1 Análisis de corriente en la zona de falla.

Una de las interrogantes más importantes en este caso de estudio es conocer la magnitud de la corriente alcanzada por la falla a lo largo de los 52 minutos que se mantuvo energizado el sistema. Éste parámetro ayuda a generar una idea previa de los alcances destructivos de la falla en las instalaciones del ex local técnico.

Para ello se utilizó el software de simulación DigSilent PowerFactory para modelar la red en la zona afectada. El modelo de la red fue basado en los planos de vía de operación de tráfico ferroviario eléctrico, el cuál puede ser analizado en el apéndice de este documento.

Las distintas subestaciones fueron diseñadas como fuentes continuas de 3000[V], con resistencias internas de 0,2 [Ω], fueron usadas un total de 15 subestaciones (la más cercanas al punto de falla), entre otras características de simulación que se presentan a continuación.

Datos a considerar	
Voltaje S/E	Fuentes de 3000 [V]
Resistencia Interna S/E	0.2 [Ω]
Número de S/E	15
Distancia entre S/E	Distancias reales, basadas en plano de tráfico ferroviario eléctrico
Método Simulación	ANSI/IEEE 946 (DC)
**Resistencia de falla	$R_1+R_2+R_3+R_4$

Tabla 2: Características de simulación red ferroviaria.

El modelo de la red usado en el software DigSilent puede ser analizado en la sección apéndice de este documento.

**Para el cálculo estimado de la resistencia de falla a considerar en la simulación obtenida, se usa lo siguiente:

$$R_{falla}: R_1+R_2+R_3+R_4 \quad (3-1)$$

$$R_{falla}: \text{Cable Tirante (Acero) + Estructura trafo (Hierro) + Tubo bajada (Hierro) + Tierra del lugar} \quad (3-2)$$

Donde se considera que la corriente toma camino por los siguiente sectores desde la tubería del pórtico PK260/5 hasta la entrada del local técnico.

$$R_{falla}: [7.2x10^{-7} + 8.9x10^{-8} + 8.9x10^{-8} + (4.5\sim 6.5)][\Omega] \quad (3-3)$$

$$R_{falla1}: 4.500000898$$

$$R_{falla2}: 6.500000898$$

Con lo que definen los siguientes valores de resistencias de falla. Mediante los datos anteriores se ejecutan las simulaciones pertinentes que se presentan a continuación.

				DigSILENT PowerFactory 15.1.7		Project:	
						Date: 8/24/2017	
Short-Circuit Calculation User Selection Method : ANSI/IEEE 946 (DC)							
				Approximation Calculation / Min. Short-Circuit Currents			
Short-Circuit Duration Fault Clearing Time (Ith) : 1,0000 (s) Fault Impedance Resistance, Rf : 4,5000 Ohm Inductance, Lf : 0,0000 mH				Load Flow Initialisation : No Joint Resistance : 0,001000 (Ohm)			
Study Case: Destrucción LT Maule				Annex: / 1			
Fault Location		Req [Ohm]	Leq [mH]	Ik [kA]	ip [kA]	Tn [ms]	RR [kA/s]
Línea 8 50 [%]		0,475636	0,001667	0,603	0,603	0,004	1799999,9950
Partial Source Contribution							
DC Batteries		Req [Ohm]	Leq [mH]	Ikb [kA]	ipb [kA]	Tb [ms]	RR [kA/s]
Subestación Espejo		6,012589	0,025000	0,026	0,026	0,004	119999,9997
Subestación Guindo		5,825219	0,025000	0,027	0,027	0,004	119999,9997
Subestación Bulnes		5,075739	0,025000	0,044	0,044	0,005	119999,9997
Subestación Cocharcas		4,888370	0,025000	0,052	0,052	0,005	119999,9997
Subestación Collipulli		5,825219	0,025000	0,031	0,031	0,004	119999,9997
Subestación Graneros		5,450479	0,025000	0,033	0,033	0,005	119999,9997
Subestación Hospital		5,637849	0,025000	0,029	0,029	0,004	119999,9997
Subestación Laja		5,450479	0,025000	0,035	0,035	0,005	119999,9997
Subestación Lirios		5,263109	0,025000	0,037	0,037	0,005	119999,9997
Subestación Monte Aguila		5,263109	0,025000	0,039	0,039	0,005	119999,9997
Subestación Panguilemo		4,701000	0,025000	0,061	0,061	0,005	119999,9997
Subestación Reinaco		5,637849	0,025000	0,032	0,032	0,004	119999,9997
Subestación Rengo		5,075739	0,025000	0,043	0,043	0,005	119999,9997
Subestación San Fernando		4,888370	0,025000	0,051	0,051	0,005	119999,9997
Subestación Villa Alegre		4,701000	0,025000	0,061	0,061	0,005	119999,9997

Cuadro 1: Resultados simulación, resistencia interna 4.5 [Ω].

		DigSILENT PowerFactory 15.1.7		Project: Date: 8/24/2017			
Short-Circuit Calculation User Selection Method : ANSI/IEEE 946 (DC)							Approximation Calculation / Min. Short-Circuit Currents
Short-Circuit Duration Fault Clearing Time (Ith) : 1,0000 (s) Fault Impedance Resistance, Rf : 6,5000 Ohm Inductance, Lf : 0,0000 mH		Load Flow Initialisation : No Joint Resistance : 0,001000 (Ohm)					
Study Case: Destrucción LT Maule		Annex: / 1					
Fault Location	Req [Ohm]	Leq [mH]	Ik [kA]	ip [kA]	Tn [ms]	RR [kA/s]	
Línea 8 50 [%]	0,616596	0,001667	0,422	0,422	0,003	1799999,9950	
Partial Source Contribution							
DC Batteries	Req [Ohm]	Leq [mH]	Ikb [kA]	ipb [kA]	Tb [ms]	RR [kA/s]	
Subestación Espejo	8,012589	0,025000	0,021	0,021	0,003	119999,9997	
Subestación Guindo	7,825219	0,025000	0,021	0,021	0,003	119999,9997	
Subestación Bulnes	7,075739	0,025000	0,030	0,030	0,004	119999,9997	
Subestación Cocharcas	6,888369	0,025000	0,034	0,034	0,004	119999,9997	
Subestación Collipulli	7,825219	0,025000	0,024	0,024	0,003	119999,9997	
Subestación Graneros	7,450479	0,025000	0,024	0,024	0,003	119999,9997	
Subestación Hospital	7,637849	0,025000	0,022	0,022	0,003	119999,9997	
Subestación Laja	7,450479	0,025000	0,026	0,026	0,003	119999,9997	
Subestación Lirios	7,263109	0,025000	0,027	0,027	0,003	119999,9997	
Subestación Monte Aguila	7,263109	0,025000	0,028	0,028	0,003	119999,9997	
Subestación Panguilemo	6,700999	0,025000	0,039	0,039	0,004	119999,9997	
Subestación Reinaco	7,637849	0,025000	0,024	0,024	0,003	119999,9997	
Subestación Rengo	7,075739	0,025000	0,030	0,030	0,004	119999,9997	
Subestación San Fernando	6,888369	0,025000	0,034	0,034	0,004	119999,9997	
Subestación Villa Alegre	6,700999	0,025000	0,039	0,039	0,004	119999,9997	

Cuadro 2: Resultados simulación, resistencia interna 6.5 [Ω].

De los cuadros 1 y 2, en la columna I_k , se puede apreciar que la corriente alcanzada por la falla en la ex estación Maule alcanza una magnitud 603 y 422 [A] respectivamente.

Los aportes de corriente de las subestaciones se ven representados por los siguientes gráficos:

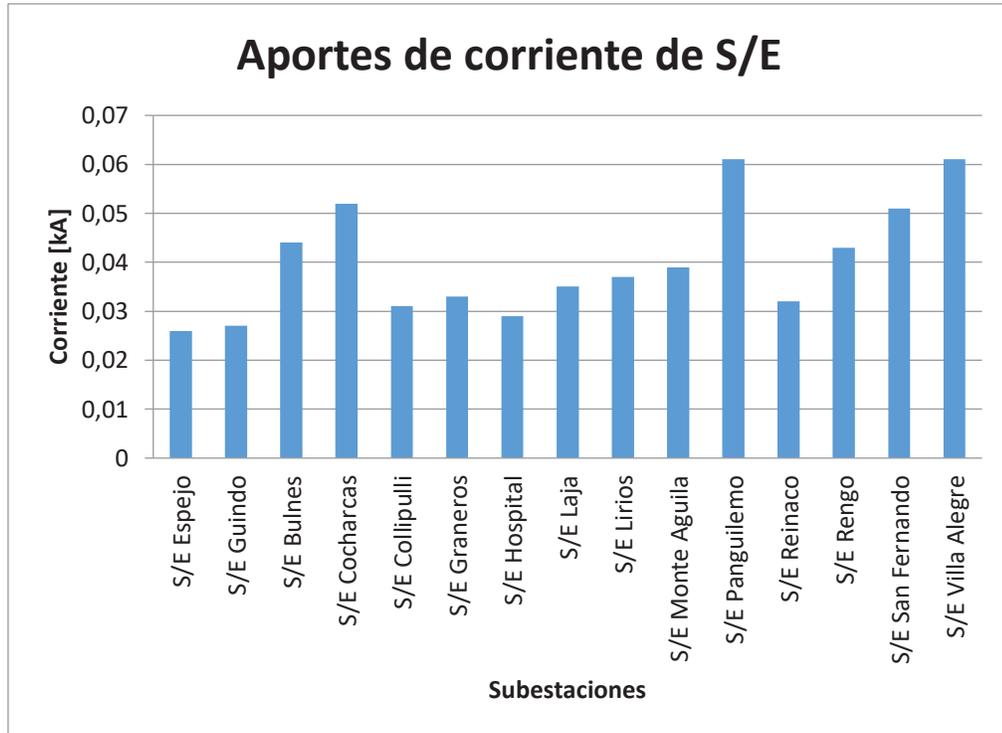


Figura 3-1: Gráfico de aporte de corrientes S/E, resistencia interna 4,5 [Ω].

