



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

EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA SOBRE USO DE  
DISPOSITIVOS DE MITIGACIÓN CLIMÁTICA EN LÍNEAS DE ALTA  
TENSIÓN PARA CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELÉCTRICO

JULIÁN EDUARDO LARREA MORAGA

PROFESOR GUÍA:  
CHRISTIAN DÍAZ DUARTE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
NELSON MORALES OSORIO  
RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE  
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: JULIÁN LARREA MORAGA.  
PROF. GUÍA: CHRISTIAN DÍAZ DUARTE.  
FECHA: 2015

ANÁLISIS TÉCNICO ECÓNOMICO SOBRE USO DE DISPOSITIVOS DE  
MITIGACIÓN CLIMÁTICA EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN PARA CODELCO  
DIVISIÓN EL TENIENTE

La gran minería de Chile se encuentra localizada, en su mayoría, en la alta montaña lo que hace vulnerable al sistema eléctrico a distintas condiciones climáticas como nieve y viento. El presente trabajo de título pretende caracterizar los distintos efectos asociados a estos fenómenos naturales. Asimismo se mostrarán las opciones de mitigación existentes en el mercado para evaluar desde el punto de vista técnico y económico si resulta pertinente comprar e instalar dichas opciones. En este caso en particular se estudiará el complejo minero de El Teniente perteneciente a la Corporación Nacional del Cobre.

Los dos grandes fenómenos que afectan a las líneas de alta tensión producto de nieve y viento son el efecto galloping y el ice jumping. Ambos, de características similares, tienen las mismas soluciones desde el punto de vista técnico, a través del uso de separadores. Se encontró durante el curso de la investigación, que los contrapesos también resultan útiles para evitar fallas por ice jumping. Consecuentemente se consideraron ambos dispositivos para el análisis. La metodología propuesta consiste en identificar las líneas que presentan fallas debido a estos fenómenos y luego calcular el costo de la eventual falla producida. Posteriormente este valor se contrasta con el precio de compra de los dispositivos, entregados por empresas proveedoras.

Se concluye que los dispositivos evaluados resultan atractivos de instalar siempre y cuando se tenga bien identificado dónde ocurre el problema y los costos que los disturbios traen. En particular para la división El Teniente se considera que la instalación de separadores para la línea Sauzal – Minero mitigaría de manera importante las fallas que se producen en invierno.. En el caso de la línea Coya – Colina no resulta conveniente la instalación de dispositivos de mitigación por diversos factores. En primer lugar la antigüedad de la misma hace difícil cualquier tipo de trabajo de implementación Otro motivo es que no se tiene identificado de manera satisfactoria los vanos en los cuales se registran con mayor frecuencia las fallas y finalmente se tiene un sistema eficiente de mitigación para la acumulación de nieve en los conductores, que es la condición de derretidor de nieve.

## **AGRADECIMIENTOS**

En estas líneas me gustaría agradecer a quienes, durante este periodo universitario, me han brindado su apoyo y compañía en esta importante etapa de mi vida.

En mi primer lugar a mis padres, Patricia y Sergio, por darme la oportunidad de realizarme como ser humano sin ninguna oposición, por su comprensión y apoyo incondicional. También quiero agradecer a mis hermanos, Raimundo, Rosario y Eloísa, quienes me han enseñado de cooperación, compañerismo y amor incondicional. A la extraordinaria familia que tengo, primos, tíos, tías y abuelos, a quienes les debo gran parte de mi desarrollo personal y los valores que me han entregado. En especial a mis tíos, Mario y Rebeca, por recibirme en su hogar durante el periodo que duró este trabajo de memoria y por tener una paciencia infinita conmigo. También me gustaría agradecer a mis amigos y amigas quienes me han hecho más fácil este camino transitado y han sido parte fundamental de mi crecimiento. Mención aparte para todas aquellas personas que fueron un gran apoyo durante este proceso y que ya no se encuentran a mi lado, en especial a mi abuelo Enrique y mi abuela Eugenia.

A la gente de Codelco división El Teniente. Mi profesor guía Christian Duarte, por ser parte importante de este trabajo y que sin sus consejos y apoyo no se podría haber llevado a cabo. A Víctor Bustamante, encargado del área de líneas, por sus lecciones y por su gran disposición a enseñarme sobre los más diversos temas. A Christian González por facilitarme información y estar siempre disponible cada vez que requerí su ayuda. A las personas que trabajan en el área de línea, Luis Cornejo, Óscar Solís, Juan Abarca, Carlos Segovia, Carlos Barahona y Gabriel Gómez, por compartir su experiencia tanto profesional como personal, dejando aprendizajes que espero poner en práctica en mi futura vida profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 MOTIVACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 Objetivos Generales.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	3
1.4 ALCANCES .....	3
1.5 ESTRUCTURA DE TRABAJO.....	4
2. CONTEXTUALIZACIÓN.....	5
2.1 VIBRACIONES DE ALTA FRECUENCIA O VIBRACIONES EÓLICAS.....	5
2.1.1 Causas.....	5
2.1.2 Efectos .....	6
2.1.3 Soluciones .....	7
2.2 EFECTO GALLOPIG O VIBRACIONES DE BAJA FRECUENCIA .....	10
2.2.1 Causas.....	10
2.2.2 Efectos .....	11
2.2.3 Soluciones .....	13
2.3 EFECTO ICE JUMPING.....	14
2.3.1 Causas.....	14
2.3.2 Efectos .....	15
2.3.3 Soluciones .....	15
2.4 NORMATIVA ELÉCTRICA .....	18
2.5 CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE.....	21
2.5.1 Proceso Productivo.....	23
2.5.1.1 Extracción Mineral .....	23
2.5.1.2 Concentración.....	24
2.5.1.3 Fundición .....	24
2.5.2 Gerencia de Servicios y Suministros, Superintendencia de Energía.....	27
2.5.3 Sistema de Transmisión .....	28
2.5.4 Sistema de Distribución .....	30

2.5.4.1	Subestación Colina .....	30
2.5.4.2	Subestación Colón .....	31
2.5.4.3	Subestación Cordillera.....	32
2.5.4.4	Subestación El Cobre .....	33
3.	IMPLEMENTACIÓN .....	35
3.1	CARACTERIZACIÓN LINEAS DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN....	35
3.1.1	Línea Sauzal – Minero.....	35
3.1.2	Línea Minero – Colón .....	36
3.1.3	Línea Minero – Cordillera.....	36
3.1.4	Línea Minero – El Cobre.....	37
3.1.5	Línea Coya – Colina.....	37
3.2	MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	38
3.3	FALLAS LINEAS DE ALTA TENSIÓN .....	43
3.3.1	Corto Circuitos .....	43
3.3.2	Fallas en División El Teniente.....	45
3.3.2.1	Disturbios año 2006.....	46
3.3.2.1.1	8 de Junio .....	46
3.3.2.1.2	6 de Agosto.....	47
3.3.2.2	Disturbios año 2007.....	47
3.3.2.2.1	29 de Mayo .....	47
3.3.2.2.2	4 de Julio.....	47
3.3.2.3	Disturbios año 2008.....	48
3.3.2.3.1	19 de Mayo .....	48
3.3.2.3.2	22 de Mayo .....	48
3.3.2.4	Disturbios año 2009.....	48
3.3.2.5	Disturbios año 2010.....	49
3.3.2.5.1	22 de Junio .....	49
3.3.2.4.1	24 de Junio.....	49
3.3.2.6	Disturbios año 2011.....	50
3.3.2.6.1	5 de Marzo .....	50
3.3.2.7	Disturbios año 2012.....	51
3.3.2.7.1	23 de Agosto .....	51

3.3.2.8	Disturbios año 2013.....	51
3.3.2.9	Disturbios año 2014.....	52
3.3.2.9.1	16 de Marzo .....	52
3.3.2.9.2	12 de Junio .....	53
3.3.2.9.3.	23 de Agosto .....	53
3.3.3	Análisis de Fallas.....	54
3.3	EVALUACION ECONÓMICA DE FALLAS.....	60
3.3.1	Fallas Línea Sauzal – Minero.....	61
3.3.1.1	Disturbio 22 de Junio 2010.....	61
3.3.1.2	Disturbio 24 de Junio 2010.....	62
3.3.1.3	Disturbio 23 de Agosto 2012.....	62
3.3.1.4	Disturbio 12 de Junio 2014.....	63
3.3.1.5	Disturbio 5 de Marzo 2011 .....	63
3.3.2	Fallas Línea Coya – Colina .....	64
3.3.2.1	Disturbio 6 de Agosto 2006 .....	64
3.3.2.2	Disturbio 16 de Marzo 2014 .....	64
3.3.2.3	Disturbio 23 de Agosto 2014 .....	65
3.3.2.4	Disturbio 29 de Mayo 2007 .....	65
3.3.2.5	Disturbio 4 de Julio 2007.....	66
3.3.3	Análisis de Sensibilidad .....	66
3.4	EVALUACIÓN ECONÓMICA DISPOSITIVOS .....	68
3.4.1	Línea Sauzal – Minero .....	70
3.4.1.1	Separadores.....	70
3.4.1.2	Contrapesos .....	71
3.4.2	Línea Coya - Colina .....	72
3.4.2.1	Separadores.....	72
3.4.2.2	Contrapesos .....	73
3.5	EVALUACIÓN ECONÓMICA IMPLEMENTACIÓN .....	74
3.5.1	Línea Sauzal – Minero .....	75
3.5.2	Línea Coya – Colina.....	78
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	79
4.1	Línea Sauzal – Minero.....	79

4.2	Línea Coya – Colina .....	82
5.	CONCLUSIONES .....	84
5.1	CONCLUSIONES GENERALES.....	84
5.2	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS .....	85
5.2.1	Línea Sauzal –Minero.....	85
5.2.2	Línea Coya – Colina.....	86
5.3	TRABAJOS FUTUROS .....	88
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	89

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 2.1: Vórtices que se forman producto del choque del viento con el conductor. ...</i>	6
<i>Ilustración 2.2: Efectos de vibraciones de alta frecuencias a hebras. ....</i>	7
<i>Ilustración 2.3: Daños vibraciones eólicas a soportes. ....</i>	7
<i>Ilustración 2.4: Amortiguadores stockbridge en configuración asimétrica [3]. ....</i>	8
<i>Ilustración 2.5: Separador amortiguador para tres conductores por fase. ....</i>	8
<i>Ilustración 2.6: Separador amortiguador para cuatro conductores por fase. ....</i>	9
<i>Ilustración 2.7: Sistema de monitoreo para vibraciones de alta frecuencia [3]. ....</i>	9
<i>Ilustración 2.8: Acumulación de nieve en líneas de alta tensión división El Teniente. ....</i>	10
<i>Ilustración 2.9: Aumento de sección transversal del conductor por acumulación de nieve. ....</i>	11
<i>Ilustración 2.10: Efecto galloping sobre torre de alta tensión [3]. ....</i>	12
<i>Ilustración 2.11: Daño a varias torres de alta tensión por efecto galloping [3]. ....</i>	12
<i>Ilustración 2.12: Separador de fases [7]. ....</i>	13
<i>Ilustración 2.13: Amortiguadores aerodinámicos separadores [3]. ....</i>	14
<i>Ilustración 2.14: Línea afectada por acumulación de nieve. ....</i>	15
<i>Ilustración 2.15: Contrapesos en las líneas para prevenir ice jumping. ....</i>	16
<i>Ilustración 2.16: Instalación de contrapesos en división El Teniente. ....</i>	17
<i>Ilustración 2.17: Mapa tramos y locaciones división El Teniente [16]. ....</i>	22
<i>Ilustración 2.18: Esquema procesos de producción división El Teniente [16]. ....</i>	26
<i>Ilustración 2.19: Diagrama unilineal sistema eléctrico de transmisión, El Teniente [19]. .</i>	29
<i>Ilustración 2.20: Diagrama unilineal sistema eléctrico de transmisión 50 [Hz], El Teniente [19]. ....</i>	30
<i>Ilustración 2.21: Diagrama unilineal subestación Colón [19]. ....</i>	31
<i>Ilustración 2.22: Diagrama unilineal subestación Cordillera [19]. ....</i>	32
<i>Ilustración 2.23: Diagrama unilineal subestación El Cobre [19]. ....</i>	33
<i>Ilustración 3.1: Termógrafo marca Fluke modelo Ti 32. ....</i>	39
<i>Ilustración 3.2: Torre con problemas, patrullaje pedestre. ....</i>	41
<i>Ilustración 3.3: Cable de guardia por cortarse, inspección con trepado. ....</i>	42
<i>Ilustración 3.4: Imagen termográfica de conexión línea e interruptor monofásico, subestación Cordillera. ....</i>	42

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 3.1: Programa de mantenciones división El Teniente 2015. ....</i>	40
<i>Tabla 3.2: Ocurrencia de fallas en los equipos. ....</i>	44
<i>Tabla 3.3: Resumen de cantidad fallas por años y líneas de transmisión. ....</i>	55
<i>Tabla 3.4: Cuadro resumen con fallas de línea Coya – Colina. ....</i>	57
<i>Tabla 3.5: Tabla resumen con fallas de línea Sauzal – Minero. ....</i>	57
<i>Tabla 3.6: Cuadro resumen costos y ocurrencia anual para fallas en línea Sauzal – Minero. ....</i>	67



<i>Tabla 3.7: Cuadro resumen costos y ocurrencia anual para fallas en línea Coya – Colina.</i>	67
<i>Tabla 3.8: Datos implementación dispositivos, línea Sauzal - Minero.</i>	68
<i>Tabla 3.9: Datos implementación dispositivos, línea Coya – Colina.</i>	69
<i>Tabla 3.10: Valor aproximado separador por empresa Trent. Sauzal – Minero.</i>	71
<i>Tabla 3.11: Valor aproximado separador por empresa Rthö. Sauzal – Minero.</i>	71
<i>Tabla 3.12: Valor aproximado contrapesos por empresa Trent. Sauzal – Minero.</i>	72
<i>Tabla 3.13: Valor aproximado contrapesos por empresa Rthö. Sauzal – Minero.</i>	72
<i>Tabla 3.14: Valor aproximado separador por empresa Trent. Coya – Colina.</i>	73
<i>Tabla 3.15: Valor aproximado separador por empresa Trent. Coya – Colina.</i>	73
<i>Tabla 3.16: Costos implementación dispositivos.</i>	75
<i>Tabla 3.17: Cotización implementación separadores Sauzal - Minero.</i>	76
<i>Tabla 3.18: Cota máxima cotización implementación separadores Sauzal - Minero.</i>	76
<i>Tabla 3.19: Cotización implementación contrapesos Sauzal- Minero.</i>	77
<i>Tabla 3.20: Cota máxima implementación contrapesos Sauzal -Minero.</i>	77
<i>Tabla 3.21: Cotización implementación separadores Coya – Colina.</i>	78
<i>Tabla 3.22: Cota máxima cotización instalación de separadores Coya – Colina.</i>	78
<i>Tabla 4.1: Evaluación económica final separadores línea Sauzal- Minero.</i>	81
<i>Tabla 4.2: Evaluación económica final contrapesos línea Sauzal – Minero.</i>	81
<i>Tabla 4.3: Evaluación económica final separadores línea Coya – Colina.</i>	83

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 MOTIVACIÓN**

El crecimiento económico que ha vivido el país en la última década, se ha visto reflejado en un aumento de la demanda por energía eléctrica. Esta situación ocurre tanto para clientes regulados como también para clientes libres, debido al aumento de la producción de las empresas y de sus operaciones. Como respuesta ante tal situación, el sector eléctrico ha debido encarar nuevos desafíos de modernización y expansión, a fin de satisfacer los exigentes requerimientos actuales de energía y responder de forma adecuada a aquellos proyectados en el futuro próximo. Todo este proceso involucra una serie de grandes inversiones, no sólo a nivel estatal sino que también en el sector privado, para la construcción y posterior utilización. Producto de aquello, ha adquirido mucha importancia el factor técnico económico a la hora de evaluar inversiones de proyectos eléctricos.

Dentro del sector industrial, uno de los rubros que ha experimentado mayor crecimiento es la minería, esto debido al precio del cobre. Este sector es de gran importancia para el país ya que es la actividad económica que le genera mayores utilidades al estado, de manera que resulta fundamental optimizar procesos y asegurar la continuidad operacional las 24 horas del día. Es por esta razón que se debe mantener el suministro de energía hacia las instalaciones de manera constante y evitando al máximo las fallas que puedan ocurrir tanto en las líneas de transmisión, como en equipos eléctricos, ya que cualquier corte de la misma generaría una para en la operación, esto produciría un costo económico asociado a la empresa y al país.

Uno de los problemas asociados al suministro de energía es la falla de las líneas de transmisión o de las estructuras que las soportan, por causas climáticas como nieve, vibraciones de alta frecuencia, viento, fenómeno galloping o ice jumping[1], fenómenos comunes en la minería de alta montaña. Por lo que estudiar sus consecuencias y maneras de prevenirlos en las líneas y equipos es de vital importancia para evitar fallas y futuros cortes de energía producto de estos.

En este contexto el presente trabajo de título abordará los fenómenos de vibraciones de alta frecuencia, galloping y ice jumping, estudiando sus causas, efectos y soluciones. También se evaluarán desde un punto de vista económico los posibles perjuicios que provocan en la producción y el costo de implementar una solución en el contexto de una empresa en particular. En este caso para Codelco división El Teniente. Este complejo minero es el más grande de la corporación y su consumo representa un 4 [%] de la energía total generada por

SIC, datos del 2014 [2]. Es por esta razón que resulta de gran importancia no solo para la empresa sino también a nivel de del sistema interconectado central el prevenir la mayor cantidad de fallas para así evitar disturbios en este.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Generales**

El objetivo principal es evaluar, desde un punto de vista técnico y económico, la utilización de dispositivos de mitigación de efectos climáticos en las líneas de transmisión de alta tensión en la división El Teniente de CODELCO. Para tales fines se comprueba de manera práctica y utilizando la experiencia internacional el desempeño de tales elementos como medio de disipación de fenómenos de tipo vibratoriales, causados por nieve y viento, en líneas de alta tensión. Posteriormente se cuantificará el efecto en las líneas, equipos y operación provocado por estos fenómenos para posteriormente evaluar si resulta conveniente la inversión de los dispositivos a estudiar o no.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

En este trabajo se definen los siguientes objetivos específicos:

- Detallar principales características de los fenómenos; vibraciones de alta frecuencia, efecto galloping y ice jumping
- Mostrar las distintas alternativas disponibles en el mercado para solucionar dichos problemas y compararlos.
- Establecer metodología de valorización económica de efecto de las fallas en líneas, equipos y producción de la división.
- Evaluar si es o no conveniente para la empresa la inversión de dispositivos capaces de contrarrestar los efectos producto de las condiciones climáticas en las cuales se desarrolla dicha actividad.

### **1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Se propone como metodología para valorizar el servicio entregado por los dispositivos basado en los costos incurridos de inversión, en contraste con aquellos que se puedan generar producto de no tener el dispositivo para prevenir fallas.

Para comprobar el aporte real de los elementos de mitigación a instalar en las distintas líneas de alta tensión del complejo minero, se estudiarán las fallas que se generan a partir de estos efectos climáticos y posteriormente ratificar el funcionamiento de los dispositivos analizando instalaciones anteriores de estos y ver si los eventos fueron disminuidos definitivamente. Se espera poder analizar si los disturbios producidos podrían provocar el daño de las líneas o los equipos contiguos, también se estudiará los posibles problemas que puedan provocar en la normal operación de la mina y cuantificar lo que la empresa deja de recibir por esta para.

Posteriormente se analizará el costo económico de instalar los dispositivos, luego se cotejará con las pérdidas que se producen sin este y finalmente se decidirá la oportuna instalación o no.

### **1.4 ALCANCES**

El presente trabajo no contempla el análisis de localización óptima de los distintos dispositivos de mitigación en las líneas de alta tensión. Esta ubicación todavía es tema de debate para los investigadores que siguen estudiando este tipo de fallas[3].

Por otra parte este trabajo de memoria de título no contempla el diseño ni la implementación de las distintas soluciones, dado que se seleccionarán dispositivos que ya se encuentren operando en la actualidad, que sean distribuidos por empresas ya conocidas del sector, y que aseguren evitar problemas causados por los fenómenos estudiados. Tampoco se utilizarán métodos computacionales para verificar el aporte de estos elementos en los circuitos.

## **1.5 ESTRUCTURA DE TRABAJO**

El presente trabajo se divide en 5 capítulos, sin contar los destinados a referencias y anexos, que se encuentran al final del mismo.

El primer capítulo corresponde a una introducción al tema tratado, definiendo su contexto y motivación; a su vez, se señalan los objetivos, metodologías y los alcances del mismo.

En el segundo capítulo se describen las causas y efectos tanto del fenómeno de vibraciones de alta frecuencia así como el efecto galloping y para el ice jumping. También se presentan los dispositivos más comunes utilizados para amortiguar estos efectos. De la misma manera se contextualiza a la empresa donde se realiza el trabajo de título, detallando historia, sistema eléctrico y gerencia en la cual se enfoca la investigación.

En el tercer capítulo se describen las actividades del plan de trabajo que permiten desarrollar el proyecto. Utilización de herramientas aprendidas en la universidad de manera de lograr una óptima implementación del problema.

El cuarto capítulo, por su parte, contiene el análisis de los resultados obtenidos de la implementación en el capítulo anterior.

El quinto y último capítulo, concluye finalmente sobre todos los aspectos considerados anteriormente y entrega a la empresa, en este caso la división El Teniente, una recomendación de si invertir o no en los dispositivos estudiados.

## **2. CONTEXTUALIZACIÓN**

En muchas ocasiones las líneas de alta tensión se ven sometidas a esfuerzos mecánicos en todas sus componentes debido a causas ambientales, como el viento provocando oscilaciones en los conductores, o el hielo que se acumula en los mismos provocando torsión. No sólo los conductores se ven dañados sino que también las torres y aisladores que se ven tensionados en distintas direcciones cuando el viento azota contra su superficie. Estos efectos inducidos en los distintos componentes de la línea de transmisión pueden provocar considerables daños mecánicos en la infraestructura.

Durante este capítulo se analizarán dos tipos de vibraciones que se pueden dar en las líneas de alta tensión. Estos fueron considerados como los más recurrentes en la división El Teniente y que por ende son los que provocan más fallas. El primer tipo de vibración es la de alta frecuencia o eólica, generalmente provocan fatiga y daño en las hebras de los conductores [1][4]. El segundo tipo se conoce como efecto galloping el cual es provocado por el viento y nieve antes mencionado, este tipo puede causar daños importantes en las líneas de alta tensión[3]. Y por último el fenómeno de ice jumping que se produce por el desprendimiento de nieve y hielo acumulado en los conductores, provocando acercamiento entre fases y por ende fallas bifásicas [5].

Para los fenómenos antes mencionados se estudiarán las causas, sus efectos en las líneas y posteriormente se mostrarán las tecnologías que se utilizan para solucionar este tipo de problemas.

### **2.1 VIBRACIONES DE ALTA FRECUENCIA O VIBRACIONES EÓLICAS**

#### **2.1.1 Causas**

La causa principal de las vibraciones eólicas es precisamente el viento soplando a lo largo del conductor. Para explicar de manera sencilla el fenómeno se tomarán algunos supuestos. Primero se considera un viento moderado y que golpea a los conductores de manera horizontal. De manera simple también se supone que existe un solo conductor por fase. Luego al chocar el viento con el área circular del conductor, las líneas de flujo del mismo se curvan haciendo que al lado contrario del choque se produzca como un vórtice al juntarse nuevamente las líneas de flujo [1], [3]. Ver la siguiente ilustración.



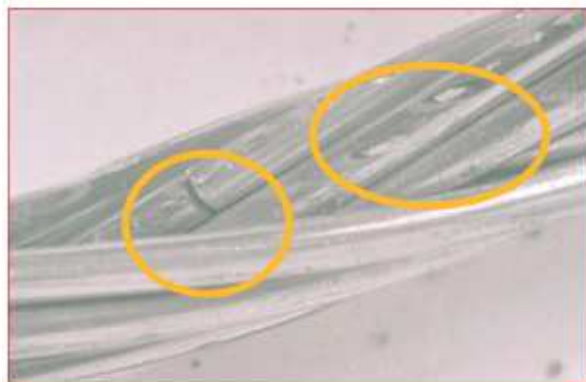
*Ilustración 2.1: Vórtices que se forman producto del choque del viento con el conductor.*

El vórtice producido por el choque entre el viento y el conductor, es muy inestable. Teniendo cambios en el sentido de giro y movimientos de arriba hacia abajo. Estos cambios en el sentido y la posición del vórtice producen fuerzas alternas sobre el conductor que se traduce en una vibración mecánica del mismo. Como se mencionó anteriormente el viento se considera que va en sentido horizontal, por ende la fuerza inducida por el viento irá en dirección vertical y se transmitirá a lo largo de todo el cable.

Este tipo de vibraciones genera frecuencias que generalmente van del orden de los 5 a 60 [Hz] [3]. Estas amplitudes son prácticamente invisibles para un ser humano y pueden generar daños para el conductor cuando son comparables con el diámetro del cable.

### **2.1.2 Efectos**

El efecto provocado por este tipo de vibraciones en las líneas de alta tensión es que el conductor se doble alternadamente en una dirección y otra del plano vertical. En el punto donde esta curva alcanza su mayor amplitud es en el soporte con los aisladores, y el movimiento continuo de los cables hace que las hebras que los forman se calienten, fatiguen y eventualmente se corten. Ver siguiente imagen [1].



*Ilustración 2.2: Efectos de vibraciones de alta frecuencias a hebras.*

El corte de una o varias de estas hebras provoca pérdidas óhmicas y también disminuye las capacidades de tensión. Pero el daño no solo es producido en las hebras de los conductores sino también se produce fatiga en las ferreterías que soportan los conductores. A continuación se muestra una imagen el daño causado por las vibraciones de alta frecuencia en soportes U que fueron utilizados por 6 años [3].



