

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Dr. Luís A. Moran T.

Supervisor Empresa:
Mauricio Ortiz J.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

**Requerimientos del Sistema de Distribución
Eléctrico para la Transición Energética en una Gran
Faena Minera**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante
Dr. Luis A. Moran T.

Requerimientos del Sistema de Distribución Eléctrico para la Transición Energética en una Gran Faena Minera

Sofía Javiera Santander Rojas

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Noviembre 2023

Resumen

En la presente memoria de título, se llevó a cabo una comparación de diversas tecnologías de energización para camiones de extracción (CAEX), profundizando tres que presentan el nivel de madurez más alto: convencional, diésel con asistencia trolley y camión eléctricos a batería (BEV). Se realizó una evaluación económica para determinar la competitividad financiera de estas opciones, comparando el camión convencional con las tecnologías mencionadas. Esta comparación se llevó a cabo considerando, el costo de inversión y el costo de operación, tanto del CAEX como de la infraestructura necesaria para la operación de cada tecnología evaluada. En esta comparación se utilizó el Valor Actual de Costos (VAC).

Para llevar a cabo este estudio, se realizaron simulaciones utilizando el software Digsilent para analizar tanto los camiones con sistema trolley como los camiones eléctricos a batería. En el caso de los camiones trolley, se implementaron cuatro líneas trolley en el loop minero, con tres camiones conectados a cada línea. Además, se agregaron seis cargadores eléctricos para los camiones eléctricos a batería. Estas simulaciones permitieron analizar el cumplimiento de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) en relación con los niveles de tensión en las barras, así como evaluar la sobrecarga en líneas, alimentadores y transformadores del sistema de distribución.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el sistema eléctrico actual de Minera Los Pelambres no está preparado para realizar una transición total de su flota de camiones. En las condiciones actuales, el sistema podría permitir la operación de hasta 3 camiones diésel eléctricos conectados al sistema trolley bajo condiciones normales de operación; sin embargo, no cumpliría con el criterio N-1 en el sistema de 220 kV, ya que al salir de servicio uno de los transformadores de subestación Piuquenes o una de las líneas Quillota – Piuquenes, se sobrecargan.



A quienes confiaron en mi...

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por su apoyo inquebrantable desde el principio y por confiar en mí a lo largo de mi carrera profesional. Gracias por hacer todo lo posible y necesario para permitirme estudiar en una universidad lejos de casa.

A Nicolás, quiero agradecerte por tu amor y compañía en este último periodo. Tu apoyo y aliento fueron fundamentales durante la fase final de mi carrera y siempre estaré agradecida por eso. Espero seguir construyendo hermosas historias a tu lado.

A mis compañeros y amigos de la universidad, tanto a los que pasaron como a los que quedaron, les agradezco de corazón por su apoyo y amistad incondicional. Gracias a ustedes, mi experiencia universitaria fue maravillosa; estuvieron ahí cuando más los necesitaba y siempre estaré eternamente agradecida por eso. Nicolás M., Sebastián R., Sebastián V.

Al profesor Luís Morán, mi gratitud por brindarme la oportunidad de realizar mi memoria de título en una empresa minera tan prestigiosa como Antofagasta Minerals, un sueño hecho realidad para mí. Agradezco su apoyo a lo largo de mis últimos años de carrera y por ser un excelente docente.

A mis amigos de toda la vida, quienes siempre están a mi lado, brindándome apoyo y ánimo para seguir adelante en mi camino. Gracias por confiar en mí y motivarme constantemente.

A los memoristas de AMSA, quienes hicieron mi estancia en la empresa muy agradable, creando lazos de amistad que valoro profundamente.

A todos los profesionales de AMSA que me brindaron su apoyo, enseñándome y ayudándome cuando lo necesitaba. Espero encontrarme con ustedes en el mundo laboral en algún momento de la vida.

Tabla de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	INTRODUCCIÓN	1
1.2.	HIPÓTESIS DE TRABAJO	2
1.3.	OBJETIVOS	2
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	2
1.4.	ALCANCES Y LIMITACIONES	3
1.5.	TEMARIO Y METODOLOGÍA	3
2.	LA INDUSTRIA MINERA Y MARCO LEGAL PARA SU TRANSICIÓN ENERGÉTICA.....	5
2.1.	INTRODUCCIÓN	5
2.2.	GRUPO MINERO	5
2.2.1	<i>Sus Procesos Mineros</i>	6
A.	Perforación y Tornadura.....	6
B.	Carguío.....	6
C.	Transporte	6
2.2.2	<i>Compañías</i>	6
A.	Minera los Pelambres	6
B.	Minera Centinela	7
C.	Minera Antucoya.....	7
D.	Minera Zaldívar.....	7
2.3.	SISTEMA DE ASISTENCIA POR TROLLEY (TA)	8
2.3.1	<i>Infraestructura de un Sistema Trolley</i>	9
2.3.2	<i>Sistema Trolley Regenerativo (TAR)</i>	11
2.3.3	<i>Mineras donde se ha Implementado Sistema Trolley</i>	12
2.4.	NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA (TRL).....	13
2.5.	NORMATIVA.....	13
2.5.1	<i>Ley Marco de Cambio Climático</i>	13
2.5.2	<i>Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022</i>	13
2.5.3	<i>Ley de Eficiencia Energética</i>	14
2.5.4	<i>Artículo 8° - Ley 20.780</i>	14
2.5.5	<i>Proyecto de Ley “Transición Energética”</i>	14
2.5.6	<i>Artículo 5-19 de la NTSyCS</i>	14
2.5.7	<i>Artículo 5-4 de la NTSyCS</i>	15
2.6.	CONCLUSIÓN	15
3.	TECNOLOGÍAS DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA DE UN CAEX	16

3.1.	INTRODUCCIÓN	16
3.2.	CAMIÓN CONVENCIONAL.....	16
3.2.1	<i>Tecnología</i>	16
3.2.2	<i>Inversión</i>	17
3.2.3	<i>Costo Operacional</i>	17
3.2.4	<i>Emisiones de Carbono</i>	18
3.3.	CAMIÓN DIÉSEL CON ASISTENCIA TROLLEY.....	18
3.3.1	<i>Tecnología</i>	18
3.3.2	<i>Inversión</i>	19
3.3.3	<i>Costo Operacional</i>	19
3.3.4	<i>Emisiones de Carbono</i>	20
3.4.	CAMIÓN BEV CON ASISTENCIA TROLLEY	20
3.4.1	<i>Tecnología</i>	20
3.4.2	<i>Inversión</i>	21
3.4.3	<i>Costo Operacional</i>	21
3.4.4	<i>Emisiones de Carbono</i>	21
3.5.	CAMIÓN CON CELDAS DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO (FCEV)	22
3.5.1	<i>Tecnología</i>	22
3.5.2	<i>Inversión</i>	23
3.5.3	<i>Costo Operacional</i>	23
3.5.4	<i>Emisiones de Carbono</i>	23
3.6.	CAMIÓN A COMBUSTIBLES SINTÉTICOS	23
3.6.1	<i>Tecnología</i>	23
3.6.2	<i>Inversión</i>	25
3.6.3	<i>Costo Operacional</i>	25
3.6.4	<i>Emisiones de Carbono</i>	26
3.7.	CONCLUSIONES	26
3.7.1	<i>Ranking de Tecnologías</i>	26
4.	EVALUACIÓN Y PRIORIZACIÓN DEL RAJO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA	
	28	
4.1.	INTRODUCCIÓN	28
4.2.	PRESENTACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS RAJOS EN EVALUACIÓN	28
4.3.	DETERMINACIÓN DE LA FLOTA POR COMPAÑÍA.....	31
4.3.1	<i>Minera Los Pelambres</i>	31
4.3.2	<i>Minera Antucoya</i>	33
4.3.3	<i>Minera Centinela - Encuentros</i>	35
4.4.	COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX) Y DE OPERACIÓN (OPEX).....	36
4.4.1	<i>Estimación de Consumo de Combustible, Electricidad y Gastos Asociados</i>	37

A.	Caso Base: Camión Convencional	40
B.	Camión Diésel con Asistencia Trolley (DE)	41
C.	Camión BEV con Asistencia Trolley	42
4.4.2	<i>Costos de Infraestructura</i>	44
4.5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	44
4.6.	EMISIONES DE CARBONO	50
4.7.	CONCLUSIÓN – PRIORIZACIÓN DE LOS RAJOS	51
5.	MODELAMIENTO Y ANÁLISIS	53
5.1.	INTRODUCCIÓN	53
5.2.	SITUACIÓN ACTUAL DE MLP.....	53
5.2.1	<i>Sistema Eléctrico de Potencia</i>	53
A.	Línea 2x220 Quillota – Piuquenes	53
B.	Subestación Piuquenes	54
C.	Alimentadores hacia el Rajo	55
D.	Sistema de Distribución del Rajo	55
5.2.2	<i>Condición de Operación Normal Actual</i>	57
5.3.	MODELO PILOTO TROLLEY	59
5.3.1	<i>Equipos a Utilizar</i>	60
A.	Grupo rectificador	60
B.	Transformador.....	61
C.	Carga.....	62
5.3.2	<i>Contenido armónico</i>	63
A.	Diseño Filtro Pasa Banda	65
B.	Diseño Filtro Pasa Alto	66
5.3.3	<i>Resultados de Simulación</i>	67
A.	Operación Normal.....	67
B.	Interruptor 52-9 Abierto.....	69
C.	Interruptor 52-10 Abierto.....	71
5.3.4	<i>Conclusión</i>	74
5.4.	MODELO DE TRANSICIÓN COMPLETA	75
5.4.1	<i>Dimensionamiento de los Cargadores</i>	76
5.4.2	<i>Simulación Líneas Trolley</i>	77
A.	Operación Normal.....	77
B.	Interruptor 52-9 Abierto.....	79
C.	Interruptor 52-10 Abierto.....	80
D.	Conclusión	81
5.4.3	<i>Simulación Conexión de Camiones BEV a Cargadores Eléctricos</i>	82
A.	Operación Normal.....	82
B.	Interruptor 52-9 Abierto.....	83
C.	Interruptor 52-10 Abierto.....	84

D. Conclusión	86
5.5. IMPLEMENTACIÓN DE NUEVA INFRAESTRUCTURA.....	87
5.6. CONCLUSIONES	92
6. CONCLUSIONES	95
6.1. SUMARIO	95
6.2. CONCLUSIONES	96
6.3. TRABAJOS FUTUROS	98
A. ANEXOS 101	
A.1. REFERENCIAS DE SISTEMAS TROLLEY EMPRESA SIEMENS	101
A.2. TIEMPOS ASARCO.....	101
A.3. AHORRO POR PERIODO Y ACUMULADO CON REDUCCIÓN DE FLOTA.....	102
A.4. DATASHEET RECTIFICADOR	104
A.5. CONEXIÓN DIRECTA DEL SISTEMA 220 kV AL SECTOR MINA.....	105



Lista de Tablas

Tabla 4.1 Características técnicas de los distintos rajes.....	29
Tabla 4.2 Costos y VAC del camión convencional.....	45
Tabla 4.3 Costos y VAC del camión DE + trolley.....	46
Tabla 4.4 Costos y VAC del camión BEV.....	47
Tabla 4.5 Ahorro por periodo y acumulado DE + trolley con respecto al caso base.....	48
Tabla 4.6 Ahorro por periodo y acumulado BEV + trolley con respecto al caso base.....	49
Tabla 4.7 Matriz de toma de decisiones.....	51
Tabla 5.1 Distancias entre parrones y sala eléctricas.....	57
Tabla 5.2 Componentes filtro pasivo pasa banda.....	66
Tabla 5.3 Componentes filtro pasivo pasa alto.....	66
Tabla 5.4 Listado de infraestructura añadida para mejorar la calidad de suministro.....	87
Tabla 5.5 Resumen de los escenarios de operación.....	93
Tabla A.1 Características de sistemas trolley aplicadas a faenas.....	101
Tabla A.2 Ahorro por periodo y acumulado de DE + trolley con reducción de flota con respecto al caso base.....	102
Tabla A.3 Ahorro por periodo y acumulado de BEV + trolley con reducción costos con respecto al caso base.....	103
Tabla A.4 Datasheet rectificador.....	104

Lista de Figuras

Figura 2.1 Modelo eléctrico de un camión conectado a sistema trolley.	8
Figura 2.2 Componentes de un TA.	10
Figura 2.3 Modificación de un CAEX para la utilización de TA	10
Figura 2.4 Comparación de velocidades camión convencional vs eléctrico. <i>Sistemas Trolley, MLP 2022.</i>	12
Figura 3.1 Composición del sistema de tracción de un camión.	17
Figura 3.2 Diagrama de bloques de camión con sistema trolley.....	19
Figura 3.3 Diagrama de producción del e-diésel.....	24
Figura 3.4 Tipos de vehículos eléctricos.	25
Figura 4.1 Requerimiento de flota para MLP [20].....	32
Figura 4.2 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para MLP.....	32
Figura 4.3 Requerimiento de flota para ANT [20].....	34
Figura 4.4 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para ANT.....	34
Figura 4.5 Requerimiento de flota para CEN-Encuentros [20].....	35
Figura 4.6 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para CEN-Encuentros.....	36
Figura 4.7 Atributos considerados en CAPEX y OPEX.	37
Figura 4.8 desglose de tiempos ASARCO.	38
Figura 4.9 Desglose de precios energía verde.....	40
Figura 4.10 Desglose de los costos OPEX de un camión convencional.	41
Figura 4.11 Desglose de los costos OPEX de un camión diésel con asistencia trolley.	42
Figura 4.12 Desglose de los costos OPEX de un BEV.	43
Figura 5.1 Unilineal sistema 220 kV MLP.	54
Figura 5.2 Alimentadores 52-2 y 52-18.	55
Figura 5.3 Unilineal Loop Mina.....	56
Figura 5.4 Desconexión de transformador Subestación Piuquenes.	58
Figura 5.5 Representación de la línea trolley en Digsilent.	59
Figura 5.6 Configuración rectificador.....	61
Figura 5.7 Configuración transformador.....	62
Figura 5.8 Configuración carga.....	63
Figura 5.9 Amplitud de componentes armónicas de rectificador 12 pulsos.	64

Figura 5.10 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso A. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas.	68
Figura 5.11 Criterio N-1 sistema 220 kV. a) Sobrecarga transformadores. b) Potencia transformadores. c) Sobrecarga líneas.	69
Figura 5.12 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso B. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas.	70
Figura 5.13 Criterio N-1 sistema 220 kV. a) Sobrecarga transformadores. b) Potencia transformadores. c) Sobrecarga líneas.	71
Figura 5.14 Tensión en las barras ante la desconexión de un transformador en Piuquenes.	71
Figura 5.15 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso C. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas.	72
Figura 5.16 Criterio N-1 sistema 220 kV. a) Sobrecarga transformadores. b) Potencia transformadores. c) Sobrecarga líneas.	73
Figura 5.17 Tensión en las barras ante la desconexión de un transformador en Piuquenes.	73
Figura 5.18 Ubicaciones propuestas MLP.	75
Figura 5.19 Conexión de 12 camiones a catenarias caso A. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	78
Figura 5.20 Conexión de camiones a catenarias caso B. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	80
Figura 5.21 Incorporación cargadores eléctricos Caso A. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	82
Figura 5.22 Incorporación cargadores eléctricos Caso B. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	84
Figura 5.23 Incorporación cargadores eléctricos Caso C. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	85
Figura 5.24 Visualización de infraestructura nueva de sistema trolley en diagrama unilineal.	88
Figura 5.25 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso A. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	89
Figura 5.26 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso B. a) Tensión en las barras. b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores Piuquenes.	90

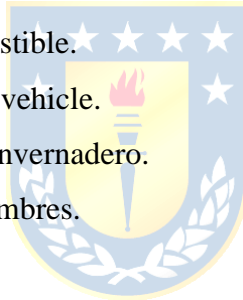
Figura 5.27 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso C. a) Tensión en las barras.
b) Sobrecarga en las líneas. c) Sobrecarga transformadores Piuquenes. d) Potencia transformadores
Piuquenes. 91
Figura A.1 Conexión sistema 220 kV directamente al sector mina. 105



Abreviaciones

Mayúsculas

AC	: corriente alterna.
AMSA	: Antofagasta Minerals Sociedad Anónima.
ANT	: Minera Antucoya.
BEV	: battery electric vehicle.
CAEX	: camiones de extracción.
CAPEX	: gastos de capital.
CC	: corriente continua.
CEN	: minera Centinela.
CMNUCC	: función de transferencia.
DC	: corriente directa.
FC	: celdas de combustible.
FCEV	: fuel cell electric vehicle.
GEI	: gases de efecto invernadero.
MLP	: minera Los Pelambres.
MW	: megawatts.
MWh	: megawatts hora
OPEX	: gasto operativo.
TA	: trolley assist.
TAR	: trolley assist regenerative.
TCO	: total cost of ownership.
US\$M	: millones de dólares.
USD	: dólar estadounidense.
VAC	: valor actual de costos.
TRL	: technology readiness levels.
MCM	: mil circular mils.
SI	: sistema interconectado.
ST	: sistema de transmisión.