Se observa que el mayor aporte de corriente es por parte de las subestaciones Panguilemo y Villa Alegre, con un total aproximado de 61 [A] por cada subestación. Cabe mencionar que éstas instalaciones se encontraban aledañas a la zona de falla, es decir, son las subestaciones más próximas al pórtico PK260/5. Es por esto que la circulación de corriente que se generó de las subestaciones anteriormente nombradas hacia la zona de falla son mucho mayores que la corriente aportada por otras subestaciones más lejanas, ya que la disipación de corriente es mucho menor con respecto a las demás instalaciones, cuyas corrientes debían recorrer un trayecto mayor hacia la zona donde ocurrió la falla.

En éste caso se alcanzó una magnitud de corriente de falla de 603 [A], ya que se considera una resistencia interna del sistema de 4,5 [Ω].

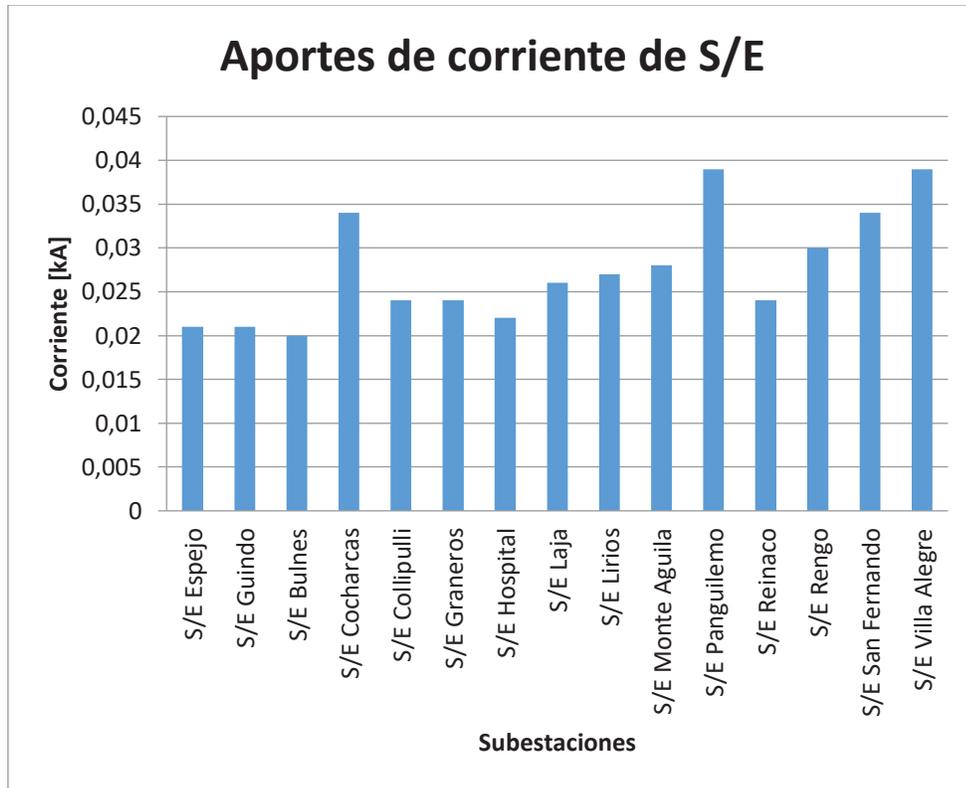


Figura 3-2: Gráfico de aporte de corrientes S/E, resistencia interna 6,5 [Ω].

En el segundo escenario y considerando sólo la variación de la resistencia interna de falla del sistema de 6,5 [Ω], se logra apreciar que el mayor aporte de corriente es por parte de las subestaciones Panguilemo y Villa Alegre, con un total aproximado de 39 [A] por cada subestación. Al igual que el escenario anterior, éstas instalaciones son las más próximas a la zona de falla y al pórtico PK260/5, por lo que el aporte de corriente a la falla es mayor, comparando con las otras subestaciones más alejadas del punto de falla, las cuáles, dado el trayecto y circulación de la corriente se generó una mayor disipación de ésta con respecto al punto de falla.

En éste caso se alcanzó una magnitud de corriente de 422 [A].

Analizando los dos escenarios anteriores, se puede apreciar una notable diferencia en los aportes de corrientes realizados por cada una de las subestaciones de la red ferroviaria. Esto se debe al cálculo de la resistencia de falla, valor que varía de 4,5 a 6,5 [Ω] según el escenario de simulación y además basándose en la ley de ohm se sabe que a una mayor resistencia, menor es el paso de corriente por el conductor que la circula.

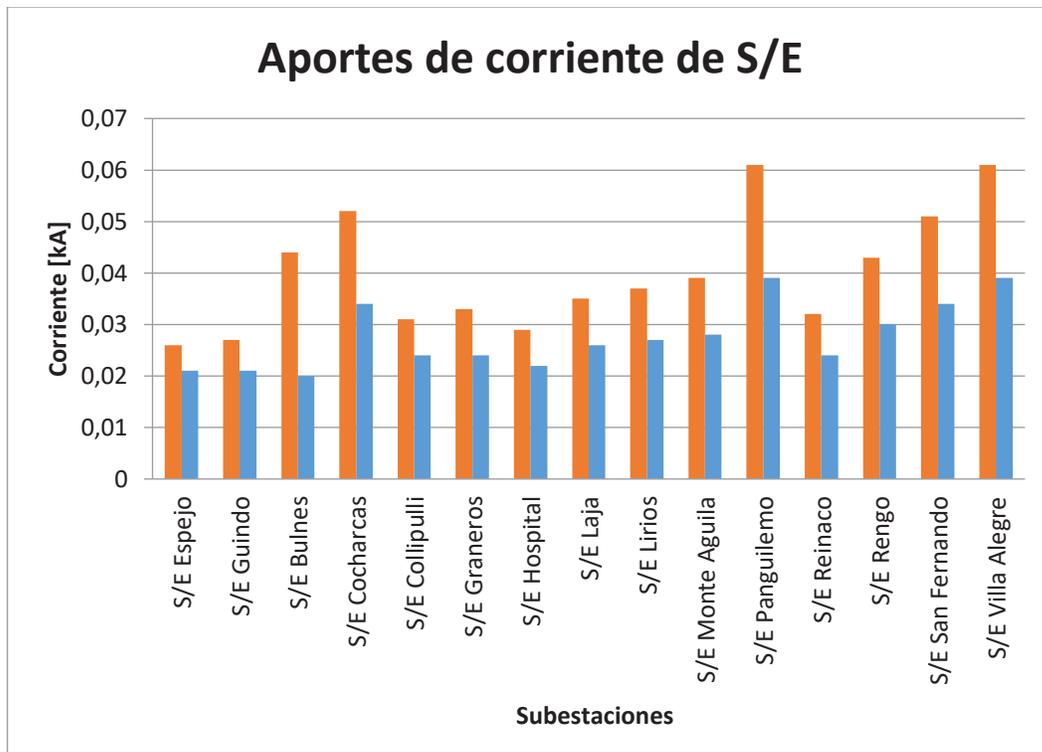


Figura 3-3: Comparación de gráficos, aporte de corrientes S/E.

Como observación de los valores de la corriente suministrada por cada S/E, se puede apreciar que el aporte más importante fue realizado por las dos subestaciones más próximas al punto de falla, porque se genera una menor disipación de corriente con respecto a la zona de falla, mientras que las demás subestaciones colaboraron en orden decreciente de acuerdo a la distancia en la que se encontraban con respecto al pórtico PK260/5, generando una disipación de corriente mayor y un aporte de corriente menor.

Se puede deducir también que, al comienzo de la falla, la magnitud de la corriente alcanzada en los primeros segundos, no es suficiente para activar las protecciones correspondientes de las subestaciones cercanas, protección de sobrecorriente y voltaje. En los primeros minutos de falla, la totalidad de la corriente se estaba derivando a tierra hasta que posteriormente, a medida que se fue reduciendo la resistencia en la zona del ducto del pórtico y la tierra, se generó más calor y se alcanza la temperatura necesaria para deteriorar el aislante del cable de baja tensión y fundir los materiales presentes en el pórtico comprometido.

3.2 Efecto Joule y temperatura alcanzada por falla.

Se analiza lo sucedido con el conductor del pórtico PK260/5 (triángulo del pórtico) al momento en que ocurrió el contacto (destrucción del aislador de cerámica) y su posterior energización, manteniéndose energizado con 3000 [V] provenientes del sistema de catenarias, además de ser sometido a una circulación de corriente estimada de 603 [A], según la simulación analizada en el

punto anterior. La corriente se desplazó desde el punto de contacto y bajó por la estructura metálica que se encontraba en el pórtico, para así finalmente llegar hasta el local técnico. Cuando se produjo el aumento de calor de los elementos involucrados, esto produjo la fusión de material aislante del conductor de baja tensión y provocó las pérdidas del local técnico y otros dispositivos.

Para entender el término de efecto Joule, primero se debe aclarar el concepto de calor. Este concepto se define como el desprendimiento de energía por parte de un sistema o elemento como causa del movimiento de las partículas que componen el sistema.

El efecto Joule es un fenómeno de tipo irreversible en el cual, si se tiene un conductor por donde circula una corriente eléctrica, parte de la energía de tipo cinética que se encuentra en los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del dentro del mismo material conductor por el que circulan y que a su vez provoca un aumento de la temperatura del elemento conductor.