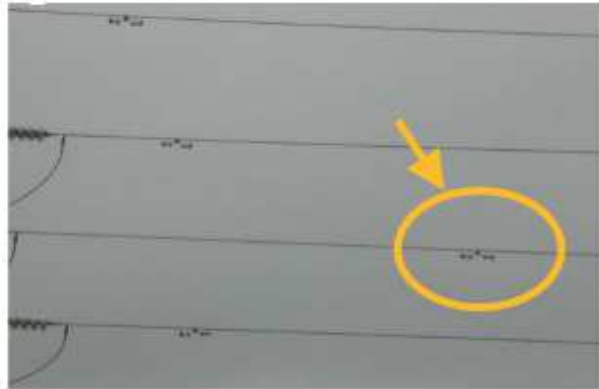
*Ilustración 2.3: Daños vibraciones eólicas a soportes.*

### **2.1.3 Soluciones**

Existen varias formas de amortiguación y monitoreo para este tipo de vibraciones, van a depender en general de la configuración de la línea y sus características. Por ejemplo cuando se tiene un solo conductor por fase se utilizan amortiguadores stockbridge. La ubicación óptima de estos dispositivos es aún tema de debate que no ha sido resuelto básicamente porque la amplitud de la vibración depende de la velocidad del viento por lo



que no existe una posición ideal para estos. De la misma manera se puede decir que no existe un lugar donde el efectividad del amortiguador sea mínima [6] . A continuación se muestra una imagen de una configuración asimétrica que busca cambiar la frecuencia de oscilación propia de los conductores.



*Ilustración 2.4: Amortiguadores stockbridge en configuración asimétrica [3].*

En el caso de más de un conductor por fase, se utilizan separadores no rígidos o separadores amortiguadores. La diferencia entre ambos es que los segundos permiten un movimiento relativo entre los subconductores de cada fase por medio de resortes y/o gomas. Estos están calculados para que en el movimiento se disipe energía, lo cual se traduce en una amortiguación de las vibraciones de alta frecuencia [3]. A continuación se muestran imágenes de separadores amortiguados para 3 y 4 subconductores respectivamente [7] .



*Ilustración 2.5: Separador amortiguador para tres conductores por fase.*



*Ilustración 2.6: Separador amortiguador para cuatro conductores por fase.*

Además de estos dispositivos mecánicos que se han mostrado para amortiguar los efectos de las vibraciones, también existen equipos de monitoreo para este tipo de fenómeno. Estos equipos son instalados en la mayoría de las oportunidades colgando de los conductores y miden la frecuencia, amplitud y periodicidad de las oscilaciones [8]. Con estos datos es posible analizar el desempeño de los equipos que se han mencionado como medios de disipación de vibraciones. Esto permitiría hacer cambios en el diseño de la configuración de los dispositivos en caso de que no estén funcionando de la manera esperada. Se muestra una imagen de un sistema de monitoreo.



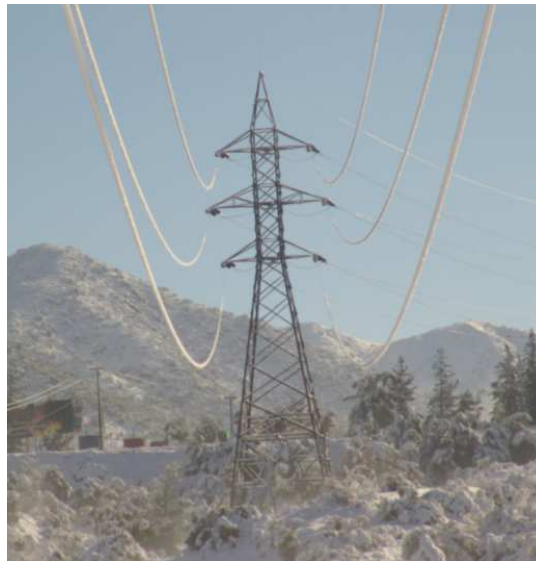
*Ilustración 2.7: Sistema de monitoreo para vibraciones de alta frecuencia [3].*

## 2.2 EFECTO GALLOPIG O VIBRACIONES DE BAJA FRECUENCIA

### 2.2.1 Causas

Como se mencionó en ocasiones anteriores, lo que provoca estas vibraciones de baja frecuencia es la acción de vientos fuertes, esto se ve incrementado por la formación de hielo sobre los conductores. Producto de esto último se produce una modificación del perfil transversal del cable, el cual era originalmente circular. Este nuevo perfil como es de suponer es irregular y aerodinámicamente inestable. Esto provoca que ante un viento transversal se produzcan oscilaciones de amplitudes considerables y fácilmente detectables al ojo humano.

Las frecuencias entre las que se encuentran este tipo de oscilaciones son típicamente desde 0.15 hasta 1 [Hz]. Las oscilaciones tienden a ser en el plano vertical pero no siempre y las amplitudes que alcanzan pueden hacer que se junten 2 conductores de fases distintas. El viento necesario para provocar este fenómeno es del orden de 7 [m/s] o superior[6].



*Ilustración 2.8: Acumulación de nieve en líneas de alta tensión división El Teniente.*

En la ilustración 2.8 mostrada anteriormente se puede apreciar la acumulación de nieve en las líneas de alta tensión. Esta fotografía fue tomada después de un día de nevazón en la división El Teniente, empresa en la cual se enfoca el presente trabajo. Esta acumulación de nieve aumenta el peso de las líneas considerablemente haciendo resentir a los conductores, estructuras y también haciéndolas más vulnerables al viento teniendo mayores oscilaciones.

En la ilustración 2.9 a continuación se puede observar cuanto aumenta el área de los conductores debido a la acumulación de nieve. Esta fotografía también fue sacada de la división pero en líneas de media tensión. Se muestran con el fin de hacer notar la cantidad de material que se puede llegar a juntar y el peso que puede sumar a los conductores. Ambas ilustraciones fueron tomadas por Víctor Bustamante jefe de líneas de la división.



*Ilustración 2.9: Aumento de sección transversal del conductor por acumulación de nieve.*

### **2.2.2 Efectos**

El efecto que produce el galloping sobre las líneas de alta tensión ha sido altamente estudiado. En una primera etapa puede provocar que 2 conductores o más de distintas fases se acerquen demasiado llegando a producir corto circuitos. Esto en el mejor de los casos tiene como consecuencia una interrupción del suministro por la operación de las protecciones.

En otro caso, más extremo, el efecto galloping puede llegar a un amplitud tal que los esfuerzos dinámicos en las cadenas de aisladores supere la resistencia mecánica de estos provocando que uno o más aisladores se rompan. Esto puede significar la interrupción del suministro por varias horas debido a las maniobras que requiere cambiar un aislador de la línea de alta tensión[3].

Finalmente el peor de los casos, las vibraciones de baja frecuencia pueden transmitirse a las torres de alta tensión con una amplitud y frecuencia tal del modo que todo el sistema resuena mecánicamente resultando en la destrucción de una o varias estructuras.

Se muestran a continuación dos imágenes que reflejan la magnitud del fenómeno para el último caso. Primero se observa una fotografía de una torre caída producto de la nieve y en segundo lugar se muestra la caída de varias torres al mismo tiempo después de una tormenta de hielo y nieve en Canadá en el año 1998.



*Ilustración 2.10: Efecto galloping sobre torre de alta tensión [3].*

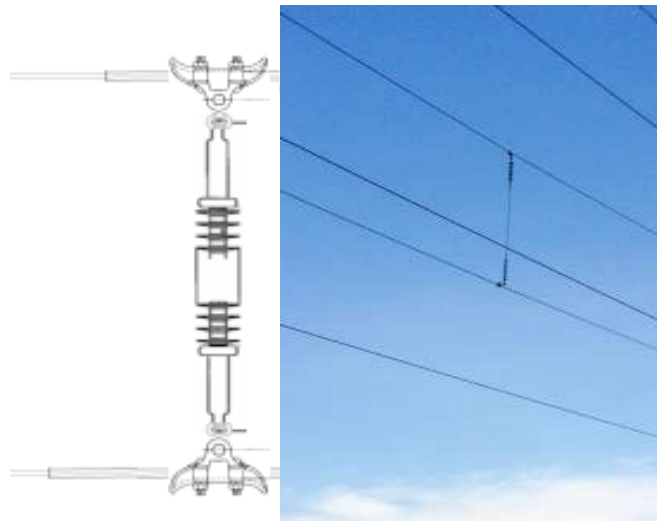


*Ilustración 2.11: Daño a varias torres de alta tensión por efecto galloping [3].*

### 2.2.3 Soluciones

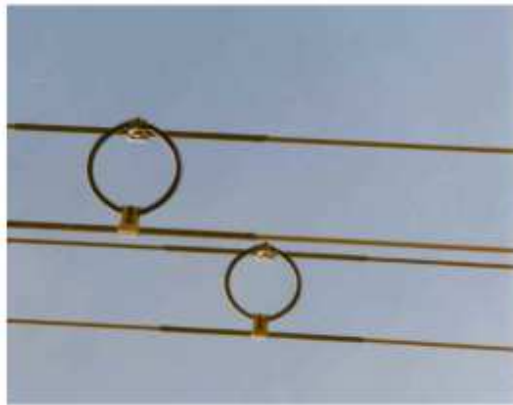
Existen distintos tipos de métodos para reducir los efectos del galloping. En la actualidad se instalan dispositivos que cumplen la función de amortiguar las vibraciones o cambiar las frecuencias de oscilación propias de la línea.

Uno de los dispositivos más utilizados para evitar este tipo de fenómeno es el separador de fases[3]. Si bien este aparato no evita el problema de acumulación de nieve en los conductores, si permite que las fases de la línea no se acerquen producto de las oscilaciones que se producen por efecto del viento. Este elemento asegura una separación entre los conductores y para hacerlo el proveedor debe tener información específica para su correcto dimensionamiento esto es, largo de cada vano, distancia entre fases, diferencia de alturas entre torres a estudiar, tipo de conductor, entre otros. En la ilustración 2.12 se muestra este tipo de dispositivo instalado en la división El Teniente.



*Ilustración 2.12: Separador de fases [7].*

Otro tipo de dispositivo que se utiliza en la disminución del efecto galloping es el amortiguador aerodinámico. Este funciona generando una torsión a partir de la fuerza que el viento ejerce sobre ellos. Esta torsión hace girar al conductor sobre sí mismo para que el viento impacte sobre todo el perfil del cable. De esta manera, se anulan las formas irregulares producto de la formación de hielo y por ende ya no existe el fenómeno aerodinámico ya que en el largo del vano del cable se tiene casi todo el perfil expuesto al viento [3]. Se muestra a continuación uno de estos amortiguadores para dos conductores por fase [9] , se puede notar que también sirven como espaciadores entre conductores de manera de evitar cortocircuitos bifásicos o trifásicos.



*Ilustración 2.13: Amortiguadores aerodinámicos separadores [3].*

Cabe mencionar que la mayoría de los espaciadores amortiguadores no rígidos que se utilizan para amortiguar las oscilaciones de alta frecuencia no sirven para amortiguar el efecto galloping, ya que están diseñados para disipar energía a una frecuencia mucho mayor que la frecuencia del galloping.

## **2.3 EFECTO ICE JUMPING**

### **2.3.1 Causas**

Si bien este efecto se podría considerar como un derivado del galloping, resulta un problema en sí mismo. Consiste en el desprendimiento intempestivo de nieve acumulada en las líneas, este desprendimiento provoca que la línea que se encontraba sometida a tensiones y pesos excesivos, producto de la acumulación de nieve en sus conductores, salte de manera de acercarse mucho a otra fase o incluso llegar a tocarla [10]. Este salto genera también una onda expansiva que se propaga a lo largo de toda la línea. Este problema se presenta especialmente en líneas verticales en las cuales al desprenderse la nieve provoca el contacto o acercamiento entre fases. Este efecto es incluso más común que el galloping por lo cual se debe tener especial cuidado a la hora de diseñar la línea [11].



*Ilustración 2.14: Línea afectada por acumulación de nieve.*

En la ilustración anterior se puede observar de manera notoria como un conductor pierde su flecha natural debido al peso provocado por la acumulación de nieve. Una vez desprendida este conductor saltará debido al gran peso del cual se alivió y en este movimiento podría acercarse al conductor de otra fase de manera de provocar algún tipo de falla. La ilustración anterior fue tomada por Víctor Bustamante jefe del área de líneas de El Teniente.

### **2.3.2 Efectos**

Los efectos de este tipo de fenómenos son corto circuitos bifásicos principalmente[5]. Esto ocurre, como se mencionó anteriormente, por el acercamiento o derechamente por el contacto entre dos fases de la línea. En una faena minera esto puede traer como consecuencias la para temporal de producción dejando pérdidas en lo monetario dependiendo de qué tan rápido se puede despejar la falla y volver a la operación normal de la mina.

### **2.3.3 Soluciones**

Las soluciones mas comunes para este tipo de efectos son dos. Los separadores, que fueron mencionados anteriormente, que permiten asegurar una separación entre las líneas de manera de que cuando se produce el desprendimiento las líneas se mueven todas y no solo una, y así se evita una falla bifásica.



Otro tipo de solución que se implementado en la práctica sobre todo en la división en cuestión es el uso de contrapesos estos sirven para contrarrestar el impulso que se genera en la cadena de aisladores a la hora de desprenderse la nieve que estaba acumulada en los conductores y así prevenir que se acerquen o derechamente se junten las líneas.



*Ilustración 2.15: Contrapesos en las líneas para prevenir ice jumping.*

En la ilustración 2.15 se puede apreciar el dispositivo y su forma esférica. Existen de distintos diámetros, formas y pesos dependiendo de los requerimientos de las líneas en las cuales se desea instalar. También se los puede encontrar en planchas rectangulares las cuales tienen un peso de 25 [kg] cada una.



*Ilustración 2.16: Instalación de contrapesos en división El Teniente.*

En la ilustración anterior se puede observar la faena de instalación de estos dispositivos en líneas de alta tensión en la división. Como se ve estos pesos deben ser instalados debajo de las cadenas de aisladores correspondientes en cada torre. Ambas ilustraciones fueron tomadas por Víctor Bustamante jefe de líneas de la división El Teniente.

## 2.4 NORMATIVA ELÉCTRICA

La norma vigente en Chile que regula la construcción y diseños de líneas de alta tensión es el reglamento de instalaciones eléctricas de corrientes fuertes, en adelante NSEG 5, la cual fue aprobada el 12 de Noviembre de 1955. La presente norma tiene como objeto fijar las disposiciones para la ejecución de instalaciones eléctricas de corrientes fuertes y para el mejoramiento o modificaciones de las mismas, entendiéndose como instalaciones de corrientes fuertes a todas aquellas que presentan en ciertas circunstancias un peligro para las personas o las cosas, entendiéndose como tales las instalaciones que sirven para generar, transportar, convertir, distribuir y utilizar energía eléctrica. Esto según el artículo primero del capítulo uno de la misma [12].

En el capítulo dos, que habla de las disposiciones generales, se hace una clasificación de las instalaciones en baja y alta tensión, sin considerar la media tensión que hoy en día también se tiene en cuenta. Dice que se considera como baja tensión a todas aquellas instalaciones que no excedan una tensión nominal de 1.000 volts; las instalaciones de alta tensión serán aquellas cuya tensión nominal sobrepase 1.000 volts [12]. Sin embargo esta sería una definición general sobre los niveles de tensión. Como lo estipula la norma de electricidad tensiones normales para sistemas e instalaciones, NSEG 8, la clasificación de los niveles de tensión sería la siguiente,

- a) Bajas Tensiones: Estas se clasifican en 2
  - Tensión Reducida: se consideran en este grupo las instalaciones con tensiones menores a 100 [V].
  - Baja Tensión: se considerarán en este grupo los sistemas o instalaciones con tensiones superiores a 100 [V] con un máximo de 1.000 [V]
  
- b) Altas Tensiones: Se categorizan en 3 tipos
  - Tensión Media: se considera en este grupo los sistemas con tensiones superiores a 1(kV) con un máximo de 60 [kV].
  - Alta Tensión: se considera en este grupo los sistemas con tensiones superiores a 60 [kV] con un máximo de 220 [kV].
  - Tensión Extra Alta: se considera en este grupo los sistemas con tensiones superiores a 220 [kV].

Tomando en cuenta entonces lo especificado en la norma NSEG 8 y el título de la presente memoria, se analizarán en consecuencia las líneas que tengan niveles de tensión entre 60 [kV] y 220 [kV] [13].

Continuando con la NSEG 5, en su capítulo sexto habla sobre líneas aéreas y que las disposiciones ahí mencionadas aplican a todas las líneas de corrientes fuertes instaladas al aire libre. En este capítulo se endosa la responsabilidad de la construcción de la línea a la empresa que haga aquella tarea, como dice el artículo 91, considerando el peligro que presentan las líneas no sólo para las personas sino que también para el suministro de energía, también debe tomar todas aquellas precauciones para que las personas que ejecutan el trabajo no se vean afectadas ni dañadas por la faena. Por otra parte dice también que las instrucciones mencionadas en este artículo serán publicadas por la Superintendencia por cuenta de las empresas y deberán ser enviadas con cierta anticipación a la puesta en servicio, a las Intendencia, Gobernaciones, Municipalidades y Carabineros [12]. Sin embargo en el artículo 106 la norma habla sobre la separación mínima entre dos conductores desnudos, considerando condiciones de temperaturas de 30 [°C] y con sobrecarga provocada por hielo. Esta separación se divide en dos dependiendo de la sección del conductor

a) Caso sección igual o superior a 33 [mm<sup>2</sup>]

$$\text{Separación en metros} = 0,36\sqrt{F} + \frac{kV}{130} + 0,5 * C$$

b) Caso sección inferior a 33 [mm<sup>2</sup>]

$$\text{Separación en metros} = 0,60\sqrt{F - 0,60} + \frac{kV}{130} + 0,5 * C$$

En las expresiones anteriores significa:

- F = Flecha aparente en metros, para las condiciones descritas con anterioridad. Por flecha aparente se entiende por la distancia entre la línea de los apoyos y la tangente al conductor paralela a ella. Se tomará a lo menos igual a un metro.

- kV = Tensión nominal entre los conductores considerados, en kilovoltios.

-  $C$  = Longitud en metros de la cadena de aisladores en suspensión. En el caso de usar conductores rígidos o cuando se trata de cadenas de anclaje se tomará igual a cero.

Sin embargo esta consideración mínima no tiene mucha aplicación en la práctica para el diseño de líneas en cordillera, esto debido a que por las condiciones adversas que muchas veces se presentan en este tipo de zonas a la hora de realizar los cálculos los resultados están muy por sobre las exigencias en la norma. Es siempre necesario considerar la experiencia de la persona que va a diseñar la línea a la hora de tener en cuenta estos fenómenos ya que en Chile no se puede encontrar una norma que especifique como debe realizarse de manera correcta este diseño de manera de evitar cortes y caída de torres.

A modo de cierre con respecto al análisis de la norma vigente sobre la construcción de líneas aéreas de alta tensión se puede decir que si bien esta contiene una serie de indicaciones y cálculos que se deben tener en cuenta para construir líneas en cordillera, estos resultan de poca ayuda en la práctica ya que las condiciones climáticas son distintas incluso en el sector de la cordillera por lo que resulta necesario que el diseñador de estas líneas sea alguien con experiencia en este tipo de terreno y que además cuenta con todas las capacidades técnicas que se requieren para llevar a cabo un proyecto de este estilo.

## **2.5 CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE**

La historia de Codelco comienza con la promulgación de la reforma constitucional que nacionalizó el cobre el 11 de julio de 1971. La creación de la corporación nacional del cobre, como se le conoce en la actualidad, fue formalizada por decreto el primero de abril de 1976.

Codelco es el primer productor de cobre del mundo y posee, además, cerca del nueve por ciento de las reservas mundiales del metal rojo.

El nombre Codelco representa a la Corporación Nacional del Cobre de Chile, una empresa autónoma propiedad del Estado chileno, cuyo negocio principal es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado, y su posterior comercialización.

Posee activos por US\$ 33.355 millones, y un patrimonio que a fines de 2013 ascendía a US\$ 12.408 millones. Codelco, en el 2013, produjo 1,79 millón de toneladas métricas de cobre refinado (incluida su participación en el yacimiento El Abra y en Anglo American Sur). Esta cifra equivale al 10% de la producción mundial [14]. Su principal producto comercial es el cátodo de cobre grado A.

La compañía ejecuta sus operaciones a través de siete divisiones mineras más la Fundición y Refinería Ventanas, que pertenece a Codelco desde mayo de 2005. La División Ministro Hales, la más nueva de las Divisiones, inició a fines de 2013 su puesta en marcha como operación minera. Su estrategia corporativa es coordinada desde la Casa Matriz ubicada en Santiago de Chile.

Durante 2013 la empresa realizó ventas por 14.956 millones de dólares, incluyendo cobre y subproductos. Los productos, encabezados por los cátodos grado A con 99,99 por ciento de cobre, parten hacia diversos destinos en el mundo. En 2013 el mercado más importante es Asia, que absorbió 59,1 % de la oferta de la Corporación, seguido por Europa con 15,2 [%]; Sudamérica con 13,4 [%], Norteamérica con 11,8 [%], y Oceanía con un 0,4 [%]. [14]

El presente trabajo de título se enmarca en el estudio de las líneas de transmisión de alta tensión de la división El Teniente de Codelco. Es por esta razón que se hace necesario contextualizar a la división en cuestión.

La división de El Teniente se encuentra a 80 [km] al sur de la ciudad de Santiago y a más de 2.500 metros de altura sobre el nivel del mar [2]. Data de una larga historia, siendo la más antigua de los yacimientos de la gran minería chilena. Su explotación se puede rastrear a comienzos del siglo XX, específicamente al año 1905, durante el cual comienza la verdadera explotación industrial de cobre por parte de la sociedad norteamericana Braden Copper Company. En 1976 se une a la Codelco formando parte de la gran minería chilena a manos del estado[15].

En la siguiente ilustración se muestran los distintos sectores de la división en un mapa reducido con los distintos tramos que deben realizar los trabajadores para poder acceder a sus lugares de trabajo.

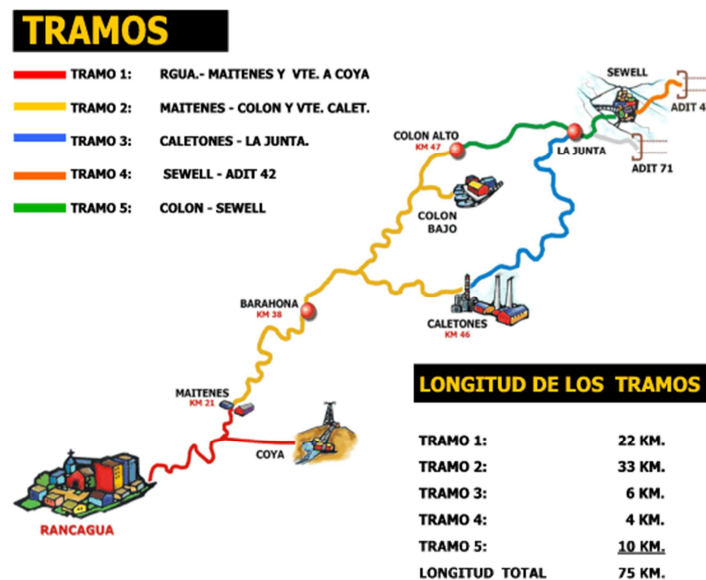


Ilustración 2.17: Mapa tramos y locaciones división El Teniente [16].

Actualmente es la mina subterránea de cobre más grande del mundo con más de 2.400 kilómetros de galerías.

En la actualidad El Teniente es la división que produce el mayor tonelaje de cobre fino de todas las divisiones de Codelco, con 450.390 [t] durante el año 2013. Esto es un 27 [%] de la producción total de cobre fino que aportan todas las divisiones. El principal producto de esta división son las barras de cobre anódico y ánodos de cobre. Dentro de los subproductos se tienen el molibdeno y ácido sulfúrico en mayor cantidad con 6.864 y 1.213.749

toneladas respectivamente. También produce en menor medida oro y plata, aportando 786 y 91.975 de toneladas respectivamente. Esta división tiene una dotación propia de 5.064 personas[17].

Si bien esta mina tiene más de 100 años de explotación, lo cual podría hacer presumir que le quede poco años de vida, nuevos proyectos han revitalizado y dado proyección a esta división en por lo menos 50 años más. Los proyectos más emblemáticos son la explotación del rajo sur, primer proyecto a cielo abierto de El Teniente inaugurado durante el año 2012, y el futuro nuevo nivel mina que corresponde a una excavación más profunda del nivel Teniente 8 que es el nivel más subterráneo de la división para el año 2017. Ambos proyectos tienen muy buena ley y grandes expectativas de explotación.

### **2.5.1 Proceso Productivo**

El proceso de producción de cobre utilizado en la División El Teniente es un proceso minero metalúrgico, este consiste en tres etapas sucesivas; una etapa de extracción de mineral, otra de concentración y una última de fundición de concentrado de mineral, desde la cual se obtiene un producto denominado Cobre Metálico.

#### ***2.5.1.1 Extracción Mineral***

La fase de extracción de mineral, dada la riqueza del mineral secundario presente en las capas superiores, roca blanda y de fácil fragmentación, se lleva a cabo por el método block caving (hundimiento de bloques), en que el mineral cae por gravedad desde el nivel de hundimiento al de producción. En los sectores profundos, de roca primaria que es más dura, el método extractivo es altamente mecanizado y se usan perforadores jumbos, cargadores LHD y martillos picadores hidráulicos.

El material fracturado proveniente de la mina, se transporta hacia las plantas de Colón, Sewell y SAG, mediante los ferrocarriles Teniente Norte 5 y Teniente 8, para posteriormente someterlos a proceso de chancado.



### ***2.5.1.2 Concentración***

La fase de concentración se realiza en las plantas de Colón y Sewell, donde se reduce el tamaño del mineral, mediante etapas de chancado y molienda.