Minúsculas

ktpd : miles de toneladas diarias de tratamiento de mineral.

Km : kilómetros.



1. Introducción

1.1. Introducción

El cambio climático es un fenómeno que se está experimentando a nivel mundial, y sus repercusiones pueden ser altamente perjudiciales tanto para el entorno natural como para la población humana a nivel global. La principal fuente para esta amenaza ambiental, que representa uno de los mayores desafíos que la humanidad debe enfrentar, es la actividad humana, en particular, la emisión de gases de efecto invernadero derivados principalmente de la quema de combustibles fósiles [15]. En respuesta a esto, diversos países se han unido al Acuerdo de París, el cual representa un hito en la lucha global contra el cambio climático, cuyo objetivo es mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 grados centígrados con respecto de los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados [16].

La industria minera del cobre, por su parte, es un consumidor importante de energía, representando aproximadamente el 34% del consumo eléctrico nacional en 2021. Dentro de la minería del cobre en Chile en 2021, la mina a rajo abierto se destacó como el segundo proceso con mayor emisión total de gases de efecto invernadero, representado un 33% de las emisiones totales de la minería de cobre (el 91% de estas emisiones proviene por el uso de diésel como combustible) [17].

La implementación de tecnologías innovadoras, como el sistema trolley, camiones eléctricos, camiones con celdas de combustible de hidrógeno, entre otras, ha surgido como alternativas prometedoras para la descarbonización de las operaciones mineras, además de mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Para la operación minera, el transporte de material desempeña un papel fundamental en la explotación minera, teniendo como objetivo principal garantizar tanto la seguridad como la eficiencia. En este contexto, los camiones de alto tonelaje juegan un papel crucial. Para conjugar el transporte seguro y eficiente con la reducción de emisiones, en línea con los objetivos de descarbonización del Acuerdo de París, la industria está explorando diversas tecnologías, que van desde camiones asistidos por trolley, equipos con baterías y combinaciones, hasta el uso de combustibles alternativos. Estas tecnologías se describirán en detalle en el presente trabajo.

El sistema trolley utiliza líneas aéreas electrificadas para suministrar energía a los camiones mientras se desplazan por rutas predefinidas, ofreciendo una serie de beneficios, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución del consumo de combustible, la

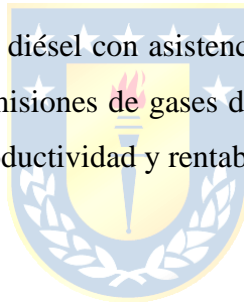
reducción de los costos de mantenimiento, aumento de producción, e incluso la posibilidad de reducir la flota de camiones.

Por otro lado, los camiones eléctricos funcionan completamente con baterías, eliminando por completo las emisiones de gases de efecto invernadero si la energía utilizada proviene de fuentes limpias. Aunque estos camiones aun no representan una tecnología completamente desarrollada (TRL 8), podrían funcionar de manera conjunta con el sistema trolley, de modo que, al estar conectados, carguen sus baterías de forma simultánea.

El objetivo principal de la presente memoria de título es analizar los requerimientos del sistema de distribución eléctrico en una operación minera, al realizar la transición desde camiones convencionales (que funcionan 100% con diésel) a tecnologías de CAEX de menores emisiones.

1.2. Hipótesis de Trabajo

La implementación de camiones diésel con asistencia trolley y camiones eléctricos resultará en una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero, disminución de los TCO, sin comprometer la seguridad, productividad y rentabilidad de la operación minera.



1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

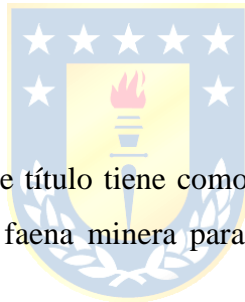
Cuantificar el aumento en la demanda, así como las modificaciones y/o ampliaciones requeridas en el sistema de distribución, que permitan suministrar la potencia al cambiar la fuente de energía de la flota de transporte de una gran faena minera.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinación de la demanda eléctrica y su localización de la flota CAEX de la faena.
- Evaluar el impacto de la mayor demanda sobre el sistema de distribución.
- Identificación de nuevos requerimientos al sistema de distribución.
- Informar recomendaciones.

1.4. Alcances y Limitaciones

- Determinar el requerimiento de potencia requerido al cambiar la fuente de energía (diésel) a eléctrico en los camiones de alto tonelaje en una gran faena minera.
- Calcular los nuevos bloques de energía que se requieren para abastecer la nueva demanda eléctrica.
- Evaluar el impacto que tiene este aumento de la demanda en la operación del sistema de distribución eléctrico.
- Recomendaciones para adaptar el sistema de distribución para suministrar esta nueva demanda eléctrica.
- El análisis desarrollado es de carácter estático, por lo que se ignoran las dinámicas propias de los motores eléctricos que accionan los camiones.
- Pese al uso de cargas no lineales, se omite el análisis de contaminación armónica debido a limitaciones de software.



1.5. Temario y Metodología

El desarrollo de esta memoria de título tiene como objetivo determinar que requerimientos necesitaría el sistema eléctrico de una faena minera para poder conectar distintas tecnologías de camiones a la red eléctrica.

Este informe está compuesto de seis capítulos sin contar la sección de anexos.

- Capítulo 1: capítulo introductorio, se define la hipótesis, y los objetivos ya sea generales, como específicos.
- Capítulo 2: se presentan normativas vigentes en el ámbito del cambio climático, además, se describe de forma resumida la empresa en la cual se está realizando la investigación.
- Capítulo 3: se presentan tecnologías para el módulo de potencia en camiones de extracción minera (CAEX), la descripción de su funcionamiento, tanto en ámbito operativo y estimación de costos, lo cual permite priorizarlos para efectos de esta investigación. Para finalizar, se concluye con una matriz de resumen de las tecnologías.
- Capítulo 4: en base a la priorización del capítulo anterior, se realiza un análisis de i) reducción de emisiones y ii) costos totales de propiedad (TCO), para tres tecnologías de módulo de potencia; caso base (diésel convencional), camión eléctrico a batería con

trolley y camión diésel con trolley, esto permitirá mediante una matriz de toma de decisiones, determinar cuál rajo es el más apto para la adopción de dichas tecnologías.

- Capítulo 5: se desarrolla el modelo del rajo seleccionado incorporando las tecnologías a utilizar y se analizan distintas situaciones operacionales de gran importancia para el funcionamiento del sistema eléctrico en el loop minero y la operación minera.
- Capítulo 6: se presentan las conclusiones y recomendaciones necesarias para la incorporación del sistema trolley al sistema eléctrico del rajo seleccionado.



2. La Industria Minera y Marco Legal para su Transición Energética

2.1. Introducción

En este capítulo se expone brevemente sobre el grupo minero Antofagasta Minerals y sus procesos mineros, se mencionan distintas tecnologías de transporte con su nivel de desarrollo, y por último menciona el marco normativo y planes vigentes en el ámbito del cambio climático.

2.2. Grupo Minero

Antofagasta Minerals (AMSA) es el principal grupo minero privado en Chile y se encuentra entre los diez mayores productores de cobre a nivel mundial. Su sede principal se encuentra en Santiago de Chile.

Las operaciones mineras de AMSA producen una variedad minerales, incluyendo cátodos y concentrados de cobre, molibdeno, oro, entre otros, dependiendo de la ubicación de la mina. Sus principales mercados a los que se destina la producción de cobre son Japón (35%), China (29%), resto de Asia (19%) y Europa (12%). [1]

El grupo está a cargo de la operación de cuatro compañías mineras de cobre a rajo abierto, Minera Centinela, Minera Antucoya y Minera Zaldívar las cuales se localizan en la región de Antofagasta. Minera Los Pelambres se encuentra en la región de Coquimbo.

En el año 2022, en sus cuatro mineras se proporcionaron aproximadamente 21.100 puestos de trabajo, entre empleados directos y contratistas. Además, lograron una producción total de 424.300 toneladas de cobre, 221.900 toneladas de cátodos de cobre, 9.600 toneladas de molibdeno y 176.800 onzas de oro [2].

A partir de abril de 2022, todas las operaciones mineras de AMSA utilizan exclusivamente energía proveniente de contratos en base a energías renovables, lo que ha resultado en una reducción del 90% en las emisiones de alcance 2. Para el año 2023, la empresa se ha fijado como objetivo definir una meta de reducción de las emisiones de alcance 3 e incluir objetivos de reducción en contratos con proveedores específicos. Recientemente, AMSA ha establecido acuerdos de GEI con distintos

fabricantes de equipos mineros, para promover el desarrollo de maquinaria y vehículos cero emisiones, los cuales en la actualidad representan el 50% de las emisiones de alcance 1 de la empresa.

2.2.1 *Sus Procesos Mineros*

Los procesos mineros típicos en operaciones de extracción de cobre incluyen la perforación y tronadura, el carguío y el transporte. A continuación se proporciona una breve descripción de cada uno de estos procesos.

A. *Perforación y Tronadura*

Es el proceso inicial en la extracción de minerales. La perforación es la operación que se realiza con la finalidad de abrir huecos en el macizo rocoso en donde se alojarán cargas explosivas. La tronadura es la operación que tiene por finalidad la extracción del mineral desde el macizo rocoso.

B. *Carguío*

Después de la tronadura, la roca fragmentada es cargada en camiones mediante palas para su posterior transporte.



C. *Transporte*

Es esencial para llevar el material desde el lugar de extracción hasta la planta de procesamiento, involucrando camiones de alto tonelaje para cada operación.

2.2.2 *Compañías*

A. *Minera los Pelambres*

Vida útil: 12 años.

Minera Los Pelambres es un yacimiento de sulfuro, ubicado a 45 km de la ciudad de Salamanca, Provincia de Choapa. Sus instalaciones recorren 120 kilómetros de cordillera mar. Desde el año 2022 MLP utiliza sólo energía de fuentes renovables. Sus operaciones son realizadas a una altura entre 3.100 y 3.600 msnm.

En el año 1997 se inició la construcción del proyecto con 85 ktpd, luego para el año 1999 se puso en marcha. Entre los años 2004 y 2009 se realizaron varios proyectos de expansión para llegar a una capacidad nominal de 175 ktpd.

En MLP produce concentrado de cobre, el cual contiene principalmente oro y concentrado de molibdeno, el cual es realizado mediante un proceso de molienda y flotación.

B. Minera Centinela

Vida útil: 43 años.

Minera Centinela está ubicada a 180 kilómetros de Antofagasta. Creada en julio de 2014 a partir de la fusión de las mineras Esperanza y El Tesoro. Se encuentra a aproximadamente 3.000 msnm.

CEN produce cátodos y concentrados de cobre, los cuales contienen en menor medida oro. La producción de concentrados se realiza mediante un proceso de molienda y flotación en la línea de sulfuros, por otro lado, la producción de cátodos de cobre es realizada por extracción de solventes y electro-obtención en la línea de óxidos.



C. Minera Antucoya

Vida útil: 21 años.

Minera Antucoya es un yacimiento de óxidos de cobre, el cual está ubicado en la región de Antofagasta, en las comunas de María Elena y Mejillones. Es una mina relativamente nueva, inaugurada en 2017. Ubicada a 1.700 metros de altura, tiene una vida útil de 20 años.

ANT posee leyes bajas del orden del 0.35%, la cual, para ser rentable, utiliza un modelo de negocios sustentable, eficiente e innovador.

D. Minera Zaldívar

Vida útil: 13 años.

Minera Zaldívar se encuentra en la precordillera de la región de Antofagasta, a una altura de 3.200 msnm. Opera una mina rajo abierto donde es extraído óxido de cobre como lixiviación en pilas. Es operada por AMSA a partir de diciembre de 2015.

2.3. Sistema de Asistencia por Trolley (TA)

Esta tecnología fue implementada en el sector de la minería a rajo abierto en respuesta a la crisis económica de 1981 y 1982. Esto llevó a las empresas mineras a buscar formas de reducir el consumo de combustible y, al mismo tiempo, disminuir los costos operativos.

El sistema TA se basa en la sustitución temporal del combustible por energía eléctrica. En lugar de generar electricidad a partir de un motor diésel y del generador eléctrico del camión, este, se alimenta durante periodos acotados de tiempo, a través de dos líneas aéreas DC, de polaridades positivo y negativo. Desde ahí la energía eléctrica se transmite a los motores eléctricos de tracción del camión.

El funcionamiento del sistema trolley implica que a medida que el camión se va aproximando a las catenarias, el operador levanta el pantógrafo hasta que hagan contacto. Una vez que se establece la conexión, el operador del camión levanta el pie del acelerador, y el camión continúa su operación utilizando la energía suministrada directamente desde las líneas aéreas, lo que reemplaza temporalmente al motor diésel y al generador.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema eléctrico de un camión cuando está conectado a las líneas catenarias del sistema trolley [4].

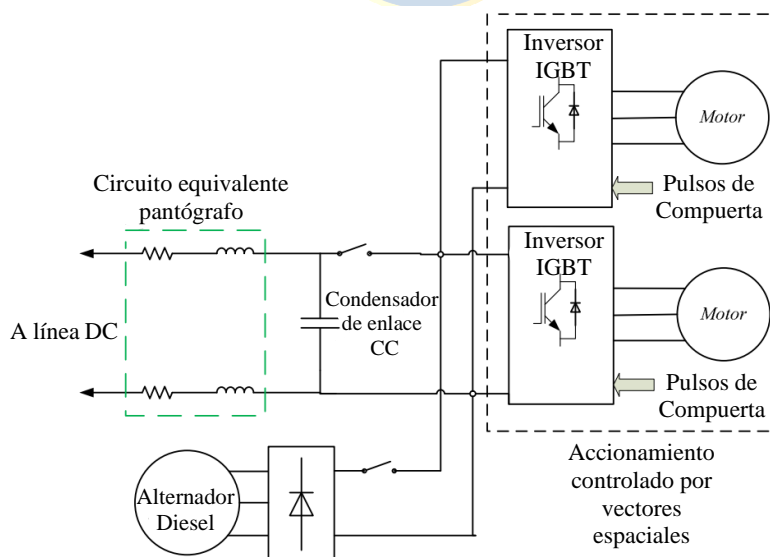


Figura 2.1 Modelo eléctrico de un camión conectado a sistema trolley.