El calor que es generado por el efecto Joule puede ser calculado mediante la ley de Joule, ésta nos explica que el calor generado por una corriente eléctrica al pasar a través de un conductor, tiene una relación directamente proporcional a la resistencia con el cuadrado de la intensidad de corriente y el tiempo que dura la circulación de corriente por el conductor.

A continuación, se presentan las siguientes expresiones:

Potencia:

$$P = V \cdot I \quad (3-4)$$

Energía desarrollada en una unidad de tiempo:

$$E = P \cdot t \quad (3-5)$$

Ley de Ohm:

$$V = I \cdot R \quad (3-6)$$

Donde:

$$\begin{aligned} V &= \text{Voltaje} \\ I &= \text{Intensidad de corriente} \\ t &= \text{Tiempo} \end{aligned}$$

Reemplazando (3-4) a (3-5):

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (3-7)$$

Reemplazando (3-6) a (3-7):

$$E = I^2 \cdot R \cdot t \quad (3-8)$$

Se tiene también:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3-9)$$

Donde:

ρ = Coeficiente de proporcionalidad o resistividad del material
 l = Longitud del elemento
 S = Area de las seccion transversal del elemento

Reemplazando (3-9) a (3-8):

$$E = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot t \quad (3-10)$$

Con los siguientes datos, se puede construir la expresión de energía desarrollada en un periodo de tiempo (5-7).

Datos	
Corriente	603 [A]
Resistividad del material (hierro)	8.9×10^{-8} [$\Omega \cdot m$]
**Superficie de tubería	4.19×10^{-4} [mt^2]
Tiempo de circulación de corriente	3120 [sg]
Largo del pórtico	4 [mt]

Tabla 3: Datos para cálculo de energía desarrollada.

**Cálculo de superficie de tubería de bajada de pórtico PK260/5:

Datos	[mt]
Radio exterior tubería de bajada	0.0279
Radio interior tubería de bajada	0.0254
Espesor tubería de bajada	0.005

Tabla 4: Datos para cálculo de superficie de tubería.

Donde:

Superficie de tubería de bajada:

$$\pi (R_{ext}^2 - r_{int}^2) = 4.19 \times 10^{-4} [m^2] \quad (3-11)$$

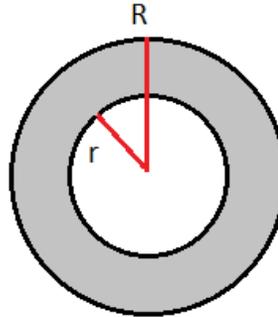


Figura 3-4: Sección interior tubería de bajada.

Por lo tanto, de la expresión (3-10) se tiene que la energía desarrollada a lo largo de los 52 minutos corresponde a:

$$E = \frac{603^2[A] \cdot 8.90 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m] \cdot 3120[sg] \cdot 4[mts]}{4.19 \times 10^{-4} [m^2]} \quad (3-12)$$

$$E = 954,3198[KJoules] \quad (3-13)$$

Basados en los cálculos y considerando imágenes del caso, se puede notar la tubería de bajada del pórtico PK260/5 (material hierro) y además una sección de aislación interior de material polietileno. La gran cantidad de energía liberada a lo largo del tiempo de energización del ducto se dio por el crecimiento de la corriente en el tiempo a medida que se reducía la resistencia del punto común a tierra.



Figura 3-5: Ducto de bajada pórtico, material aluminio – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura 3-6: Aislación de tubería de bajada, material polietileno reticulado – Registro fotográfico Empresa SSEC.

Los puntos de fusión de estos materiales se presentan en la siguiente tabla adjunta:

Tipo de material aislante	Punto de fusión [�C]
Polietileno reticulado	250
Aluminio	660,3
Cobre	1083
Hierro	1538

Tabla 5: Tabla punto de fusión de materiales.

Se debe mencionar también que en el interior del ducto se encontraban los conductores de cobre que fueron fundidos por la alta temperatura que se alcanzó en la zona de falla. De ello se deduce que la temperatura alcanzada a los largo de los 52 minutos que duró la falla eléctrica superó los 1083 °C. Temperatura necesaria para fusionar material de cobre. Los materiales, polietileno reticulado y aluminio, según se muestra en las imágenes, fueron fundidos a los pocos minutos de ocurrencia de la falla.

4 Análisis de Confiabilidad.

Hoy en día, alrededor del 30% de todas las fuentes mundiales de energía primaria son usadas para la generación de energía eléctrica y casi toda esta energía es transmitida mediante sistemas de tensión alterna de 50Hz o 60Hz. En la actualidad es más importante que nunca el diseño y la operación de sistemas eléctricos que no solo tengan la máxima eficiencia practicable además deben poseer el más alto grado de seguridad y confiabilidad.

En sistemas eléctricos, el no disponer de electricidad en momentos inesperados conlleva graves consecuencias productivas. Un corto periodo de tiempo sin electricidad puede causar la detención de un motor en alguna faena productiva; pérdida de datos almacenados en algún computador o también la interrupción o alteración de alguna cadena en generación, por lo que en sistemas eléctricos se debe tender a la máxima confiabilidad posible debido a que las posibles consecuencias son muy relevantes.

La confiabilidad [5] [6], es la probabilidad de que un equipo o un sistema cumpla con su misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un periodo determinado.

El nivel de confiabilidad requerido por un sistema debe ser establecido de acuerdo con la criticidad de las cargas del mismo y debe basarse en estudios que contemplen las necesidades o características del proceso en términos de disponibilidad, seguridad, mantenimiento y fiabilidad.

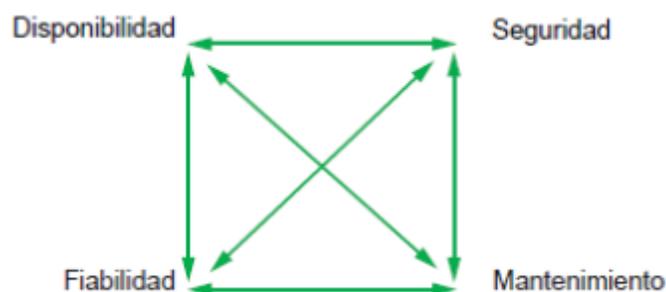


Figura 4-1: Componentes de la garantía de funcionamiento en confiabilidad – La confiabilidad en los sistemas eléctricos, Schneider Electric [6].

La disponibilidad de un sistema representa el porcentaje del tiempo en que el sistema funciona correctamente. La fiabilidad de un sistema es la capacidad de un equipo a funcionar de manera correcta durante la mayor parte de tiempo posible bajo condiciones establecidas. Esta aptitud

está ligada a su robustez y su capacidad de permanecer en operación cuando se encuentra trabajando en su límite máximo.

La mantenibilidad se refiere a la aptitud del sistema a ser reparado rápidamente, está ligada al valor de *MTTR* (mean time to repair).

El término de seguridad, es la probabilidad de evitar un suceso catastrófico que genere daños graves o ponga en riesgo la vida de las personas.

4.1 Índices de confiabilidad.

Los parámetros de confiabilidad son utilizados para redes eléctricas los cuales pretenden cuantificar la calidad del servicio que es presentado por la red en cualquier punto de consumo. En algunos casos también se definen índices globales para el sistema como un todo. Entre los cuantificadores más populares se encuentran:

- Tasa de falla (λ): Es la cantidad de veces que un consumidor se ve privado del suministro de electricidad por unidad de tiempo. Se considera como unidad de tiempo el periodo de 1 año, ya que la disponibilidad eléctrica normalmente es alta. El inverso de la tasa de falla se conoce como tiempo promedio entre fallas.
- Tiempo de reparación (r): Tiempo que representa la acción de cambio o reparación del "elemento causante del problema". Es el tiempo promedio que dura una falla de suministro expresado en horas. El inverso del tiempo de reparación se conoce como tasa de reparación (μ).
- Energía no suministrada (*ENS*): Término que representa la cantidad de energía que la empresa pierde de vender. Este índice tiene gran relevancia para estas empresas, ya que puede ser usado como parámetro de decisión al evaluar distintas alternativas de mejoramiento de calidad de servicio.
- Carga promedio desconectada (L): Cantidad de consumidores afectados por los cortes de suministro.
- Tiempo anual de desconexión esperado (U): Es la indisponibilidad total de servicio durante un año, medido en horas. Se obtiene como la multiplicación de la tasa de falla por su duración promedio.

4.2 Parámetros de confiabilidad.

Éstos nos permiten evaluar el comportamiento operacional de instalaciones, sistemas y equipos. En base a estos datos se puede implementar planes de mantenimiento orientados a aumentar la vida útil de los elementos y evitar cortes en el funcionamiento del sistema.

- **MTTF (Mean time to failure):** Parámetro que indica el tiempo promedio que es capaz de operar un equipo o sistema in interrupciones, dentro de un periodo de tiempo considerado.
- **MTTR (Mean time to repair):** Es la medida de tiempo de reparación de un equipo o sistema. Mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación cuando una unidad se encuentra fuera de servicio.
- **MTBF (Mean time between failures):** Éste parámetro corresponde a la suma de los parámetros anteriores. Nos indica el tiempo o intervalo más probable entre el arranque ya aparición de alguna falla del equipo o sistema, es decir, el tiempo medio transcurrido hasta la ocurrencia de una falla. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del equipo. Estimador muy importante y representativo del comportamiento de un equipo. Para determinar el valor de este indicador, se deben usar datos históricos registrados del comportamiento del equipo.

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (4-1)$$

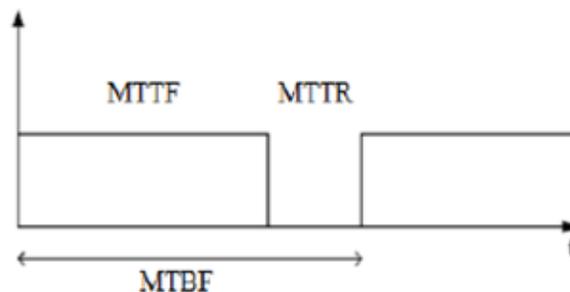


Figura 4-2: Relación entre MTTF, MTTR y MTBF – Confiabilidad en Sistemas Eléctricos, 1999 [5].