El chancador es el encargado en primera instancia de disminuir de tamaño el mineral grueso hasta alcanzar una granulometría inferior a 10" y entre 6"- 8", para luego continuar con la molienda convencional y SAG respectivamente. Además, se separan las partículas de cobre y molibdeno a través de un proceso de flotación. Este proceso es el encargado de recuperar o concentrar los sulfuros de cobre contenidos en la pulpa proveniente de la molienda, bajo parámetros metalúrgicos de calidad y eficiencia económica, para entregar como producto concentrado de cobre y molibdeno con alta ley. Todo el cobre que no fue procesado, se vuelve a tratar por la planta de tratamiento de relaves.

Finalmente, el concentrado final de la flotación y del tratamiento de relaves es secado en la Planta de Filtros y Secado para ser llevado al proceso de fundición.

La concentración de mineral exige una cantidad de agua industrial que supera los 1.000 litros por segundo. Para satisfacer dicha demanda, El Teniente utiliza dos sistemas: la captación de aguas superficiales a través de bocatomas, redes de conducción y equipos de bombeo, y una aducción desde el río Blanco hasta Colón.

### ***2.5.1.3 Fundición***

La etapa de fundición se realiza en Caletones donde se efectúa el tratamiento del concentrado proveniente de las plantas de flotación, principalmente en un proceso de secado para que pueda alimentar al Convertidor Teniente.

La fusión se ejecuta en Convertidores Teniente, con lo cual se obtiene metal blanco y escoria. El metal blanco es alimentado a los Convertidores Pierce Smith (CPS), desde los cuales se obtiene cobre blíster (99,3% cobre) el cual es enviado a refinación. La escoria (8% cobre) se envía a los hornos de limpieza de escoria para obtener una escoria con fase rica en cobre que se reincorpora a los CPS, y una escoria de descarte con 1% de cobre.

Por último, el cobre blíster es sometido a un proceso de refinación y moldeo, con el objeto de disminuir el contenido de oxígeno del cobre y aumentar su pureza, generando dos productos, cobre RAF (99,9% cobre) obtenido del refinado a fuego y cobre anódico (99,7% cobre). Los gases resultantes del proceso de fusión-conversión son tratados en las plantas de limpiezas de gases, donde a la vez se obtiene ácido sulfúrico que es comercializado principalmente en mineras del norte del país.

A continuación se muestra una imagen resumen con los procesos productivos de la división. En esta se pueden apreciar los pasos anteriormente señalados y explicados, también se pueden observar los destinos finales de los productivos y subproductos obtenidos de manera de clarificar lo comentado durante esta sección.

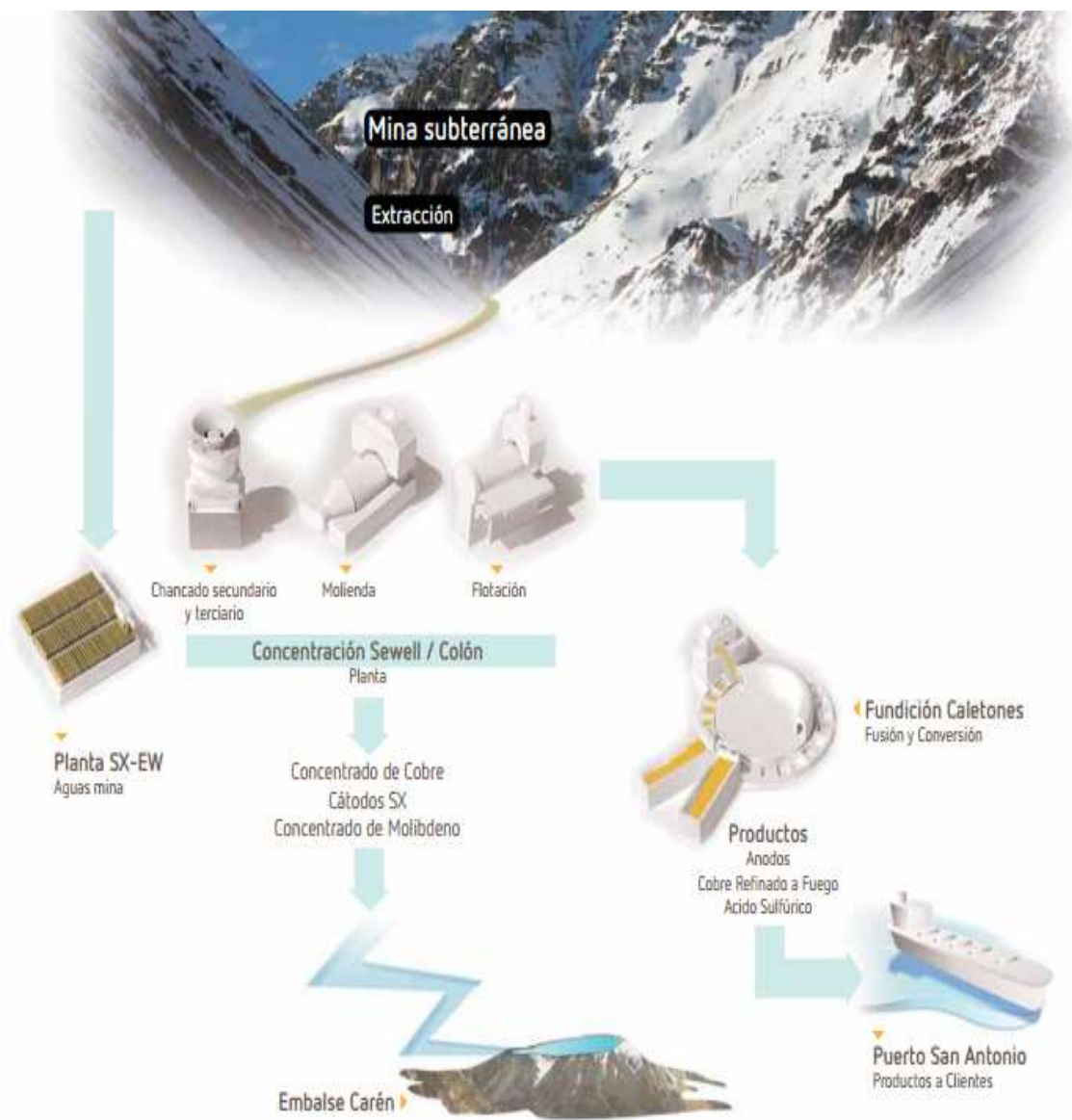


Ilustración 2.18: Esquema procesos de producción división El Teniente [16].

## **2.5.2 Gerencia de Servicios y Suministros, Superintendencia de Energía**

La misión de esta gerencia es la siguiente. Ser una gerencia confiable, anticipativa y estratégica, que integra conectividad, entre las unidades organizacionales, las personas y las empresas colaboradoras, siendo siempre responsables por la sustentabilidad de nuestros procesos, por la calidad y costos de los servicios y suministros, creando valor y generando prestigio, para la división en particular y el país en general.

La Gerencia De Servicios y Suministros, es la encargada de proveer apoyo y soporte al proceso productivo, en forma transversal a toda la división.  
Esta gerencia cuenta con 5 superintendencias.

- Superintendencia de Energía
- Superintendencia Ing. Logística y Contratos
- Superintendencia Carretera y Movilización
- Superintendencia Operaciones Logísticas
- Superintendencia Transporte Industrial

La superintendencia en la cual se realizó el presente trabajo de título fue la de energía, y esta se divide en tres áreas.

- Unidad de Transmisión y Distribución, son los dueños y encargados de la operación del sistema eléctrico, estudios de impacto eléctrico y la gestión de compra de energía.
- Unidad de Eficiencia Energética, son los encargados de realizar las iniciativas de proyectos de eficiencia energética de la división, y adicionalmente proveen el combustible a la división.
- Unidad de Servicios Eléctricos y Electrónicos, son los encargados de la mantención preventiva, predictiva y correctiva del SET. Adicionalmente se encarga de la metrología e instrumentación de algunas plantas, como también de los servicios en baja tensión de los campamentos.

Dentro de la unidad de Servicios Eléctricos y Electrónicos, se sitúa líneas de transmisión, área donde se realiza este estudio.

Esta área se sitúa geográficamente en Coya y realiza servicios transversalmente a toda la división. Su tarea es básicamente la de generar licitaciones para construcción de líneas, inspeccionar mantenciones y realizar un catastro certero sobre las posibles necesidades que pueda requerir la división de manera de que el transporte de energía quede garantizado durante todo el día.

### **2.5.3 Sistema de Transmisión**

El sistema eléctrico de El Teniente de 50 [Hz] se abastece desde las centrales de Colbún y Candelaria, de las centrales Coya y excepcionalmente por el sistema de 60 [Hz], el cual inyecta energía a través de unos convertidores estáticos de frecuencia que llegan a la subestación El Cobre. También se alimenta de la central Sauzal. El sistema completo cumple con el criterio N – 1, como se requiere a nivel internacional

La energía que viene de la subestación Candelaria, punto de conexión con el SIC, es transmitida a una tensión de 220 [kV], la cual disminuye a 110 [kV] en la subestación Minero, por medio de tres autotransformadores. Esta se une con la energía proveniente de la central Coya-Pangal, que desde Maitenes se transfiere en 110 [kV]. Luego desde la subestación Minero se transmite a las subestaciones de Colón, Cordillera y El Cobre.

En el esquema a continuación muestra el sistema eléctrico de transmisión de El Teniente en 50[Hz] y 60 [Hz] [18].

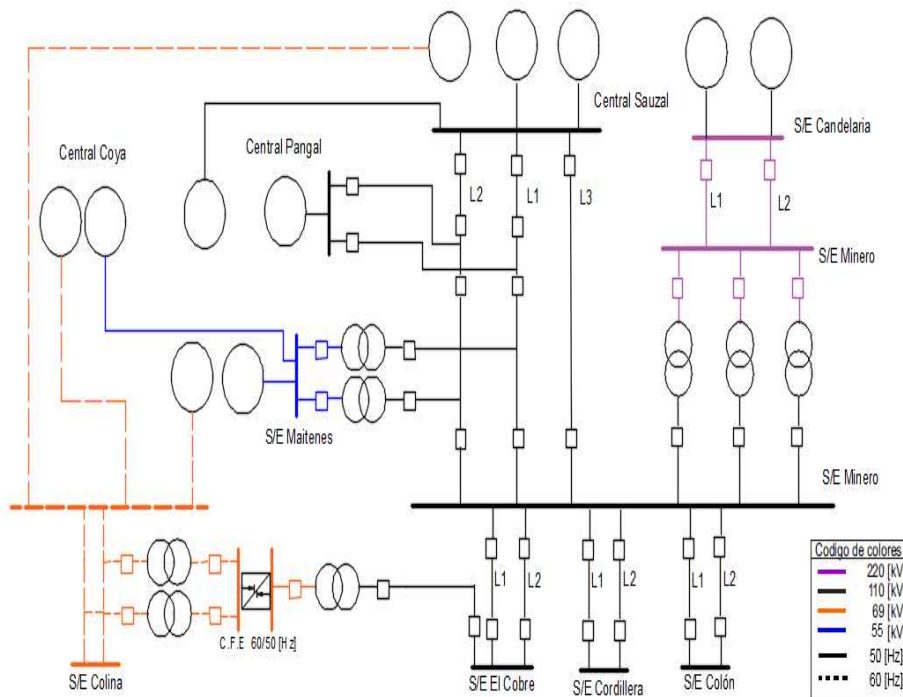


Ilustración 2.19: Diagrama unilineal sistema eléctrico de transmisión, El Teniente [19].

Las subestaciones de El Cobre y Colón consumen en la actualidad 50 [MW] cada una, y la subestación Cordillera 120 [MW]. Durante enero del año 2013 se instaló un banco de condensadores en la barra de 110 [kV] de la subestación Cordillera, de una capacidad de 30 [MVar], el cual consta de dos ramas en paralelo por fase y con siete condensadores en serie por rama, el cual mejoró el factor de potencia en la subestación Minero, de un 92 [%] al 96 [%] aproximadamente. Actualmente se está trabajando en la incorporación de un condensador de las mismas características que el de la subestación Cordillera, pero con una capacidad de 35 [MVar], esto pronostica mejorar el factor de potencia de un 96 [%] hasta un 99 [%] aproximadamente.

La generación de energía proveniente desde la central Coya se transmite a través de las líneas de Sauzal 1 y 2, la central mencionada tiene la característica de generar en 50 y 60 [Hz]. Coya tiene actualmente cuatro generadores de 12, 8, 6 y 15 [MW], pero por el generador de 15 [MW] solo entrega energía a Sauzal, la cual la envía al SIC. Además el generador de 6 [MW] se encuentra en mantenimiento en la actualidad [20].

## 2.5.4 Sistema de Distribución

### 2.5.4.1 Subestación Colina

El sistema eléctrico de Sewell tiene una frecuencia de 60 [Hz], y posee la característica de que se conecta al sistema de 50 [Hz] del sistema eléctrico de transmisión, a través de convertidores estáticos, los cuales llegan a la subestación El Cobre. El diagrama unilineal correspondiente a esta subestación es el siguiente [19].

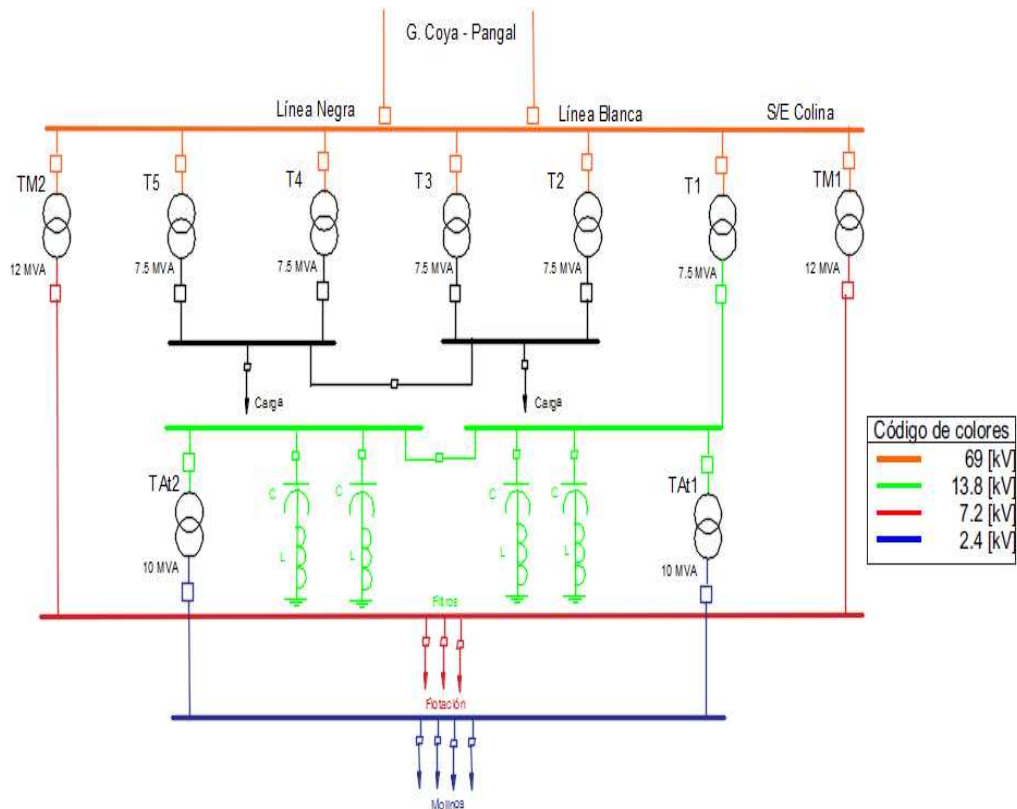


Ilustración 2.20: Diagrama unilineal sistema eléctrico de transmisión 50 [Hz], El Teniente [19].

La Superintendencia de Energía, ente a cargo del suministro de energía de la división, proyectó el sistema eléctrico de Sewell hasta el año 2018.

### 2.5.4.2 Subestación Colón

Los principales procesos que alimenta esta subestación son, la planta de chancado secundario – terciario. En la actualidad se encuentran cuatro transformadores de tres devanados, de 110, 13,8 y 4,16 [kV]. El primario de los transformadores recibe la energía de la subestación Minero, luego en 4,16 [kV] (terciario) se alimentan principalmente los molinos y por el secundario, que es de 13,8 [kV], los demás procesos. Se puede observar en la siguiente ilustración el diagrama unilineal de la subestación Colón [19].

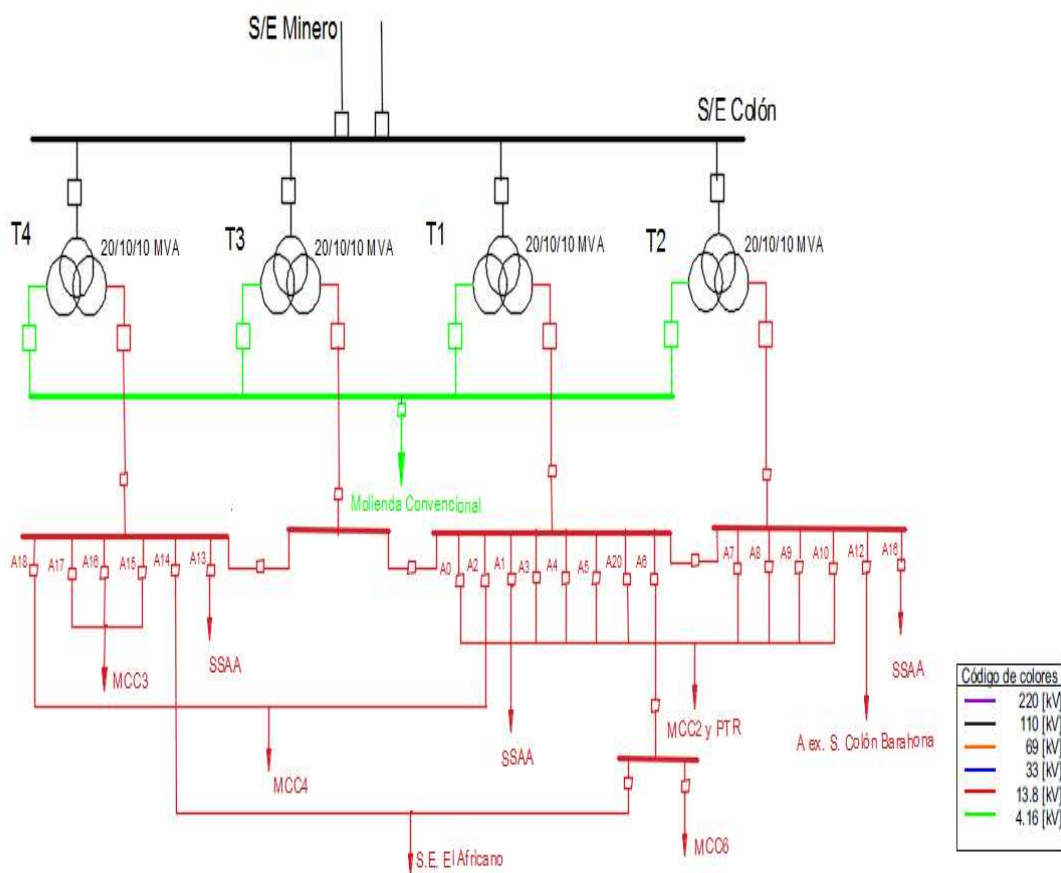


Ilustración 2.21: Diagrama unilineal subestación Colón [19].

El consumo de la subestación es cercano a los 50 [MW] con un factor de potencia del 90 [%], los consumos principales se dividen en los tres transformadores  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_4$ , esto debido a que la barra de 13,8 [kV] del transformador  $T_3$  no existe físicamente y sólo sirve como maniobra para dejar en paralelo los transformadores adyacentes, y a una barra de 4,16 [kV]



tiene un consumo de 3 [MW] aproximadamente. Con respecto a los transformadores  $T_1$  y  $T_4$ , presentan consumos próximos a los 18 [MW], por otra parte el transformador  $T_2$  tiene un consumo cercano a los 10 [MW] [20].

### 2.5.4.3 Subestación Cordillera

Los consumos que abastece principalmente la subestación Cordillera son: Planta de chancado primario (proceso SAG), Planta centralizada de Pebbles y la Mina. Esta cuenta con ocho transformadores, tres de ellos de 110 a 33 [kV] que alimentan los procesos de la mina, dos de ellos con las mismas características (110 a 33 [kV]) que alimentan a proceso SAG (molinos relativamente nuevos), y los últimos tres transformadores alimentan los demás procesos. En la ilustración 14 se puede observar el diagrama correspondiente a esta subestación [19].

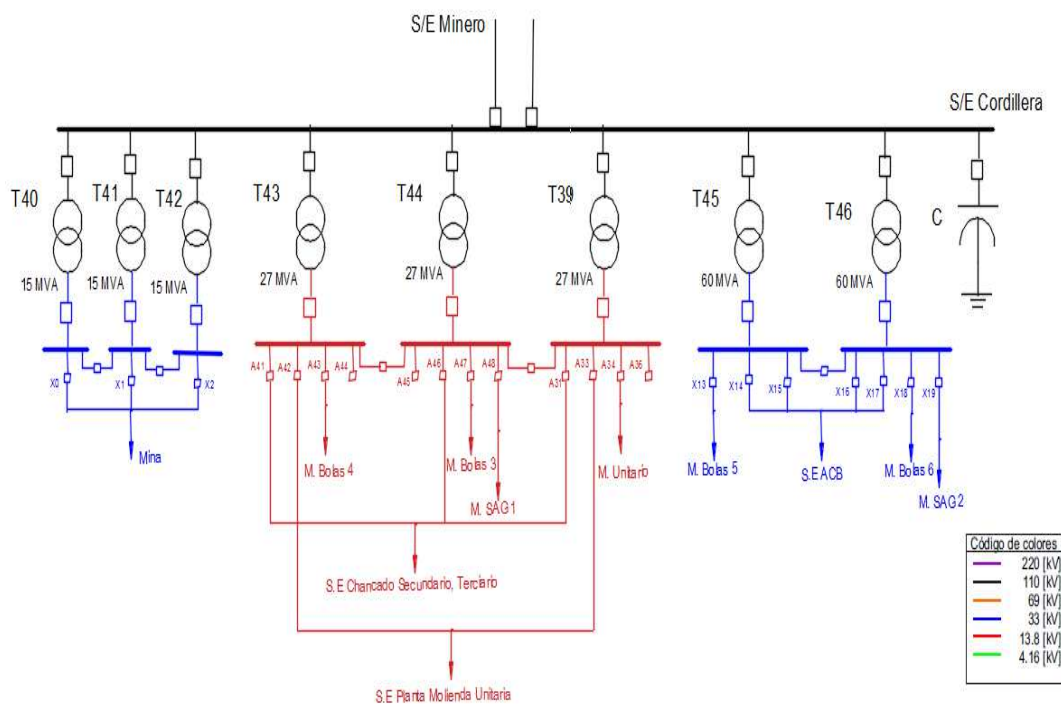


Ilustración 2.22: Diagrama unilínea subestación Cordillera [19].

El banco de condensadores que se instaló en la barra de 110 [kV] en esta subestación a comienzos del año 2013, mejoró el factor de potencia en la barra de un 89[%] a un 97 [%] aproximadamente.

El consumo de la subestación es cercano a los 120 [MW], en donde los transformadores que alimentan a la mina, vale decir  $T_{40}$ ,  $T_{41}$  y  $T_{42}$  presentan consumos cercanos a los 8 [MW]. Para los transformadores  $T_{39}$ ,  $T_{43}$  y  $T_{44}$  los cuales alimentan el  $SAG_1$  (15.000[HP]), sus dos molinos (6.000 [HP]) y el molino de bolas (15.000 [HP]) como cargas más importantes, presentan un consumo de alrededor de 13 [MW]. Por último los transformadores  $T_{45}$  y  $T_{46}$ , los cuales alimentan el  $SAG_2$  (26.000 [HP]) y sus dos molinos (15.000 [HP]), presentan un consumo aproximado de 18 y 32 [MW] respectivamente [20].

#### 2.5.4.4 Subestación El Cobre

La subestación El Cobre alimenta los procesos de la planta de flotación y filtrado de Caletones. Esta cuenta con seis transformadores, cuatro de ellos con las mismas características y dos recientemente incorporados, debido a una ampliación de la subestación con la nueva tecnología en SF6, y con una amplia capacidad comparados con los anteriores. La siguiente ilustración muestra el esquema unilineal para la subestación [19].

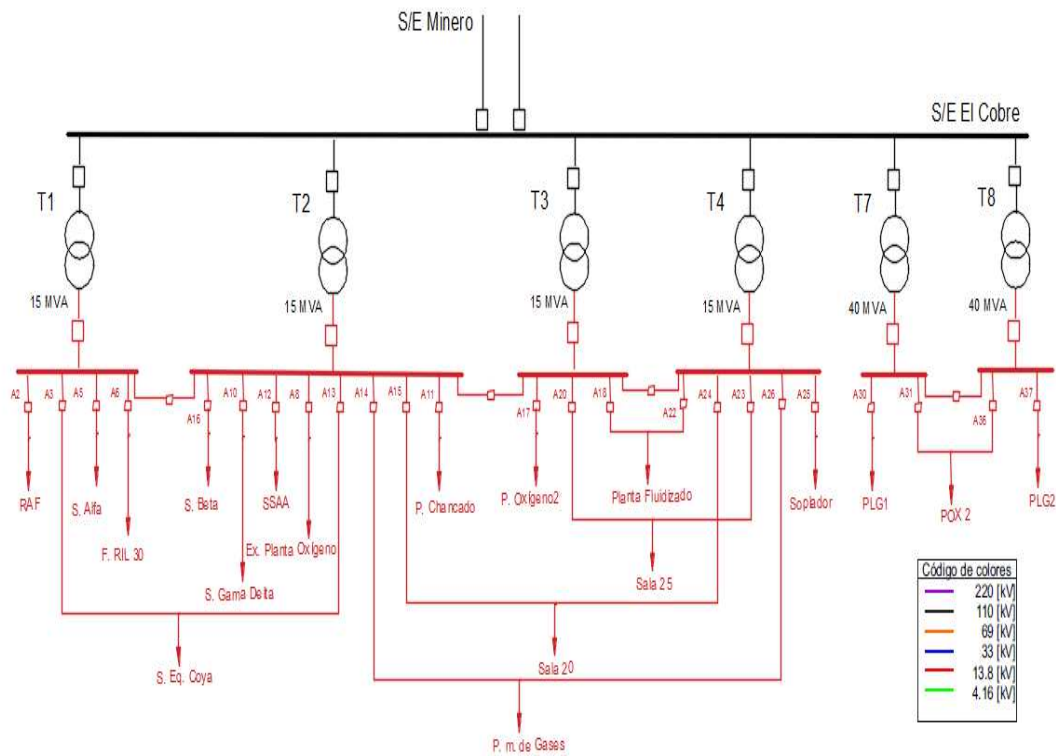


Ilustración 2.23: Diagrama unilineal subestación El Cobre [19].