Los inversores IGBT ofrecen una unidad compacta de mayor potencia y de alto rendimiento para cumplir con los requisitos de operación continua, alta confiabilidad, etc.

2.3.1 *Infraestructura de un Sistema Trolley*

La infraestructura de un sistema trolley consiste en cinco elementos clave:

1. Subestación AC: esta subestación es responsable de proporcionar la alimentación de corriente alterna del sistema eléctrico local, que a su vez se utiliza para abastecer subestaciones de corriente continua más pequeñas a lo largo de la ruta del sistema trolley.
2. Subestación DC: Estas subestaciones se ubican aproximadamente cada un kilómetro. El número total de subestaciones varía según la longitud de la ruta y del número de camiones operando simultáneamente.
3. Postes de soporte: estos postes de soporte constan de una base y una estructura catenaria, y se instalan cada 40 metros a lo largo de la ruta.
4. Líneas de catenarias: Son conductores de corriente continua que se conectan directamente a las subestaciones de CC. Las escobillas de carbón ubicadas en el pantógrafo del camión entran en contacto directo con estas líneas de catenaria para recibir energía eléctrica.
5. Comprobación de altura de carga: Antes del inicio de la línea del trolley, se verifica la altura de la carga del camión para garantizar que se encuentre por debajo de la altura de las catenarias, garantizando así un funcionamiento seguro del sistema.

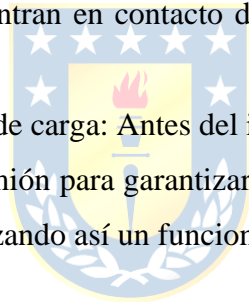
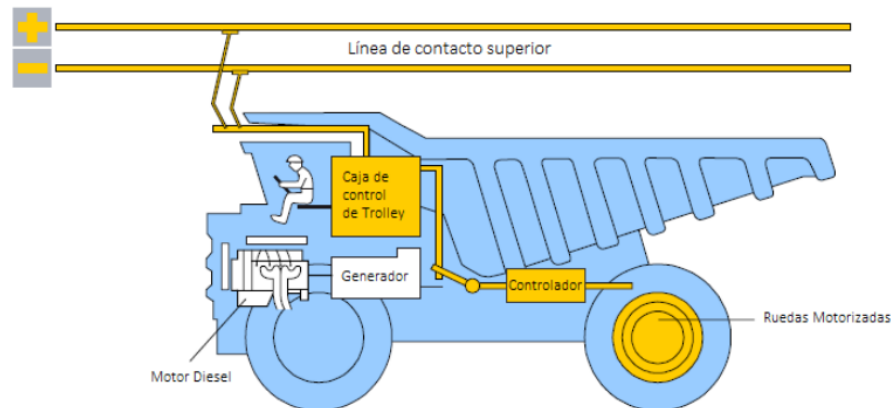


Figura 2.2 Componentes de un TA.



Además de la infraestructura necesaria para el sistema trolley, es fundamental incorporar distintos dispositivos de control adicionales al camión. Esto asegura que la energía obtenida de las líneas aéreas de contacto se transmita de manera efectiva a los motores de las ruedas. Cuando el camión se encuentra conectado a las líneas, el motor pasa automáticamente a ralentí, lo que significa que toda la potencia de propulsión proviene de las líneas de contacto eléctrico. Esto permite un funcionamiento óptimo del sistema y garantiza una transición suave entre la energía diésel y la eléctrica cuando el camión está en movimiento.

Figura 2.3 Modificación de un CAEX para la utilización de TA



2.3.2 Sistema Trolley Regenerativo (TAR)

El sistema TAR aprovecha la capacidad de regenerar energía cuando el camión baja cargado. Esto se logra mejorando la eficiencia general del sistema de generación DC al transferir la energía de frenado hacia la corriente alterna a través de un transformador. La energía regenerada puede utilizarse en la red de suministro eléctrico de la mina o en otras cargas dentro de la misma.

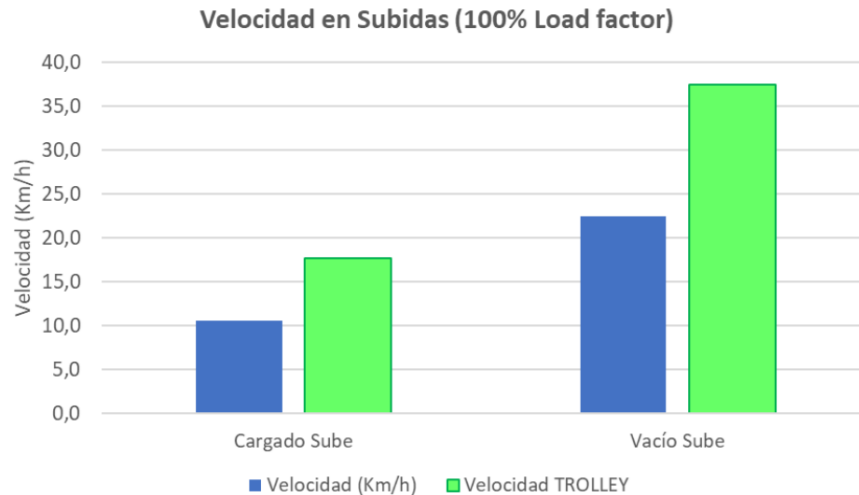
Para implementar este sistema, es necesario reemplazar puente rectificador de diodos no controlados con un rectificador activo, lo que convierte una subestación unidireccional en una subestación reversible.

Al convertirse en una subestación reversible, se obtienen varios beneficios:

1. Regeneración de la energía de frenado en todas las situaciones.
2. Eliminación o reducción de resistencias de frenado. Esto disminuye la masa del camión y la generación de calor.
3. Mejora el factor de potencia y se reducen los niveles de armónicos en el lado AC.
4. Regulación de la tensión continua de salida. Esto hace que la sobrecarga de voltaje DC independiente de las fluctuaciones de la línea AC.

Sin embargo, es importante destacar que la principal variable en la implementación de un sistema trolley son sus costos de inversión. Esto incluye los costos de postes, cables, subestaciones y otros componentes. Además, este sistema implica estructura fija que debe implementarse en ubicaciones específicas que se puedan utilizar durante la mayor parte de la vida útil de la mina. Además, los caminos donde se implemente este sistema deben mantenerse en óptimas condiciones para evitar la desconexión del pantógrafo con las líneas aéreas.

Figura 2.4 Comparación de velocidades camión convencional vs eléctrico. *Sistemas Trolley, MLP 2022.*



2.3.3 Mineras donde se ha Implementado Sistema Trolley

Alrededor del mundo hay diversas mineras en las cuales se ha implementado esta tecnología. Algunas se mencionan brevemente a continuación.

1. Palabora Mining Company Limited: minera fundada en agosto de 1956, está ubicada en Phalaborwa, Sudáfrica. En el año 1980, se comenzó a utilizar la línea trolley con una longitud de 720 metros y una pendiente del 8%. Este sistema resultó siendo funcional por lo que se instaló trolley en sus otras fases. Esta mina alcanzó su límite económico en el año 2002, hasta esa fecha se utilizó el sistema de trolley. En total fueron 8 kilómetros de ruta trolley, contando con 7 subestaciones [5].
2. Lumwana Mining Company: fue inaugurada en abril de 2009. Contaba con 4 kilómetros de trolley y 5 subestaciones.
3. Barrick Goldstrike mine: es la mina de oro más grande de América del norte. Fue adquirida por Barrick en 1986. Esta mina contaba con 5.5 kilómetros de trolley y 7 subestaciones. En 2001, el sistema trolley se desmontó debido a los cambios que hubo en el plan minero.

En anexo A.1 se muestra una tabla proporcionada por la empresa Siemens, donde se mencionan minas donde la empresa ha implementado sistema trolley, mencionando voltajes, subestaciones, camiones convertidos, etc.

2.4. Niveles de Madurez de la Tecnología (TRL)

Los niveles de madurez de la tecnología surgieron originalmente de la NASA y se han generalizado para evaluar el nivel de madurez de distintas tecnologías, no solo en el ámbito espacial. La escala TRL utiliza un rango del 1 al 9, donde el nivel 9 representa la máxima madurez tecnológica. A continuación se muestran los niveles TRL.

- TRL 1: idea básica
- TRL 2: formulación del concepto
- TRL 3: prueba de concepto
- TRL 4: validación en laboratorio
- TRL 5: validación de componente en entorno relevante
- TRL 6: validación de sistema en entorno relevante
- TRL 7: validación de sistema en entorno real
- TRL 8: certificación completa en entorno real
- TRL 9: solución terminada

El uso de esta metodología permite una evaluación coherente y uniforme respecto de la discusión sobre el nivel de madurez de cualquier tipo de tecnología. La asignación de TRL a las tecnologías mencionadas en el capítulo 0, se basará en el conocimiento y la comprensión actuales en el campo, lo que facilitará la identificación de tecnologías en diferentes etapas de desarrollo. Esto ayudará a determinar cuáles de estas tecnologías tienen un mayor potencial para la investigación y su futura implementación.

2.5. Normativa

2.5.1 Ley Marco de Cambio Climático

Esta ley tiene como objetivo dar cumplimiento a las metas establecidas en el Acuerdo de París, que incluyen la meta de lograr la neutralidad de carbono para el año 2050. Además, se establece un proceso de revisión cada cinco años.

2.5.2 Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022

Este plan busca abordar los desafíos planteados por el cambio climático y promover la

implementación de los compromisos adquiridos por Chile ante la CMNUCC. Incluye medidas específicas para la minería a ser implementadas para los años 2035 y 2050, como mejoras en la eficiencia energética, y la adopción de tecnologías de baja emisión.

2.5.3 *Ley de Eficiencia Energética*

El propósito de esta ley es fomentar el uso racional y eficiente de los recursos energéticos. En el sector minero, obliga a la implementación de sistemas de gestión de energía y a la presentación anual de informes sobre los parámetros energéticos para fines de fiscalización.

2.5.4 *Artículo 8° - Ley 20.780*

Este artículo establece un impuesto anual sobre las emisiones al aire de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (Nox), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de carbono (CO₂) en establecimientos que emitan 100 o más toneladas anuales de MP, o 25.000 o más toneladas de CO₂ [3].



2.5.5 *Proyecto de Ley “Transición Energética”*

Este proyecto incluye medidas destinadas a promover la inversión necesaria para llevar a cabo el proceso de descarbonización. Busca establecer materias de consenso en la legislación eléctrica, que a su vez tengan un impacto regulatorio en el segmento de la transmisión. Los pilares principales de este proyecto son: permitir el desarrollo eficiente de obras de transmisión eléctrica, abordar los desafíos del proceso de transición en términos de organización industrial del sector de generación, y habilitar el anuncio presidencial respecto de licitar un sistema de almacenamiento de gran escala [9].

2.5.6 *Artículo 5-19 de la NTSyCS*

El SI deberá operar en Estado Normal con todos los elementos e instalaciones del ST y compensación de potencia reactiva disponibles, y suficientes márgenes de reserva de potencia reactiva en las unidades generadoras, compensadores estáticos y sincrónicos, para lo cual el Coordinador y los CC, deberán controlar que la magnitud de la tensión en las barras del SI esté comprendida entre [13]:

- a) 0,97 y 1,03 por unidad, para instalaciones del ST con tensión nominal igual o superior a 500 kV.
- b) 0,95 y 1,05 por unidad, para instalaciones del ST con tensión nominal igual o superior a 200 kV e inferior a 500 kV.
- c) 0,93 y 1,07 por unidad, para instalaciones del ST con tensión nominal inferior a 200 kV.

2.5.7 Artículo 5-4 de la NTSyCS

La planificación para el desarrollo del SI deberá ser realizada aplicando el Criterio N-1, definido según lo establecido en el Artículo 1-7 numeral 32.

En los estudios de planificación, la aplicación del criterio N-1 solo podrá utilizar recursos EDAC, EDAG o ERAG supervisados por frecuencia o por tensión.

2.6. Conclusión

El marco regulatorio en Chile muestra un gran compromiso con la lucha contra el cambio climático y la promoción de prácticas más sostenibles en la industria minera, un sector crucial en la economía del país. Chile ha establecido metas ambiciosas de carbono neutralidad al año 2050, impulsando la adopción de tecnologías más limpias y la reducción de emisiones en el sector minero.

La ley de eficiencia energética y la imposición de impuestos frente a las emisiones fomentan la gestión más responsable de la energía y la reducción de las emisiones en la industria.

El proyecto de ley de transición energética destaca la importancia de invertir en energías limpias. El marco regulatorio proporciona un marco sólido para la toma de decisiones sostenibles en la minería, promoviendo la alineación con los objetivos internacionales para la mitigación del cambio climático.

3. Tecnologías de los Sistemas de Potencia de un CAEX

3.1. Introducción

En la presente sección, se describen cinco tecnologías de motorización para la utilización de camiones mineros, se menciona su tecnología, sus emisiones y costos operacionales. Cada una de estas tecnologías posee un nivel de madurez, generando un ranking de forma de seleccionar cuales son más aptas para la incorporación en el rajo minero.

3.2. Camión Convencional

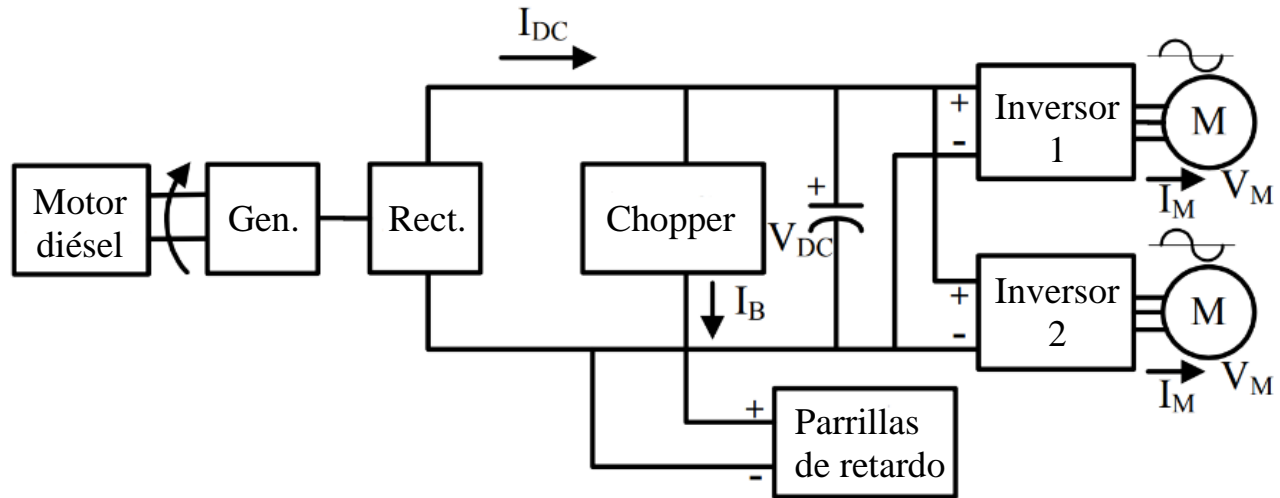
3.2.1 Tecnología

Los camiones convencionales utilizan motores diésel para generar potencia. Estos motores diésel transmiten directamente la fuerza a las ruedas a través de un sistema de transmisión mecánica. Un camión minero convencional se compone de un sistema de tracción eléctrica que consta de tres subsistemas independientes:

1. **Tren de Poder:** Incluye el motor diésel, generador sincrónico y el rectificador no controlado. El tren de poder es responsable de proporcionar la energía necesaria al enlace DC del camión.
2. **Sistema de Tracción AC:** Se compone de dos motores de inducción jaula de ardilla, ubicados en las ruedas traseras del camión. Su función es proporcionar el movimiento al camión.
3. **Sistema de Retardo:** Se compone de un chopper de retardo. Los choppers de frenado eléctrico se utilizan para dirigir la energía hacia los resistores de la red. Durante el frenado eléctrico, los motores actúan como generadores y los inversores convierten la energía cinética del camión en energía eléctrica. Esta energía se disipa a través de los resistores de alta potencia en la red.