Cada uno de los parámetros anteriormente nombrados poseen un inverso, los cuales corresponden a una determinada tasa:

- Tasa de falla:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (4-2)$$

- Tasa de reparación:

$$\mu = \frac{1}{\text{MTTR}} \quad (4-3)$$

- Frecuencia de falla:

$$f = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (4-4)$$

Estos indicadores anteriormente nombrados también entregan información adicional al análisis de confiabilidad de un sistema.

5 Recomendaciones para el sistema.

En una institución como Empresas de Ferrocarriles del Estado donde la calidad de servicio de transporte hacia los usuarios tanto externos e internos no puede verse afectado por interrupciones severas se presentan los siguientes puntos y recomendaciones a considerar para que un siniestro de esta magnitud no se vea repetido y además se efectúan las opciones necesarias para aumentar la confiabilidad del sistema en su totalidad y así evitar su mal funcionamiento.

5.1 Recomendaciones para resolver falla en Empresas de Ferrocarriles del Estado.

En los siguientes puntos se dan a conocer alternativas disponibles a ejecutar, con el fin de generar un cambio en el funcionamiento y gestión de Empresas de Ferrocarriles del Estado, considerando alternativas para evitar fallas futuras como la sucedida en la ex estación Maule.

5.1.1 Aisladores de vitroresina.

Se debe realizar el cambio completo de todos los elementos aisladores de cerámica, ya que estos dispositivos poseen al menos 50 años de uso, tiempo el cual su vida útil y correcto funcionamiento ya no se encuentran en óptimas condiciones, pasando a un estado de obsolescencia y dando paso a un desempeño negativo para la seguridad y calidad de servicio del sistema ferroviario.

La reposición de elementos de cerámica se debe realizar y sustituir por las nuevas tecnologías usadas en aplicaciones ferroviarias como lo son los aisladores de vitroresina, que son elementos compuestos por una matriz de plástico o resina reforzada con fibra de vidrio. Según el caso de estudio, se tiene que las principales ventajas de este nuevo aislador son su resistencia mecánica frente a golpes y esfuerzos dados por su flexibilidad y mejor comportamiento ante la contaminación, además de ser buen aislante térmico y eléctrico. Es también un material hidrofóbico, por lo que repele el agua y en posibles escenarios que se produzcan microfisuras en la superficie del aislador, el agua no haría ingreso al interior del elemento por lo que su vida útil superaría a los aisladores de cerámica actualmente en uso.

5.1.2 Capacitación a operadores ferroviarios.

Al no estar presente en la red un seccionamiento a lo largo de la vía de ferrocarril o en caso de ausencia de sistemas de protecciones capaz de operar frente a las condiciones de falla, se recomienda la inclusión al equipo de trabajo de despacho eléctrico personal capacitado que sea capaz de reaccionar de manera eficiente a los distintos escenarios de falla que se puedan generar en la red ferroviaria, al igual que operarios en las subestaciones que puedan apoyar en la toma correcta de decisiones, basándose en la situación de falla comprometida.

Los operadores deben tener conocimiento pleno de los procedimientos, funcionamiento del sistema y dispositivos. Se deben tener claras las posibles consecuencias de no llevar a cabo un corte de suministro eléctrico ante un evento de falla con características de catástrofe.

5.1.3 Conexión puesta a tierra.

Se debe realizar mantención o restitución de las conexiones de puesta a tierra, principalmente de estructuras metálicas que se encuentren amenazadas a sufrir daños o destrucción ante las fallas de partes estructurales o vandalismo por parte de terceros individuos. Y en el posible escenario de robo frecuente de los elementos de puesta a tierra, se recomienda la sustitución de la estructura por su equivalente resistivo de otro material con menos atractivo comercial con respecto al cobre con su barra respectiva de puesta a tierra y a este conjunto posicionarlo bajo una cierta profundidad más la aplicación de concreto para evitar su sustracción.

5.2 Recomendaciones para aumentar confiabilidad en el sistema.

En los siguientes puntos se dan a conocer alternativas disponibles a realizar para generar un cambio e impacto en funcionamiento del sistema de Empresas de Ferrocarriles del Estado, centrándonos en el correcto desempeño de la red en su totalidad para no enfocarse en una falla específica.

5.2.1 Pruebas Hi-Pot.

Son pruebas que verifican el aislamiento de un producto eléctrico para que sea capaz de entregar seguridad y proteger al usuario de un shock eléctrico. Las pruebas hi-pot ofrecen seguridad y confiabilidad en accesorios como cables, circuitos y motores.

Esta prueba puede ayudar a descubrir fallas de diseño, defectos, pequeños espacios entre piezas conductoras y tierra, cables sueltos, conductores contaminados, problemas de terminales, errores de tolerancia en cables.

Existen tres tipos de pruebas de alta tensión o Hi-Pot:

1. Prueba de ruptura dieléctrica: Se realiza el incremento de voltaje hasta que el dieléctrico falla o se rompe para así determinar la carga más alta de voltaje que el cable puede soportar.
2. Prueba de tensión de voltaje de rigidez dieléctrica: En esta prueba una carga estándar de voltaje es aplicada, la corriente de fuga se controla y debe estar por debajo de un límite preestablecido por una cantidad de tiempo determinado.
3. Prueba de resistencia de aislamiento: Se determina el valor de resistencia de los productos insulados. Tanto la tensión como la corriente se usan para calcular la resistencia de aislamiento de los dispositivos.

5.2.2 Análisis Termográficos.

Éstas son pruebas que se realizan a distintos elementos y dispositivos electricos, el análisis termográfico es una potente herramienta en el campo del mantenimiento predictivo, con la que se puede monitorear la temperatura de un objeto sin la necesidad de entrar en contacto físico con éste.

Se pueden identificar problemas de funcionamiento en una fase temprana, registrarlos y resolverlos antes de que puedan producir algún efecto negativo mayor para el funcionamiento en la totalidad del sistema.

Si se tienen los equipamientos técnicos adecuados y también el conocimiento del operador, ésta herramienta ayuda a detectar de manera rápida zonas de alta resistencia, desbalances de carga o sobrecargas durante la operación de maquinarias.



Figura 5-1: Zonas de alta resistencia no deseadas en subestaciones - Guía de termográfica para mantenimiento predictivo, FLIR.

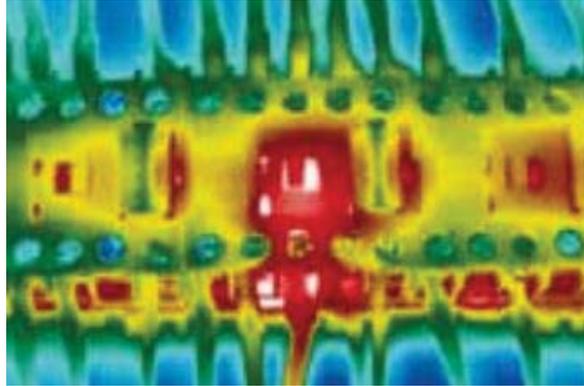


Figura 5-2: Puntos susceptibles a incendios- Guía de termográfica para mantenimiento predictivo, FLIR.

5.2.3 Mantenimiento centrado en confiabilidad.

Es un proceso mediante el cual se determina que hacer para que los elementos físicos continúen desempeñando las funciones para las que han sido diseñados. Se deben identificar los elementos, equipos a los cuales se les aplicará el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad. Los equipos elegidos son los que suponen un riesgo para la red y su funcionamiento, aquellos elementos que si llegaran a fallar producirían un efecto crítico para el funcionamiento de la red en su totalidad, tomando en cuenta que cada equipo tiene entornos de trabajo distintos (temperatura, presión, esfuerzos dinámicos).

Con la aplicación de mantenimiento centrado en confiabilidad se podría lograr o siguiente:

- Obtención de amplia base de datos de mantenimiento del sistema de operación.
- Mayores y mejor análisis de cada uno de los componentes de la red.
- Mayores rendimientos operativos.
- Detección de fallas antes de que ocurran.
- Mayor seguridad y protección para la red.

Una vez seleccionados los elementos a estudiar, el proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad responde a una serie de preguntas:

1. ¿Cuál es la función del equipo?
Contexto operacional, función principal y secundaria del elemento.
2. ¿De qué forma puede fallar el equipo?
Razones por las cuales el elemento deja de hacer lo que el usuario quiere que haga.

3. ¿Cuál es la causa de la falla?
Ya identificada la falla se debe identificar los hechos que la han causado.
4. ¿Qué sucede si falla el equipo?
Efectos de la falla que describen que pasaría si no se realizan las tareas para anticipar, prevenir o evitar los incidentes.
5. ¿Cuál es la consecuencia de la falla?
Se evalúa la importancia de la falla, el impacto que pueda tener sobre el sistema en su totalidad.
6. ¿Qué se puede hacer para prevenir el fallo?
Se plantean casos de mantenimiento preventivo para evitar o reducir las consecuencias.
7. ¿Qué sucede si no se puede prevenir el fallo?

Se consideran un rediseño del sistema, sus características y especificaciones de los equipos. Se añaden o sustituyen elementos y agregan tareas de rutina para mantenimiento.

Discusión y conclusiones

En el documento fueron explicadas todas las características de funcionamiento del sistema en la zona de falla afectada. Se consideraron y detallaron tanto las causas principales como secundarias que se fueron desarrollando desde el inicio de la circulación de corriente del sistema de alimentación de catenarias, hasta las instalaciones del local técnico destruido.

En base a lo anteriormente explicado se formularon metodologías y una serie de recomendaciones a considerar para resolver el desarrollo de situaciones no adecuadas y de ésta manera asegurar un correcto funcionamiento tanto del sistema, así también, un desempeño óptimo del personal encargado de la operación de tráfico ferroviaria.