Esta subestación presenta como consumos aproximados 50 [MW] con un factor de potencia de 97 [%], en la cual los transformadores  $T_1$  y  $T_2$  presentan consumos cercanos a 1 y 3 [MW] respectivamente,  $T_3$  y  $T_4$  ambos de 9[MW], y  $T_7$  y  $T_8$  aproximadamente de 10 [MW] y 19 [MW] [20].

### **3. IMPLEMENTACIÓN**

#### **3.1 CARACTERIZACIÓN LINEAS DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN**

Así como se mostró en la ilustración 2.19, existen varias líneas de alta tensión en la división El Teniente de Codelco, sin embargo no todas estas líneas pertenecen a la empresa estatal, sino que algunas son de las empresas generadoras que le entregan energía a la división y que construyeron sus propias líneas para cumplir con este propósito.

Durante el tiempo en el cual la división ha estado en funcionamiento ha habido diferentes cambios en el trazado de las líneas de alta tensión. El más importante de ellos se produjo en el año 2003 con motivo de un nuevo contrato de energía con la empresa Colbún. Antes de este contrato el complejo minero tenía un trazado en forma de anillo, estaba alimentada principalmente desde una línea de 110 [kV] que llegaba a la subestación Colón, a la cual se conectaba centrales como Sauzal, Coya y Pangal en su mayoría. Luego desde la subestación antes mencionada salían líneas en 110 [kV] para las otras subestaciones como Cordillera, el Cobre y Colina. A partir de la firma del nuevo contrato la empresa generadora Colbún construyó una línea auxiliar de doble circuito en 220 [kV] desde la central térmica Candelaria, y junto con ellos hicieron una subestación llamada Minero en donde llega la línea en cuestión. La finalidad de esta subestación es alimentar las subestaciones de todo el complejo minero en 110 [kV] por lo que transforma a este voltaje el que viene desde la central térmica. Para poder hacer esto se construyeron nuevas líneas y se acortaron otras como es el caso de la que originalmente iba desde Sauzal a Colón.

En esta sección se procederá a detallar las líneas de las cuales la división se puede y debe hacerse cargo en caso de ocurrir una falla, de manera de poder acotar y precisar de mejor manera los casos de estudios para el presente trabajo.

##### **3.1.1 Línea Sauzal – Minero**

Originalmente el trazado se contempló con una alimentación desde el SIC a través de una línea de 110 [kV] desde la central Sauzal hacia la subestación Colón. Esta también recibe energía desde la central Coya por intermedio de una línea de 55 [kV] que es elevada a través de la subestación Maitenes, esto se mantiene en la actualidad. El trazado se constituía por 3 circuitos trifásicos, la línea 1 y 3 circulan por la misma torre, por otra parte el circuito número 2 tiene una estructura independiente. El largo original de esta línea era de 26,56

[km] para el circuito 1-3 y 25,8 [km] para el circuito 2, con 109 y 108 torres respectivamente. Fue puesta en servicio en agosto de 1970.

Con la adquisición del nuevo contrato por la división y Colbún, esta línea se modificó un poco en su trazado, llegando hasta la subestación Minero sin embargo la mayoría de su estructura se mantuvo. El largo del circuito 1-3 quedó en 27,88 [km] y el 2 con 26 [km]. El número de estructuras se redujo a 105 y 104 respectivamente. Algo que tampoco varió fue el conductor el cual es ACSR HAWK 477 MCM. Cuenta con un cable de guardia de acero E.H.S. de 3/8'', el cual llega hasta la subestación Minero. También cuenta con amortiguadores stockbridge en todos sus vanos.

Luego del contrato firmado por la división y la empresa generadora Colbún, esta línea no se utiliza mucho quedando prácticamente sin carga la mayoría del tiempo. La potencia que transmite es entre 20-25 [MW] en los meses de verano ya que ahí es cuando se tiene agua para que Sauzal genere.

### **3.1.2 Línea Minero – Colón**

Esta línea fue construida el año 2003 y en parte se aprovechó el trazado que ya existía de la línea Sauzal – Colón, alimenta la subestación Colón en 110 [kV], la cual a su vez tiene cargas conectadas las cuales se detallaron anteriormente en la ilustración 2.21. El largo de esta es de 2 [km], es un doble circuito trifásico con un conductor ACSR HAWK 477 MCM, con cable de guardia y amortiguadores stockbridge. También y debido a las constantes fallas que presentaba esta línea durante los meses de invierno, producto de nevazones, se instalaron contrapesos en todas las cadenas de aisladores. El número de estructuras con las que cuenta esta línea es de 8.

### **3.1.3 Línea Minero – Cordillera**

Al igual que todas las líneas que salen desde la subestación Minero esta fue puesta en operación en el año 2003 y se dirige hacia la subestación Cordillera en 110 [kV], la cual tiene consumos como Molino Unitario, el SAG 1, la mina, entre otros. Ver detalle en ilustración 2.22. Tiene un largo de 2,8 [km], doble circuito trifásico con un conductor AAAC Flint 740,8 MCM, tiene cable de guardia y amortiguadores stockbridge. El conductor de esta línea no es el mismo que el de las demás ya que por problemas de

capacidad tuvo que ser cambiado y sustituido por otro que pudiera llevar la cantidad de potencia demandada por la subestación. La cantidad de estructuras para esta línea es de 14.

#### **3.1.4 Línea Minero – El Cobre**

La línea Minero – El Cobre fue puesta en servicio durante el 2003 y alimenta la subestación del mismo nombre en 110 [kV]. Esta subestación tiene importantes consumos como son la fundición, la cual es parte fundamental de la división y también el chancado, entre otros, más detalles en la ilustración 2.23. Al igual que su par Minero - Cordillera tiene un largo de 2,8 [km] sin embargo utiliza un conductor ACSR HAWK 477 MCM, con cable de guardia y amortiguadores stockbridge. El número de estructuras correspondientes a esta línea es de 12.

#### **3.1.5 Línea Coya – Colina**

Se conoce como la línea más antigua del complejo minero y que en la época previa a la estatización de la minería, en manos de capitales norteamericanos, y la entrada en operación de la línea Sauzal - Colón era la columna vertebral del sistema de transmisión. Fue puesta en operación en el año 1911 y alimentaba todo el proceso minero incluyendo a Sewell, famosa ciudad minera. En un comienzo esta línea era alimentada exclusivamente por la central hidráulica Coya, sin embargo en 1920 se incluyó a la central hidráulica Pangal. Ambas centrales son alimentadas por los ríos Cachapoal, Coya y Pangal.

La línea transmite potencia a un voltaje de 69 [kV] a una frecuencia de 60 [Hz]. El hecho que se transmitiera a 60 ciclos, algo inusual en el país, es debido a que los inversionistas originales del proyecto eran de nacionalidad estadounidense y en ese país toda la energía utiliza esa convención para la frecuencia, incluido equipos y dispositivos. Esta línea está formado por un doble circuito trifásico, en el cual cada circuito recibe una denominación se conocen como línea blanca y línea negra. El largo es de 24 [km] y el conductor utilizado es de cobre específicamente 4/0 AWG, lo cual también es bastante inusual ya que posteriormente se utilizarían conductores de aluminio y acero. Cuenta con un total de 159 estructuras de alta tensión.

### **3.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El mantenimiento oportuno de los distintos elementos que forman parte de un sistema eléctrico de potencias resulta esencial para poder prevenir fallas y salidas intempestivas de estos. En la mayoría de estos sistemas se mantiene un monitoreo constante de generadores, líneas de transmisión, subestaciones y líneas de distribución, ya que estos son los puntos más sensibles y expuestos a fallas que puedan provocar una interrupción en la operación tanto de sistemas interconectados como también de industrias en las cuales la energía sea un tema prioritario.

En la presente sección se mostrará el plan de mantenimiento 2015 de la división El Teniente para sus líneas de alta tensión y cuáles son los procedimientos que se efectúan para tener un pronóstico acertado para prevenir disturbios en la operación normal del complejo minero. También se mostrarán ejemplos para explicar de mejor manera la importancia de la realización de las tareas de mantención y las consecuencias de la falta de estas.

Las tareas que se tienen asignadas como plan de mantenimiento predictivo dentro de la corporación son patrullaje pedestre, inspección con trepado y termografía. El patrullaje pedestre es aquel que se realiza en camioneta o a pie y en el cual se realiza una observación minuciosa de las condiciones en las cuales se encuentra la línea y sus componentes como conductor, aisladores y herrajes. También se trata de tener una visualización sobre algunos cambios ocurridos en el terreno en el tiempo transcurrido durante la última inspección. Este aspecto es muy importante en trazados de líneas ubicados en alta montaña ya que debido a las condiciones climáticas extremas que se tienen las cuales pueden provocar desprendimientos de roca o desplazamientos del sedimento, que afectan de manera negativa a las torres que soportan las líneas.

Para reforzar el patrullaje pedestre se realiza también una inspección con trepado (realizado por personas con más de cuarenta años de experiencia en líneas), esto quiere decir que la persona encargada de hacer el patrullaje debe subirse a la torre y observar desde más cerca los aisladores, herrajes y ferretería, y también tener una panorámica con más perspectiva sobre el terreno para observar si han ocurridos cambios importantes que pudieron haber afectado a la estructura en cuestión. Junto con las inspecciones antes mencionadas, y en caso de ser estrictamente necesario, se sobrevuela la línea en helicóptero para poder observar aquellos tramos que son de difícil acceso ya sea a pie o en camioneta.

La termografía consiste en revisar uniones de cables y también de soportes con conductores para encontrar puntos calientes que puedan delatar el desgaste de las mismas, y así poder reapretar en los puntos encontrados. Esto se hace mediante un instrumento que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano, indicando la temperatura máxima que se registra y la temperatura promedio para poder contrastar con el resto de la estructura. Estas medidas se toman de noche de manera de evitar distorsiones ocasionadas por el calor y luz del día. A continuación se muestra una fotografía del instrumento utilizado con este propósito.



*Ilustración 24.1: Termógrafo marca Fluke modelo Ti 32*

Este instrumento permite capturar fotografías y luego traspasarlas en formato digital de manera que se pueda hacer un informe con las anotaciones realizadas.

El calendario de mantenciones se realiza a fines de un año para presentarlo a comienzos del otro de manera de que se aceptado y pueda ser implementado inmediatamente. La agenda programada para el año 2015 es muestra en la siguiente tabla.



Tabla 3.1: Programa de mantenencias división El Teniente 2015.

Líneas de Transmisión	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Sausal- Minero Circuito 1 y 3												
Patrullaje Pedestre					P							
Inspección con Trepado										P		
Termografía												P
Sausal Minero Circuito 2												
Patrullaje Pedestre					P							
Inspección con Trepado									P			
Termografía											P	
Minero - Colón												
Patrullaje Pedestre						P						
Inspección con Trepado										P		
Termografía											P	
Minero - El Cobre												
Patrullaje Pedestre						P						
Inspección con Trepado										P		
Termografía											P	
Minero - Cordillera												
Patrullaje Pedestre						P						
Inspección con Trepado									P			
Termografía											P	
Coya - Colina												
Patrullaje Pedestre			P									
Inspección con Trepado									P			
Termografía												P
Lavado de Aisladores				P								P

Como se observa en el calendario las actividades descritas anteriormente se realizan una vez al año para cada línea de transmisión. Además se puede notar que para la línea Coya-Colina se tiene una actividad más registrada para el presente año, la cual es el lavado de aisladores. Esto debido a que en una inspección realizada durante el 2014 se registró que estos se encontraban sucios por lo que se calendarizó la tarea de limpiarlos. Este plan de mantenimiento tiene presupuestado gastar un 35 [%] de los recursos con los que dispone el área en total.

A continuación se mostrarán ejemplos de lo importantes que son estas inspecciones y lo útiles que resultan realizarlas a tiempo o por el contrario, los daños que puede traer no realizarlas con la preocupación necesaria.

En el mes de Enero de 2015 se realizó un patrullaje pedestre a la línea Coya-Colina muy exhaustivo, debido a que se habían dejado de realizar este tipo de inspección hace 6 años en la división, esto por un cambio de jefatura que hubo durante el periodo mencionado. En esta inspección se encontró con una torre descuadrada con signos de una inminente caída, lo que se califica como una falla grave. Esto se puede observar en las siguientes imágenes.



*Ilustración 3.25: Torre con problemas, patrullaje pedestre.*

El informe de la inspección registra un doblamiento importante de los fierros que soportan la estructura de la torre y también el corte de estos en la base de la misma. Las causas son atribuibles a esfuerzos mecánicos realizados y no ha caída de algún material rocoso en la línea. Estos esfuerzos mecánicos se deben en primera instancia al desplazamiento del terreno donde se encuentran las fundaciones de la torre y que habría provocado el doblamiento de la misma. Una de las causas puede ser el movimiento telúrico de gran magnitud registrado en febrero del 2010, ya que no se hacía inspección desde esa fecha. Las conclusiones del informe son lapidarias y demanda el reacomodo de los fierros que soportan la estructura de manera que no ceda y provoque un daño mayor en la línea.

Durante el mismo mes en una inspección con trepado realizada a la misma línea anterior se pudo observar que el cable de guardia que va sujeto en la parte superior de las torres se encontraba roto en una de estas. Si bien esta se cataloga como algo menor, es uno de los objetivos que tiene realizar este tipo de patrullajes para poder evitar fallas mayores. La imagen siguiente muestra el cable roto.



. Ilustración 26.3: Cable de guardia por cortarse, inspección con trepado.

Ilustración 3.2 y 3.3 fueron tomadas por Víctor Bustamante jefe de líneas de El Teniente.

En cuanto a la termografía se muestra una imagen en la cual se puede observar el modo de hacer este análisis por medio del dispositivo antes descrito y cual es el tipo de fotografía que muestra.

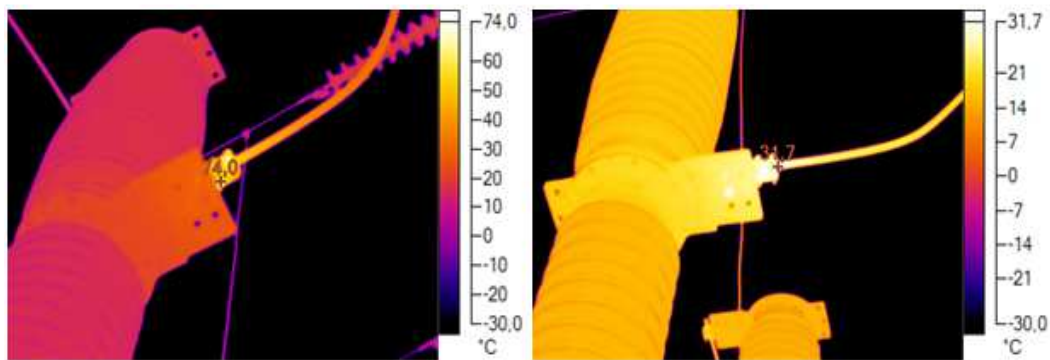


Ilustración 27: Imagen termográfica de conexión línea e interruptor monofásico, subestación Cordillera.

La ilustración 3.4 corresponde a un interruptor ubicado en la subestación Cordillera para la línea Minero – Cordillera, la fotografía de la izquierda corresponde a la fase 3 y la de derecha es de la fase 2. En correspondiente a la fase 3 se observa que la temperatura es de 74[°C] y la fase 2 registra una temperatura de 31,7 [°C]. El primer caso se califica como grave con una sugerencia de reapriete urgente, por otra parte en el segundo caso este se califica como moderado por lo que debe ser monitoreado para ver su evolución.

### **3.3 FALLAS LINEAS DE ALTA TENSIÓN**

En primer lugar se comienza por definir una falla. Esta se entiende como condición que impide continuar con la operación de uno o más componentes de un sistema eléctrico y requiere rápida acción de los esquemas de protecciones para evitar el daño de los equipos. Entre las fallas, las más comunes son los cortocircuitos. Otras que se pueden mencionar son; la apertura de conductores, la pérdida de excitación de máquinas síncronas, etc., las que pueden producir efectos similares a los cortocircuitos.

Dados los tipos de efectos climáticos que se estudian en la presente memoria, estos tienen como consecuencia, la mayoría de las veces, cortocircuitos. La salvedad ocurre en el caso de oscilaciones de alta frecuencia que por lo general genera problemas de desgaste de material que forman una línea de alta tensión, como soporte y aisladores, lo que posteriormente, si no se realiza la oportuna revisión y cambio de estos, puede desembocar en cortocircuitos.

#### **3.3.1 Corto Circuitos**

Un cortocircuito es la desaparición del aislamiento relativo de dos conductores de tensión diferente, alimentados de la misma fuente, sin la presencia de una impedancia conveniente.

Las consecuencias de un cortocircuito se deben tanto a los efectos de la sobrecorriente como a los de las caídas de tensión originadas por ésta. En general, las corrientes de cortocircuito alcanzan magnitudes mucho mayores que los valores nominales de los generadores, transformadores y líneas. Si se permite que estas corrientes circulen por un período prolongado, pueden causar un serio daño térmico al equipo y problemas de estabilidad de funcionamiento en el SEP.

En este aspecto, La experiencia ha mostrado que entre el 70 y 80% de las fallas en líneas de transmisión son fallas monofásicas a tierra, que se originan en el flameo de una línea a la torre y a tierra. Aproximadamente en 5% de las fallas intervienen las tres fases [21].

Existen cuatro fuentes básicas de corrientes de cortocircuito, que alimenta con corrientes de cortocircuito a la falla, estas son: Generadores, motores sincrónicos, motores de inducción y el sistema de la compañía suministradora de energía.

Dentro de los equipos que conforman un sistema eléctrico de potencia, las líneas aéreas son las que poseen una mayor probabilidad de ocurrencia de falla, y en la mayoría de los casos se deben a ruptura o contaminación de las cadenas de aisladores, cortadura de conductores, balanceo de los conductores por la acción del viento, contacto accidental de la línea con cuerpos extraños, etc.

Otras causas de cortocircuitos son, envejecimiento del aislamiento, daño de bobinados, falsas maniobras tales como apertura en carga de desconectores y puesta a tierra de líneas por trabajos, etc.

La probabilidad de ocurrencia de fallas en ellas y en otros equipos se detalla seguidamente [22].

Tabla 3.2: Ocurrencia de fallas en los equipos.

Equipos	Ocurrencia [%]
Líneas de Transmisión Aéreas	50
Cables	10
Switchgears	15
Transformadores de Poder	12
Transformadores de Medida	2
Equipos de Control	3
Otros	8

Dependiendo de la capacidad de generación, la distancia y la impedancia entre la fuente y el punto de falla, la sobrecorriente puede alcanzar una magnitud varias veces superior a la corriente nominal de los equipos.

Cuando se determinan las magnitudes de las corrientes de cortocircuito, es extremadamente importante que se consideren todas las fuentes de corriente de cortocircuito y que las reactancias características de estas fuentes sean conocidas.

A su vez, la disminución del voltaje ocasionada por los cortocircuitos trae como consecuencia para el resto del sistema la disminución de su capacidad de transferencia de potencia y con ello, una baja de su estabilidad si se prolonga por algunos segundos.

### 3.3.2 Fallas en División El Teniente

Las fallas en líneas de transmisión, como se mostró anteriormente, es algo de mucha ocurrencia. Es por esta razón que se utilizan muchas fórmulas de manera de poder asegurar el suministro de energía y también corregir las distintas fallas que van ocurriendo. Uno de los criterios que permiten asegurar la entrega oportuna de energía a los distintos consumos es el conocido N-1. Este se trata básicamente de que al ocurrir la salida intempestiva de algunos de los elementos del sistema de potencia este pueda ser remplazado. En el contexto de una línea de transmisión este se puede interpretar como tener un doble circuito, y así cuando falle uno de los circuitos pueda ser capaz de soportar toda la carga requerida y así no dejar sin energía a algún consumo determinado. Este criterio es difícil de implementar en una empresa minera ya que requiere un gasto adicional en el cual prefieren no incurrir debido a que se tienen otras prioridades como la operación misma o exploración y explotación de nuevos yacimientos dentro de los mismos complejos mineros.

Si bien a priori se entiende que la energía es algo fundamental para el funcionamiento de la faena minera, las distintas empresas no invierten mucho en asegurar su suministro y muchas veces simplemente implementan soluciones que no terminan por resolver las fallas o contingencias que ocurren.

Como se mencionó en capítulos anteriores, el diseño de líneas de alta tensión en cordillera es un tema complejo, no solo por las condiciones climáticas si no por la geografía en sí, lo cual dificulta en muchas ocasiones realizar un trazado de la misma. En general a la hora de planificar las líneas se privilegia el camino por el cual se construirá la línea sin tomar en cuenta la condición de viento y nieve. A la larga estas condiciones climáticas provocarán fallas que detendrán la operación de cualquier empresa que instaló sus faenas en altura.

Para poder despejar las fallas provocadas por condiciones climáticas de invierno, como nieve y viento, se deben estudiar bien sus causas y tener un registro apropiado sobre las mismas y así saber cuáles son las líneas afectadas y que tipos de fallas ocurren de manera de asociarlas con los fenómenos que se han estudiado con anterioridad y así implementar el dispositivo correcto para poder prevenirla y evitar que siga ocurriendo.

En este contexto se realizó una investigación en el área de operaciones perteneciente a la Superintendencia de Energía, la cual es la encargada de revisar el correcto funcionamiento del sistema de potencia de la división El Teniente y registrar los distintos eventos que hacen operar las protecciones del sistema y dejar sin suministro de energía a alguna de las faenas del complejo minero. Se mostrará el registro de los disturbios que se puedan asociar a causas climáticas ocurridos comenzando desde el año 2006 y hasta llegar al año 2014. En

este se especificará línea en la cual se produce, tiempo de despeje y en el que demora en tener una operación normal y cargas a las cuales afectó, para así poder analizar las fallas y tener una mejor panorámica de las mismas.

### **3.3.2.1 Disturbios año 2006**

#### **3.3.2.1.1 8 de Junio**

En esta fecha se registró una gran tormenta de viento y nieve, esto trae como consecuencia la operación de las protecciones del circuito número 2 de la línea Candelaria – Minero. La protección que se activa es el relé diferencial a las 5:06 [hrs]. El evento produjo una baja de voltaje lo que liberó cargas por protección de bajo voltaje, lo que no impide retomar la carga de inmediato. La autorización para tomar carga se dio a las 5:10 [hrs]. Las cargas más importantes que se vieron afectadas fueron las siguientes; Mina 50 [Hz] 3,7 [MW], Colón 13,4 [MW], Molino SAG 1 10,1 [MW], Molino SAG 2 41,6 [MW], Planta de chancado secundaria 1[MW], Subestación El Cobre 10,5[MW], Bombas de impulsión de agua 3,5 [MW]. En total fueron 88[MW] los que se desprendieron luego de que operaran las protecciones. La hora en la cual es repone el servicio fue a las 5:21 [hrs] y a la hora a la que se logra tener una normalización de todo el sistema es a las 6:59 [hrs]. Esto da como resultado que se demoró 15 [min] en restablecer el servicio y 1 hora con 53 minutos llegar al estado de normalización.

Durante la misma tormenta se registra otro suceso que terminó con la detención de la operación normal de la mina. Se activa el relé diferencial del circuito número 1 en la línea Minero -Colón. Esto ocurre a las 6:08 [hrs]. Al operar el relé diferencial el circuito n° 1 Minero – Colón quedó fuera de servicio hasta efectuar una inspección visual al tendido y torres. Media hora más tarde opera el circuito n°2 Minero – Colón, lo que obligó hacer dos intentos de reposición del circuito 1 de la misma línea, no logrando el objetivo. La primera reposición se realiza a las 7:01 [hrs] y la segunda a las 7:20 [hrs]. El circuito n°1 queda fuera de servicio hasta que el área de mantención líneas realice inspección. Se pierden 8 [MW] en la subestación Colón. Se logra reponer el servicio a las 9:59 [hrs] y se logra una condición de normalidad a las 13:45 [hrs]. Por lo que se tiene que la duración del evento fue de 3 [hrs] y 51 [min] y se llega la normalidad en 7 [hrs] y 37 [min].

Finalmente y en el mismo día se registra la operación de la protección de relé diferencial del circuito número 2 de la línea Minero – Colón. Esta se produjo a las 6:38 [hrs]. Este queda fuera por la misma protección que el primero, por lo que al no tener alternativa de suministro de energía para la subestación Colón, se intentó una reposición a las 7:20 [hrs], la cual resultó exitosa. Se deja el circuito n°1 fuera de servicio hasta que se realice la inspección visual. Se pierde un total de 29,5 [MW] en la subestación Colón. Como se

mencionó anteriormente se logra reponer el servicio a las 7:20 [hrs] y la normalización del sistema fue a las 13:45 [hrs]. El evento se mantiene por 42 [min] y el complejo minero vuelve a la operación en 7 [hrs] y 7 [min].

#### 3.3.2.1.2 6 de Agosto.

Durante la noche del día 6 de agosto aconteció una tormenta de nieve con gran presencia de viento, lo cual produce el chicoteo entre fases de la línea blanca Coya – Colina. El evento ocurre a las 20:54 [hrs] operando los siguientes relés, el 21 en la central Coya fases A – B zona 2, y el 67 en la subestación Colina fase C. Se produce un total de 12, 4 [MW] de pérdidas siendo las más importantes las ocurridas en la mina en 60 [Hz] con 2,98 [MW] y la subestación Colina con 7,5 [MW]. La hora de reposición del sistema a las 20:57 [hrs], es decir, el evento duró 3 [min]. La condición de normalización se alcanza a las 22:38, demorándose así 1 hora y 44 [min] en lograr dicha estabilización.