La Figura 3.1 muestra un esquema que representa la configuración del sistema de tracción de un camión minero [6].

Figura 3.1 Composición del sistema de tracción de un camión.



Una desventaja notable de los camiones convencionales son los elevados costos asociados al mantenimientos y las reparaciones de sus sistemas de tracción.

Los camiones convencionales son tecnologías que ya se encuentran establecidas y han sido ampliamente utilizadas en la industria minera durante décadas. Por esta razón, se les asigna un TRL de 9. Este nivel se caracteriza por presentar una tecnología completamente desarrollada, probada y validada en condiciones operativas reales.

3.2.2 Inversión

El costo de un camión minero convencional varía según distintos factores, como el tamaño, el modelo y capacidad de carga, entre otros. Para esta investigación se consideran camiones mineros Komatsu de 300 toneladas, que tienen un valor aproximado de 5 millones de dólares.

3.2.3 Costo Operacional

Los costos operacionales son esenciales para mantener los camiones en condiciones óptimas de operación y garantizar la eficiencia y productividad en las operaciones. Los costos operacionales,

también conocidos como OPEX, abarcan el mantenimiento, el combustible, los neumáticos, las reparaciones, etc., y varían significativamente entre los 10.000 y los 800.000 dólares.

3.2.4 Emisiones de Carbono

Estos camiones, al depender exclusivamente del diésel como fuente de energía, generan únicamente emisiones directas (alcance 1) de carbono. Cabe destacar que cada m³ de diésel quemado produce aproximadamente 2,71 toneladas de CO₂.

3.3. Camión Diésel con Asistencia Trolley

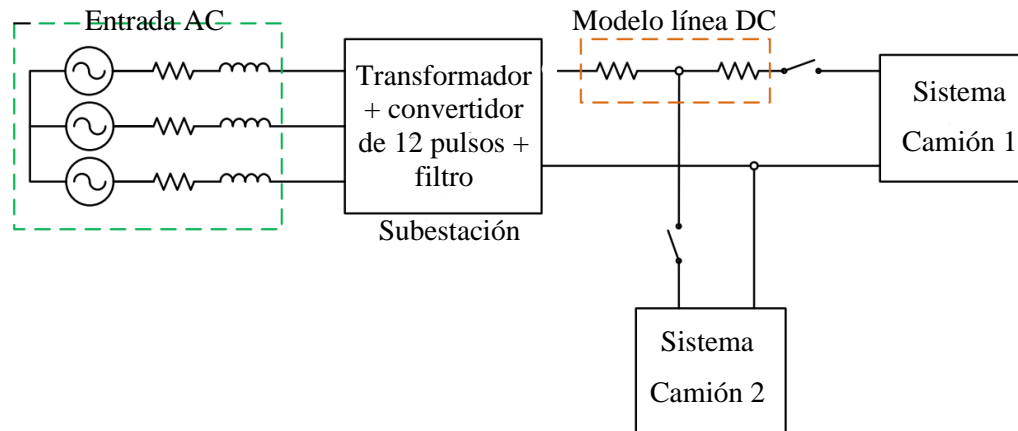
3.3.1 Tecnología

Estos camiones operan de manera similar a los camiones convencionales, pero incorporan una asistencia trolley como alternativa de alimentación para los motores de tracción del camión. Cuando el camión se conecta a las catenarias del sistema trolley, el enlace DC recibe la energía directamente desde las líneas eléctricas en lugar de depender del generador. En esta configuración, el motor diésel funciona en modo ralentí, lo que reduce significativamente su consumo de combustible.

La implementación de este sistema trolley ofrece bastantes beneficios, incluida la reducción del consumo de combustible, lo que a su vez reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. También se traduce en menores costos de mantenimiento del motor debido a su menor uso, gracias a la asistencia del sistema trolley. Además, este sistema permite aumentar la velocidad en tramos de subida donde se encuentra disponible, entre otros beneficios.

La Figura 3.2 presenta un diagrama de bloques simplificado que ilustra como se integra el sistema trolley en el camión [4].

Figura 3.2 Diagrama de bloques de camión con sistema trolley.



Cuando el camión se engancha a la línea aérea, pueden surgir ciertas oscilaciones de corriente debido a la interacción entre la inductancia de la línea y el condensador de enlace de CC de los motores. Estas oscilaciones pueden provocar sobrepasos de corriente excesivos, lo que a su vez puede activar los dispositivos de protección y dejar el sistema inoperativo.

La tecnología trolley es conocida desde la década de los 80, por lo tanto, no se trata de una tecnología nueva. En todo el mundo, numerosas mineras utilizan sistemas trolley en sus operaciones. Como resultado, se le asigna un TRL de 9 a esta tecnología, debido a su exitosa implementación y uso en operaciones mineras. En este punto, la tecnología se considera completamente desarrollada y probada, habiendo demostrado su viabilidad y utilidad en un entorno real.

3.3.2 Inversión

El costo de capital (CAPEX) de esta tecnología es equivalente al de un camión convencional. Sin embargo, se debe agregar el costo de la instalación de los pantógrafos en el camión, que tienen un valor aproximado de 800.000 dólares. Además, se debe contemplar la inversión de la infraestructura del sistema trolley, que asciende a aproximadamente 4.1 millones de dólares por kilómetro.

3.3.3 Costo Operacional

Los costos operativos de mantenimiento y el consumo de combustible disminuyen en comparación con los camiones convencionales, debido al menor uso del motor en los tramos donde se utiliza trolley. Esto resulta en un menor consumo de combustible. El ahorro en los costos operativos

dependerá si el costo de la energía eléctrica utilizada es menor que el costo del combustible. Los costos de mantenimiento y neumáticos se consideran iguales a los de un camión convencional.

3.3.4 Emisiones de Carbono

Los camiones convencionales con asistencia trolley además de consumir combustible, también consumen electricidad. Esto significa que, además de contribuir a las emisiones de alcance 1, también podrían generar emisiones de alcance 2 (producidas por terceros), las cuales podrían eliminarse si la energía utilizada proviene de fuentes renovables.

3.4. Camión BEV con Asistencia Trolley

3.4.1 Tecnología

En la actualidad, aun no existen camiones eléctricos de la envergadura y requisitos de potencia como los camiones convencionales. Un vehículo eléctrico reemplaza el motor a combustión interna por un motor eléctrico, junto con baterías que le suministran la energía necesaria para su funcionamiento. Debido a que estos vehículos funcionan completamente con electricidad, no generan emisiones de GEI. Los motores eléctricos son considerablemente más eficientes que los motores de combustión interna y proporcionan una aceleración inmediata, lo que resulta en una potente y continua propulsión.

La principal desventaja de los vehículos eléctricos es que tienen una autonomía inferior en comparación con los vehículos de combustión interna, además de que las baterías tienen una vida útil limitada y su costo es elevado, ya que se degradan con el uso. La energía necesaria para un camión eléctrico puede recuperarse y reutilizarse mediante el frenado regenerativo. Si el camión cuenta con asistencia trolley, este extrae energía del sistema aéreo mientras se encuentra conectado a las catenarias y, al mismo tiempo, carga su batería.

Aunque los camiones eléctricos han sido implementados en menor medida y han tenido éxito en operaciones mineras en condiciones operativas típicas, no se trata de una tecnología completamente desarrollada. Se asigna un TRL de 8 a esta tecnología, ya que hasta este punto se han recopilado datos

y experiencias que respaldan la efectividad de los camiones eléctricos en términos de ahorro energético, eficiencia, reducción de emisiones y autonomía en distintas situaciones operativas.

3.4.2 *Inversión*

El costo de los camiones eléctricos a batería puede variar según varios factores, como la capacidad de carga y la tecnología de la batería, además de considerar la infraestructura del trolley. La batería es el componente más significativo en términos de inversión en un camión eléctrico, ya que su capacidad y tecnología influyen directamente en el precio. Para la presente investigación, se consideran camiones de 300 toneladas que ya vienen equipados con pantógrafos, cuyo costo es de aproximadamente 10 millones de dólares. Además, se debe tener en cuenta la inversión en la infraestructura del trolley mencionada anteriormente, que asciende a aproximadamente 4,1 millones de dólares. También es necesario adquirir cargadores eléctricos, que tienen un costo de alrededor de 1 millón de dólares por cada cargador.



3.4.3 *Costo Operacional*

Aunque los camiones eléctricos a baterías están exentos de costos de mantenimiento del motor, con el tiempo las baterías pierden capacidad y eventualmente deben ser reemplazadas, lo que puede resultar costoso debido a la tecnología relativamente nueva. Otros costos operacionales de los camiones eléctricos son similares a los de un camión convencional con asistencia trolley, con la diferencia de que no tienen costos de combustible, sino más bien solo de electricidad.

3.4.4 *Emisiones de Carbono*

Los camiones eléctricos a batería generan emisiones de alcance 2. Sin embargo, si la energía contratada es generada mediante fuentes renovables, quedarían exentos de dichas emisiones.

3.5. Camión con Celdas de combustible de Hidrógeno (FCEV)

3.5.1 Tecnología

Estos camiones se alimentan mediante pilas de celdas de combustible de hidrógeno como fuente de energía primaria, con baterías de litio como fuente secundaria. Aunque camiones mineros propulsados por celdas de hidrógeno aún no se encuentran disponibles de manera comercial, recientemente se han reconsiderado como una opción viable para la propulsión de estos camiones. En estos camiones, los tanques de gasolina son sustituidos por tanques de hidrógeno, y también incorporan pilas de combustible, baterías de litio, convertidores de corriente y un freno regenerativo que recupera la energía disipada durante el frenado.

Los camiones propulsados por celdas de hidrógeno son más eficientes que los camiones con motores de combustión interna convencionales. Además, el tiempo de recarga de sus tanques de hidrógeno es más rápido en comparación con los camiones eléctricos [11]. Otra ventaja significativa de las celdas de combustible es que no emiten gases de efecto invernadero cuando se utiliza hidrógeno verde.

Actualmente, la producción de camiones de gran tonelaje impulsados por celdas de hidrógeno es limitada, y la mayoría de estos vehículos se encuentra en estado de prototipo, lo que resulta en costos de producción elevados. El tren motriz, que incluye el módulo de celdas de combustible y el tanque de almacenamiento (CAPEX), junto con los costos operativos del hidrógeno (OPEX), son los principales factores que justifican el alto costo de estos camiones.

Las celdas de combustible aprovechan la energía de un combustible para generar energía mediante reacción electroquímica, convirtiendo la energía del combustible en energía mecánica. En estas celdas, el hidrógeno se combina con el oxígeno del aire para generar la electricidad a través de una reacción electroquímica. Esta electricidad alimenta los motores eléctricos del camión. Por otro lado, las baterías de litio constan de dos o tres celdas de energía que están diseñadas para almacenar energía eléctrica. Estas baterías son conocidas por su ligereza, alta capacidad energética y resistencia a la descarga.

Actualmente existen prototipos de sistemas de propulsión con celdas de hidrógeno y baterías diseñados para su uso en camiones CAEX, los cuales se están probando y validando en entornos

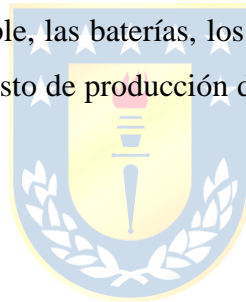
relevantes (TRL 6). En esta etapa, se ha demostrado que el sistema de celdas de hidrógeno es capaz de propulsar al camión y cumplir con criterios de rendimiento, aunque aún pueden requerir ajustes adicionales y pruebas en condiciones operativas más amplias.

3.5.2 Inversión

La inversión asociada a estos camiones, además del costo CAPEX de compra, que es más elevado que el de un camión convencional, incluye la infraestructura necesaria para la producción, almacenamiento y distribución del hidrógeno. Esto podría implicar la construcción de estaciones de recarga de hidrógeno y el transporte del hidrógeno en estado líquido.

3.5.3 Costo Operacional

Los costos operacionales de un camión con celdas de hidrógeno comprenden los costos de mantenimiento, las celdas de combustible, las baterías, los neumáticos y el costo de producción del hidrógeno. Actualmente, en Chile, el costo de producción de hidrógeno varía entre 5 y 6 dólares por kilogramo, lo que lo hace poco rentable.



3.5.4 Emisiones de Carbono

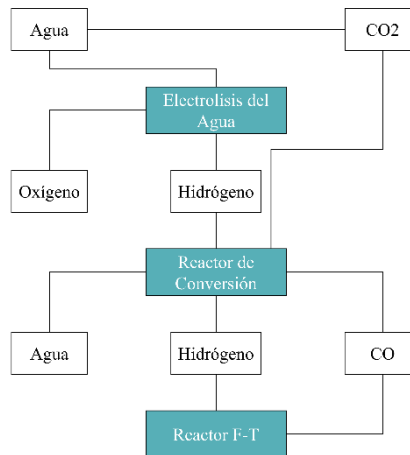
Al igual que los camiones que utilizan electricidad, estos camiones generarían emisiones de alcance 2 si la producción del hidrógeno no proviene de fuentes renovables; de lo contrario, estarían exentos de emisiones.

3.6. Camión a Combustibles Sintéticos

3.6.1 Tecnología

Los combustibles sintéticos, como el e-diésel, son productos basados en materias primas como el agua y el dióxido de carbono. La producción de estos combustibles sintéticos es posible al extraer dióxido de carbono de la atmósfera, que, al combinarse con el hidrógeno del agua, da lugar al e-diésel mediante un proceso de electrólisis.