Se sabe que la falla eléctrica fue producto de una serie de eventos y condiciones perjudiciales, todos de naturaleza negativa, como la degradación constante y poca o nula mantención de los elementos aisladores de cerámica, el robo frecuente de las barras que formaban parte del sistema de protección puesta a tierra del pórtico PK260/5, la mala inducción y conocimientos precarios por parte de los funcionarios de Empresas de Ferrocarriles del Estado ante algún escenario de falla existente en la red, la morfología y estructura de la red ferroviaria que contenía todos los espacios de aire cerrados simulando de ésta manera sólo un conductor por el cuál circuló la corriente y no permitió activar el funcionamiento de las protecciones eléctricas presentes en las subestaciones aledañas, entre muchas otras observaciones y consideraciones que formaron parte negativa al escenario desarrollado de la falla.

Una de las motivaciones más importantes que se debe considerar en un futuro para Empresas de Ferrocarriles del Estado, es el generar una correcta instrucción a los funcionarios y trabajadores de la entidad, para de ésta manera lograr desenvolverse adecuada y coherentemente a los retos y complicaciones que ofrezcan el desarrollo del servicio correspondiente al transporte de carga y pasajeros. Deben tener claros los procedimientos y protocolos a seguir ante algún evento y/o escenario negativo, no dudar ni tener desconocimiento del funcionamiento de la red, del mantenimiento necesario a realizar a los distintos elementos y dispositivos, además de tener un criterio formado para la toma de decisiones ante alguna situación complicada que comprometa la calidad de servicio.

La magnitud de la corriente alcanzada por la falla en la ex estación Maule ilustra el poder destructivo que tuvo el siniestro y ayuda a plantear una serie de motivaciones, planes de acción a

llevar a cabo para así evitar que una situación como ésta vuelva a ocurrir y ponga en juego la credibilidad tanto de la empresa como de este tipo de transporte público. Dado lo anterior es que se proyectan posibles soluciones para que en un futuro el desempeño de las actividades sea más seguro y confiable.

Para que sea corregido el evento de falla se deben asumir y corregir los distintos factores que tuvieron lugar y contribuyeron a la destrucción del local técnico. Se deben implementar los planes de mantenimiento expuestos anteriormente, concientizar al personal con un objetivo de mejora de trabajo en equipo y además de la creación de protocolos ante eventos de falla. De ésta manera se lograría un funcionamiento eficiente y seguro tanto para los usuarios como para el personal de la empresa

En el desarrollo de este estudio se consideran modificaciones a realizar en la red para así generar un cambio e impacto en su funcionamiento diario, asegurando una correcta proyección a las distintas metas y objetivos apuntados por Empresas de Ferrocarriles del Estado.

Bibliografía

- [1] Empresas de Ferrocarriles del Estado, Norma de Seguridad de Electrificación, Santiago de Chile, 2006.
- [2] Empresas de Ferrocarriles del Estado, Norma de seguridad de material rodante general, Santiago de Chile, 2005.
- [3] R. Moreno-Chuquén, Sistemas de Alimentación Eléctrica a Sistemas de Transporte Masivo tipo Metro, 2008.
- [4] J. L. Juan, Diseño de las Subestaciones Eléctricas de Tracción y Centros de Auto Transformación Asociados de una Línea Ferroviaria de Alta Velocidad, Barcelona, Escola Técnica Superior d' Enginyeria, 2010.
- [5] P. (PRIEN), Confiabilidad de Sistemas Eléctricos, Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile, 1999.
- [6] J.C.Orjuela, La Confiabilidad en los Sistemas Eléctricos, Schneider Electric.
- [7] N.R.O, Porcelana y su Aplicación en la Industria Eléctrica, Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2008.
- [8] D. Eléctrica, Aisladores para Líneas Eléctricas, U.N.T. Facultad del Rosario.
- [9] «Experiencia de la Evaluación de Aisladores Poliméricos para la red de 23,9 kV de ENELVEN,» de *II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica*, Venezuela, 2009.
- [10] B.U.Kingery, Introductions to Ceramics, John Wiley & Sons, 1976.
- [11] T. a. Technology, Recubrimientos Hidrofóbicos vs Recubrimientos Hidrofilicos & Usos de los Recubrimientos Hidrofóbicos.

- [12] M. W. F. Smith, Ciencias e Ingeniería de Materiales, 2004.
- [13] P. Forbes, «www.sciam.com,» Agosto 2009. [En línea]. Available: <http://www.sciam.com/article.cfm?id=self-cleaning-materials>.
- [14] T.-. P. S. a. Technology., Recubrimientos hidrofóbicos vs. recubrimientos hidrofílicos & Usos de los recubrimientos hidrofóbicos.
- [15] E. Charles, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering., Boston, Massachusetts: Mc. Graw-Hill., 1997.
- [16] J. Montesinos Ortuño, Tecnología de catenaria, 2002.

A Apéndices

A.1 Plano de operación de tráfico eléctrico.

A continuación, se presenta la imagen “plano de operación de tráfico ferroviario eléctrico”, el cuál fue usado para realizar la simulación de análisis de corriente en la zona de falla del punto 5.1 de este documento.

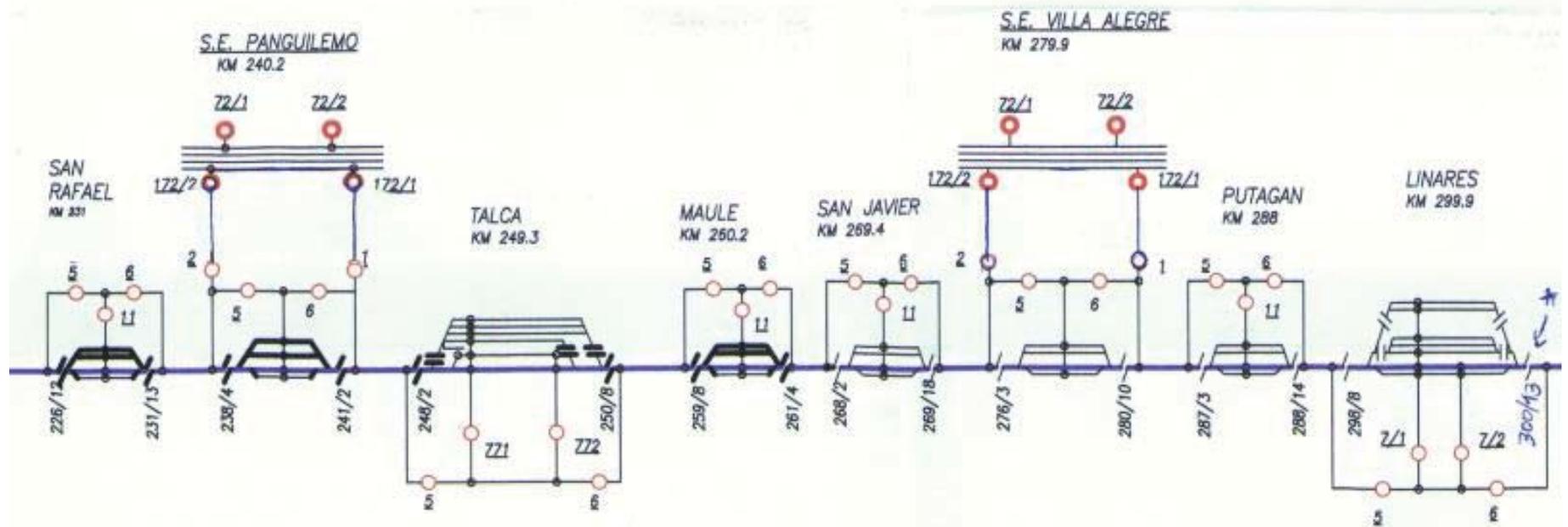


Figura A.1-1: Plano de operación de tráfico ferroviario eléctrico – Plano facilitado por Empresas de Ferrocarriles del Estado.

A.2 Modelo usado en software DigSilent PowerFactory.

A continuación, se presenta la imagen “Modelo red ferroviaria”, el cuál fue usado para realizar la simulación de análisis de corriente en la zona de falla del punto 5.1 de este documento.

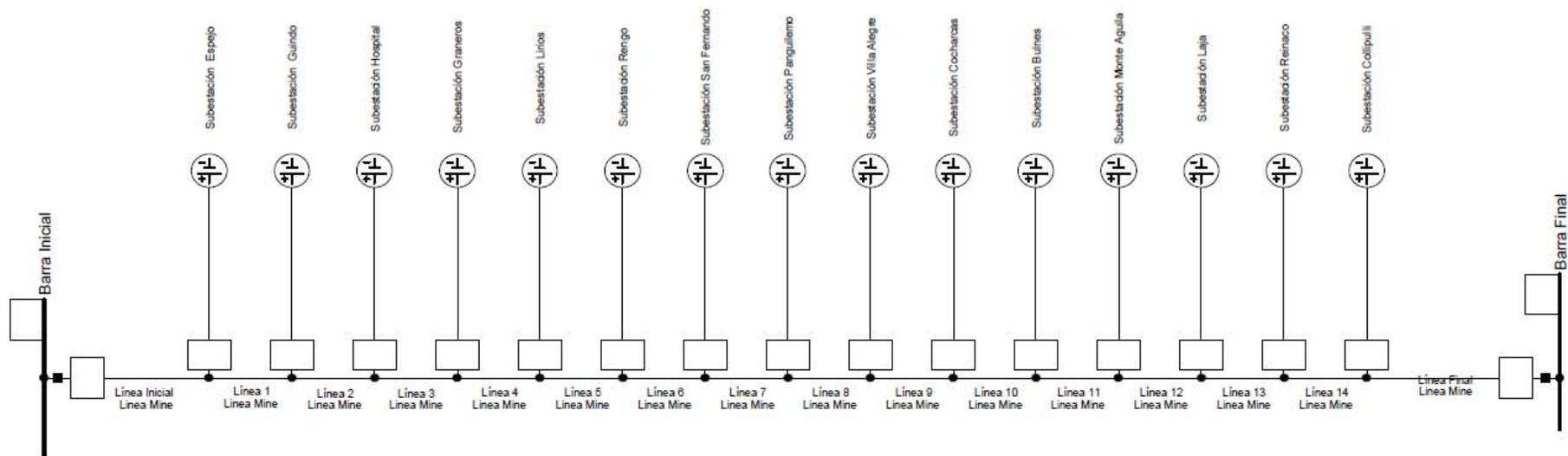


Figura A.2-1: Modelo usado para simulación de corrientes.