#### **3.3.2.2 *Disturbios año 2007***

Los datos obtenidos de fallas para este año no se encuentran tan detallados como las del año anterior, sin embargo se deja constancia en los informes anuales de las líneas afectadas, cargas y tiempos de despeje de la falla. Estos deberán ser suficientes para que posteriormente se haga un análisis global y concluir al respecto.

##### 3.3.2.2.1 29 de Mayo

Se deja registro de una falla en el circuito Coya – Colina, la línea negra, por causas climáticas, en específico viento y nieve. Este disturbio tiene como consecuencia una para en la operación desconectando 15,5 [MW] en la subestación Colina en la alimentación en 60 [Hz] que se dirige a la Mina. El tiempo en el cual se logra despejar esta falla es de 39 minutos.

##### 3.3.2.2.2 4 de Julio

Este evento al igual que el anterior, registrado en el mismo año, involucra al circuito Coya – Colina en su línea negra por condiciones climáticas adversas de viento y nieve. Tiene



como consecuencia la detención de la operación normal teniendo pérdidas de cargas de 9,8 [MW] en las subestaciones de Colina y El Cobre. Esta falla tiene un tiempo de despeje de alrededor de 16 minutos.

### **3.3.2.3 *Disturbios año 2008***

Al igual que en el año 2007 no se encuentran datos detallados sobre las fallas, sin embargo los más relevantes para la investigación se pueden obtener. La modalidad en la cual se encontró la información fue en un informe anual el cual contenía todos los eventos ocurridos pero sin un informe el cual detalle los acontecimientos y medidas que se tomaron en los mismos.

#### **3.3.2.3.1 19 de Mayo**

Se registra la desconexión de los circuitos 1 y 2 de la línea Candelaria – Minero. Esta es la principal fuente de energía para el complejo minero por lo que esta falla detiene la operación de gran parte de las faenas. Si bien el informe dice que las causas de la falla no están claras se las atribuye al temporal de nieve que ocurre durante ese día. El disturbio trae consigo la desconexión de 78,02 [MW] de cargas y por un tiempo no menor de 43 [min]

#### **3.3.2.3.2 22 de Mayo**

En esta fecha también se observa la falla del circuito 1 y 2 de la línea Candelaria - Minero. Al igual que en la anterior se deja escrito que las causas son desconocidas y se investigan, sin embargo se las atribuye a condiciones climáticas adversas de nieve. Este evento no es tan grave como el anterior en cuanto a cargas desconectadas y tiempo de despejes, siendo de 21,25 [MW] y 10 [min] respectivamente.

### **3.3.2.4 *Disturbios año 2009***

En la recopilación realizada sobre distintos eventos relacionados a condiciones climáticas no se encontró ninguna falla o disturbio correspondiente a este año. Esto puede deberse a dos razones, la primera es que definitivamente no hubo fallas por este motivo y la segunda

es que si hubo, esta no fue debidamente documentada por lo que resulta imposible su caracterización.

### **3.3.2.5 Disturbios año 2010**

Desde este año en adelante se encuentra información de mejor documentada, esto se debe a que como política de empresa se comenzó a hacer informes para cada evento detallando las causas, consecuencias y posibles políticas correctivas o preventivas. Estos son muy detallados en cuanto a relato de los hechos y también muy explícito de las cargas que se desprenden producto de los disturbios, lo cual resulta de muchísima utilidad a la hora de hacer un análisis de las distintas fallas.

#### **3.3.2.5.1 22 de Junio**

Producto de una tormenta de nieve y viento se produce un disturbio en los circuitos 1 y 2 de la línea Sauzal – Minero. El relato de los acontecimientos es el siguiente, a las 00:01 se desconectan los interruptores del circuitos de 110 [kV] de Sauzal – Minero 1 y 2 en subestación Minero, circuitos de 55 [kV] Maitenes 1 y 2 en central Coya. En el primer caso la operación fue debido a la activación de los relés 21, por distancia pero se desconoce la zona, por otra parte en la central Coya la apertura de interruptores fue debido a la acción de los relés 50 por sobrecorriente instantánea. A las 1:21 comienza el cierre de los interruptores de los circuitos de la línea Sauzal – Minero afectados, y a las 1:39 se procede de la misma manera con los circuitos de Maitenes. Esta falla no registra pérdida de cargas esto debido a que las líneas en cuestión no estaban aportando energía al sistema. Tampoco se registran pérdidas de producción debido a perturbaciones de operación de estos circuitos.

#### **3.3.2.4.1 24 de Junio**

En la madrugada de este día se registra una gran tormenta de nieve y viento provocando la operación del circuito 3 de la línea Sauzal – Minero. Esta suministra 6 [MW] de energía eléctrica a las plantas de impulsión Coya – Sapos 1,2 y 3, a hidrovaciado y a la instalación de comunicaciones El Canelo.

El detalle de la maniobra fue el siguiente, a las 23:00 [hrs] de acuerdo a procedimiento establecido para condiciones de mal tiempo se debe sacar de servicio el circuito 1 de la línea Sauzal – Minero, la cual acompaña al circuito 3. A las 1:09 [hrs] operan las protecciones de distancia (falla entre fases) del circuito 3 ubicadas en la subestación Minero. En la subestación Colón se pierde carga de molinos 3, 9 y 12 un total de 9,6 [MW]. Por otra parte en la subestación Cordillera se pierden 67,2 [MW] correspondiente a los

molinos unitarios, molinos SAG 1 y 2, molino de bolas 5 y 6, en la mina se registra una pérdida de 1,7 [MW] en los ventiladores 58 y 65. Por otra parte en la subestación El Cobre se registra la pérdida de 8,5 [kW] de la planta de oxígeno 3. Todas estas pérdidas se deben a las perturbaciones provocadas por la falla que tienen como consecuencia en las protecciones de los equipos que operan al sentir la baja de voltaje. A las 1:15 [hrs] se da el visto bueno para retomar carga en las plantas, a las 2:40 se normaliza la carga en la mina, 2:44 [hrs] planta de oxígeno 3 al 50 [%] y finalmente a las 3:46 entra toda la molienda en servicio.

En las causas que se detallan en el informe es que al llevar poca carga la línea esto favorece la acumulación de nieve, la cual al desprenderse provoca la oscilación en la línea de transmisión y rompe la distancia de seguridad entre conductores, ice jumping.

### ***3.3.2.6 Disturbios año 2011***

#### **3.3.2.6.1 5 de Marzo**

En este caso no se tiene un informe asociado a la falla, sin embargo se logra recopilar este acontecimiento producto de registros que se tienen sobre los relés activados. En este caso se activa la protección 21 de distancia para el circuito 3 de la línea Sauzal – Minero, debido a una inusual tormenta de nieve y viento acontecida en esa fecha. Se deja escrito que este disturbio trae consecuencias en la producción, pero no se deja en claro los equipos que fueron desconectados ni tampoco se menciona el tiempo de despeje de los mismos. Para efectos de realizar la posterior evaluación económica de las fallas se harán supuestos acordes a acontecimientos similares para poder tener una estadística mayor y así poder resolver de mejor manera.

### **3.3.2.7 Disturbios año 2012**

#### **3.3.2.7.1 23 de Agosto**

El disturbio registrado durante esta fecha es consecuencia de una tormenta de nieve y la acumulación de esta en los conductores, luego y producto del desprendimiento de la misma se produce el acercamiento entre dos fases de la línea Sauzal – Minero. Se deja constancia de que la falla se habría producido cerca del sector el Polvorín por donde se encuentra el trazado.

El ocurrió a las 6:32 [hrs] de la mañana luego de que por la acción del relé 21 fases 2 y 3 se desconectara el circuito 3 de la línea Sauzal Minero lo que produce una baja de voltaje en el sistema de 50 [Hz], que tiene como consecuencia la operación de protecciones en equipos de distintas subestaciones. Como por ejemplo en la subestación Cordillera se tiene la desconexión de los molinos SAG 1 y 2, los molinos de bolas 3, 4, 5 y 6, el molino unitario, y también los ventiladores 58 y 65 de la mina. Por otra parte en la subestación El Cobre se observa la desconexión del soplador A y A – 9, en la fundición. Finalmente en la subestación Colón se registra la desconexión del molino 12, aunque este último ocurre a las 6:39 [hrs] producto de la detención de la bomba de ciclones. En total se tiene una desconexión de 87 [MW] producto del disturbio.

Posteriormente a las 6:34 [hrs] Colbún da la autorización para tomar carga, proceso que comienza a las 6:35 [hrs]. Dos minutos más tarde entra en servicio el molino de bolas 5, a las 6:50 [hrs] entra el molino 4 y un minuto después hace lo propio el 3. A las 6:52 entra en servicio nuevamente el SAG 1 y con una diferencia de dos minutos el SAG2. Luego los sopladores a las 7:03 [hrs] y finalmente el molino unitario a las 7:07 [hrs].

### **3.3.2.8 Disturbios año 2013**

Durante este periodo de tiempo no se registraron fallas por causas climáticas en las líneas de transmisión de la división. Esto coincide con que este año fue considerada como un año seco por la Dirección Meteorológica de Chile. Este tipo de periodos si bien parecen ser beneficiosos en cuanto a cantidad de fallas puede traer como consecuencias que se deje de preocupar por el problema que las tormentas de nieve generan en transmisión y quedando expuestos a fallas aún más considerables cuando estos eventos se presenten nuevamente.

### **3.3.2.9 Disturbios año 2014**

#### **3.3.2.9.1 16 de Marzo**

Para esta fecha se tiene una falla ocurrida en el circuito blanco de la línea Coya – Colina. Esta le suministra energía a concentrador Sewell, a la mina, a campamento Sewell y bombas de agua Sewell. El disturbio se produce a las 10:24 de la mañana, en central Coya se produce la desconexión del circuito blanco que se dirige hacia Colina por operación de distancia 21 en la zona 2, entre fases 1 y 3. Posteriormente en la subestación Colina se abre el interruptor de la línea por operación de la protección 67, fase A. De la misma manera en subestación El Cobre se abre el interruptor de 2,4 [kV] por operación del relé 67, fase A. Las desconexiones que ocurren son las siguientes, mina 0,5 [MW], molienda Sewell 12,27 [MW], chancado Sewell 1,95 [MW], bombas Matadero y Blaisdell 0,94 [MW] y el convertidor de frecuencia con 0,5 [MW]. Esto da un total de 15,71 [MW]. El procedimiento para retomar carga se da de la siguiente manera, 10:26 [hrs] se autoriza a las plantas a tomar carga, un minutos después los consumos de la mina quedan normalizados, 10 minutos más tarde las bombas se ponen en servicio. A las 10:47 [hrs] el circuito blanco se vuelve a energizar, 11:00 [hrs] el convertidor estático de frecuencia se pone en servicio. Casi cincuenta minutos después la molienda Sewell toma carga y finalmente a las 12:15 [hrs] el chancado de Sewell toma carga.

Las causas por las cuales se produjo esta falla no se tienen claras sin embargo se sabe que fue una falla provocada por el acercamiento peligroso entre dos fases del circuito antes mencionados. Hablando con el personal de la empresa estos comentan que el sector en donde se produce el disturbio se caracteriza por sus fuertes vientos los cuales pudieron haber provocado esta falla. Se aclara que trazado de toda la línea se encuentra en un sector ventoso y que si se le suma el peso adquirido por la misma al acumularse nieve en sus conductores esta queda muy expuesta a efecto galloping o vibraciones de baja frecuencia.

### 3.3.2.9.2 12 de Junio

El día jueves 12 de junio se registra una fuerte tormenta de nieve y viento haciendo que dispare la protección de distancia por falla bifásica en el kilómetro 5,4 de la línea Sauzal – Minero circuito 3. Lo cual provocó una variación de voltaje y la posterior desconexión de cargas sensibles a este tipo de variación. Los circuitos 1 y 2 de esta línea permiten la inyección de energía de las centrales Coya y Pangal en 50 [Hz], por otra parte el circuito 3 toma energía de la subestación Minero y alimenta servicios como el sistema de impulsión Coya – Sapos 1,2 y 3, el hidrovaciado y también el sistema de telecomunicaciones en el cerro Canelo.

La cronología de los acontecimientos fue de la siguiente manera, a las 13:12 [hrs] se registra la apertura de la línea Sauzal Minero, circuito 3. Las cargas perdidas a esta hora producto de la variación de voltaje fueron el SAG 1 con 11,2 [MW], SAG 2 15,4 [MW], molino de bolas 5 y 6, 24,1 [MW], molinos 9 y 11, 5,5 [MW], bombas de impulsión 4,9 [MW] y oras cargas 4,9 [MW]. Siendo un total de 65 [MW] desconectados por la falla. A las 13:18 [hrs] se solicita a Colbún reposición del interruptor en la subestación Minero, y este autoriza. Un minuto después se pone en servicio. A las 13:20 [hrs] se autoriza a tomar carga, en primer lugar entran el molino 11 y el molino de bolas 5 a las 13:34 [hrs], luego dos minutos después lo hace el molino de bolas 6. El molino 9 hará lo propio a las 13:38 [hrs], cuatro minutos más tarde entrará el molino SAG 2 y a las 13:51 [hrs] el SAG 1. Finalmente a las 15:50 [hrs] se ponen en servicio las bombas de impulsión.

### 3.3.2.9.3 23 de Agosto

A las 23:42 [hrs] se produce la desconexión del circuito blanco de la línea Coya – Colina por acción de la protección de distancia 21 en la central Coya en zona 2. Esto provoca una desconexión de cargas la cual se debe a una falla bifásica provocada atribuible a evento climático. Circuito negro se encontraba en condición de derretidor de nieve debido al temporal por lo que no llevaba energía. La falla del circuito blanco provoca la pérdida total de suministro eléctrico afectando al concentrador Sewell (que se encontraba sin carga), campamento, impulsión de agua y ascensores de pique de la mina. Las cargas que se perdieron fueron 1,8 [MW] correspondiente a la mina, el chancado Sewell con 0,5 [MW], 1 [MW] de las bombas de Matadero y Blaisdell, 1 [MW] del convertidor de frecuencia y finalmente 0,5 [MW] del campamento Sewell.

Los sucesos posteriores a la falla y que intentaron restablecer la energía de las cargas afectadas acaecieron de la siguiente manera. 00:14 [hrs] se intenta cierre del circuito blanco para volver a energizar, sin embargo esta maniobra no da resultados ya que esta opera nuevamente por la protección de distancia. A las 00:35 [hrs] subestación Minero autoriza a sacar de servicio condición de derretidor de nieve al circuito negro, cerrando el interruptor cinco minutos después y quedando en servicio la línea a las 00:57 [hrs]. Un minuto más tarde se autoriza a la mina a retomar carga.

En un principio el circuito blanco se encontraba abasteciendo la demanda de 6 [MW] antes del disturbio, incluido 1 [MW] correspondiente al convertidor de frecuencia. Luego esta sería tomada en su totalidad por el circuito negro, que se encontraba en condición de derretidor de nieve, dado que no se pudo poner en servicio el circuito fallado.

### **3.3.3 Análisis de Fallas**

En esta sección se hará un análisis exhaustivo de las fallas de las cuales se tienen registro, que cubren el periodo desde el año 2006 hasta el año 2014. Se pretende por medio de este análisis asociar algunos de los fenómenos, estudiados con anterioridad, que producen fallas en líneas de alta tensión para así poder encontrar el dispositivo capaz de solucionar estos disturbios y poder disminuir la cantidad de estos incidentes de manera sustancial.

En primer lugar se debe analizar desde el punto de vista meteorológico el periodo que se ha analizado, ya que resulta útil para las medidas que se deban tomar a futuro si los registros que se tienen de disturbios ocurrieron en años secos, normales o lluviosos.

En este contexto un informe del año 2013 realizado por la Dirección de Meteorología de Chile, indica que el periodo comprendido entre los años 2003 y 2013 ha sido la década más seca de los últimos 150 años para la zona central, que comprende desde la región de Coquimbo hasta el Biobío. Las lluvias durante este tiempo cayeron un 39,4 [%] con respecto al promedio histórico. Si bien este periodo es de sequía, esta no es la peor de la que se tenga registro pero sí la más extensa [23].

Lo verdaderamente interesante de analizar este tipo de estadística es saber o tener un aproximación de cómo serán los años venideros desde el punto de vista climatológico, si esta época seca informada por la dirección es algo cíclico o responde más bien a un comportamiento generalizado del clima como el calentamiento global. Según se comenta en el mismo informe antes mencionado tener décadas más lluviosas o secas no es algo nuevo y que puede deberse tanto la variabilidad interanual, fenómenos de la niña y el niño, como

la llamada oscilación decadal del pacífico que es la variación del clima del océano que alterna fases de calentamiento y enfriamiento cada 10 a 30 años. Otro aspecto que influye en esta condición es la oscilación Antártica que influye en las precipitaciones hacia la zona sur de Chile. Sin embargo no se puede descartar la acción de factores antropogénicos como el calentamiento global, ya que sugerentemente este fenómeno nos llevará a una condición más seca. El argentino Vicente Barros, copresidente del grupo de trabajo del panel intergubernamental de la ONU sobre cambio climático, dice que por ahora es difícil saber cuánto es culpa de este fenómeno ya que es algo que recién se está estudiando. Agrega que si bien la reducción de precipitaciones ha sido importante y ahora se tiene una década seca, esto no quiere decir que esta condición deba empeorar. En los modelos que ellos mismos han desarrollado se ve una tendencia hacia la baja con proyecciones de 20 [%] de déficit de lluvia para Chile al año 2050. Esto abre la puerta para que esta sequía actual se revertirá pero no con los niveles de lluvia de otras épocas.

En conclusión se puede decir que el factor climático de los últimos diez años podría influir en la poca cantidad de fallas asociadas a tormentas de nieve, sin embargo esta fenómeno debería revertirse en los próximos años, aunque la tendencia en el país, según los expertos, es a tener cada vez menos precipitaciones producto del cambio climático debido al calentamiento global. Dicho todo lo anterior queda claro que las condiciones en las cuales se toma el registro de disturbios se enmarcan en un contexto especial climatológico el cual debe ser tomado en cuenta a la hora de implementar, o no, alguno de los posibles dispositivos que se recomendarán. Se espera entonces que las tormentas de nieve aumenten por lo que las fallas provocadas por las mismas también lo hagan, por lo que tomar alguna medida de contingencia resulta vital independiente de cual esta sea.

A continuación se mostrará una tabla resumen con las fallas ocurridas y en las distintas líneas para los años catastrados, con esto se trata de tener una visión más general de las fallas en cuanto a cantidad y repetitividad.

Tabla 3.3: Resumen de cantidad fallas por años y líneas de transmisión.

Líneas de Transmisión	Cantidad de Fallas por año								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Candelaria - Minero	1	-	2	-	-	-	-	-	-
Minero - Colón	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Sauzal - Minero	-	-	-	-	2	1	1	-	1
Coya - Colina	1	2	-	.	.	.	.	.	2



En esta tabla se tomó en cuenta la línea Candelaria – Minero a pesar de que no forma parte del sistema de transmisión de la división, esto debido a que resulta importante saber los disturbios que ha tenido ya que se le instalaron en todas sus torres contrapesos para prevenir fallas por causas climáticas. Por lo que resulta atractivo desde el punto de vista como solución a instalar dependiendo de su eficacia. Esta implementación ocurrió en el año 2008 lo cual resulta convincente ya que luego de esto las fallas ocurridas en este línea dejan de ocurrir.

Esta misma situación se puede notar para la línea Minero – Colón a la cual se le instalaron contrapesos en el año 2007 resultando muy efectivo ya que después de esto no se registran más incidentes.

La validación de los contrapesos resulta muy importante ya que no es un dispositivo que se utilice con estos fines, más bien es algo implementado por la división y que no se encuentra analizada su eficacia en los distintos trabajos utilizados para contextualizar los fenómenos climáticos. Este elemento funciona en caso de existir específicamente ice jumping, como son las fallas que se daban en las líneas analizadas. En caso de existir problemas de galloping la solución ideal son los separadores.

Otra de las conclusiones que se puede sacar de esta tabla resumen es que las líneas que tienen problemas y que se deben analizar las consecuencias de estas son, línea Sauzal – Minero sus tres circuitos y la línea Coya – Colina en ambos circuitos, blanco y negro.

Ambas líneas en cuestión resultan ser las más antiguas de El Teniente y tienen en común que ya no forman parte fundamental de la inyección de energía del complejo minero. En la actualidad el circuito 1 y 2 de la línea Sauzal – Minero permiten la inyección de las centrales Coya y Pangal, por otra parte el circuito 3 recibe energía desde la subestación Minero y alimenta servicios como sistemas de impulsión Coya – Sapos estaciones 1,2 y3, hidrovaciado y sistemas de comunicaciones de cerro Canela. La línea Coya – Colina suministra energía a la mina en 60 [Hz], también al concentrador Sewell, campamento Sewell y bombas de agua de Sewell. A continuación se mostrará una tabla resumen de las fallas de ambas líneas para su posterior análisis.

Tabla 3.4: Cuadro resumen con fallas de línea Coya – Colina.

Año	Fecha	Circuito	Característica Falla	Cargas Desconectadas	Tiempos de despeje
2006	6 de Agosto	Blanco	Tormenta de nieve con gran presencia de viento que provoca el chicoteo entre fases A y B. Acción de relé 21 en central Coya y 67 en subestación Colina. Consecuencia en producción.	Mina 60 [Hz] ----- 2,98 [MW] Subestación Colina ----- 7,5 [MW] Molienda Sewell ----- 11,46 [MW]	Inicio Disturbio: 20:54 [hrs] Reposición de la Línea: 20:57 [hrs] Normalización de Faenas: 22:38 [hrs]
2007	29 de Mayo	Negro	Causas climáticas. Tormenta de nieve y viento. Consecuencias en producción.	Subestación Colina ----- 15,5 [MW]	Tiempo de despeje de Falla : 39 [min]
2007	4 de Julio	Negro	Causas climáticas. Tormenta de nieve y viento. Consecuencias en producción.	Subestación Colina y El Cobre ----- 9,8 [MW]	Tiempo de despeje de Falla : 16 [min]
2014	16 de Marzo	Blanco	No hay presencia de tormenta sin embargo hay chicoteo entre fases A y C, por lo que se activa relé 21. Operación de relé 67 fase A en subestación Colina y El Cobre. Consecuencias en la producción.	Mina 60 [Hz] ----- 0,5 [MW] Molienda Sewell ----- 12,27 [MW] Chancado Sewell ----- 1,95 [MW] Bombas Matadero y Blaisdell ----- 0,94 [MW] Convertidor de Frecuencia ----- 0,5 [MW]	Inicio Disturbio: 10:24 [hrs] Autorización para tomar carga: 10:26 [hrs] Consumo Mina Normalizado: 10:27 [hrs] Bombas en servicio: 10:37 [hrs] Circuito Blanco Energizado: 10:47 [hrs] Convertidor en servicio: 11:00 [hrs] Molienda Sewell en servicio: 11:49 [hrs] Chancado Sewell en servicio: 12:15 [hrs]
2014	23 de Agosto	Blanco	Causas climáticas. Tormenta de nieve y viento. Acción relé 21 en central Coya, falla bifásica. Circuito Negro se encontraba en condición de derretidor de nieve por lo que todo el suministro era llevado por la línea Blanca. Consecuencia en producción	Mina 60 [Hz] ----- 1,8 [MW] Chancado Sewell ----- 0,5 [MW] Molienda Sewell ----- 9,72 [MW] Bombas Matadero y Blaisdell ----- 1 [MW] Campamento Sewell ----- 0,5 [MW] Convertidor de Frecuencia ----- 1 [MW]	Inicio Disturbio: 23:42 [hrs] Autorización para energizar C. Negro: 00:35 [hrs] Circuito Negro en servicio: 00:57 [hrs] Consumos normalizados: 00:58 [hrs]

Tabla 3.5: Tabla resumen con fallas de línea Sauzal – Minero.