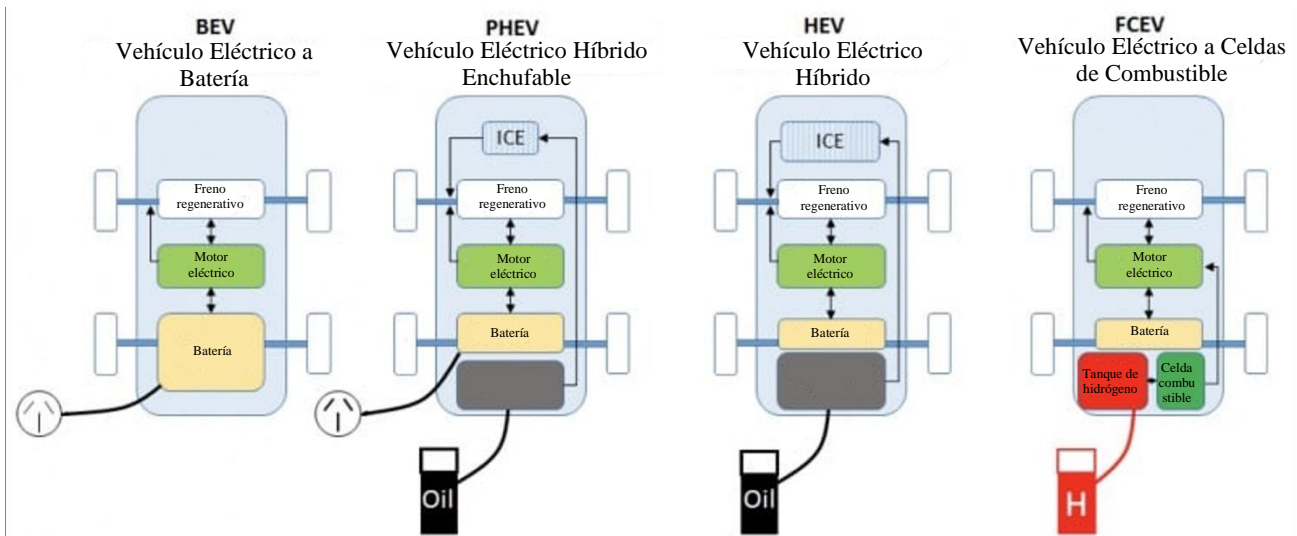
Figura 3.3 Diagrama de producción del e-diésel.



La Figura 3.3 muestra un diagrama de los pasos para obtener el e-diésel. En primer lugar, se calienta el agua para separar el hidrógeno del oxígeno mediante electrólisis, reteniendo el hidrógeno en el reactor y liberando el oxígeno a la atmósfera. Luego, se incorpora el dióxido de carbono a la reacción, el cual se extrae directamente del aire. Esta mezcla de dióxido de carbono e hidrógeno se hace reaccionar a presiones y temperaturas elevadas para producir el e-diésel en forma líquida. Finalmente, se somete a un proceso de refinamiento similar al del diésel tradicional para que sea apto para su uso.

Una ventaja significativa de este combustible es que sigue siendo diésel, por lo que es compatible con motores convencionales. Sin embargo, una desventaja importante, al igual que con las celdas de combustible, es su alto costo de producción.

Figura 3.4 Tipos de vehículos eléctricos.



Si bien el combustible sintético ha sido probado en vehículos convencionales en entornos urbanos, aún no se ha utilizado en camiones CAEX de minería. Esta tecnología podría tener un nivel de TRL de 4, lo que sugiere que ha sido validada y probada en laboratorios bajo condiciones controladas. Sin embargo, dada la naturaleza más exigente de las aplicaciones en camiones de minería de alto tonelaje, las pruebas exitosas en vehículos urbanos no garantizan el mismo éxito en aplicaciones más demandantes como los CAEX.

3.6.2 Inversión

La inversión para este tipo de camiones sería la misma de un camión convencional, ya que utilizan el mismo tipo de motor. Además del costo CAPEX del camión, se requiere la inversión adicional para la producción de este combustible, y la infraestructura necesaria para el almacenamiento del hidrógeno.

3.6.3 Costo Operacional

Los costos operacionales (OPEX) para esta tecnología incluyen mantenimiento, combustibles, neumáticos, reparaciones, etc. Estos costos oscilan entre los 10.000 y aproximadamente 800.000 dólares, similares a los de un camión convencional.

3.6.4 Emisiones de Carbono

Este combustible sintético no aumenta las emisiones de dióxido de carbono en la atmósfera; de hecho, contribuye a reducirlas, ya que se extrae más dióxido de carbono durante la producción de lo que se emite durante la combustión. También es importante considerar la fuente de electricidad utilizada para producir el hidrógeno necesario; si proviene de fuentes renovables, las emisiones podrían ser mínimas o incluso nulas.

3.7. Conclusiones

La elección de la tecnología adecuada para la industria minera es una decisión crucial que depende de una serie de factores, incluyendo la infraestructura disponible, los costos operativos, las necesidades específicas de la operación, y cada vez más, las consideraciones ambientales. En este contexto, se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de cinco tecnologías de camiones CAEX con el objetivo de determinar cuáles son las más adecuadas para la creación de un modelo de electrificación de un rajo minero. A continuación, se presenta un ranking de estas tecnologías, considerando su nivel de madurez tecnológica y potencial impacto ambiental.



3.7.1 Ranking de Tecnologías

1. Camión Convencional: Los camiones convencionales presentan la tecnología establecida en la industria minera y han alcanzado un nivel de madurez máximo. Son ampliamente utilizados, pero también generan emisiones significativas de carbono.
2. Camión Diésel con Asistencia Trolley: La asistencia trolley se ha utilizado en la industria minera durante décadas, lo que la coloca en el nivel máximo de madurez tecnológica. Combina combustible diésel y electricidad, lo que reduce las emisiones y los costos de mantenimiento del motor.
3. Camión BEV con asistencia Trolley: Los camiones BEV con asistencia trolley están ganando popularidad debido a su eficiencia y reducción de emisiones de carbono. Aunque aún están en desarrollo, existen datos y experiencias que respaldan su efectividad. Sin embargo, su inversión inicial es alta.
4. Camión con Celdas de Combustible de Hidrógeno: Los camiones FCEV tienen un nivel de madurez tecnológica de TRL 6 y se espera que su viabilidad económica aumente en

el futuro, especialmente si los costos de producción de hidrógeno disminuyen. Son una opción prometedora para reducir las emisiones.

5. **Camión con Combustibles Sintéticos:** Esta tecnología se encuentra en una etapa prematura y solo ha sido probada en vehículos urbanos. Su aplicación en camiones mineros de alto tonelaje requiere más investigación y desarrollo.

La reducción de las emisiones de carbono es un factor clave en la elección de tecnologías más sostenibles. Las fuentes de energía renovable desempeñan un papel importante en la reducción de las emisiones de tecnologías como los camiones BEV, FCEV y a combustible sintético.

La industria minera está en pleno proceso de transición hacia tecnologías más limpias y eficientes con el fin de reducir su impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad a largo plazo.



4. Evaluación y Priorización del Rajo para la Implementación de la tecnología

4.1. Introducción

En este capítulo, se analizan los diferentes rajos de AMSA teniendo en cuenta el ranking de tecnologías presentado en el capítulo anterior. El objetivo es determinar cuál de ellos reúne las condiciones más propicias para la implementación de nuevas tecnologías. Esta evaluación se llevará a cabo considerando aspectos como la topología del rajo, la temporalidad de los requerimientos de camiones, la flota de camiones involucrada y, por último, los costos asociados.

4.2. Presentación y Comparación de los rajos en evaluación

Un rajo minero que operaría tanto con camiones con sistema trolley como con camiones eléctricos a baterías debe tener en cuenta una serie de consideraciones cruciales para garantizar su eficiencia y seguridad. Entre las principales consideraciones se encuentran:

- **Planificación Minera:** Es esencial llevar a cabo una planificación minera exhaustiva, dado que el sistema trolley no permite gran flexibilidad operativa. Una vez que la infraestructura esté instalada, su reubicación solo es viable si resulta económicamente justificable.
- **Perfil de Transporte:** Se debe determinar cuidadosamente en que tramos del ciclo de transporte se pueden aprovechar mejor los beneficios de un sistema trolley. Por lo general, se opta por rutas de transporte más extensas con mayores pendientes, ya que esto maximiza la eficiencia de este sistema.
- **Mantenimiento de Caminos:** Es fundamental mantener los caminos en óptimas condiciones. Esto podría requerir la inclusión de equipos auxiliares destinados específicamente a la mantenimiento de caminos, asegurando que estén siempre aptos para la circulación de los camiones.
- **Ancho de Caminos:** La anchura de los caminos debe ser suficiente para alojar dos pistas, considerando el paso de los camiones con sistema trolley. Sin embargo, si se emplean camiones de mayor tonelaje, como los de 360 toneladas, podría ser necesario

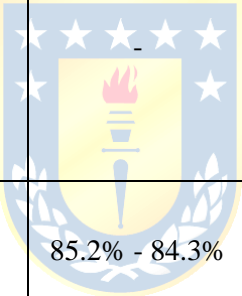
evaluar la ampliación del ancho de los caminos para acomodar los vehículos de mayor envergadura.

- Espacios de Carga para Camiones eléctricos: Para los camiones eléctricos a baterías, es imperativo contar con espacios de carga que sean lo suficientemente amplios como para permitir una maniobrabilidad óptima.

Como se analizará en la sección 4.3, cada compañía tiene un requerimiento de flota diferente, por lo que compararlas únicamente según los costos de su flota no sería equitativo. No obstante, la mejor forma de determinar qué compañía es la más adecuada para la implementación de las tecnologías seleccionadas es crear una tabla que incluya las características técnicas de cada rajo.

Tabla 4.1 Características técnicas de los distintos rajos.

Característica	MLP	ANT	CEN-ENCUENTRO	CEN-ESP
Tipo de camión en uso	930E	930E	Autónomos (cuando comience operación)	797B, 797F, 930E, 793C, 793F
Switchbacks (N°)	3	5	-	7
Porcentaje del loop minero que se realiza subiendo cargado	74%	73.1%	-	79.7%
Pared que se mantenga estable por largos periodos de tiempo	1. Año 2025 se habilita salida al chancado por el sur de la fase 11. Esta pared queda estable hasta el término de la fase 11 en el año 2029. Desde 2029-2034 no se utilizan las rutas de ese sector. Y se vuelven a usar estas rutas para el	1. La pared Oeste de la Fase 6 se mantiene estable desde el año 2025 al 2028. 2. La pared sureste de la fase 4 desde la cota 1432 está habilitada y	Encuentro es un rajo concéntrico donde las paredes del rajo no se mantienen estáticas por períodos prolongados de tiempo.	Esperanza es un rajo donde sus fases alternan paredes entre el norte y el sur. 1. La pared de la fase 07 se encuentra estable hasta el año 2026.

Característica	MLP	ANT	CEN-ENCUENTRO	CEN-ESP
	fondo de la fase 12E desde el año 2034	estables desde el 2025 al 2028. 3. La berma de la fase 5 en la cota 1496 está habilitada y estables desde el 2025 al 2028.		2. La pared de la fase 10 se encuentra estable entre los años 2024 y 2028.
Opciones de autonomía o avances de esta tecnología	-	-	Operará con equipos autónomos cuando comience a operar	-
Estudios o avances en el análisis de tecnologías de carga dinámica (trolley)	En proceso prueba piloto trolley		-	Solo a nivel conceptual
Disponibilidad física de los últimos años	85% - 87%	85.2% - 84.3%	Rajo no está operando	81.4% - 86.8%
Vida útil que le resta al rajo (años)	13	21	34	23
Ancho de camino (metros)	40	40	40	40

Los “Switchbacks” hacen referencia a posibles complicaciones relacionadas con la configuración de la mina, especialmente en términos de cantidad de curvas cerradas o cambios de dirección que podrían requerir ajustes o instalaciones adicionales para implementar el sistema trolley.

4.3. Determinación de la Flota por Compañía

La estimación de la flota necesaria se fundamenta en el cálculo de las horas efectivas requeridas durante un determinado periodo. Este cálculo se basa en la cantidad de toneladas movidas o metros perforados, divididos por el rendimiento en horas efectivas. Luego, este valor se divide por el número de días en el periodo, se multiplica por las horas en un día y se ajusta por la utilización efectiva.

La utilización efectiva se calcula como el producto de la disponibilidad y la utilización operativa, multiplicado por el factor de operación. Las ecuaciones correspondientes se presentan a continuación para una comprensión más clara y detallada de este proceso.

$$N^{\circ} \text{ Equipos Nominales} = \frac{\text{Horas efectivas requeridas por periodo}}{\text{Horas efectivas por equipo}} \quad (4.1)$$

$$\text{Hrs efectivas requeridas x año} = \frac{\text{Movimiento de materiales del periodo}}{\text{Rendimiento efectivo por hora}} \quad (4.2)$$

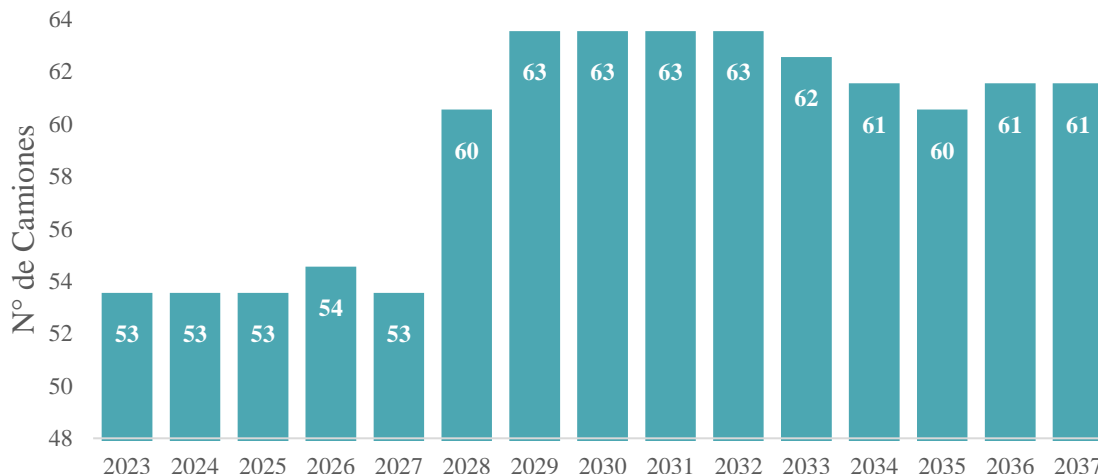
$$N^{\circ} \text{ Equipos Nominales} = 24 \cdot N^{\circ} \text{ de días del periodo} \cdot \text{utilización efectiva} \quad (4.3)$$

Utilizando estas ecuaciones, se puede estimar la flota necesaria para cada compañía. Esta estimación es esencial para determinar cuántos camiones se requieren para cumplir con los requisitos de producción en cada una de las compañías evaluadas. Es un paso crítico para el análisis económico, ya que afecta directamente a los costos operativos, y por lo tanto, a la viabilidad económica de la implementación de tecnologías alternativas en la flota de camiones.

4.3.1 Minera Los Pelambres

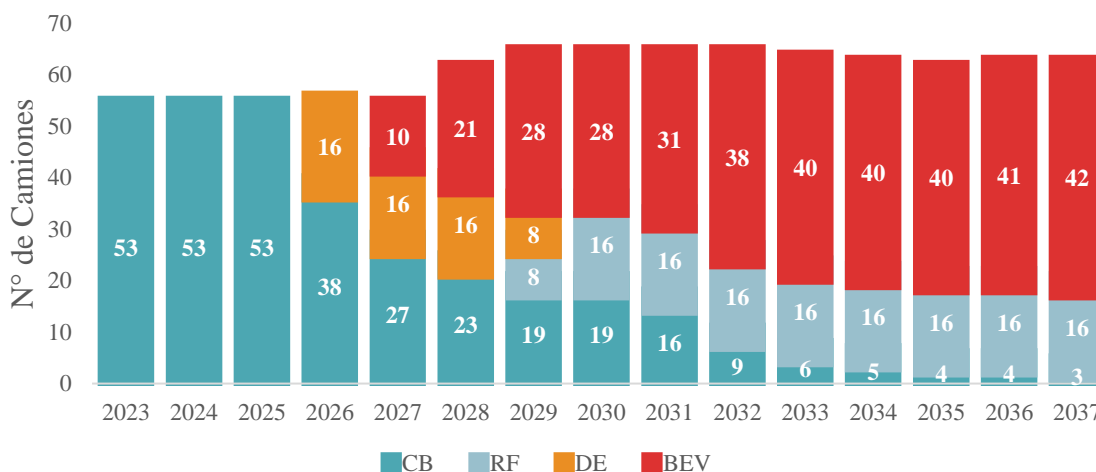
El cálculo de la cantidad de camiones requeridos para la operación de Minera Los Pelambres desde 2023 y 2037 es un proceso fundamental en la planificación de la flota. Esto permite dimensionar adecuadamente la cantidad de camiones necesarios para cumplir con los requisitos de producción y movimiento de material durante ese periodo. Este análisis es esencial para determinar la inversión necesaria en camiones y la evaluación de costos operativos a lo largo del tiempo.