A.3 Propiedades de la cerámica y consideraciones

Estos elementos son fabricados de porcelana [7], el cual es clasificado como material inorgánico por lo que es un material capaz de soportar altas temperaturas y posee propiedades químicas la que lo vuelven resistente y muy poco vulneradas a los fenómenos naturales que podrían afectarlo.

La porcelana contenida en los aisladores poseen una estructura atómica vidriosa [8], ésta se caracteriza por ser amorfa y no tener una estructura definida lo cual le brinda propiedades térmicas (bajo coeficiente de expansión térmica), mecánicas (alto módulo de elasticidad) y dieléctricas. La porcelana o cerámica es una pasta de arcilla, caolín, cuarzo o alúmina a la cual se le da forma y mediante horneado se obtiene la cerámica para aplicaciones de uso eléctrico.

En aplicaciones eléctricas, los aisladores de cerámica se encuentran envueltos completamente por una superficie vitrificada la que tiene como función mantener sellada la cerámica o loza del elemento aislante hacia el medioambiente [9], de efectos tales como humedad que podría ser absorbida por la superficie porosa, suciedad localizada en la superficie del aislador, entre otras. Estos factores deterioran y alteran las propiedades aislantes de la cerámica, dando paso a descargas superficiales que pueden llegar a ocasionar fracturas o grietas en el aislador por el calor generado dada la alteración del elemento.

A.3.1 Características de los aisladores de cerámico.

A continuación, se presentan algunas de las características más importantes de los elementos de cerámico

A.3.2 Material Hidrofílico.

Una de las principales características de los aisladores de cerámica es su propiedad hidrofílica [10], la superficie del aislador es capaz de atraer el agua permitiendo que el elemento se moje produciendo una elevada humectabilidad que fácilmente fluye por el mismo removiendo y llevándose consigo el polvo y la suciedad [11] (el agua tiende a formar capas en vez de acumularse como gotas sobre el cerámico) y provocando como resultado un ángulo de contacto muy bajo entre el agua y el dispositivo.

El rendimiento eléctrico de los aisladores depende en gran parte de ésta característica que se genera en la superficie del aislador, además de los contaminantes como dióxido de carbono u otros contaminantes orgánicos provenientes del medio ambiente que pueden provocar corriente de fuga.

A.3.3 Propiedades Térmicas.

La mayoría de los materiales aislantes de cerámico poseen bajas conductividades térmicas, además de baja expansión de calor cuando se le aplican altas temperaturas, esto es debido al enlace iónico covalente. La diferencia de energía de la banda de conducción y la banda de covalencia en este tipo de material es muy grande, es por ésta razón que son buenos aislantes

térmicos. Debido a su resistencia al calor son refractarios y usados en aplicaciones metalúrgicas, químicas, vidrio, entre otras.

Las estructuras amorfas tienen una curva típica de expansión lineal con la temperatura, que cambia un cierto punto específico. El coeficiente de expansión térmica o dilatación se define como:

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} [10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \quad (\text{A.3-1})$$

Donde:

L = Longitud del aislador a temperatura ambiente.

ΔT = Incremento de la temperatura.

ΔL = Incremento de la longitud del aislador entre la temperatura ambiente y 100°C

Algunos materiales como el hierro y el aluminio poseen valores de coeficiente de dilatación de 12 y 23 respectivamente. Mientras que los aisladores de cerámico poseen un coeficiente de dilatación de $\alpha = 6 [10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$

A.3.4 Propiedades Mecánicas.

Otra propiedad de los aisladores de cerámica es su capacidad de elasticidad. Ésta cualidad caracteriza el comportamiento de los materiales elásticos según la dirección en la que se esté aplicando la fuerza sobre el elemento y puede ser calculado mediante un ensayo de tracción.

Este atributo tiene relación con las fuerzas de las uniones atómicas de las estructuras. Ocurre una situación similar con el coeficiente de expansión térmica, ya que las estructuras con bajos valores de expansión térmica tienen un alto módulo de elasticidad y mayor rigidez. Mecánicamente es un material frágil, puede soportar altos esfuerzos sin deformarse elásticamente y por ser un material frágil su curva de esfuerzo-deformación no posee zona de deformación plástica.

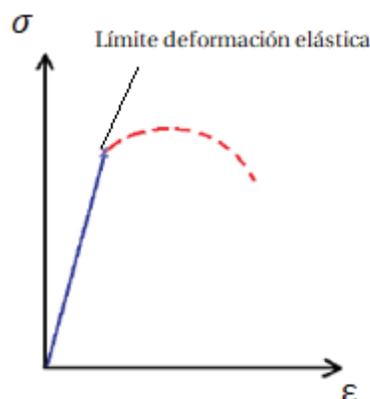


Figura A.3-1: Figura cualitativa Esfuerzo v/s Deformación - [7].

La gráfica de un material dúctil posee ambas zonas de trabajo, destacando los ejes de esfuerzo σ y deformación ϵ . Los materiales frágiles sólo poseen la parte correspondiente a la recta. La porcelana usada en aplicaciones eléctricas tiene gran resistencia mecánica a la flexión y compresión, además de una buena resistencia a la tracción y torsión.

A continuación, se presenta la siguiente tabla con algunos valores típicos de resistencias de cerámicas tanto para fenómenos de compresión, tracción y flexión.

Características	Por Vía Seca	Por Vía Húmeda	Colada
Resistencia a la tracción en [Kg/cm ²] (con esmaltado)	100-140	300-500	-
Resistencia a la tracción en [Kg/cm ²] (sin esmaltado)	70-140	240-300	-
Resistencia a la compresión en [Kg/cm ²] (con esmaltado)	3000-4000	4000-5500	4000-5500
Resistencia a la compresión en [Kg/cm ²] (sin esmaltado)	3000-3500	4000-4500	4000-4500
Resistencia a la flexión en [Kg/cm ²] (con esmaltado)	600-700	900-1000	900-1000
Resistencia a la flexión en [Kg/cm ²] (sin esmaltado)	300-600	400-800	400-800

Tabla A.3-6: Propiedades Mecánicas Cerámicos

A.3.5 Propiedades Dieléctricas.

Los aisladores de cerámico o porcelana poseen una constante dieléctrica con un valor aproximadamente 6 cuando se trabaja a 60 [Hz]. Por lo que si se utilizara la porcelana como dieléctrico en un capacitor de placas paralelas, la capacidad de este elemento es 6 veces mayor que si se tuviera vacío entre ellas.

La capacidad que tiene el aislador de albergar energía a voltajes altos es denominada rigidez dieléctrica, lo que corresponde al voltaje que puede soportar el elemento por unidad de longitud justo antes que se produzca una descarga a través de él.

El factor de pérdidas es una medida que posee el material en la cual se mide la energía eléctrica que se pierde en forma de calor por un condensador en un circuito de corriente alterna. Se define como:

$$\text{factor de pérdidas} = \kappa \cdot \text{tg}\theta \quad (\text{A.3-2})$$

Donde κ se define como la constante dieléctrica y θ el ángulo de desfase entre la corriente sinusoidal inducida en un capacitor con éste dieléctrico y corriente inducida con un dieléctrico libre de pérdidas.

A continuación, se presenta la siguiente tabla con algunos valores típicos de valores de características dieléctricas del cerámico y algunos materiales.

Material	Resistividad	Rigidez Dieléctrica	Constante Dieléctrica [κ]		Factor de Pérdidas	
	[$\Omega \cdot m$]	[Kv/mm]	[60 Hz]	[1 MHz]	[60 Hz]	[1 MHz]
Cerámica	10^{12} a 10^{13}	2 a 12	6	-	0,06	-
Esteatita	$>10^{12}$	6 a 11	6	6	0,008 a 0,090	0,007 a 0,025
Fosterita	$>10^{12}$	9,8	-	6	-	0,001 a 0,002
Alúmina	$>10^{12}$	9,8	-	9	-	0,0008 a 0,009
Vidrios soda-cálcicos	-	-	-	7,2	-	0,009
Sílice Fundida	-	-	-	3,8	-	0,00004

Tabla A.3-7: Propiedades Dieléctricas del Cerámico y otros materiales.

Propiedad	Unidad	Porcelana	Porcelana	Vidrio
		Silicosa	Aluminica	Endurecido
Permitividad (60-50 Hz, 20°C)	Aire=1	5,0 - 6,5	6,0 - 7,5	7,3 - 7,5
(1 MHz, 20°C)	Aire=1	4,8 - 5,6	5,0 - 6,5	7,1 - 7,5
Tangente de pérdida (60-50 Hz, 20°C)	$\times 10^{-3}$	10,0 - 25,0	12,0 - 30,0	15,0 - 60
(1 MHz, 20°C)	$\times 10^{-3}$	5,0 - 12,0	5,0 - 12,0	5,0 - 12,0
Resistencia a perforación (60-50 Hz, 20°C)	$[kV/mm]$	10,0 20,0	10,0 - 20,0	> 25,0
Resistencia a perforación por impulso (1/5 usg)	$[kV/mm]$	40,0 - 50,0	40,0 - 50,0	170 - 220
Resistividad volumétrica (r)				
20°C	$[\Omega \cdot m]$	10^{13}	10^{12}	10^{12}
300°C	$[\Omega \cdot m]$	10^6	10^{11}	$10^5 - 10^6$
Temperatura (Te) para $r = 10^6 \text{ ohm m}$	$[^\circ C]$	280 - 340	830 - 1070	270 - 400

Tabla A.3-8: Propiedades de materiales aisladores.