Año	Fecha	Circuito	Característica Falla	Cargas Desconectadas	Tiempo de despeje
2010	22 de Junio	Circuito 1 y 2	Causas Climáticas. Tormenta de nieve y viento. Apertura de interruptores circuitos 1 y 2 línea Sauzal en subestación Minero debido a acción de relé 21. Operación de relé 50 en central Coya provoca apertura de INPO en línea de Maitenes 55 [kV] circuitos 1 y 2. No se registran consecuencias en producción ni cargas desconectadas producto de la salida de ambas líneas.	No hay cargas desconectadas	Inicio Disturbio: 00:01 [hrs] Gerre INPO circuitos afectados línea Sauzal: 01:21 [hrs] Gerre INPO circuitos afectados línea Maitenes: 01:39 [hrs]
2010	24 de Junio	Circuito 3	Causas Climáticas. Tormenta de nieve y viento. Por razones de mal tiempo se saca de servicio el circuito 1 de la línea Sauzal. Operan protecciones de distancia, relé 21, en S/E Mineros en el circuito 3 de la línea en cuestión. Esto provoca un disturbio en la tensión el cual afecta a las subestaciones. Consecuencias en producción.	Subestación Colón: Molinos 3,9 y 12 ----- 9,6 [MW] Subestación Cordillera: Molinos Unitarios, molinos SAG 1 y 2, molinos de bola 5 y 6 ----- 67,2 [MW] Ventiladores Mina 58 y 65 ----- 1,7 [MW] Subestación El Cobre: Planta de Oxígeno 3 ----- 8,5 [kW]	Inicio Disturbio: 01:09 [hrs] Autorización retomar carga plantas: 01:15 [hrs] Carga mina normalizada: 02:40 [hrs] Planta de oxígeno 3 al 50 [%]: 02:44 [hrs] Molinos en servicio: 03:16 [hrs]
2011	5 de Marzo	Circuito 3	Causas Climáticas. Tormenta de nieve y viento. Opera relé 21 por falla bifásica en circuito 3 la cual provoca baja de tensión en el sistema de 50 [Hz]. Consecuencias en producción.	No está especificado	No está especificado
2012	23 de Agosto	Circuito 3	Causas Climáticas. Tormenta de nieve y viento. Opera relé 21 entre fases 2 y 3 por lo que se desconecta el circuito 3 produciendo una baja de voltaje en el sistema de 50 [Hz]. Consecuencias en producción.	Subestación Cordillera: Molino SAG 1 y 2, molino unitario, molinos de bolas 3,4,5 y 6, Ventiladores 58 y 65 de Mina. Subestación El Cobre: Soplador A y A - 9, en fundición. Subestación Colón: Molino 12. Total cargas ----- 87 [MW]	Inicio Disturbio: 06:32 [hrs] Autorización retomar cargas: 06:34 [hrs] Molinos de Bolas en servicio: 06:51 [hrs] Molino SAG 1 en servicio: 07:14 [hrs] Molino SAG 2 en servicio: 07:16 [hrs] Sopladores fundición en servicio: 07:33 [hrs] Molino unitario en servicio: 07:37 [hrs]
2014	12 de Junio	Circuito 3	Causas Climáticas. Tormenta de nieve y viento. Opera relé 21 por falla bifásica en circuito 3 la cual provoca baja de tensión en el sistema de 50 [Hz]. Consecuencias en producción.	Molino SAG 1 ----- 11,2 [MW] Molino SAG 2 ----- 15,4 [MW] Molino Unitario ----- 16,5 [MW] Molinos de bolas 5 y 6 ----- 24,1 [MW] Molinos 9 y 11 ----- 5,5 [MW] Bombas de impulsión ----- 4,9 [MW] Otras cargas ----- 4,9 [MW]	Inicio Disturbio: 13:12 [hrs] Autorización retomar cargas: 13:20 [hrs] Molino 11 y molino de bolas 5 en servicio: 13:34 [hrs] Molino de bolas 6 en servicio: 13:36 [hrs] Molino 9 en servicio: 13:38 [hrs] Molino SAG 2 en servicio: 13:57 [hrs] Molino SAG 1 en servicio: 14:09 [hrs] Molino Unitario en servicio: 14:24 [hrs] Bombas de impulsión en servicio: 15:50 [hrs]

En la línea Coya – Colina se puede observar en primer lugar que el número total de fallas ocurridas para el periodo estudiado es de 5, lo que hace que tengo un promedio de 0,56 [%] de las fallas al año, factor que será importante a la hora de evaluar económicamente estos disturbios. Las principales cargas que se ven afectadas con estos eventos son las subestaciones de El Cobre y Colina, ya que son estas las que la línea alimenta. Dentro de estas el más afectado es el sector de Sewell y las distintas operaciones que se efectúan aquí, también el sector de la mina en 60 [Hz] se ve afectado. Estos datos no son tan específicos en los primeros acontecimientos esto debido a que después del año 2010 se pudo tener estadística más detallada sobre las fallas. Algo importante de notar es que no se tuvieron disturbios durante un periodo de casi 7 años hasta los eventos acaecidos el año 2014. En este caso ambos circuitos se ven afectados de igual manera ante los distintos disturbios por lo que de instalarse algún dispositivo debe hacerse en las dos líneas.

Con respecto al procedimiento con el que se cuenta en esta línea para evitar la salida intempestiva de los circuitos y dejar sin suministro a las cargas antes mencionadas, es la condición de derretidor de nieve. Esto consiste en cortocircuitar una de las líneas, blanco o negro, y llevar toda la energía por el que queda en operación. De esta manera se calienta el conductor que lleva mucha carga evitando de esta forma la acumulación de nieve. De similar manera producto de la alta corriente que se produce por el corto circuito también se calienta el otro conductor, y así en caso de falla del circuito que está operando producto de condiciones climáticas adversas se tiene la otra línea lista para funcionar. Este mecanismo para evitar problemas asociados al galloping fue implementado junto con la construcción de la línea, es decir hace más de 100 años, teniendo buenos resultados.

Una de las conclusiones que se puede obtener desde el punto de vista del origen de la falla es que si bien esta línea en su mayoría fue construida con un trazado que no va por las cumbres de las montañas, protegiéndola del viento, sin embargo existen sectores que son altamente vulnerables al factor eólico. Conversando con los encargados de las líneas de alta tensión de la división mencionan que en los sectores que se encuentran expuestos a altas velocidades de viento han visto acercarse las líneas produciendo fallas, incluso sin necesidad de tener nieve acumulada en ellas. A pesar de que estos fenómenos son aislados como por ejemplo el producido el 16 de marzo del 2014, esto da indicios de que al tener temporales de nieve y viento estos juntos provocan efecto galloping o de frecuencias de baja frecuencias en ambos circuitos la variable eólica se vuelve mucho más importante por el peso que adquieren las líneas, esto sumado a que se tienen torres para líneas de 69 [kV] esto hace menor el espacio de separación entre conductores debido a disposición de la estructura. Por esta razón se recomienda el uso de separadores en ambos circuitos ya que es la solución que se recomienda para este tipo de fallas y condiciones climáticas.

Por otra parte en el caso de la línea Sauzal – Minero se observa una cantidad de 5 fallas en el periodo 2006 a 2014, lo que da un porcentaje de 0,56 [%] de probabilidad de falla anual. En este caso las cargas que se ven afectadas son de mayor rango y pueden alcanzar a las subestaciones de Colón, El cobre y Cordillera. A pesar de que esta línea no alimenta directamente a estas subestaciones sino a Minero, las variaciones de voltaje producidas por los disturbios hace que operen las protecciones de equipos sensibles a este tipo de cambios provocando paras en la operación de la faena mayores que las producidas por la línea anteriormente mencionada. En este caso las cargas más importantes que se desconectan son los molinos de varios tipos, SAG, de bolas, el unitario. Las fallas para esta línea se concentran entre los años 2010 y 2014 lo que los hace muy comunes durante el último tiempo. Para esta línea se tiene que los circuitos afectados son el 2 y 3, sin embargo los disturbios en el primero no registran consecuencias en la producción de la mina por lo que se le debe prestar especial atención al circuito 3 de la línea el cual presenta paras en la operación en todas la fallas registradas.

En cuanto al procedimiento con el que se cuenta para evitar estas fallas se opta por sacar fuera de servicio los circuitos 1 y 3 como medida precautoria ante frente de mal tiempo y se deja en servicio línea 2 que lleva energía de la empresa PacificHydro con sus centrales Coya y Pangan el 50 [Hz]. Sin embargo esta condición no depende exclusivamente de la gerencia de servicios y suministros, ya que como se ha mencionado anteriormente la línea 3 alimenta los sistemas de impulsión e hidrovaciado especialmente, procesos que dependen de la gerencia planta la cual tiene requerimientos de agua que deben ser satisfechos incluso en condiciones climáticas adversas. Esto deja muy vulnerable al circuito. Se considera que los procedimientos preventivos no tienen los efectos deseados ya que dependen de otra gerencia para su eficacia.

En este caso una conclusión rápida de las razones por las cuales esta línea presenta fallas es que en su diseño original no se tenía contemplado que funcionase con poca carga, algo que ocurre desde la puesta en marcha del contrato con la empresa Colbún y el nuevo sistema de transmisión de la división. Esto hace que la línea sea propensa a acumular nieve en sus conductores, lo cual la expone a tener fallas por esta razón. Durante el trazado de esta línea no se tienen mayores problemas de viento condición que se mantiene incluso con los conductores con mayor peso y más vulnerables a esta condición, por lo que se presume que la mayoría de los disturbios ocurren producto de ice jumping. Este fenómeno es muy común en el sistema de transmisión eléctrica de la división y sobre el cual se tomaron medidas en la línea Minero – Colón con la instalación de contrapesos, y en la línea Candelaria – Minero instalando los mismos dispositivos. Por lo que se evaluará para esta línea la instalación de contrapesos y separadores ya que ambos dispositivos sirven como

solución para este tipo de fallas. Esta evaluación se realizará solo para el circuito 3 ya que es el que presenta las fallas con pérdidas en producción.

### **3.3 EVALUACION ECONÓMICA DE FALLAS**

Parte importante del presente trabajo se trata de evaluar desde el punto de vista económico la influencia de la fallas en la producción de cobre de la división El Teniente. Para esto se tomarán en cuenta los datos financieros que se encuentran en la memoria 2013 de la empresa, así mismo como la cantidad de cobre producido y capacidad de los distintos molinos en la división para tener una aproximación lo más cercana a la realidad posible.

Como se mencionó anteriormente durante el año 2013 Codelco alcanzó 1.791.524 toneladas métricas de cobre fino, que corresponde a los yacimientos operados por Codelco más las proporciones de su participación en Minera El Abra (49 [%] de propiedad) y en Anglo American Sur (20 [%] de la propiedad) [17] . En específico en la división donde este trabajo está contextualizado se produjeron 450.390 [t], lo que corresponde al 25,1 [%] de la producción total. En cuanto a las ventas durante este año se obtuvo un total de [US\$] 14.956 millones anuales de los cuales un 93 [%] corresponde a cobre y el 7 [%] a subproductos. Esto indica que solo correspondiente a ventas realizada por cobre se logró un total de [US\$] 13.909 millones, en El Teniente se lograron ventas por [US\$] 3.491 millones. Por otra parte los excedentes, por cobre, que obtuvo la corporación para este periodo fueron de [US\$] 3.889 millones anuales, de los cuales [US\$] 972,25 millones fueron aporte exclusivo de Rancagua. Transformando esta última cifra anual a excedentes por hora generados en la división, se llega al número de [US\$] 110.987 en cada hora de operación de la mina. Este último dato será de gran ayuda para el posterior análisis de las fallas.

En la división se procesa todo el cobre extraído en las distintas faenas, subterránea y rajo abierto, en los distintos molinos, por lo que para evaluar los disturbios se tomará el tiempo en el cual estos vuelven a su operación normal. En este contexto es de vital importancia saber la capacidad de mineral que puede procesar cada molino para poder asignar así un porcentaje a cada uno y tener más claridad a la hora de evaluar cada detención en la producción. En el caso de la molienda Sewell tiene una capacidad de entre 18 y 20 mil [t], esto en 60 [Hz]. Con respecto al sistema de 50 [Hz] se tienen dos grandes moliendas, los molinos SAG 1 y 2 con capacidad entre 70 y 90 mil [t], y la molienda unitaria con 20 mil [t] para procesar cobre. Esto traducido en porcentajes implica que la molienda Sewell procesa un 15 [%] del mineral total, los molinos SAG un 70 [%] y la molienda unitaria un

15 [%]. Es decir en 50 [Hz] se trata un 85 [%] del cobre, y por otra parte en el sistema de 60 [Hz] un 15 [%].

Con estos datos económicos se puede ya comenzar a realizar el análisis por línea de los disturbios que se tienen registrados. Este estudio se separará por línea para cada falla, y luego se calculará el promedio de los costos obtenidos para llegar a una cifra intermedia la cual será la base de un posterior análisis de sensibilidad ante distintos escenarios de aumento de fallas anuales por líneas.

Otro supuesto que se utilizará para este análisis es con respecto a la operación en sí, en el sentido de desconexión de equipos y pérdida de producción. Se asumirá que al ocurrir una falla en cualquiera de los sistemas, ya sea de 50 o 60 [Hz], el cobre que se procesa en los distintos molinos desconectados no es trasladado a otro molino que quede en operación. Este supuesto es importante debido a que los encargados de gerencia planta no tienen un procedimiento estándar para este tipo de contingencias, si no que van solucionando dependiendo de la falla y equipos detenidos. Así los costos obtenidos en los distintos casos serán una cota máxima ya que se está utilizando el peor escenario posible. De todas maneras y habiendo dicho lo anterior este valor obtenido por disturbio será bastante ajustado a la realidad ya que los molinos que generalmente operan al registrarse alguna falla son los que procesan la mayor cantidad de cobre, quedando operativo solo molinos que se consideran despreciables en cuanto a tonelaje.

### **3.3.1 Fallas Línea Sauzal – Minero**

#### ***3.3.1.1 Disturbio 22 de Junio 2010***

Como se puede observar en la tabla 3.5 para este evento no se registran pérdidas en la producción de la división. Esto se debe a que las medidas de contingencia para evitar fallas producto de condiciones climáticas adversas estaban operando, es decir, desconectar circuitos 1 y 2 de la línea en cuestión. Este condición estuvo favorecida por que la falla se produjo en los circuitos antes mencionados que estaban fuera de servicio y no en el circuito 3 que es el que causa los problemas en la operación normal de la línea generalmente.

### **3.3.1.2 *Disturbio 24 de Junio 2010***

Para esta falla si se registra una detención en la operación y por ende en la producción normal de la mina. Este evento se produce en el circuito 3 de la línea Sauzal – Minero y afecta a los molinos unitarios y a los SAG 1 y 2, es decir el 85 [%] de la producción estuvo comprometida. La hora de inicio según el informe del disturbio fue a las 1:09 [hrs], y para el análisis económico, como se mencionó anteriormente, se tomará en cuenta el tiempo en el cual los molinos desconectados vuelven a estar en servicio, esto se produjo a las 3:16 [hrs].

Tomando en cuenta la hora de inicio del disturbio y la puesta en servicio de los molinos transcurre un tiempo de 2 horas y 7 minutos, lo que es equivalente a 2,12 [h]. Si se toma en cuenta los cálculos realizados anteriormente, los cuales indicaban que por cada hora de detención de producción se pierden [US\$] 110.987 y el porcentaje de cobre que procesan los molinos en cuestión, se obtiene la cifra de [US\$] 199.999. Esta sería la cantidad de dinero que se perdió producto del disturbio ocurrido.

### **3.3.1.3 *Disturbio 23 de Agosto 2012***

En el caso de este evento se tiene una falla nuevamente del circuito 3 de la línea que se dirige desde la central Sauzal hacia la subestación Minero, con consecuencias en la producción. De igual manera se ven afectados los molinos SAG y unitario, sin embargo en el informe de este disturbio se tiene tiempos específicos en el despeje de cada elemento lo que hará más acabado el análisis económico. La hora de inicio del incidente ocurre a las 6:32 [hrs], la puesta en servicio de los molinos SAG a las 7:16 [hrs] y finalmente el molino unitario a las 7:37 [hrs].

Tomando en cuenta los tiempos anteriores se nota que en poner el servicio los molinos SAG hay un lapso de 44 minutos, y en el caso del molino unitario 65 minutos. Llevando ambos tiempos a horas se tiene 0,73 y 1,1 [h] respectivamente. Tomando en cuenta que el porcentaje de mineral que se procesa en los molinos SAG es un 70 [%] y el unitario es un 15 [%], más el valor de costo de detención de producción por hora se tiene que en el caso de los SAG se pierde [US\$] 56.714 y para el unitario [US\$] 18.313. Por lo que sumado ambos montos se tiene un valor de [US\$] 75.027. Este valor es considerablemente menor al anterior.

### **3.3.1.4 *Disturbio 12 de Junio 2014***

Para este disturbio nuevamente se presenta una falla el circuito 3 de la línea que se está analizando con consecuencias en la producción. Como es común para este evento se tiene la desconexión de los molinos SAG y el molino unitario. Al igual que en el disturbio anterior se tiene detalle de la entrada en servicio de los equipos mencionados anteriormente. La hora de inicio de la falla ocurre a las 13:12 [hrs], la puesta en servicio de los molinos SAG fue a las 14:09 [hrs] y el molino unitario a las 14:24 [hrs].

El lapso de tiempo en el cual se logra poner en servicio los molinos SAG 1 y 2 es de 57 minutos, en el caso del molino unitario transcurre 1 hora y 12 minutos. Transformando ambos periodos a hora se tiene que los SAG se demoran 0,95 [h] en volver a la operación normal, y al molino unitario le toma 1,2 [h] en lograrlo. De igual manera que como se hizo en el análisis pasado se separan los porcentajes de capacidad de producción de los SAG y el unitario, en este caso se tiene que por detención de los molinos SAG se pierde [US\$] 73.806, para el molino unitario se obtiene una pérdida de [US\$] 19.978. Sumando ambos costos de pérdida se llega a la cifra de [US\$] 93.784. Nuevamente se llega a un valor menor, prácticamente la mitad, del obtenido en la primera falla analizada y este es más cercano al que se obtuvo en el segundo disturbio. Se puede inferir en una primera instancia que la hora en la cual ocurre el primero, madrugada, pudo haber influido en que los tiempo de despeje de la falla y posterior puesta en servicio de los equipos afectado haya sido más lenta que lo acostumbrado.

### **3.3.1.5 *Disturbio 5 de Marzo 2011***

Para la falla ocurrida en esta ocasión no se tiene la información necesaria para poder realizar la evaluación económica pertinente. Para poder analizar este disturbio se supondrá un tiempo normalización de la molienda que sea razonable y acorde a lo mostrado en los casos anteriores. Según el informe que se pudo recopilar el evento se origina en el circuito 3 y tiene consecuencias económicas debido a que produce una detención en la producción. Por lo que el primer supuesto será que se desconectan tanto los molinos SAG, como el molino unitario. Este supuesto es cercano a la realidad ya que cada falla ocurrida en este circuito provocó la desconexión de ambas moliendas debido a variaciones de voltaje.

Si se toma en cuenta los eventos anteriores se puede notar que en promedio la normalización de la faena demora 1,47 [h]. Para este análisis se tomó el tiempo en el que entra el último molino de cada disturbio. Se supondrá, además, que todos los molinos que se vieron afectados por el incidente quedan en servicio al mismo tiempo. Para poder



realizar la evaluación se considerará un valor de normalización de faena ligeramente inferior al promedio ya que esta cifra está inflada por el disturbio del 24 de Junio de 2010, el cual es bastante inusual si se analizan las otras fallas, por lo que se tomará tiempo 1,35 [h]. Ya con este dato y con los valores de ganancia por hora de la división y el porcentaje de cobre procesado en los molinos en cuestión se llega a [US\$] 127.358.

### **3.3.2 Fallas Línea Coya – Colina**

#### **3.3.2.1 *Disturbio 6 de Agosto 2006***

Para la falla ocurrida en esta fecha se tiene que ocurre en el circuito Blanco de la línea en cuestión, teniendo consecuencias en la producción de la Mina en 60 [HZ]. El principal equipo que se ve comprometido con el evento es la molienda Sewell, y en base a este equipo es al que se hará la evaluación económica pertinente. El disturbio inicia 20:54 [hrs] y posteriormente según el informe se tiene que la normalización de las faenas ocurre a las 22:38 [hrs].

En este caso se utilizará el mismo valor de la hora de producción perdida que usó en el análisis de la línea Sauzal – Minero, además la capacidad de procesamiento de la molienda Sewell es del 15 [%] de toda la división. El lapso de tiempo transcurrido hasta la puesta en servicio de los equipos es de 1 hora y 44 minutos, que en horas es 1,73 [h]. Con estos datos se puede concluir que el costo de la detención de producción de la faena es de [US\$] 28.801. Se puede notar que este costo es menor que los que fueron provocados por la falla de la línea Sauzal – Minero.

#### **3.3.2.2 *Disturbio 16 de Marzo 2014***

En el caso del incidente ocurrido durante esta fecha se tiene que el circuito afectado es el Blanco de la línea Coya – Colina, con desconexión de equipos importantes para la operación del complejo minero, como es la molienda Sewell. Para este disturbio se tiene que se inicia a las 10:24 [hrs] y se vuelve a poner en servicio la molienda a las 11:49 [hrs]

Al igual que en el análisis anterior para la misma línea se usarán tanto el valor para el costo de la pérdida por hora así como el porcentaje de mineral que se procesa en la molienda, mencionados anteriormente. El intervalo de tiempo que pasa entre el inicio de la falla hasta la normalización de la faena es de 1 hora y 25 minutos, lo cual es equivalente a 1,42 [h]. En

base a estos valores se puede calcular el costo que produjo esta pérdida para la división fue de [US\$] 23.307, cifra muy similar al resultado anterior.

### **3.3.2.3 *Disturbio 23 de Agosto 2014***

El disturbio que se analizará a continuación afectó al circuito Blanco de la línea que se está estudiando y tuvo como consecuencia la detención en la operación, específicamente la desconexión de la molienda Sewell, entre otros. La hora en la cual se inicia la falla fue a las 23:42 [hrs] y los consumos se ven normalizados a las 00:58 [hrs].

Para calcular el costo de la pérdida se procederá de la misma manera como se ha hecho anteriormente. En este caso el intervalo de tiempo transcurrido entre el inicio de la falla y la normalización de los consumos es de una hora y dieciséis minutos, lo que traducido a hora queda en 1,27 [h]. Luego el valor en dólares del costo de la falla es [US\$] 21.143. Nuevamente se tiene un precio similar a los calculados en los disturbios anteriores.

### **3.3.2.4 *Disturbio 29 de Mayo 2007***

El análisis económico de los disturbios ocurridos durante el año 2007 será distinto a los anteriores, esto debido a que no se cuenta con toda la información necesaria. En el informe de esta falla en particular se tiene un lapso de tiempo entre el inicio de la falla y un tiempo de despeje de la misma el cual fue 39 minutos, también se deja registro que este disturbio provoca detención en la producción. Lo que se busca, para la evaluación económica, es saber cuanto demoran los consumos en volver a su condición normal de operación, al no tener este dato se harán supuestos que sean acorde a los tiempos mostrados en los análisis previos.

Un cálculo simple es promediar los intervalos de tiempo en los cuales se normaliza la operación mostrados anteriormente y utilizarlo en este caso. El promedio simple es 1,47 [h], sin embargo se considerará un tiempo mayor debido a que el tiempo de despeje del disturbio es mayor del normal, ya que en la mayoría de los casos este es menor a 15 minutos. Por lo que se tomará que el tiempo de despeje de la falla es de 1,6 [h], equivalente a 1 hora y 36 minutos. Con este supuesto y considerando los valores anteriores para el costo por hora de falla y porcentaje de mineral procesado en 60 [Hz], se obtiene que la evaluación del evento es de [US\$] 26.637. Cifra que se ajusta a lo obtenido con anterioridad.

### **3.3.2.5 *Disturbio 4 de Julio 2007***

De la misma manera que en el disturbio anterior sólo se pudo rescatar del informe de falla el tiempo de despeje de aproximadamente 16 minutos y que tiene consecuencias en la operación. Se supondrá entonces periodo en el cual los equipos vuelven a su funcionamiento normal utilizando el razonamiento previo.

El promedio simple calculado de los intervalos en los cuales la molienda vuelve a su operación normal es de 1,47 [h] y este mismo valor será utilizado para evaluar este disturbio ya que en este caso se tiene un tiempo de despeje de falla dentro de los rangos normales por lo que se considera que esta cifra es una buena aproximación para lo que pudo haber ocurrido. Se obtiene que el costo de la falla es de [US\$] 24.473.

### **3.3.3 Análisis de Sensibilidad**

Para realizar una evaluación económica más completa es pertinente considerar en este análisis el porcentaje de ocurrencia que tienen los disturbios que afectan a las distintas líneas. Posteriormente esta variable se debe modificar de manera de poder tener una visión más general de los costos que las fallas tienen en la operación. Observar que tan sensible es a la ocurrencia de las tormentas resulta necesario ya que, como fue mencionado anteriormente, la muestra tomada se enmarca en un contexto climatológico el cual puede variar haciendo que este tipo de fenómenos aumente para ciertos periodos. Los casos que se estudiarán son una probabilidad anual de ocurrencia de 50 [%] lo que es cercano a lo que ocurre en la actualidad, 100[%], 150 [%] y finalmente 200[%]. Lo que se expresa en que ocurra medio incidente al año, una falla, 1,5 disturbios y dos eventos en el periodo de un año para cada línea.

Para explicar de mejor manera este análisis se realizan tablas resumiendo los costos anteriores por falla para cada línea, y mostrando los casos que se comentó que iban a ser expuestos. Primero se mostrará el caso de la línea Sauzal – Minero y posteriormente la Coya – Colina.

Tabla 3.6: Cuadro resumen costos y ocurrencia anual para fallas en línea Sauzal – Minero.

Fallas	Costo [US\$/h]	Probabilidad anual [%]	Costo [US\$/h]
24-06-2010	\$ 199.999,00	50	\$ 62.043,50
05-03-2011	\$ 127.538,00	100	\$ 124.087,00
23-08-2012	\$ 75.027,00	150	\$ 186.130,50
12-06-2014	\$ 93.784,00	200	\$ 248.174,00
Promedio	\$ 124.087,00		

Tabla 3.7: Cuadro resumen costos y ocurrencia anual para fallas en línea Coya – Colina.

Fallas	Costo [US\$/h]	Probabilidad anual [%]	Costo [US\$/h]
06-08-2006	\$ 28.801,00	50	\$ 12.436,10
29-05-2007	\$ 26.637,00	100	\$ 24.872,20
04-07-2007	\$ 24.473,00	150	\$ 37.308,30
16-03-2014	\$ 23.307,00	200	\$ 49.744,40
23-08-2014	\$ 21.143,00		
Promedio	\$ 24.872,20		

Lo primero que se puede notar es que las fallas producidas en el sistema de 50 [Hz], es decir en la línea Sauzal – Minero, tienen un mayor costo económico que las registradas en el de 60 [Hz]. Esto se explica fácilmente ya que la mina y sus procesos son alimentados en un porcentaje cercano a 85 [%] en 50 ciclos por lo que al producirse un disturbio en este provoca la detención de un mayor número de equipos. Otro aspecto que se nota es que el costo de los eventos aumenta a medida que estos se hacen más comunes al año, hecho bastante obvio ya que estos aspectos tienen una correlación directa.

Lo que se busca con el análisis de sensibilidad realizado es tener una estadística sobre posibles valores de costos para una cierta cantidad de eventos al año. Si bien resulta imposible desde el punto de vista práctico que ocurra media falla al año, este dato resulta importante debido a que al tomar un horizonte de tiempo mayor y contabilizar las fallas para sacar una probabilidad anual, estos números tienen sentido y son más ajustados a la realidad. Por ejemplo en los datos obtenidos que van desde el periodo 2006 al 2014 la probabilidad de falla anual fue de 56[%]. En este sentido es importante poder contabilizar que ocurriría con los costos para probabilidades mayores a esta.