Figura 4.1 Requerimiento de flota para MLP [20].



La estrategia de reemplazo gradual de los camiones convencionales (CB) a medida que alcanzan el final de su vida útil con las tecnologías seleccionadas es una decisión inteligente para una transición efectiva hacia tecnologías más sostenibles. Esto permite una implementación escalonada de las nuevas tecnologías sin interrumpir significativamente las operaciones mineras. Al adquirir nuevos camiones con las tecnologías seleccionadas, la empresa puede reducir gradualmente su dependencia de camiones convencionales y obtener los beneficios ambientales y económicos de las tecnologías más avanzadas. Esto también proporciona un marco para una planificación financiera efectiva y una gestión de activos a largo plazo.

Figura 4.2 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para MLP.



En el marco de nuestro análisis económico, se ha adoptado una estrategia que busca extender la vida útil de los camiones convencionales hasta aproximadamente 120.000 horas. Este enfoque se ha diseñado con la finalidad de que coincida con la llegada de otras tecnologías. La introducción de camiones 100% eléctricos está programada para comenzar en el año 2027. Por lo tanto, en los años previos a esta fecha, se adquieren camiones diésel con asistencia trolley. Dado que estos camiones no son completamente libres de emisiones, se llevará a cabo un proceso de adaptación, conocido como retrofit (RF), para convertirlos en vehículos eléctricos.

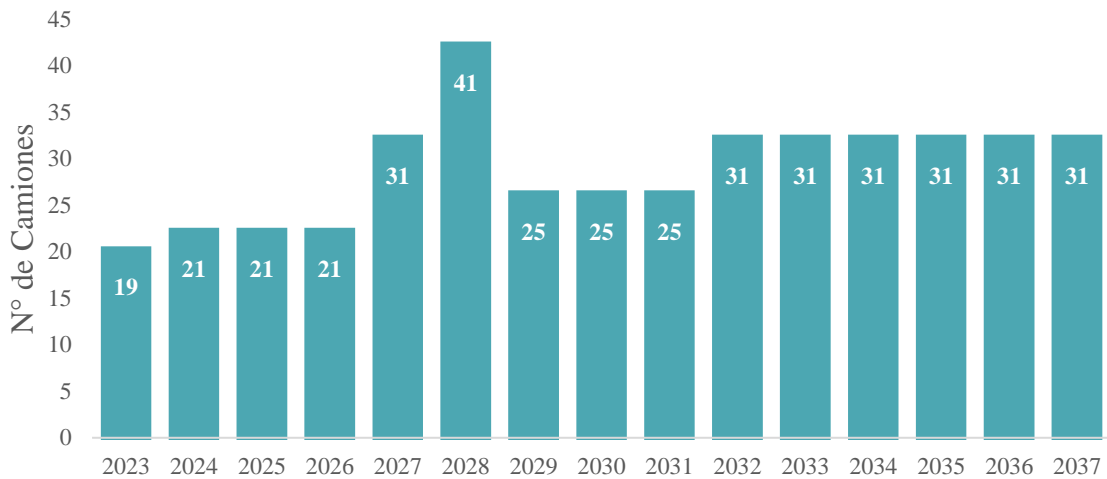
A partir del año 2027, todas las adquisiciones de flotas de camiones serán de vehículos cero emisiones. Esta estrategia de sincronización entre la incorporación de nuevas tecnologías y la retirada de camiones convencionales presenta una ventaja significativa para la elección de la compañía. De lo contrario retirar anticipadamente los camiones convencionales podría resultar en una recuperación incompleta de los costos iniciales de inversión de estos camiones.

4.3.2 *Minera Antucoya*

En minera Antucoya se plantea realizar una renovación anticipada de sus camiones convencionales con el objetivo de lograr una reducción del 100% en las emisiones para el año 2030. Sin embargo, no se contempla necesariamente retirar anticipadamente estos camiones, ya que poseen un valor residual y podrían ser utilizados o vendidos durante toda su vida útil. Esta decisión podría plantear un desafío económico, ya que implica evaluar si el valor obtenido por estos equipos al final de su vida útil sería menor que el valor residual pendiente por depreciar.

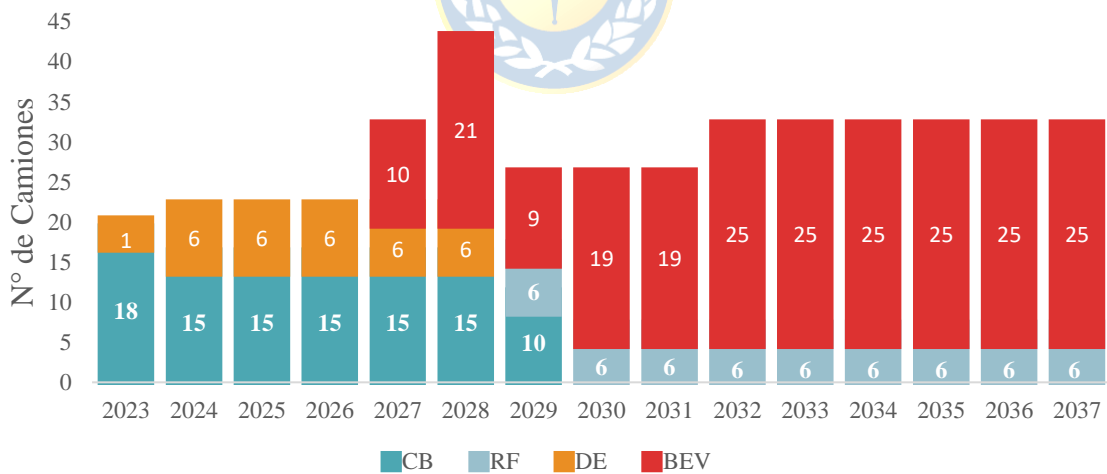
Por otro lado, es importante destacar que Minera Antucoya no cuenta con una flota tan extensa como Minera los Pelambres. En lo que respecta a la asistencia trolley, el hecho de contar con una flota más reducida conlleva una menor utilización del sistema Trolley. Esto implica que la inversión inicial requerida para implementar y mantener el sistema se distribuiría en un número menor de equipos. Como resultado, la inversión se amortizaría en un número menor de equipos, lo que resultaría en un mayor TCO.

Figura 4.3 Requerimiento de flota para ANT [20].



A partir del año 2027, se espera la incorporación de camiones 100% eléctricos, marcando un importante paso hacia una flota libre de emisiones. Desde ese punto en adelante, todas las compras de camiones serían de vehículos cero emisiones, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono de la operación minera.

Figura 4.4 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para ANT.



4.3.3 Minera Centinela - Encuentros

En el caso de la operación de Encuentros, la situación difiere significativamente de las operaciones anteriores. Dado que este rajo aún no está en funcionamiento, se requerirá adquirir una flota de camiones desde cero para poner en marcha la operación. Sin embargo, debido a que la tecnología de camiones eléctricos aún no estará disponible en el momento del comienzo de las operaciones del rajo, la adquisición inicial de camiones sería de modelos diésel adaptados para la posterior utilización del sistema trolley. Este enfoque plantea desafíos económicos, ya que la inversión requerida para adaptar estos camiones podría equipararse al costo de compra de camiones BEV.

Una alternativa a considerar en este caso es evaluar la posibilidad de arrendar equipos necesarios para la operación hasta que los camiones eléctricos estén disponibles, lo que sería a partir del año 2027. Además, el sistema trolley, que idealmente se implementaría a partir de 2024, no coincidiría con el inicio de operaciones de este rajo.

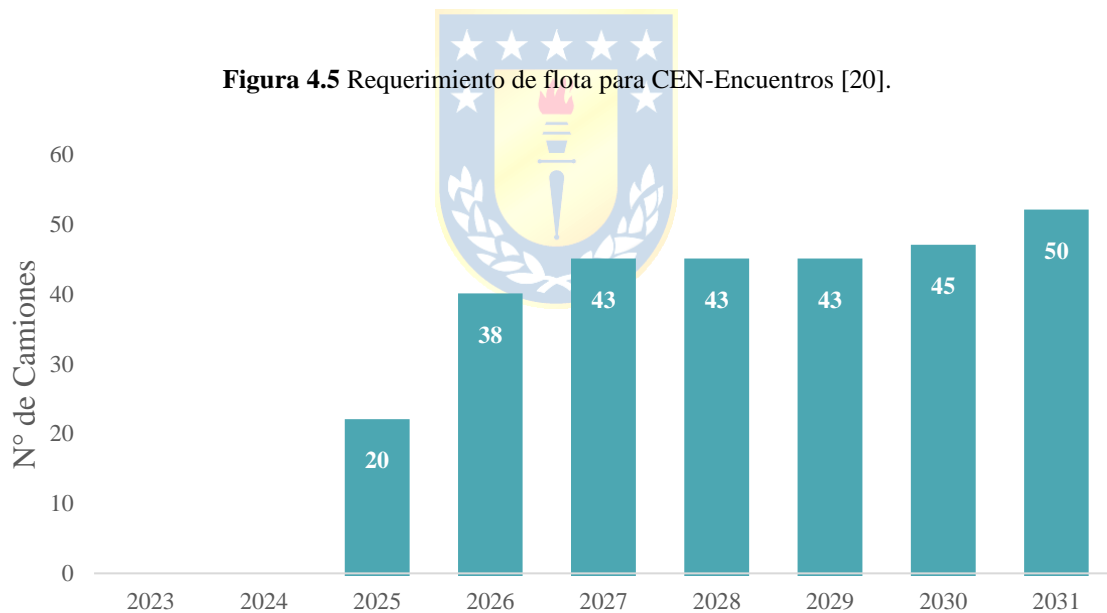
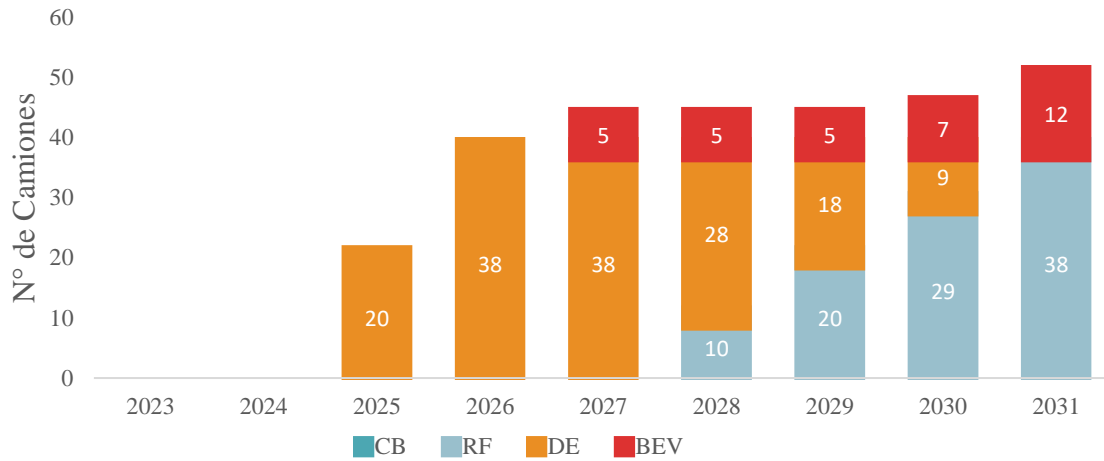


Figura 4.6 Evolución de la flota según tecnologías de CAEX para CEN-Encuentros.



4.4. Costos de Inversión (CAPEX) y de Operación (OPEX)

La Figura 4.7 proporciona una visión general de los atributos que se consideran en cada uno de los escenarios tecnológicos, clasificados en dos categorías principales: costos de operación (OPEX) y gastos de capital (CAPEX). Estos atributos jugarán un papel crucial en la evaluación y selección de la compañía más idónea para la implementación de los CAEX.

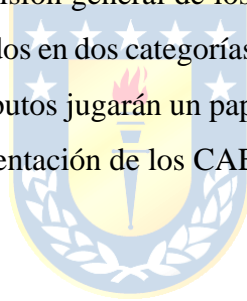


Figura 4.7 Atributos considerados en CAPEX y OPEX.

	CAPEX	OPEX
Caso base	<ul style="list-style-type: none"> • CAEX 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento • Consumo de diésel • Carbon tax
DE + Trolley	<ul style="list-style-type: none"> • CAEX • Modificación del CAEX • Infraestructura Trolley • Sistema de Catenarias • Subestaciones eléctricas 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento • Consumo de diésel • Consumo de electricidad • Carbon tax
BEV + Trolley	<ul style="list-style-type: none"> • CAEX • Infraestructura Trolley • Sistema de Catenarias • Subestaciones eléctricas • Baterías 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento • Consumo de electricidad

4.4.1 Estimación de Consumo de Combustible, Electricidad y Gastos Asociados

En esta sección, se detallan las metodologías empleadas para calcular el consumo de electricidad y combustible correspondiente a cada una de las tecnologías. El propósito de estos cálculos es doble: primero, cuantificar los ahorros económicos derivados de la reducción del consumo de combustible y electricidad, y segundo, facilitar la comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para estimar el consumo tanto de combustible como de electricidad, es necesario determinar las horas operativas durante las cuales el camión estará en funcionamiento a lo largo del año. Estas horas se calculan considerando el porcentaje de disponibilidad y utilización, siguiendo los índices de operación ASARCO. En el anexo A.2 se proporciona información detallada relacionada con la Figura 4.8.

Figura 4.8 Desglose de tiempos ASARCO.

Tiempo Nominal (TN)			
Tiempo Disponible (TD)			Mantenimiento
			Programado
			No Programado
Tiempo Operativo (TO)		Reservas (TR)	
Tiempo Efectivo (TE)	Demoras		
	DP	DNP	

Las horas operacionales se calculan utilizando la ecuación (4.4). El porcentaje de utilización, que representa la fracción porcentual del tiempo disponible que el equipo se encuentra operativo, se determina mediante la ecuación (4.5). Por su parte, el porcentaje de disponibilidad corresponde a la fracción porcentual del tiempo nominal durante el cual el equipo se encuentra en condiciones mecánicas aptas para operar, y se obtiene a partir de la ecuación (4.6).