La proporción en la que se encuentren los feldespatos, cuarzo o sílice y arcilla o caolines determinarán las propiedades mecánicas, térmicas y dieléctricas de la porcelana, según el diagrama que se muestra a continuación:

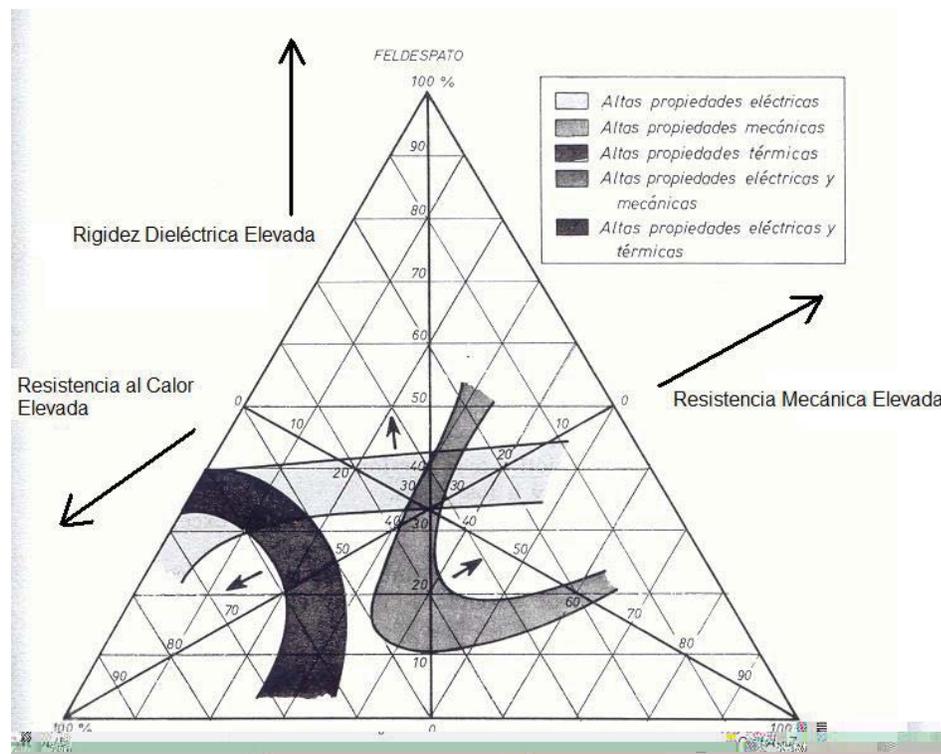


Figura A.3-2: Propiedades mecánicas, térmicas y dieléctricas de la porcelana - [8].

A.3.6 Degradación y desgaste de Aisladores de Cerámico.

Los aisladores de cerámico, después de un lapso de años sin presentar fallos o problemas de funcionamiento, se comienzan a deteriorar en un lapso breve de tiempo. Este deterioro se da principalmente por fenómenos de carácter mecánico y térmico.

Los resquebrajamientos se producen frecuentemente por las dilataciones del material que vincula las campanas entre sí o a estas con el soporte. Por ésta razón anterior, se puede atribuir el comportamiento defectuoso de los cementos utilizados y también a la dilatación o contracción de la campana exterior por la acción de las variaciones de temperatura.

En aquellos aisladores que se encuentran almacenados en depósitos, el deterioro es semejante a los que se encuentran instalados en funcionamiento, siempre y cuando que las condiciones climáticas a las que se encuentran expuestos sean iguales. Por el efecto de lluvia el agua es capaz de penetrar en fisuras existentes generando así la rotura total del elemento aislador.

Al paso del tiempo en los aisladores instalados, se van produciendo degradaciones en el material que lo forman, tales como:

- Encaminamiento, que es una degradación irreversible del material aislante y se da por la formación de surcos de descarga que se inician y desarrollan de manera superficial.
- La arborescencia es caracterizada por la formación de canales microscópicos dentro del material aislante los que pueden llegar a ser conductores, estos micro canales se pueden extender progresivamente en profundidad a través del cuerpo del material hasta que ocurra la ruptura o perforación eléctrica.
- La erosión no produce conducción, se forma en la superficie del material y se caracteriza por la pérdida de éste.

Con el envejecimiento climático aparecen en los aisladores trizados, cuarteos, y grietas. El trizado, aparece con el tiempo y se caracteriza por la aparición de partículas de la carga que forman una superficie rugosa hasta depósitos blancuzcos, mientras que el cuarteo es la aparición de micro fisuras de profundidades que no más allá de 0,1 [mm] y las grietas son fracturas de profundidades superiores a 0,1 [mm].

Con cualquier aislador es necesario conocer su resistencia mecánica y electromagnética. Al aplicar simultáneamente tensión eléctrica y mecánica, la resistencia mecánica disminuye alrededor del 20%. En el caso de los aisladores de porcelana, la resistencia mecánica se reduce aún más al pasar el tiempo por lo que se produce un envejecimiento acelerado.

Para evitar la destrucción del aislador, estos deben ser correctamente fabricados (no poseer defectos de fábrica) y no deben ser sometidos a esfuerzos mecánicos exagerados. Además de exigirle al fabricante las curvas de ensayo de duración.

Los aisladores de cerámico poseen un comportamiento basado en la curva de la bañera, la cual es una gráfica que representa los fallos durante el periodo de vida útil de un sistema o elemento. En ella se distinguen tres zonas de comportamiento:

Fallos iniciales: Etapa que se caracteriza por tener una alta tasa de fallos que desciende rápidamente con el tiempo. El fallo se puede producir inmediatamente o en un corto periodo de tiempo desde la puesta en funcionamiento del equipo, por razones como errores de diseño del elemento, defectos de fabricación, incorrecta instalación, desconocimiento del equipo por parte de los operarios, entre otros.

Fallos normales: Corresponde a un periodo de vida útil del elemento con una tasa de fallos constante y mucho menor, los fallos no se producen debido a causas propias del equipo, sino que por factores aleatorios y externos como accidentes fortuitos, mala operación o condiciones no adecuadas. Es el periodo de mayor duración, en el que se suelen estudiar los sistemas, ya que se supone que se reemplazan antes de que alcancen el periodo de envejecimiento

Fallos de desgaste: Ésta última etapa se caracteriza por una tasa de averías rápidamente creciente, debido a que los componentes pueden presentar fallas y errores por degradación de sus características en el transcurso del tiempo. Aún con reparaciones y mantenimiento, la tasa de fallo aumenta, hasta que resulta demasiado costoso el mantenimiento.

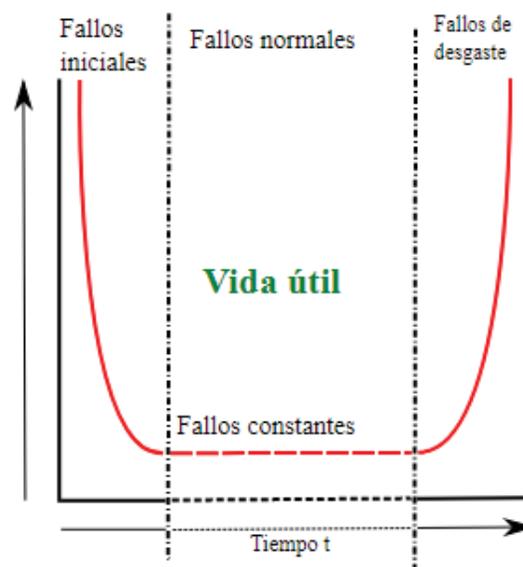


Figura A.3-3: Curva de la bañera, aisladores de cerámico – [15].

Las principales causas de deterioro de los aisladores son las siguientes:

- Defectos de fabricación que introducen tensiones internas.
- Porosidad del material (se ioniza el aire existente en los poros facilitando consecuentemente la perforación del aislador).
- Defectuosa distribución del campo eléctrico.
- Pequeña resistencia mecánica.
- Microfracturas superficiales con profundidades entre 0.01 y 0.1 [mm].
- Pérdida significativa del material aislante, irreversible y no conductora (erosión).
- Daños por arcos de potencia.
- Penetración de agua en forma líquida o vapor, causando el ablandamiento de cubierta o faldones (hidrólisis).
- Cambios en el color base del material aislante.
- Vandalismo

A.4 Cronología temporal de eventos.

El día 24 de Julio del año 2014 se llevó a cabo un cronograma con todos los eventos ocurridos al momento en que se inició la falla hasta que se llevó a cabo el corte de suministro eléctrico de manera definitiva, a continuación, se detallan los hechos de manera cronológica y también la persona o entidad encargada de la acción que se realizó.

Se deben tener las siguientes consideraciones:

- Se omitieron variados sucesos registrados por las moviolas, ya que, estas al tener un registro completo y continuo de todas las actividades y hechos ocurridos, existen datos que no son de utilidad para el caso de estudio.
- Se omitieron nombres de personal involucrado tanto de la empresa EFE y también por parte de la empresa fiscalizadora SSEC, para no comprometer al personal responsable.
- Se omitieron nombres de empresas involucradas al momento de la sucesión de los eventos.