### 3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA DISPOSITIVOS

Toda evaluación económica que trate de solucionar algún problema en particular que pueda presentar cualquier tipo de empresa, debe contabilizar los perjuicios económicos que conlleva el aprieto en el que se encuentran. Luego de calcular la falla se debe valorizar una posible solución y su implementación. Obteniendo estos dos costos, corresponde cotejar ambos resultados para poder analizar si la empresa debe, o no, implementar dicha solución. Dicho lo anterior en esta sección se evaluarán los dispositivos que sugiere la literatura y la práctica, para solucionar los problemas asociados a condiciones climáticas de invierno en las distintas líneas analizadas.

Los dispositivos que se cotizarán, como se ha mencionado anteriormente, son separadores y contrapesos. Para este propósito se puso en contacto con distintas empresas distribuidoras de estos elementos, para que con los datos recopilados puedan entregar una evaluación aproximada del precio que podrían tener sus productos. En este caso se pudo poner en contacto con dos empresas Trent y Rthö. Ambas reconocidas empresas del rubro eléctrico que se especializan en distribución de equipos y elementos para generación, transmisión y distribución.

Para que las empresas puedan entregar una cotización lo más acertada posible se debe contar con datos de las líneas y los vanos en los cuales se instalará dicha solución. Estos datos son conductor, cantidad de vanos, largo de cada vano, distancia entre fases y tensión de la línea. Para mostrar estos datos se adjunta una tabla con la información solicitada por cada circuito [24].

Tabla 3.8: Datos implementación dispositivos, línea Sauzal - Minero.

Línea Sauzal - Minero		Vanos complicados			
Conductor	ACSR HAWK 477 MCM	Torres	Tipo de Torre	Distancia de Separación [m]	Desnivel [m]
Tensión	110 [kV]	54 - 55	Anclaje - Suspensión	445,9	0,57
Separación entre Fases	2,4 [m]	57 - 58	Suspensión - Suspensión	445,53	9,98
		58 - 59	Suspensión - Suspensión	332,12	-14,18
		63 - 64	Anclaje - Suspensión	276,14	-2,3
		64 - 65	Suspensión - Suspensión	380,85	0,66
		65 - 66	Suspensión - Suspensión	311,04	-3,49
		67 - 68	Suspensión - Suspensión	438,65	3,44
		68 - 69	Suspensión - Suspensión	288,39	-2,66

Es fundamental tener la mayor y mejor información disponible para que se pueda hacer una cotización lo más ajustada a la realidad. En este aspecto se realizó una inspección visual para saber cuáles eran los vanos que han tenido mayores problemas, esto se puede distinguir ya que al momento de haber un cortocircuito por acercamiento entre fases el conductor afectado suelta una de sus hebras la cual es reparada por una preformada. Por lo que esta inspección consistió en contar los vanos que contarán con este elemento y luego corroborar la información con el encargado de líneas en la división. También es importante mencionar que todos los disturbios con pérdidas en la producción afectan al circuito 3 de la línea Sauzal – Minero, es por esta razón que se hará una evaluación para instalar los separadores solo en este circuito debido a que es el más afectado y el que genera las pérdidas. Los dos puntos anteriormente mencionados acotan de manera importante el número de elementos que se deben comprar para poder solucionar las fallas provocadas por galloping o ice jumping.

Tabla 3.9: Datos implementación dispositivos, línea Coya – Colina.

Línea Sauzal - Minero		Vanos complicados			
Conductor	Cu 4 AWG	Torres	Tipo de Torre	Distancia de Separación [m]	Desnivel [m]
Tensión	69 [kV]	70-71	Anclaje - Suspensión	143,33	10,1
Separación entre Fases	1,4 [m]	71-72	Suspensión - Suspensión	149	-8,4
		72-73	Suspensión - Suspensión	178,33	-1,7
		73-74	Anclaje - Suspensión	176	8,9
		74-75	Anclaje - Suspensión	154	3,6
		75-76	Anclaje - Suspensión	301,33	-19,7
		76-77	Anclaje - Anclaje	137	-11,4
		77-78	Anclaje - Suspensión	187,33	-16,7
		78-79	Suspensión - Suspensión	194,33	-6,6
		79-80	Suspensión - Suspensión	162	-4,2
		80-81	Suspensión - Suspensión	155	-2,4
		81-82	Suspensión - Suspensión	174	-0,6
		82-83	Suspensión - Suspensión	180,67	-4,7
		83-84	Anclaje - Suspensión	80	0,5
		84-85	Anclaje - Anclaje	260	3,6
		85-86	Anclaje - Suspensión	208	-1,2
		86-87	Suspensión - Suspensión	157,67	-1,2
		87-88	Anclaje - Suspensión	191,67	-1,7
		88-89	Anclaje - Suspensión	96,33	-3
		89-90	Anclaje - Suspensión	59	-25,8
		90-91	Anclaje - Anclaje	351,33	7,8
		91-92	Anclaje - Anclaje	288	-4,1

Se puede observar que en este caso el número de vanos involucrado es mayor que el contabilizado en la línea anterior. Para poder contabilizarlos no se realizó una inspección visual sino que simplemente se recurrió a los registros de las fallas y a los apuntes que tenía el jefe de mantenimiento de líneas. Estos apuntes y registros señalaban un sector en específico, Copado. Esta zona tiene un número de 23 estructuras, siendo 22 los vanos que contabilizan como problemáticos. Para esta línea los disturbios afectan indistintamente a ambos

circuitos, Blanco y Negro, por lo que se debe realizar la implementación de los dispositivos en estos dos [25].

Luego de presentar los datos, mostrados en las tablas anteriores, a las empresas que entregaron la evaluación tanto de separadores como de contrapesos para soluciones que pudieran acomodarse a la información entregada. Ambas distribuidoras insistieron que para poder vender los dispositivos adecuados a las líneas ellos debían inspeccionar las mismas y tener sus propios informes. A continuación se mostrará la evaluación realizada por ambas empresas para cada línea.

### **3.4.1 Línea Sauzal – Minero**

#### ***3.4.1.1 Separadores***

Como se puede notar en la tabla 3.8, los vanos en conflicto resultan ser 8 para esta línea. Ahora bien como recomendación, para poder evitar los efectos de ice jumping y galloping, se evaluará la implementación de tres de estos elementos para vanos largos y dos para los cortos. Esto da un total de 22 separadores, ya que sólo los vanos 63 – 64 y 68 – 69 resultan ser cortos, el resto entra todo en la clasificación de largos, es decir sobre 300 [m].

La empresa Trent informó que el valor de un separador formado por aislador de goma de silicona de tipo de suspensión y anclaje de un largo aproximado de 2,1 [m], tiene un valor aproximado de [US\$] 431,68. Los herrajes necesarios para sujetar este aislador al conductor tienen un costo referencial de [US\$] 113. Al necesitar 22 de estos dispositivos se deben tomar en cuenta comprar 44 herrajes ya que estos elementos van sujetos arriba y abajo del separador con el conductor respectivo. Estos precios no consideran el IVA. Por otra parte la empresa Rthö para su cotización de separadores consideró que el valor del cuerpo del separador tendría un valor referencial de [US\$] 487,32, y para los herrajes el costo aproximado sería de [US\$] 124. Considerando los valores anteriormente mencionados y la cantidad de elementos a comprar se muestra a continuación el costo de la compra por empresa.

Tabla 3.10: Valor aproximado separador por empresa Trent. Sauzal – Minero.

TRENT	Costo [US\$]	Cantidad	Total [US\$]
Cuerpo (Aislador)	\$ 431,68	22	\$ 9.496,96
Herrajes	\$ 113,00	44	\$ 4.972,00
Total Separador			\$ 14.468,96

Tabla 3.11: Valor aproximado separador por empresa Rthö. Sauzal – Minero.

RTHÖ	Costo [US\$]	Cantidad	Total [US\$]
Cuerpo (Aislador)	\$ 487,32	22	\$ 10.721,04
Herrajes	\$ 124,00	44	\$ 5.456,00
Total Separador			\$ 16.177,04

Se puede observar que el presupuesto entregado por Trent es el más barato, algo que se podía prever debido a sus menores costos de los implementos. Sin embargo ambos presupuesto son relativamente cercanos diferenciándose por menos de dos mil dólares. Ambas cotizaciones son sólo referenciales para poder evaluar si a la empresa le conviene implementar a priori desde el punto de vista económico este tipo de solución.

### 3.4.1.2 Contrapesos

En el caso de los contrapesos la cantidad necesaria para instalar se calcula en base a las torres en cuestión, en el caso de la línea Sauzal – Minero, estas serían 12. Estos dispositivos, como se han aplicado en la práctica, sirven para mitigar los efectos de ice jumping pero no así el galloping. En las torres que se han instalado para evitar el efecto antes mencionado sólo se instala en dos de las fases, la inferior y la de al medio, ya que la fase superior al saltar no chocaría con otro conductor. Esta línea tiene un doble circuito donde va el 1 y 3, este último es el que presenta los problemas de disturbios con pérdidas para la corporación. Sin embargo y por un tema de simetría estos elementos deben ser instalados en ambos circuitos. Tomando en cuenta lo anterior se deben considerar comprar 48 contrapesos en total con un peso de 100 [kg] cada uno.

La empresa Trent cotizó contrapesos de 20 [kg] en un valor de [US\$] 31,71. Por otra parte la empresa Rthö entregó un presupuesto de [US\$] 25,65 por cada contrapeso de 20 [kg]. Ambos elementos son planchas que pueden superponerse una encima de otra de manera de



alcanzar el peso que se necesite para la línea. Con estos datos entregados por ambas empresas el valor final de la compra de contrapesos queda indicado en las tablas a continuación.

Tabla 3.12: Valor aproximado contrapesos por empresa Trent. Sauzal – Minero.

TRENT	Precio [US\$]	Cantidad por Peso	Cantidad por Torre	Torres	Total [US\$]
Contrapesos	\$ 31,71	5	4	12	\$ 7.610,40

Tabla 3.13: Valor aproximado contrapesos por empresa Rthö. Sauzal – Minero.

RTHÖ	Precio [US\$]	Cantidad por Peso	Cantidad por Torre	Torres	Total [US\$]
Contrapesos	\$ 25,65	5	4	12	\$ 6.156,00

Al contrario del presupuesto para los separadores en esta ocasión la empresa Rthö fue la que cotizó más baratos los contrapesos. En este caso no se puede decir que los valores son relativamente cercanos, esto debido a que el costo total es menor que el de los separadores y la diferencia entre un presupuesto y otro es casi el mismo que el anterior. Nuevamente es bueno mencionar que estos son precios de referencias y basados en pesos instalados anteriormente en líneas de 110 [kV] dentro de la misma división.

### 3.4.2 Línea Coya - Colina

#### 3.4.2.1 Separadores

A partir de la tabla 3.9 se puede obtener el número de vanos conflictivos. En este caso resulta ser mayor que en la línea anterior debido a que solo se tiene identificado el sector donde ocurren el mayor número de fallas. Como se mencionó anteriormente, para asegurar que no ocurra un disturbio al instalar los separadores se sugiere que se implementen tres en vanos largos y dos en cortos. Considerando las distancias, en esta línea solo se tendrían 2 vanos largos los cuales son 75 – 76 y 90 – 91, el resto se toma como cortos. Se tienen un total de 22 vanos entre largos y cortos y tomando en cuenta lo anterior se debe implementar un total de 46 separadores.

Trent consideró, tomando en cuenta las características de la línea, que el valor del aislador del separador es de [US\$] 170,24 aproximadamente. Para los herrajes necesarios para instalar este dispositivo el valor considerado fue de [US\$] 65. Por otra parte la empresa

Rthö presupuestó un costo de 152 [US\$] promedio por el aislador del separador y para los herrajes un valor de [US\$] 73. Con estos datos se pueden construir las siguientes tablas por empresa para este dispositivo.

Tabla 3.14: Valor aproximado separador por empresa Trent. Coya – Colina.

TRENT	Costo [US\$]	Cantidad	Total [US\$]
Cuerpo (Aislador)	\$ 170,24	46	\$ 7.831,04
Herrajes	\$ 65,00	92	\$ 5.980,00
Total Separador			\$ 13.811,04

Tabla 3.15: Valor aproximado separador por empresa Trent. Coya – Colina.

RTHÖ	Costo [US\$]	Cantidad	Total [US\$]
Cuerpo (Aislador)	\$ 152,00	46	\$ 6.992,00
Herrajes	\$ 73,00	92	\$ 6.716,00
Total Separador			\$ 13.708,00

En este caso se observa que ambos presupuestos son muy similares siendo el de Trent mayor en un poco más de cien dólares. Comparando este resultado con el obtenido para la línea Sauzal – Minero se puede decir que el precio es menor pero no tanto como debiese ser debido a que el conductor es de menor tamaño, al igual que las torres. Sin embargo la gran cantidad de vanos en los cuales se debe instalar hace que el costo de este aumente considerablemente.

### 3.4.2.2 Contrapesos

Al contrario de lo que ocurre en el caso de los separadores, los contrapesos no tienen una especificación distinta dependiendo del conductor ni de la torre. Lo que si se debe tener en cuenta es cuanto peso se debe instalar para poder evitar problemas y al ser un tensión menor, 69 [kV] en comparación con los 110 [kV] de Sauzal – Minero, entonces el peso que pueden soportar sus torres es menor. Sin embargo y conversando con los expertos en líneas de la división, y en particular con el jefe de mantenciones del área de líneas, Víctor Bustamante, se consideró que no se debe realizar un presupuesto para contrapesos en este circuito debido a que la cadenas de aisladores y las torres fueron diseñadas para soportar el peso de los conductores y algunos dispositivos no tan pesados como es el caso de los separadores. Por lo que solo no se realizará una evaluación económica para estos

dispositivos en la línea Coya – Colina. Cabe recordar que esta línea tiene más de 100 años por lo que debe ser mantenida regularmente y de implementarle dispositivos estos deben ser minuciosamente evaluados para no producir daños mayores.

### **3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA IMPLEMENTACIÓN**

Parte importante de la evaluación económica de la memoria radica en saber el costo aproximado que tendría la instalación de los dispositivos estudiados. Se dice aproximado ya que en general las empresas hacen un presupuesto previo al trabajo y luego entregan el valor de la implementación posterior a su ejecución, es este monto final el que debe ser pagado por la empresa. Sin embargo es de suma importancia que el costo que se prevé que podría tener el trabajo sea lo más cercano a la realidad de manera que la empresa que quiere contratar el servicio pueda evaluar oportunamente si vale la pena realizarlo o no.

En el caso de la división El Teniente se tiene un contrato con una empresa responsable de realizar las mantenciones a subestaciones, líneas y protecciones, llamada Cobra. En la presente memoria se consultó con la empresa anteriormente mencionada sobre su cotización para realizar la implementación de separadores y contrapesos en las distintas líneas avaluadas y las cantidades de los dispositivos indicadas en la sección anterior.

En la cotización entregada por esta empresa se distingue primero entre la implementación de separadores y la de contrapesos, siendo la primera más complicada que la segunda. En el caso de los separadores la empresa dijo que se debía realizar una inspección visual de los vanos en los cuales se iban a instalar estos para poder saber si se tiene acceso a las zonas intermedias de estos y subir a dos personas que harán la instalación desde un camión pluma, lo cual haría el trabajo más rápido, seguro y eficiente. En caso de no poder llegar con camión pluma a las zonas en las cuales se quiere instalar los dispositivos, se debe subir a dos personas por las torres y luego estas deslizarse a través del conductor hasta llegar a la zona donde se quiere poner el elemento. Este tipo de trabajo es más riesgoso sobre todo en líneas en las cuales sus conductores son relativamente viejos, de la misma manera al no poder acceder de manera directa al vano esto lo hace más lento para su instalación. En base a lo dicho anteriormente la empresa entregará dos cotizaciones una para instalar un sólo separador con camión pluma y otra sin este.

En el caso de los contrapesos la instalación resulta más sencilla ya que estos son puestos en la cadena de aislación que se encuentra muy próxima a la torre de alta tensión. Para este trabajo también se considera un escenario en el cual se puede acceder a la estructura de

manera fácil con el camión pluma y otra sin este, aunque ambos trabajos no revisten mayores problemas de seguridad, si se pueden distinguir en base al tiempo empleado en hacerlo, siendo más rápido nuevamente con el uso del vehículo. En este caso se considera la instalación de 100 [kg] de contrapesos.

Los presupuestos entregados quedan resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 3.16: Costos implementación dispositivos.

Implementación de un Separador	Costo [Ch\$]	Costo [US\$]
Con Camión Pluma	\$ 473.750,00	\$ 956,34
Sin Camión Pluma	\$ 728.750,00	\$ 1.471,09

Implementación de un Contrapeso	Costo [Ch\$]	Costo [US\$]
Con Camión Pluma	\$ 288.750,00	\$ 582,89
Sin Camión Pluma	\$ 563.750,00	\$ 1.138,02

En ambos presupuestos se tiene contemplado las horas hombre, cantidad de personas que realizan el trabajo incluido el supervisor y también el gasto de combustible del camión en caso de utilizarse. Cabe decir que el precio del dólar utilizado para hacer la transformación desde el peso chileno, fue el promedio del año 2013 debido a que se están considerando las ganancias obtenidas durante ese año [26], el valor promedio fue de 495,38 [US\$]. Se puede observar que los trabajos realizados con el camión pluma para ambos dispositivos resultan más baratos, esto debido a que el tiempo empleado es menor por lo que se gasta menos dinero en horas hombre. De la misma manera al ser la instalación de contrapesos un trabajo más sencillo el costo por este trabajo es menor. Cabe notar que en el caso de la cotización del separador solo se considera la instalación de uno dispositivo.

A continuación se procede a realizar la evaluación económica de la implementación de los distintos dispositivos por línea, tomando en cuenta la recomendación realizada por la empresa y las condiciones específicas de cada circuito.

### 3.5.1 Línea Sauzal – Minero

Para realizar la evaluación correspondiente a la implementación de los distintos dispositivos para esta línea se debe conocer el nivel de accesibilidad para los distintos vanos y torres, de manera de saber si el costo a considerar por la instalación de los elementos será con o sin camión pluma. En este caso en particular, como se mostró con anterioridad, la cantidad de vanos a analizar son ocho con un total de 12 estructuras.

En el caso de los vanos y estructuras a analizar se tiene que en su mayoría son accesibles. Para las estructuras el porcentaje es de un 100 [%] y en el caso de los vanos se tiene que 6 de estos son de fácil acceso para que un camión pluma se aproxime y pueda realizar los trabajos requeridos durante la implementación. Aquellos vanos con difícil acceso son el 58-59 y 65-66 (vanos largos). Esto es una consideración personal en base a las visitas realizadas a los mismos, sin embargo queda a criterio de la empresa que realizará el trabajo el definir el nivel de accesibilidad a los vanos. Ahora bien, en la cotización entregada por la empresa cobra se consideró el trabajo realizado para la instalación de un solo dispositivo, por lo que a continuación se mostrará cuanto sería el costo estimativo por la cantidad completa para cada elemento considerado en esta memoria. En el caso de los separadores el valor queda mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 3.17: Cotización implementación separadores Sauzal - Minero.

Implementación Separador	Cantidad de Vanos	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Con Camión Pluma	6	16	\$ 15.301,38
Sin Camión Pluma	2	6	\$ 8.826,56
Total			\$ 24.127,94

El escenario presentado anteriormente, si bien puede ajustarse a la realidad y mostrar una estimación correcta del valor aproximado que podría tener la implementación de los separadores en la línea en cuestión, esta queda sujeta a criterios de otra empresa la cual puede tener otra idea de cómo realizar el trabajo. Para evitar este tipo de problemas se tomará el mayor valor que podría tener esta instalación, es decir, considerar que todo el trabajo se realiza sin camión. De esta manera se entregará a la división una evaluación que es la cota máxima de la implementación para que al momento de tomar la decisión si ejecutar o no la memoria se tenga una estimación mayor del costo del trabajo y así no llevarse sorpresas durante la evaluación posterior. En base a lo mencionado anteriormente se tiene que la cota máxima para la implementación queda de la siguiente manera.

Tabla 3.18: Cota máxima cotización implementación separadores Sauzal - Minero.

Implementación Separador	Cantidad de Vanos	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Sin Camión Pluma	8	22	\$ 32.364,04
Total			\$ 32.364,04

Con esta nueva estimación se tiene que el precio final de la implementación de los separadores en la línea Sauzal – Minero es de [US\$] 32.364, lo cual es aproximadamente [US\$] 8.000 mayor que la cotización considerando los criterios antes explicados.

Para la evaluación de los contrapesos en este circuito se procederá de la misma manera que en el caso de separadores, es decir, primero se mostrará una tabla con la cotización correspondiente a lo observado en las inspecciones visuales y posteriormente se entregará una cota máxima para la implementación de este trabajo, es decir la realización del mismo pero sin camión pluma.

Como ya fue dicho la cantidad de estructuras que se consideran accesibles para el camión pluma es del 100 [%], por lo que el trabajo completo debería realizarse con esta maquinaria haciendo que sea más rápido y seguro. La evaluación queda representada por la siguiente tabla.

*Tabla 3.19: Cotización implementación contrapesos Sauzal- Minero.*

Implementación Contrapesos	Cantidad de Estructuras	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Con Camión Pluma	12	48	\$ 27.978,52
Sin Camión Pluma	0	0	\$ 0,00
Total			\$ 27.978,52

En el escenario de cota máxima se considera la implementación realizada en su totalidad sin camión pluma, de manera que el valor obtenido sea máximo según la cotización entregada por la empresa contratista Cobra. Esto queda expresado en la tabla a continuación.

*Tabla 3.20: Cota máxima implementación contrapesos Sauzal -Minero.*

Implementación Contrapesos	Cantidad de Estructuras	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Sin Camión Pluma	12	48	\$ 54.624,73
Total			\$ 54.624,73

Como era de esperar la cota máxima resulta ser mayor que la aproximación que resulta de las inspecciones visuales, es más esta es prácticamente el doble. El costo final por instalar los contrapesos en la línea Sauzal – Minero es de [US\$] 54.625, este es incluso mayor que el valor de la implementación de los separadores debido a que la cantidad de elementos es mayor por lo que requiere más trabajo.

### 3.5.2 Línea Coya – Colina

En el caso de la línea Coya – Colina no se tiene con exactitud la cantidad de vanos y torres que son accesibles para el camión pluma debido a que fue imposible coordinar una inspección visual por todos estos, sin embargo se tomó en cuenta la opinión del personal de líneas, en específico del jefe del área Víctor Bustamante. Por la información que se pudo recabar cerca del 65 [%] de vanos y estructuras correspondientes a la zona donde se producen la mayor cantidad de fallas en invierno, es accesible con camión pluma.

En el caso de los separadores para el circuito en cuestión se tomará en cuenta los datos entregados por el personal para poder realizar una evaluación económica de la implementación que se pueda ajustar a la realidad y posteriormente, al igual que la línea anterior, se procederá a calcular la cota máxima para esa implementación. Con esto se tiene que el costo de instalar los separadores es el siguiente.

Tabla 3.21: Cotización implementación separadores Coya – Colina.

Implementación Separador	Cantidad de Vanos	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Con Camión Pluma	14	30	\$ 28.690,10
Sin Camión Pluma	8	16	\$ 23.537,49
Total			\$ 52.227,58

Finalmente y como se consideró que en esta línea no tiene sentido evaluar el uso de contrapesos, se entregará la cota máxima que se estima podría costar la implementación de separadores, es decir sin camión pluma en un 100 [%] del circuito.

Tabla 3.22: Cota máxima cotización instalación de separadores Coya – Colina.

Implementación Separador	Cantidad de Vanos	Cantidad de Dispositivos	Costo [US\$]
Sin Camión Pluma	22	46	\$ 67.670,27
Total			\$ 67.670,27

Es fácil notar que el costo de la implementación de separadores para la línea Coya – Colina es mucho mayor, más del doble, que para su similar Sauzal – Minero. Esto se debe a que la cantidad de vanos en los cuales se piensa trabajar es mayor en el primer caso lo que implica más número de dispositivos y por ende más trabajo para poder instalarlos. El costo final de la instalación de separadores en este circuito es de [US\$] 67.670.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En esta sección se pretende tomar en cuenta todas las consideraciones mostradas en los capítulos anteriores desde el punto de vista técnico y económico sobre la pertinencia de instalar los distintos dispositivos en los circuitos estudiados. Las variables que se tomarán en cuenta son en primer lugar técnicas y tienen relación con la a viabilidad de implementación desde el punto de vista estructural, tipo de fenómeno más recurrente, medidas de mitigación actuales para prevenir fallas y cantidad de fallas acaecidas en el último tiempo por línea. Posteriormente se tomará en cuenta desde el punto de vista económico el costo promedio estimado de las pérdidas producidas por los disturbios provocados en los circuitos, así como las correspondientes evaluaciones de compra y posterior instalación de los elementos. Con respecto a estas últimas cotizaciones se tomarán los valores más altos de manera de que la empresa tenga una cota superior del costo total del trabajo. Para poder realizar este correcto análisis se separará el mismo por línea y en cada sección se comentará los puntos mencionados con el mayor detalle posible de manera de poder tener toda la información recabada durante este trabajo de título con la mayor objetividad.

### **4.1 Línea Sauzal – Minero.**

Esta línea fue construida originalmente para ser uno de los principales aportes energéticos de la división, sin embargo y con el reciente contrato adquirido con la empresa Colbún, esta ha quedado prácticamente en desuso. Siendo utilizada a muy baja carga lo que permite una fácil acumulación de nieve en sus conductores debido a que estos no se encuentran calientes, este fenómeno en el cual la nieve se va depositando en toda la sección del conductor es conocido como efecto galloping, sin embargo para poder producir fallas se necesita condiciones de viento fuerte capaces de moverlos en grandes desplazamientos por el peso adquirido, haciendo que se acerquen peligrosamente produciendo un corto circuito bifásico. En el caso del trazado de esta línea no se aprecian, por experiencia de los trabajadores de la división, vientos que puedan tener estas características, pero de todas maneras en los registros de fallas queda constancia de disturbios bifásicos ocurridos bajo condiciones climáticas de viento y nieve. Lo que podría calzar con estos eventos es el fenómeno de ice jumping, ya que este se debe al desprendimiento de la nieve acumulada en los conductores haciendo a estos saltar y produciendo las fallas descritas.