Es importante destacar que los valores de disponibilidad y utilización experimentan variaciones anuales debido a diversos factores que inciden en las operaciones diarias en el lugar de trabajo. Estos factores pueden incluir condiciones operativas cambiantes, como condiciones ambientales y de terreno, mantenimiento de los camiones y la disponibilidad de personal, tanto operadores de camiones como personal de mantenimiento, entre otros.

$$\text{Horas operacionales} = \text{Horas año} \cdot \frac{\% \text{ Disponibilidad}}{100} \cdot \frac{\% \text{ Utilización}}{100} \quad (4.4)$$

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{tiempo disponible}}{\text{tiempo nominal}} \quad (4.5)$$

$$\text{Utilización (\%)} = \frac{\text{tiempo operativo}}{\text{tiempo disponible}} \quad (4.6)$$

Utilizando un promedio de estos valores, se tiene una tasa de disponibilidad y utilización del 83%. Con esta cifra, se ha determinado que el camión estará operativo durante un total de 6.035 horas anuales.

El cálculo del consumo de combustible total en un año para un camión se realiza multiplicando las horas operativas por la tasa de consumo por hora de un camión, tal como se describe en la ecuación (4.7).

$$\text{Consumo Total}_{\text{Anual}} [L] = \text{Consumo camión} \left[\frac{L}{h} \right] \cdot \text{Horas operacionales} [h] \quad (4.7)$$

El costo de combustible asociado a cada camión se determina multiplicando su consumo total por el precio del combustible, que es de 0.53 dólares por litro.

Hace varios años, se implementó una legislación conocida como la Ley del Impuesto Verde, que establece la imposición de un impuesto anual sobre las emisiones al aire de material particulado, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono [7]. El cálculo de este impuesto se realiza multiplicando la tarifa establecida para este impuesto, que es de 100 USD, por las toneladas de dióxido de carbono presentes en el combustible. El proceso de cálculo de este impuesto se describe en la ecuación (4.8).

$$\text{Carbon tax} [USD] = 0.00271 \left[\frac{tCO_2}{L} \right] \cdot \text{Consumo total} [L] \cdot 100 \left[\frac{USD}{tCO_2} \right] \quad (4.8)$$

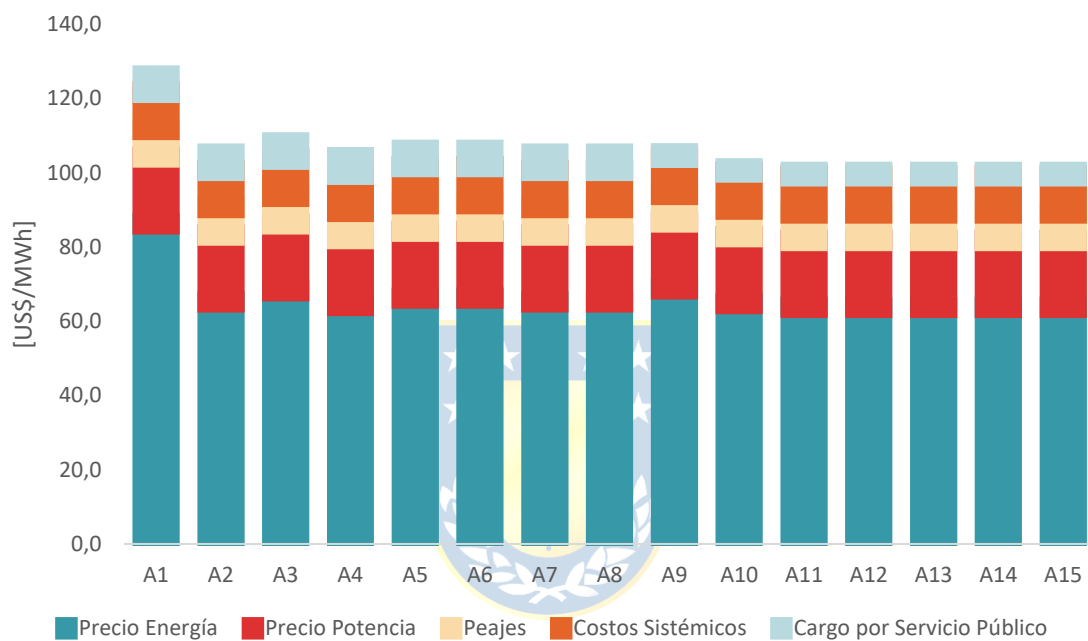
Para calcular la energía requerida por los camiones, se convierten los litros de diésel utilizados en energía eléctrica. Un litro de diésel equivale a 10.96 kWh, por lo tanto, la ecuación de conversión consiste en multiplicar este factor por el consumo total de combustible y la eficiencia del motor, tal como se muestra en la ecuación (4.9).

$$\text{Energía} [kWh] = 10.96 \cdot \text{Consumo total} [L] \cdot \text{eficiencia motor} \quad (4.9)$$

El precio de la energía requerida por el camión, conocida como “energía verde”, se obtiene a través de un valor que engloba varios componentes. Esto incluye el costo de la energía en sí, el costo de la potencia, los peajes (cargos que la empresa distribuidora aplica por el uso sus redes eléctricas), los cargos sistémicos (asociados al funcionamiento seguro del SEN), y, por último, los cargos por servicio público.

Es importante destacar que la inclusión de estos cargos por servicio público en la tarifa de la energía es resultado del marco regulatorio eléctrico establecido por la ley N° 20.936. Esta ley permite a los usuarios finales, de manera libre y sujeta a regulación de precio, financien los presupuestos del CEN, el panel de expertos y el estudio de franja, tal como se establece en el artículo 93° de la Ley General de Servicios Eléctricos [8].

Figura 4.9 Desglose de precios energía verde.



Se espera que en los próximos años, el costo de la energía disminuya debido al aumento de demanda eléctrica que requerirá el sistema minero. Esto podría permitir la renegociación del valor de la energía, beneficiando así a los costos de la operación minera.

Cada uno de los tres tipos de tecnologías presenta un consumo diferente de combustible y/o electricidad, los cuales se detallan a continuación.

A. *Caso Base: Camión Convencional*

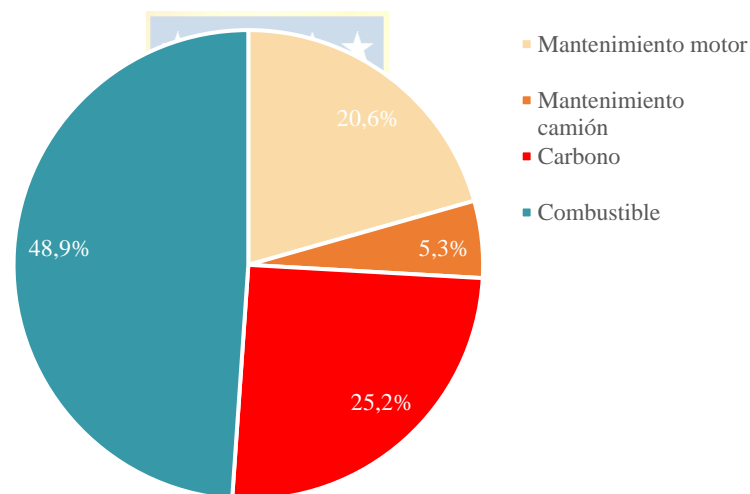
El camión convencional funciona exclusivamente con diésel, con un consumo de 200 litros por hora. Esto se traduce en un consumo total anual de 1.206.953 litros de combustible.

El principal gasto asociado a un camión convencional es el costo del combustible. Aunque el precio del diésel en si no es elevado, la cantidad de litros consumidos anualmente genera un costo anual de 0,64 millones de dólares, representando aproximadamente el 49% del costo total anual de operación de cada camión.

Adicionalmente al costo del combustible, es necesario considerar el costo de las emisiones de carbono que estos camiones generan. Aplicando la ecuación (4.8), se calcula que el costo anual debido a las emisiones de carbono asciende a 0,33 millones de dólares.

En el gráfico de la Figura 4.10, se puede observar el desglose de los gastos OPEX de un camión convencional, resaltando que el segundo gasto más significativo es el impuesto al carbono.

Figura 4.10 Desglose de los costos OPEX de un camión convencional.



Los costos de mantenimiento del camión y del motor del camión están establecidos por la empresa proveedora del vehículo, y en este análisis se han tomado como referencia los costos asociados a un camión Komatsu 930E-5.

B. Camión Diésel con Asistencia Trolley (DE)

La asistencia trolley ofrece un beneficio significativo al proporcionar ahorros de combustible en áreas con mayor consumo, como las subidas. Se estima que el ahorro diario total de combustible por camión equipado con este sistema es de 30%, equivalente a 60 litros de combustible. El costo

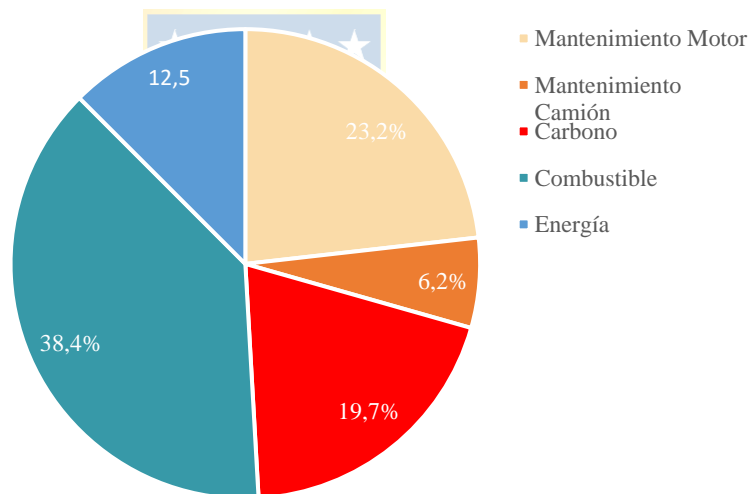
anual del 70% restante de combustible sigue siendo sustancial, ascendiendo a 0,45 millones de dólares, lo que representa el principal gasto operativo (OPEX) de un camión diésel con asistencia trolley.

Es importante destacar que, incluso sumando los costos de combustible y energía, el camión con asistencia trolley sigue siendo más rentable en comparación con un camión convencional.

Cuando se utiliza diésel, se debe tener en cuenta el carbon tax, calculado mediante la ecuación (4.8), lo que da como resultado un costo anual de 0,23 millones de dólares.

En el gráfico de la Figura 4.11, se muestra el desglose de los gastos operativos de un camión con asistencia trolley. A pesar de utilizar los mismos valores de mantenimiento y motor que un camión convencional, el mayor gasto sigue siendo el combustible, representando el 38,4% del costo total.

Figura 4.11 Desglose de los costos OPEX de un camión diésel con asistencia trolley.



C. Camión BEV con Asistencia Trolley

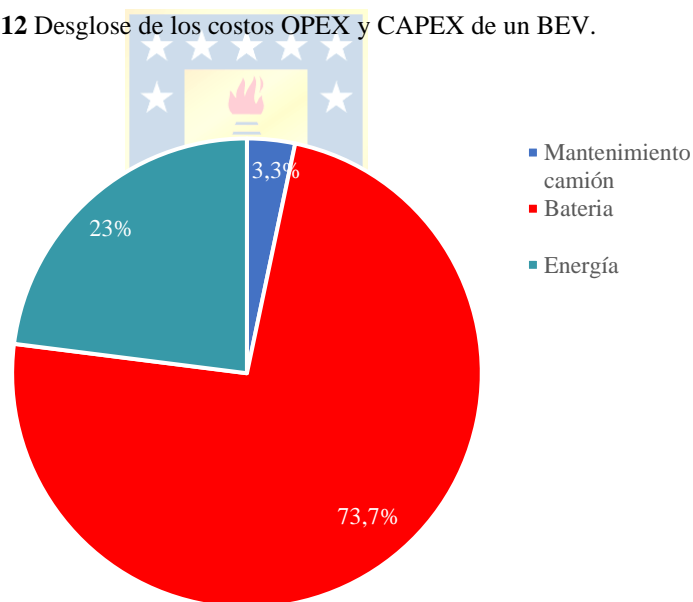
Para calcular la equivalencia entre el combustible consumido por un camión convencional y la energía en el caso de un camión eléctrico con asistencia trolley, se utiliza la ecuación (4.9). En cuanto a la eficiencia, se divide la eficiencia del motor convencional (35%) por la eficiencia del motor eléctrico, que se asume en un 90%. Esto da un consumo de energía total equivalente de 5.144 [MWh]. El costo de esta energía es de 0,65 millones de dólares para el primer año, mientras que para los restantes varía entre 0,56 y 0,51 millones, de acuerdo con el precio de la energía verde.

Los costos operativos de un camión eléctrico a batería incluyen tanto el gasto asociado al mantenimiento como el costo de la batería, que es de 0,30 dólares por kWh (proporcionado por CAT). Este último valor, que refleja el costo operativo por hora durante la vida útil de la batería, se considera como una anualidad. Esta selección de tratamiento se alinea con la frecuencia de evaluación de otros costos, facilitando la interpretación de los resultados en el contexto de análisis anuales. Es importante señalar que este valor abarca todo el ciclo de vida de la batería, contemplando aspectos como el desmontaje, el mantenimiento y reciclaje de la batería.

El costo anual de la batería equivale a 1,54 millones de dólares, que representa el principal costo de un camión eléctrico. Se espera que estos costos disminuyan en el futuro.

Para efectos de comparación de los costos operativos, se asume que el costo de mantenimiento de este camión es igual al de los otros dos camiones mencionados anteriormente.

Figura 4.12 Desglose de los costos OPEX y CAPEX de un BEV.



El mayor costo que representa un camión BEV es el de la batería, ya que equivale aproximadamente al 74% del costo total anual. Esto se debe a que el rendimiento de las baterías disminuye con el tiempo, lo que exige reemplazarlas de manera frecuente, aproximadamente cada dos años. Se anticipa que a medida que surjan nuevas tecnologías de baterías, los costos asociados se reducirán.

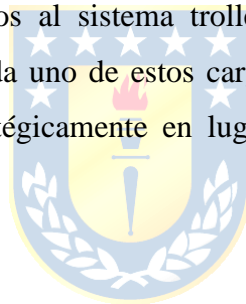
4.4.2 Costos de Infraestructura

Los costos de infraestructura están asociados a la implementación del sistema trolley, con un valor estimado de aproximadamente 4.1 millones de dólares por cada kilómetro de trolley instalado, excluyendo mano de obra y costos de mantenimiento. Este costo engloba tanto las líneas aéreas como las estructuras de soporte, como los postes utilizados para sostener las líneas eléctricas.

Es importante tener en cuenta que la infraestructura del sistema trolley es estática y debe ubicarse estratégicamente en lugares que permitan su uso durante la mayor parte de la vida útil del rajo minero. Sin embargo, varios de los componentes de esta infraestructura, como los postes y los elementos de las subestaciones eléctricas utilizados en el sistema trolley, pueden ser reutilizados después de que el sistema sea desmantelado.

El modelo propuesto implica la instalación de cuatro líneas de trolley en diferentes ubicaciones dentro del rajo, cada una con una longitud de 1 kilómetro, como muestra la Figura 5.4

Además de los costos asociados al sistema trolley, se deben considerar los cargadores eléctricos para los camiones BEV. Cada uno de estos cargadores tiene un costo aproximado de 1 millón de dólares y se ubicarán estratégicamente en lugares donde no sea necesario retirar los camiones de servicio para cargarlos.



4.5. Evaluación Económica

El propósito fundamental de este análisis económico es calcular y estimar los costos asociados a cada uno de los CAEX seleccionados previamente en el capítulo 0. El objetivo es realizar una comparación detallada de estos costos en relación con el caso base, que es el camión convencional. Este análisis permitirá evaluar y contrastar los costos asociados a tres compañías de interés diferentes (MLP, CEN y ANT), teniendo en cuenta sus necesidades específicas de camiones para cada una. De esta manera, se podrá determinar cuál de estas compañías es la más adecuada para implementar estas tecnologías.