Hora	Persona encargada	Detalle del evento
12:14	Técnicos Mantenimiento SSEC	Arribo paso a nivel Maule para tareas de mantenimiento preventivo de componentes de vías férreas.
12:15	Técnicos Mantenimiento SSEC	Personal de mantenimiento solicita autorización a CT (Control Tráfico EFE) para iniciar trabajos de mantenimiento en paso a nivel del sector. CT informa que deben esperar paso del tren proveniente desde el norte, luego de la operación podrían iniciar trabajos a realizar.
12:18:47	Moviola	Operador de tráfico EFE establece itinerario Maule-Sn Javier
12:22:02	Moviola	Salida de tren proveniente estación Talca, usa vía férrea Talca- Maule
12:27:18	Moviola	Tren en tránsito dirección norte a sur, usa vía férrea 1 de estación Maule.
12:28:06	Moviola Técnicos Mantenimiento SSEC	Tren en tránsito dirección norte a sur, usa vía férrea estación Maule. Es Divisado arco eléctrico por parte de personal en el pórtico PK260/5 al paso de tren.

12:34	Técnicos Mantenimiento SSEC	Desde distancia de 230[m], personal en el lugar observan humo (proveniente dirección sur-poniente) desde paso a nivel Maule. Se comentan sucesos con guardacruce quien alude a proveniencia del humo desde casas cercanas.
12:36	Técnicos Mantenimiento SSEC	Personal de mantenimiento observa que humo comienza a rodear parte del pórtico PK260/5 y se llega a la conclusión que la irregularidad no es proveniente desde casas cercanas. Se dirigen a las cercanías del lugar para observación y se percatan que el humo proviene desde tubería adosada al pórtico.
12:37	Técnicos Mantenimiento SSEC	Personal informa mediante vía telefónica situación a Jefe Zonal de empresa fiscalizadora Talca, quien indica informar inmediatamente a Despacho Eléctrico EFE

12:42	Técnicos Mantenimiento SSEC	<p>Personal de mantenimiento llama a Despacho Eléctrico EFE informando la situación y solicitando el corte inmediato de suministro.</p> <p>Despachador de turno indica que no puede ser cortada la corriente ya que viene en circulación un tren proveniente desde el sur.</p> <p>Se informa además al Despachador Eléctrico la emanación de humo del pórtico. Aún bajo éstas circunstancias, se da prioridad al paso del tren. Ante la gravedad de los sucesos, personal de mantenimiento solicita presencia de personal de EFE.</p>
12:45	EFE	<p>Se informa a personal capacitado de EFE para dirigirse a estación Maule para ver la gravedad de lo ocurrido.</p>
12:50	Técnicos Mantenimiento SSEC	<p>Se le informa a la autoridad (Jefe Zonal EF Talca) que el corte de suministro eléctrico no es llevado a cabo. Jefe Zonal se dirige a la zona de falla.</p>
12:50:06	Moviola	<p>Operador de Tráfico de EFE realiza itinerario Maule-Talca .</p>
12:59	Jefe Zonal SSEC Talca	<p>Arribo a zona de falla</p>

13:01:37	Moviola	Tren proveniente de estación San Javier, dirección sur a norte usa vía ferroviaria Maule-San Javier.
13:03	Jefe Zonal SSEC Talca	Se informa situación a especialista eléctrico quien indica que existe humo proveniente desde pórtico. Especialista indica evento a Despacho eléctrico EFE.
13:04:06	Moviola	Sistema procede orden de bajar barreras de paso a nivel Maule.
13:04:26	Moviola	Sistema registra que barreras se encuentran abajo.
13:05:29	Moviola	Tren en tránsito dirección sur a norte, usa vía férrea estación Maule.
13:05:36	Moviola	Tren en tránsito dirección sur a norte, libera vía férrea Maule-Sn Javier.
13:05:55	Moviola	Tren en tránsito dirección sur a norte libera un tramo de circuito de vía ferroviaria de estación Maule.

13:06:05	Moviola	<p>Sistema registra ingreso de tren en estación Maule, el cual sólo hace uso de una vía de circuito ferroviario.</p> <p>Tren en tránsito dirección sur a norte ocupa línea férrea de estación Maule.</p>
13:06:26	Moviola	<p>Sistema registra salida de tren en estación Maule (el cual deja de hacer uso de una vía de circuito ferroviario).</p> <p>Tren en tránsito dirección sur a norte ocupa línea férrea de estación Maule.</p>
13:06:40	Moviola	<p>Sistema da orden para subir barreras de paso a nivel localizado en cercanías de local técnico Maule.</p>
13:06:48	Moviola	<p>Sistema registra que barreras se encuentran arriba.</p>
13:06:54	Moviola	<p>Tren en tránsito dirección sur a norte usa vía férrea Talca-Maule.</p>
13:08	EFE	<p>Funcionarios de EFE llegan a la zona afectada.</p>
13:09	Jefe Zonal SSEC Talca	<p>Se informa a Despachador eléctrico EFE la situación de zona de falla y se solicita nuevamente el corte de suministro, la cual fue rechazada, por dale prioridad a tren que se encontraba en funcionamiento.</p>

13:10	EFE	<p>Funcionarios de EFE confirman lo que se les fue informado por personal de mantenimiento e indican que la situación no es normal. Se detecta un aislador cortado y el brazo del triángulo se encuentra en contacto con la torrecilla, lo que provoca un corto circuito directo con 3000[V] al marco rígido del pórtico. Esta información es transmitida al despachador eléctrico, el que indica que operara las subestaciones Panguilemo y Villa Alegre. Se inicia registro fotográfico del terreno.</p> <p>Al mismo tiempo funcionario de EFE da a conocer la situación con Control de Tráfico de EFE.</p>
13:11:50	Moviola	Tren en tránsito dirección sur a norte, deja libre vía férrea Talca-Maule.
13:17	Jefe Zonal SSEC Talca	Se informa de lo acontecido a funcionario de Empresa externa de infraestructura ferroviaria.
13:20	Jefe Zonal SSEC Talca	Se genera explosión en Local Técnico.
13:20	Jefe Zonal SSEC Talca	Se realiza llamada a despacho eléctrico de EFE para informar de explosión pero llamada no es contestada por EFE.
13:21:25	Moviola	Sistema detecta falsa ocupación de vía férrea Maule-San Javier.

13:21:25	Moviola	Sistema detecta falsa ocupación de vía férrea Talca-Maule.
13:21:40	Moviola	Se comienzan a registrar pérdida de datos desde enclavamiento de local técnico.
13:21:41	Moviola	Pérdida total de datos desde enclavamiento.
13:22	Jefe Zonal SSEC Talca	Nuevamente se realiza llamada telefónica a EFE para informar de lo ocurrido (explosión).
13:22	EFE	Funcionario de EFE informa a despacho eléctrico EFE que se ha producido una explosión.
13:22	EFE	Según registros realizados en subestación Panguilemo y subestación Villa Alegre, se produce una desconexión remota de la línea de 3000[V]
13:30	Control Tráfico Centralizado SSEC	Se produce caída de enclavamiento.
13:50	EFE	Personal de despacho eléctrico de EFE informa falla a Call Center SSEC.
13:54	Supervisor SSEC Talca	Personal SSEC acudió al lugar con extintores, los cuales no fueron utilizados.

14:07	Jefe Zonal SSEC Talca	Se informa situación a funcionario de EFE, quien manifiesta que no poseía conocimiento de lo ocurrido.
15:10	Empresa externa de infraestructura ferroviaria.	Acude grupo de mantenimiento para revisar y reparar aislador comprometido.
15:17	EFE	Encargado despachador eléctrico EFE, hace entrega de manera desconectada del sector donde ocurrió la falla.
17:15	Empresa externa de infraestructura ferroviaria.	Se realiza entrega de catenaria normal para tráfico eléctrico.

A.5 Imágenes registradas del evento de falla en Empresas de Ferrocarriles del Estado.

A continuación, se presentan una serie de registros fotográficos correspondientes al día del evento de falla en la ex estación Maule, donde se exponen los distintos escenarios ocurridos en la vía férrea, además de las instalaciones del local técnico afectado por el siniestro.



Figura A.5- 1: Emanación de humo de pórtico PK260/5 – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 2: Estructura pórtico humeando – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 3: Bajada tubería y terreno cristalizado – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 4: Bajada de tubería y terreno cristalizado (2) – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 5: Pórtico PK260/5 en incineración – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 6: Entrada local técnico – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 7: Elementos y dispositivos dañados – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 8: Elementos y dispositivos dañados (2) – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 9: Elementos y dispositivos dañados (3) – Registro fotográfico Empresa SSEC.



Figura A.5- 10: Elementos y dispositivos dañados (4) – Registro fotográfico Empresa SSEC.

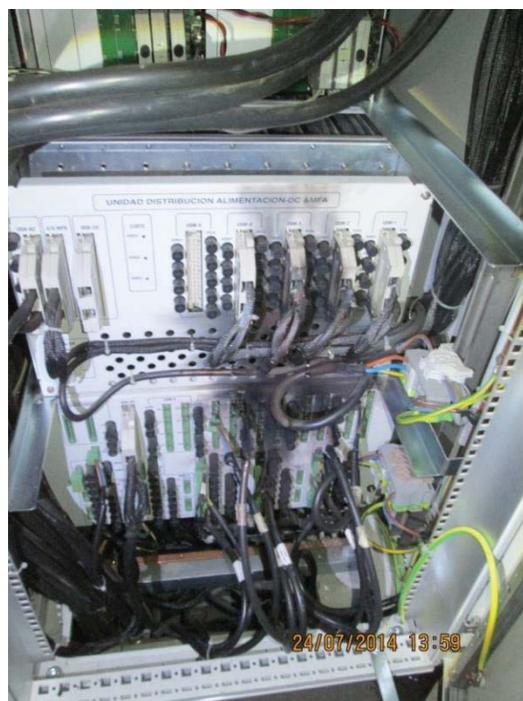


Figura A.5- 11: Elementos y dispositivos dañados (5) – Registro fotográfico Empresa SSEC.