Con respecto al análisis de los elementos de mitigación con los que la división cuenta en estos momentos para poder prevenir este tipo de disturbios son pobres en esta línea. La Sauzal – Minero cuenta con tres circuitos de los cuales el 1 y 2 entregan energía desde la



central Sauzal, Coya, Pangal y Chacayes, en los meses en los cuales el nivel de agua le permite generar energía a estas centrales, esta va directamente a la subestación Minero la cual la redistribuye en las distintas subestaciones de la división. La energía entregada por estas dos líneas representa menos del 10 [%] del total del consumo de la división, y esto ocurre durante los meses de verano, por lo que durante el invierno prácticamente estos circuitos están en cerrados. Por otro lado el circuito 3 es el encargado de alimentar entre sus cargas más importantes las bombas de impulsión de agua, elemento fundamental para cualquier faena minera. Las medidas de mitigación tomadas por la gerencia de servicios y suministros en caso de tormenta de nieve son de sacar de operación los circuitos 1 y 2, en caso de estar funcionando, sin embargo no puede operar de la misma manera con el circuito 3 ya que las bombas de impulsión dependen directamente de la gerencia planta por lo que se debe recibir la autorización de esta misma para proceder con la desconexión. Esto crea un problema ya que al poder desconectar esta línea y al funcionar a baja carga se acumula nieve lo cual produce la falla anteriormente descrita. El verdadero problema ocurre una vez acaecido el disturbio ya que este genera variaciones de voltajes en todo el sistema de 50 [Hz], haciendo que operen las protecciones de los equipos más sensibles entre ellos los molinos. Al no tener control directo la gerencia de servicios y suministros sobre este tipo de acontecimientos se producen fallas con pérdidas de producción que resultan en un costo económico para la corporación. Estas fallas han sido recurrentes en los últimos 3 años lo que va de la mano con ligero aumento de las precipitaciones en el sector, llegando hasta ocurrir un evento por año.

Como se mencionó en el capítulo segundo del presente trabajo, que el elemento más utilizado para poder prevenir el efecto de ice jumping es el separador sin embargo en la división se han implementado de manera exitosa los contrapesos como elementos de mitigación. Estos últimos lo que hacen es no permitir el movimiento de la cadena de aisladores al momento del desprendimiento de nieve ya que, según la experiencia de la gente de líneas, este movimiento se propaga a través de la línea provocando que vanos más cortos en relación al que ocurre el fenómeno, salte de manera tal haciendo que sus conductores se acerquen peligrosamente o derechamente choquen. Estos han tenido resultados exitosos disminuyendo las fallas de este tipo en las líneas en las cuales se implementó. Desde el punto de vista estructural la Sauzal – Minero no representa mayores problemas para poder soportar la implementación de cualquiera de estos dispositivos. El único pero que podría tener es la edad de sus conductores, 45 años, sin embargo estos se encuentran en perfecto estado en la mayoría del trazado al igual que sus torres.

Desde el punto de vista económico como se pudo observar en el capítulo tercero sección 3.3 el costo asociado a la falla promedio considerando una falla anual es de [US\$] 124.087. Esto se debe básicamente a la desconexión de la molienda en 50 [Hz] siendo las más

importantes los molinos SAG, la molienda unitaria y los molinos de bolas, ya que sustentas la mayor parte de la producción de cobre de la división. Este costo debe ser contrastado con los costos de compra e implementación de ambos dispositivos que podría solucionar el problema. Para este análisis se tomarán los mayores valores obtenidos.

Para los separadores en esta línea se considerará la cotización entregada por la empresa Rthö, así mismo como la implementación sin el uso de camión pluma. Tomando en cuenta lo anterior se tiene la siguiente tabla.

Tabla 4.23: Evaluación económica final separadores línea Sauzal- Minero.

Evaluación Económica Separadores	Pérdida por Falla [US\$]	Costo Dispositivos [US\$]	Costo Implementación [US\$]	Diferencia Pérdida - Costo [US\$]
	\$ 124.087,00	\$ 16.177,00	\$ 32.364,00	\$ 75.546,00

Para el caso de los contrapesos se utilizó la cotización de la empresa Trent, ya que este resultado ser mayor para estos dispositivos, y de igual manera que en la anterior se utilizará el costo de la implementación sin camión pluma. Esta evaluación queda reflejada en la siguiente tabla.

Tabla 24.2: Evaluación económica final contrapesos línea Sauzal – Minero.

Evaluación Económica Contrapesos	Pérdida por Falla [US\$]	Costo Dispositivos [US\$]	Costo Implementación [US\$]	Diferencia Pérdida - Costo [US\$]
	\$ 124.087,00	\$ 7.610,00	\$ 54.625,00	\$ 61.852,00

De ambas tablas se puede concluir que para esta línea resulta conveniente la implementación de los dos dispositivos en cuanto a la relación pérdida – costo. En el caso de los separadores la ganancia anual que registraría la división por la instalación es de [US\$] 75.546, y para los contrapesos esta suma sería de [US\$] 61.852. En base a estos resultados se puede decir que resulta desde el punto de vista económico más atractivo la compra e instalación de separadores. Si bien estos elementos son más caros su posterior implementación le da ventajas económicas con respecto a los contrapesos. Desde el punto de vista técnico, por otra parte, estos últimos resulta que son mucho más seguros de implementar ya que no se arriesga a la persona a deslizarse por el conductor lo cual podría traer como consecuencia algún accidente fatal en caso de que la línea no este apta para este tipo de trabajo. Un punto a favor de los separadores desde la mirada técnica es que estos considerados por la comunidad académica como la mejor solución ya sea para efecto galloping como para ice jumping, en el caso de los contrapesos es una solución implementada por la división, con mucho éxito, pero que no ha sido analizada desde el punto de vista académico, además de que solo funciona para el caso de ice jumping.

## 4.2 Línea Coya – Colina

Esta línea es la más antigua de todo el sistema de transmisión de la división, en la actualidad cumplirá 104 años desde su fundación y tiene la particularidad de transmitir energía en 60 [Hz] algo que ocurre debido a que los primeros inversionistas de la mina eran capitales estadounidenses. Si bien este circuito era parte fundamental del complejo minero, en la actualidad ha dejado de tener tal importancia debido a que prácticamente el 85 [%] de la producción de la mina se realiza en 50 [Hz] dejando al sistema de 60 ciclos en segundo plano. Esta línea es continuamente ocupada ya que si bien no transmite gran cantidad de energía debe mantener activa las cargas que funcionan en base a esta frecuencia siendo la más importante la molienda Sewell. En el transcurso del trazado de esta línea se observan vientos mayores que los registrados en la Sauzal – Minero, llegando al punto que pueden juntarse dos conductores sin la necesidad de tener nieve acumulada en estos, aunque esto ha ocurrido en muy pocas ocasiones. Tiene tendencia a acumular nieve en sus conductores lo que sumado a esta fuerte condición de viento trae como consecuencia efecto galloping, no así el ice jumping, como factor principal de sus fallas.

Las medidas de mitigación que toma la gerencia de servicios y suministros, en la línea, para poder prevenir los disturbios que puedan ocurrir producto del efecto galloping, se consideran efectivas y esto se traduce en la poca ocurrencia de fallas producto de este fenómeno en el último tiempo, uno en los últimos siete años. Esta medida es una particularidad que tiene el circuito y que fue considerada por los diseñadores de la misma hace más de 100 años. Esta es la condición de derretidor de nieve. Esta línea cuenta con dos circuitos, blanco y negro, uno de los cuales se queda fuera de operación y se transforma su nivel de tensión a 7,2 [kV], luego es aterrizado en un reóstato de agua salinizada con electrodos produciendo un corto circuito controlado en este, y provocando una corriente de corto circuito de 394 [A] que calienta al conductor derritiendo la nieve acumulada e imposibilitando su acumulación. Por otra parte el circuito que no fue desconectado transmite toda la energía funcionando prácticamente a plena carga haciendo que el conductor se calienta y de la misma manera derrite la nieve acumulada anteriormente. Este método resulta ser muy efectivo para prevenir fallas en invierno.

Debido al tipo de efecto predominante en todo el trazado de la línea, galloping, se decide solo evaluar la compra e implementación de separadores. Esto sumado a que por la antigüedad y diseño de la misma instalar contrapesos puede ser peligroso tanto para la cadena de aisladores como para la estructuras en sí, ya que éstas fueron diseñadas para soportar los pesos de conductores, aisladores y demás herrajes. Considerando además que el peso aproximado de cada separador es menor a los 6 [kg] estos no aportarían mucho en esta variable. Cabe mencionar eso sí que realizar un trabajo de implementación de

separadores en una línea de estas características resulta de por sí muy riesgoso, debido a la antigüedad de sus conductores y estructuras, por lo que en los casos en los cuales el trabajador deba deslizarse por el cable para instalar, este quedaría muy expuesto a un accidente. Sin embargo se considera que queda a criterio de la empresa que realizará los trabajos hacer la evaluaciones pertinentes para aprobar o descartar el mismo.

Con respecto a la evaluación económica se tomará el costo de la falla del capítulo tercero en la sección 3.3 que es de [US\$] 24.872, considerando el promedio de una falla anual, algo que se está dando con poca frecuencia en la actualidad. De la misma manera se tomará en cuenta el costo de dispositivo entregado por la empresa Trent y la realización del trabajo sin camión pluma, aunque en la práctica esto último podría ser considerado muy riesgoso. El resultado se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 4.25: Evaluación económica final separadores línea Coya – Colina.

Evaluación Económica Separadores	Pérdida por Falla [US\$]	Costo Dispositivos [US\$]	Costo Implementación [US\$]	Diferencia Pérdida - Costo [US\$]
	\$ 24.872,00	\$ 13.801,00	\$ 54.625,00	-\$ 43.554,00

Al contrario de lo ocurrido con la evaluación económica para la línea Sauzal – Minero, en este caso no resulta económicamente atractivo realizar la inversión para solucionar las fallas, para que este empiece a tener números azules la evaluación se debe realizar con un horizonte mayor a tres años de manera que las pérdidas acumuladas justifiquen la compra e implementación de los separadores. En parte este resulta es negativo por el bajo costo en el que se incurre por la pérdida en relación con la otra línea evaluada, prácticamente seis veces menor, y también la gran cantidad de vanos que se ven afectados por la falla esto porque no se tiene completa certeza de donde ocurren los disturbios, por lo que se restringe a una zona de estructuras mucho mayor que la anterior.

Queda pendiente analizar si es conveniente realizar la inversión de compra de separadores para esta línea tomando en cuenta las buenas medidas de mitigación que esta tiene y los altos costos en los que incurriría la división para poder solucionarlo. Además el tema de la seguridad de los trabajadores a la hora de realizar el trabajo es un punto muy importante a considerar ya que se debe tratar de implementar con el menor factor de riesgo posible para los trabajadores, algo que no está garantizado en este caso.

## **5. CONCLUSIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES GENERALES**

El presente trabajo ha permitido conocer de mejor manera el rubro de la minería y los desafíos y problemas que presenta en el plano energético. Se comprendió la difícil tarea que significa diseñar y construir líneas de alta tensión en la alta montaña, dado las condiciones climáticas a las cuales estas se ven afectadas y también al terreno que está sujeto a constantes cambios, ya sea por temblores, aluviones o caídas de rocas. Se pudo constatar que la normativa chilena es escasa para este tipo de construcción y que los actuales diseñadores de líneas se basan más en su experiencia personal e intuición, que en normas que ayuden a una mejor proyección del circuito que contemple medidas de mitigación adecuadas para cada condición. Si bien la energía es un factor fundamental para el desarrollo de la industria minera, ya que esta es requerida las veinticuatro horas todos los días de la semana sin excepción, esta se da por contado y no se invierte de manera suficiente para tener un sistema seguro y eficiente, sino más bien se abaratan costos, en este sentido, conformándose con un sistema eléctrico que funcione incluso con algunas fallas al año, ya sea por causas climáticas o de otra índole.

Se ha logrado implementar una metodología para una evaluación técnico económica en la cual se corroboran aspectos técnicos más generales como tipo de soluciones existentes actualmente en el mercado, características climáticas del emplazamiento donde se encuentra la faena minera y fenómenos de ocurrencia más globales. También investigar sobre los detalles estructurales de cada línea de manera de poder cotizar un dispositivo a fin con los requerimientos que estas necesitan y analizar si estas son aptas para soportar este tipo de trabajo de manera que los trabajadores puedan realizarlo de manera segura. Con respecto a la evaluación económica se llegó a un valor referencial del costo en el incurre la empresa por cada falla ocurrida por factores climáticos y también cuánto costaría una solución desde la compra de los dispositivos hasta la implementación de los mismos.

## **5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS**

Se logra detallar principales características de los distintos fenómenos vibracionales, identificando fallas producidas y consecuencias en operación. También se muestran de forma satisfactoria las distintas alternativas existentes en el mercado que se utilizan para mitigar los fenómenos descritos. Se establece metodología de valorización de las fallas en las líneas de alta tensión de la división El Teniente, la cual se incluye en el análisis económico.

Se revisarán los resultados obtenidos para cada línea que se analizó. Esta revisión incluirá todos los aspectos incluidos en el trabajo de manera de tener una visión más completa de los aspectos positivos y negativos de la implementación de los distintos dispositivos en cada circuito. La idea de esta sección es que la empresa que requirió de este trabajo, en este caso Codelco división El Teniente, pueda tomar una decisión con toda la información disponible y considerando los distintos aspectos abarcados durante el trabajo.

### **5.2.1 Línea Sauzal –Minero**

Desde el punto de vista técnico esta línea presenta varios aspectos. En primer lugar se tiene bien identificada la zona y los vanos que resultan más vulnerables a condiciones climáticas de viento y nieve. Tomando en cuenta lo anterior y considerando el trayecto del trazado se considera que la causa más probable de falla es producida por el efecto de ice jumping debido a que los vientos en la zona no se caracterizan por lo fuertes. Esto posibilita considerar a los contrapesos como una solución ya probada por la división e incluirla en el análisis junto con los separadores. Otro aspecto que se tiene ya bien analizado es que todas las fallas que provocan pérdida de producción, es decir un costo económico, se generan en el circuito 3 de la misma. Un aspecto que juega en contra de esta línea es que opera con baja carga lo que facilita la acumulación de nieve en sus conductores. Por condiciones ajenas a la gerencia de suministro y servicios, encargada de velar por el correcto funcionamiento del sistema eléctrico del complejo minero, no se puede sacar de operación este circuito debido a que alimenta cargas fundamentales para la faena como las bombas de impulsión de aguas, y que son responsabilidad de la gerencia de planta la cual debe dar el visto bueno de la desconexión de la misma. Esto hace muy difícil tener medidas de contingencia que funcionen correctamente en caso de tormentas de nieve. En el caso estructural se considera que la línea está apta para realizar los trabajos de implementación de los dispositivos sin que esto revista un peligro mayor para los trabajadores.

Considerando las fallas que ocurren en el circuito tres, un primer análisis que se puede realizar es que estas van en aumento junto con el ligero aumento de las precipitaciones de los últimos años. Si bien como se mencionó anteriormente la década 2003 – 2013 fue la más seca registrada en la historia de Chile, se espera que para el decenio siguiente las precipitaciones aumenten. Haciendo que estos fenómenos ocurran con mayor frecuencia. Desde el punto de vista económico observando las tablas 4.1 y 4.2 se puede concluir que ambos dispositivos, separadores y contrapesos respectivamente, resultan favorables de comprar e instalar. Sin embargo desde un punto de vista técnico la solución más segura resultan ser los separadores ya que es lo más probado y estudiado a nivel mundial, siendo los contrapesos en este sentido una solución implementada por la división y que no tiene mucha investigación teórica sobre su real aporte como dispositivo de mitigación. El costo de comprar e implementar los separadores es recuperado al ocurrir una falla anual y dejaría ganancias para la división de [US\$] 75.546, en la primera falla. Posteriormente el valor que gana la corporación es el costo por cada falla que se evita.

Tomando en cuenta lo anteriormente expresado se considera pertinente la implementación de separadores. Desde el punto de vista técnico estos resultan ser una solución efectiva ya sea contra efecto galloping y ice jumping, lo que le da una ventaja al compararlo con los contrapesos ya que estos solo resultan útiles en caso de ice jumping. Considerando además que las medidas para prevenir fallas en esta línea no cumplen tal función. Otro aspecto técnico que es favorable en este caso es que estructuralmente la línea presenta las condiciones adecuadas para que se pueda realizar el trabajo. Desde el punto de vista económico es atractivo para la empresa ya que registra ganancias desde la primera falla que se evita, esto se puede medir en base a la cantidad de tormentas de nieve ocurridas durante un año.

### **5.2.2 Línea Coya – Colina**

Para el análisis de esta línea las consideraciones técnicas evaluadas son las siguientes. La zona en la cual se presenta el mayor número de fallas se tiene identificada, sin embargo el número de vanos involucrados no se tiene analizado, lo que implica un mayor número de dispositivos a instalar y por ende mayor cantidad de trabajo a realizar. Se puede considerar que la causa más probable de fallas para esta línea es el de efecto galloping, esto porque los vientos que se registran en la zona de fallas son altos lo que sumado a la condición de nieve en los conductores puede provocar fallas en los circuitos. Por ende no se considera a los contrapesos como parte de los dispositivos que puedan servir como solución en esta línea. Con respecto a las fallas que provocan fallas de producción estas ocurren indistintamente en ambos circuitos de la línea, blanco o negro por lo que se debe evaluar la implementación de separadores en ambos. Un punto que es muy favorable en esta línea son las medidas de contingencia que se toman para evitar fallas en caso de tormenta de nieve. La principal es la

condición de derretidor de nieve el cual tiene excelentes resultados, ya que evita la acumulación de nieve calentando ambos circuito, uno aterrizándolo y poniéndolo en corto circuito y el otro aumentando la potencia que transmite de manera que el conductor se sobrecaliente. Este método resulta muy efectivo haciendo que se registren solo una falla asociada a tormentas de nieve en los últimos siete años. Desde el punto de vista estructural la línea no presenta las condiciones adecuadas para realizar el trabajo de implementación de los separadores, si bien estos no tienen un peso muy alto que pueda traer problemas, toda la estructura es muy antigua ya que tiene más de 100 años lo que hace muy riesgoso cualquier trabajo que se realiza sobre los conductores o las torres.

En cuanto a las fallas que se registran para esta línea no ocurren en gran cantidad y no se puede decir si estas aumentarán o no debido a que las medidas de precaución que se toman resultan efectivas y las disminuyen considerablemente. Desde el punto de vista económico se puede observar en la tabla 4.3 que la implementación de los separadores no genera ganancias al primer evento que se evita, sino más bien tendrían que evitarse varios de este tipo de incidentes para que la corporación pueda ver ganancias a su favor. Este punto es complejo debido a la poca frecuencia con la que estas fallas ocurren lo que traería en el corto plazo pérdidas para la empresa. El balance final de la implementación de los separadores en el primer año, considerando que ocurre una falla en el mismo es de [US\$] – 43.554, lo que se traduce en una pérdida.

Considerando todo lo mencionado se considera que no es necesario para esta línea la implementación de separadores como elementos de mitigación climática. En primer lugar estos trabajos podrán resultar riesgosos para quienes lo realicen lo cual es un problema a la hora de instalarlos. En segundo lugar se considera que las medidas de contingencia tomadas en esta línea son suficientes y evitan un gran número de fallas anuales. Y finalmente no resulta atractivo desde el punto de vista económico para la división ya que recuperarían la inversión en un periodo indeterminado de tiempo.



### 5.3 TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos futuros que se proponen son considerados no solo para que se realicen dentro de la división El Teniente de Codelco, sino también como materia investigativa para analizar otros tipos de alternativas capaces de poder mitigar los efectos del galloping y el ice jumping sobre las distintas líneas.

- En primer lugar, como complemento del presente trabajo, se propone realizar un estudio técnico económico sobre el uso de dispositivo de mitigación climática en las líneas aéreas de 13,8 [kV] de la división El Teniente. Ya que estos fenómenos no sólo afectan a las líneas de alta tensión y para mejorar el suministro de energía de manera más completa este estudio debe realizarse para tensiones menores.
- En el presente trabajo se consideró a los contrapesos como un tipo de solución válida para evitar problemas de ice jumping, esto utilizando la experiencia práctica que tenía la empresa en su utilización. Sin embargo no se tienen datos concretos sobre su real aporte. Se propone entonces, un estudio acabado sobre el efecto de este tipo de dispositivos desde el punto de vista mecánico y como este ayudaría a evitar dichos efectos.
- Otro aspecto que no se tiene muy claro es la cantidad y ubicación ideal de los separadores en las líneas, así como de otros dispositivos como los amortiguadores. En el caso del presente trabajo se utilizaron recomendaciones de los mismos proveedores en cuanto a la cantidad pero no hubo comentarios con respecto a la ubicación de los mismos. La idea es identificar, de ser posible, la ubicación en la cual estos dispositivos logran su máximo rendimiento.
- Se propone el estudio técnico económico de la utilización de conductores que son fabricados por la empresa La Farga, y que pueden evitar la acumulación de nieve en los mismos. Esta evaluación debe realizarse para líneas nuevas que se vayan a instalar no en las que ya existen.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Wang, “Overhead transmission line vibration and galloping,” *2008 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl. ICHVE 2008*, pp. 120–123, 2008.
- [2] Página Web, “CODELCO - El Teniente.” . [En Línea]. Aviable: [http://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/edic/base/port/el\\_teniente.html](http://www.codelco.com/prontus_codelco/site/edic/base/port/el_teniente.html). [Consulta: 05/02/2015].
- [3] P. J. Pinto, “Todo Sobre Vibraciones en Líneas de Alta Tensión.”Universidad de Chile, Taller de Proyectos II, 2011.
- [4] G.E. Braga, R. Nakamura, T.A. Furtado "Aeolian Vibration of Overhead Transmission Line Cables : Endurance Limits," *2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*, 2004.
- [5] V. T. Morgan, B. S. Eng, D. A. Swift, B. Sc, Associate Member, “Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads,” *PROC. IEEE, Vol 111, no. 10*, October 1964.
- [6] J. Wang and J. L. Lilien, “Overhead electrical transmission line galloping: A full multi-Span 3-DOF model, some applications and design recommendations,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 3, pp. 909–916, 1998.
- [7] Página Web, “Harvard Engineering Inc.” .[En Línea]. Aviable : <http://www.harvardeng.com/index.html>. [Consulta: 20/08/2014] .
- [8] D. Tdd, A. Device, J. Lilien, and A. A. Vinogradov, “Full-Scale Tests of Torsional Damper and,” vol. 17, no. 2, pp. 638–643, 2002.
- [9] Página Web, “AR Products Research Consulting Associates.”. [En Línea]. Aviable: <http://arproducts.org/>. [Consulta: 20/08/2014] .
- [10] D. A. . Davis, D. A.; Orawski, G.; Simpson, A.; Poskitt, T. J.; Wood, A. B.; Mcdonald, F. G.; Vinjar, A.; Morgan, V. T.; Swift, “Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads,” *PROC. IEEE, Vol 112, no. 10*, October 1965.
- [11] J. P. Romero Herrera, “Guía Práctica para el Diseño y Proyecto de Líneas de Transmisión de Alta Tensión en Chile,”*Universidad de Chile, Memoria*, 2010.
- [12] Comisión Nacional de Energía, “Norma NSEG 5EN 71 Instalaciones Corrientes Fuertes.” 1955.
- [13] Comisión Nacional de Energía, “Norma NSEG 8 75 Electricidad Tensiones Normales para Sistemas e Instalaciones.” .

- [14] Página Web, “CODELCO - Corporación Nacional del Cobre , Chile.” .[En Línea].  
 Aviable: <http://www.codelco.com/>. [Consulta 05/02/2015].
- [15] División El Teniente, “El Teniente Minería del Futuro,” 2013.
- [16] K. V. de L. Carvajal Gutierrez, “Análisis de la Coordinación de Protecciones Mediante ETAP para las Subestaciones Principales del Sistema Eléctrico El Teniente.” *Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Memoria*, 2014.
- [17] Corporación Nacional del Cobre, “Codelco Memoria.” 2013.
- [18] CODELCO División El Teniente, “Patio de Líneas - Sistema Eléctrico División El Teniente - Frecuencias de 50 [Hz] y 60 [Hz] - Diagrama Esquemático, SI-142117-2.” . [Plano]
- [19] Intranet, “potal6.codelco.cl.” .[Consulta: 15/03/2015] ..
- [20] I. Iturra Figueroa, “Actualización del Modelo del Sistema Eléctrico División El Teniente,” *Universidad Técnica Federico Santa María, Memoria*, 2013.
- [21] M. V. Moreno, “Protecciones de Sistemas Eléctricos.” *Universidad Católica de Temuco, Memoria*, 2012.
- [22] W. D. J. Jhon J. Gravier, “Análisis de Sistema de Potencias.” *Editorial Mc Graw Hill*, 1996.
- [23] Página Web, “Dirección Meteorológica de Chile .”. [En línea]. Aviable: <http://www.meteochile.gob.cl/publicaciones.php>. [Consulta:25/02/2015] .
- [24] CODELCO División El Teniente, “Patio de Líneas - 110 [kV] transmission line - torre tipo II - plano de montaje, 541-3-113 E1.” . [Plano]
- [25] CODELCO División El Teniente, “Patio de Líneas - 69 [kV] transmission line - torre tipo II - plano de montaje, GP8-174503.” . [Plano]
- [26] Página Web, “Servicios de impuestos internos.”. [En línea]. Aviable: [www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2013](http://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2013). [Consulta: 05/03/2015] .