En las siguientes tablas se presentan los costos para cada tecnología, incluyendo los costos CAPEX y los costos OPEX mencionados anteriormente. Se calcula el valor actualizado de costos (VAC) con una tasa de interés del 8%, de manera de ver la factibilidad de implementación de las tecnologías. El VAC se emplea para evaluar el costo total ajustado al valor presente de un proyecto a

lo largo del tiempo, especialmente cuando no se esperan ingresos directos del proyecto. El VAC se enfoca exclusivamente en los flujos de efectivo relacionados con los costos del proyecto, como los gastos de inversión inicial, costos operativos, costos de mantenimiento, entre otros.

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1-r)^t} \quad (4.10)$$

Donde:

I_0 : Inversión inicial

C_t : Costos al final del periodo t

r: Tasa.

Tabla 4.2 Costos y VAC del camión convencional.

Periodo	Camión Convencional						
	CAPEX [M\$US]	OPEX				Total [US\$M]	VAC [US\$M]
		Motor [US\$M]	Mantenimiento [US\$M]	Impuesto Carbono [US\$M]	Diésel [US\$M]		
A1	5	0.14	0.01	0.33	0.64	6.12	5.66
A2	0	0.27	0.07	0.33	0.64	1.31	1.12
A3	0	0.14	0.14	0.33	0.64	1.25	0.99
A4	0	0.74	0.56	0.33	0.64	2.26	1.66
A5	0	0.14	0.73	0.33	0.64	1.84	1.25
A6	0	0.27	0.16	0.33	0.64	1.40	0.88
A7	0	0.14	0.39	0.33	0.64	1.50	0.87
A8	0	0.74	0.21	0.33	0.64	1.91	1.03
A9	0	0.14	0.70	0.33	0.64	1.80	0.90
A10	0	0.27	0.52	0.33	0.64	1.76	0.81
A11	0	0.74	0.22	0.33	0.64	1.93	0.83
A12	0	0.14	0.18	0.33	0.64	1.28	0.51
A13	0	0.27	0.84	0.33	0.64	2.07	0.76

Periodo	Camión Convencional						
	CAPEX [M\$US]	OPEX				Total [US\$M]	VAC [US\$M]
		Motor [US\$M]	Mantenimiento [US\$M]	Impuesto Carbono [US\$M]	Diésel [US\$M]		
A14	0	0.14	0.19	0.33	0.64	1.30	0.44
A15	0	0.74	0.40	0.33	0.64	2.10	0.66
Total						18.39	

Para el camión diésel con asistencia trolley, el costo CAPEX presentado abarca tanto el precio del camión como el de la instalación del pantógrafo.

Tabla 4.3 Costos y VAC del camión DE + trolley.

Periodo	Camión Diésel + Trolley							
	CAPEX [M\$US]	OPEX					Total [US\$M]	VAC [US\$M]
		Motor [US\$M]	Mantenimiento [US\$M]	Impuesto Carbono [US\$M]	Diésel [US\$M]	Energía [US\$M]		
A1	5.80	0,14	0,01	0,23	0,45	0,18	6,80	6,30
A2	0	0,27	0,07	0,23	0,45	0,15	1,16	1,00
A3	0	0,14	0,14	0,23	0,45	0,15	1,11	0,88
A4	0	0,74	0,56	0,23	0,45	0,14	2,12	1,56
A5	0	0,14	0,73	0,23	0,45	0,15	1,69	1,15
A6	0	0,27	0,16	0,23	0,45	0,15	1,25	0,79
A7	0	0,14	0,39	0,23	0,45	0,15	1,35	0,79
A8	0	0,74	0,21	0,23	0,45	0,15	1,77	0,95
A9	0	0,14	0,70	0,23	0,45	0,15	1,66	0,83
A10	0	0,27	0,52	0,23	0,45	0,15	1,61	0,74
A11	0	0,74	0,22	0,23	0,45	0,14	1,78	0,76
A12	0	0,14	0,18	0,23	0,45	0,14	1,13	0,45
A13	0	0,27	0,84	0,23	0,45	0,14	1,92	0,71

Periodo	Camión Diésel + Trolley							
	CAPEX [M\$US]	OPEX					Total [US\$M]	VAC [US\$M]
		Motor [US\$M]	Mantenimiento [US\$M]	Impuesto Carbono [US\$M]	Diésel [US\$M]	Energía [US\$M]		
A14	0	0,14	0,19	0,23	0,45	0,14	1,15	0,39
A15	0	0,74	0,40	0,23	0,45	0,14	1,95	0,62
Total							17,92	

Tabla 4.4 Costos y VAC del camión BEV.

Periodo	Camión BEV					
	CAPEX [M\$US]	OPEX			Total [US\$M]	VAC [US\$M]
		Batería [US\$M]	Mantenimiento [US\$M]	Energía [US\$M]		
A1	10,00	1,54	0,01	0,65	12,06	12,20
A2	0	1,54	0,07	0,54	2,12	2,16
A3	0	1,54	0,14	0,54	2,19	2,24
A4	0	1,54	0,56	0,54	2,60	2,64
A5	0	1,54	0,73	0,55	2,77	2,82
A6	0	1,54	0,16	0,55	2,20	2,25
A7	0	1,54	0,39	0,54	2,43	2,47
A8	0	1,54	0,21	0,54	2,25	2,29
A9	0	1,54	0,70	0,54	2,72	2,78
A10	0	1,54	0,52	0,52	2,54	2,58
A11	0	1,54	0,22	0,51	2,25	2,28
A12	0	1,54	0,18	0,51	2,20	2,24
A13	0	1,54	0,84	0,51	2,86	2,90
A14	0	1,54	0,19	0,51	2,22	2,25
A15	0	1,54	0,40	0,51	2,42	2,46
Total					29,04	

Al comparar los costos actuales de las tres tecnologías, se observa un ahorro 0,47 [M\$US] en el caso del camión diésel con asistencia trolley con relación al caso base. Este ahorro se debe principalmente a la reducción en el gasto de combustible y al carbon tax asociado. Es importante destacar que este ahorro es específico para un solo camión.

Por otro lado, al analizar el valor actual de costos del camión BEV, no se observa un ahorro en comparación con el caso base, principalmente debido a los elevados costos de las baterías. Sin embargo, es crucial considerar que, a pesar de un VAC más alto, existen factores adicionales que pueden compensar esta desventaja. Por ejemplo, los beneficios ambientales de una tecnología totalmente eléctrica tienen un valor significativo en términos de sostenibilidad y cumplimiento de regulaciones ambientales.

El análisis de las tecnologías debe basarse en una evaluación integral que abarque no solo costos, sino también los impactos ambientales, la disponibilidad del equipo, la innovación y la adaptabilidad a futuros cambios en la industria.

Un estudio realizado por la empresa CAT en Encuentros [21] reveló que la implementación del sistema trolley podría resultar en una reducción del 15% en la flota debido a la mayor velocidad de ascenso de los camiones. Sin embargo, para determinar el periodo de retorno de la inversión en estas tecnologías, es esencial situarse en un escenario equivalente para las tres opciones. Por lo tanto, se consideran 50 camiones para cada uno de los escenarios.

Tabla 4.5 Ahorro por periodo y acumulado DE + trolley con respecto al caso base.

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC DE + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
Inversión		16,40	-16,40	-16,40
A1	283,22	314,93	-31,71	-48,11
A2	56,10	49,92	6,18	-41,93
A3	49,48	43,93	5,56	-36,37
A4	83,22	77,87	5,35	-31,02
A5	62,48	57,62	4,86	-26,16
A6	44,01	39,51	4,50	-21,66
A7	43,62	39,41	4,21	-17,46
A8	51,60	47,70	3,90	-13,56

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC DE + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
A9	45,12	41,51	3,61	-9,96
A10	40,65	37,18	3,47	-6,49
A11	41,32	38,08	3,24	-3,25
A12	25,48	22,48	3,00	-0,25
A13	38,14	35,36	2,78	2,53
A14	22,12	19,55	2,57	5,11
A15	33,13	30,62	2,52	7,49

Con base en la Tabla 4.5, se calcula que el retorno de la inversión de 16.4 [M\$US] correspondiente a la infraestructura trolley se logra en el decimotercer año en el caso de los camiones diésel con asistencia trolley.

Se considera un ahorro anual derivado de la reducción de la flota en un 15%, el retorno de la inversión en la infraestructura trolley para el camión diésel con asistencia trolley se produciría a partir del segundo año, como se muestra en la Tabla A.2 del anexo A.3.

Tabla 4.6 Ahorro por periodo y acumulado BEV + trolley con respecto al caso base.

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC BEV + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
Inversión		16,40	-16,40	-16,40
A1	283,22	564,97	-281,75	-298,15
A2	56,10	92,39	-36,29	-334,43
A3	49,48	88,90	-39,42	-373,86
A4	83,22	96,99	-13,77	-387,62
A5	62,48	95,92	-33,45	-421,07
A6	44,01	70,84	-26,83	-447,90
A7	43,62	72,15	-28,53	-476,43
A8	51,60	61,86	-10,26	-486,69
A9	45,12	69,57	-24,46	-511,14
A10	40,65	59,77	-19,13	-530,27

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC BEV + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
A11	41,32	48,91	-7,59	-537,86
A12	25,48	44,39	-18,90	-556,77
A13	38,14	53,23	-15,09	-571,86
A14	22,12	38,33	-16,21	-588,06
A15	33,13	38,71	-5,58	-593,64

Los resultados de la

Tabla 4.6 concuerdan con el VAC obtenido para los camiones BEV. En esta tecnología, la inversión en la infraestructura trolley a lo largo de los 15 años no se recupera. Si se realiza el mismo análisis para un total de 43 camiones, se puede observar incluso con la disminución del 15% en la flota, la inversión no tendría un retorno en los 15 años. Sin embargo, se anticipa que en los próximos años, cuando la tecnología alcance su máximo nivel de madurez, los costos de las baterías disminuirán. Para que esta inversión sea rentable, los valores CAPEX del camión y el costo de la batería deben reducirse.

Si se consideran 50 camiones y el costo CAPEX del camión disminuye a 6,5 [M\$US], junto con un costo anual de la batería de 0.10 [USD\$/kWh], recién en el decimoquinto año se recuperaría la inversión, como se refleja en la Tabla A.3 del anexo A.3.

Si se opta por una reducción de flota, con 43 camiones sería necesario que el costo CAPEX del camión disminuyera a 7 [M\$US] y que el costo de la batería sea de 0.15 [USD/kWh] para que el retorno a la inversión se produzca en el undécimo año.

4.6. Emisiones de Carbono

Dado que el 100% de la energía eléctrica utilizada por las compañías proviene de fuentes limpias, las emisiones de carbono de los camiones eléctricos y del sistema trolley serían nulas. Por esta razón, solo se compararán las emisiones de carbono del camión convencional y el camión diésel con asistencia trolley.

Como se mencionó en la sección 3.2.4, un litro de diésel emite 0.00271 toneladas de dióxido de carbono. En total, un camión convencional consume 1.206.953 litro de combustible anualmente,

mientras que en el caso del camión diésel con asistencia trolley se consumen 844.867 litros. Esto equivale a emitir 3.271 toneladas y 2.290 toneladas de dióxido de carbono respectivamente. Por lo tanto, el uso de la asistencia trolley reduce la huella de carbono en 981 toneladas de dióxido de carbono, lo que representa una disminución del 30% en las emisiones.

4.7. Conclusión – Priorización de los Rajos

Para elegir la compañía en la cual se llevará a cabo la investigación, se creó una matriz de toma de decisiones. Esto permite evaluar de manera más exhaustiva las posibles situaciones para los distintos rajos. Se utilizó la siguiente escala de calificaciones para cada alternativa en función de un conjunto de criterios:

Escala de 1 a 3: donde 1 representa un nivel bajo, 2 un nivel medio y 3 un nivel alto.

Tabla 4.7 Matriz de toma de decisiones.

Criterio	MLP	ANT	CEN-ENCUENTRO	CEP-ESP
Tipo de camión	3	3	3	3
Switchbacks	3	2	-	1
Porcentaje del loop minero que se realiza subiendo cargado	2	1	-	3
Pared que se mantenga estables por largos periodos de tiempo	3	3	1	2
Opciones de autonomía o avances de esta tecnología	1	1	3	1
Estudios o avances en el análisis de tecnologías de carga dinámica (trolley)	3	1	1	2
Disponibilidad física de los últimos años	3	2	-	2
Vida útil que le resta al rajo (años)	1	2	3	2

Criterio	MLP	ANT	CEN-ENCUENTRO	CEP-ESP
Ancho de camino	2	2	2	2
Puntaje total	21	17	13	18

Los puntajes obtenidos en la matriz de toma de decisiones proporcionan una perspectiva más técnica sobre cuál de los rajos sería el más adecuado para la implementación del sistema trolley. Considerando estos puntajes y todo lo expuesto en las secciones de este capítulo, se han identificado los siguientes puntos clave para la selección de la compañía.

Tomando en cuenta los puntajes de la matriz y con todo lo expuesto las secciones del presente capítulo se consideran los siguientes puntos más importantes para la selección de la compañía:

1. Minera Antucoya: la implementación nuevas tecnologías en esta compañía implicaría que los camiones convencionales no serían operados hasta el final de su vida útil, por lo cual existe el riesgo de no recuperar el valor residual de los mismos.
2. Minera Centinela – Encuentros: Dado que se trata de un rajo nuevo, la adquisición de camiones debe ser completa para ajustarse al plan minero de la compañía. La inversión en equipos nuevos sería significativa, especialmente debido a la necesidad de adaptar estos camiones a un sistema trolley, seguido por un proceso de retrofit para convertirlos en camiones eléctricos con batería. Sin embargo, esta opción podría no ser la más conveniente, ya que los costos asociados podrían superar la adquisición directa de camiones eléctricos a batería.
3. Minera los Pelambres: Esta compañía presenta varias ventajas para la implementación de las tecnologías. Primero, coincide la renovación de equipos con la llegada de equipos eléctricos, lo que ahorra dinero en la compra de camiones que luego necesitarían ser adaptados. Además, MLP tiene un mayor requerimiento de flota, y la implementación del sistema trolley podría contribuir a reducir el tamaño de la flota debido a la disminución de los tiempos de ciclo. Además, este sistema sería beneficioso para un mayor número de camiones en esta compañía.

En conclusión, considerando todos los factores, se toma la decisión de trabajar con Minera los Pelambres y evaluar sus requisitos específicos para llevar a cabo la transición hacia una fuente de energía más sostenible.

5. Modelamiento y Análisis

5.1. Introducción

En esta sección se modela y analiza el sistema eléctrico de MLP tanto con la incorporación de camiones diésel con asistencia trolley como de camiones BEV con asistencia trolley. Para llevar a cabo este análisis, se emplea el software “DigSilent”. Este programa es elegido debido a su capacidad de realizar análisis de estabilidad y calcular flujos de potencia en sistemas eléctricos.

5.2. Situación Actual de MLP

5.2.1 Sistema Eléctrico de Potencia

El sistema eléctrico de potencia de MLP se divide en cuatro secciones principales o infraestructuras, a las cuales se prestará especial atención al realizar los flujos de potencia para los distintos casos operativos.



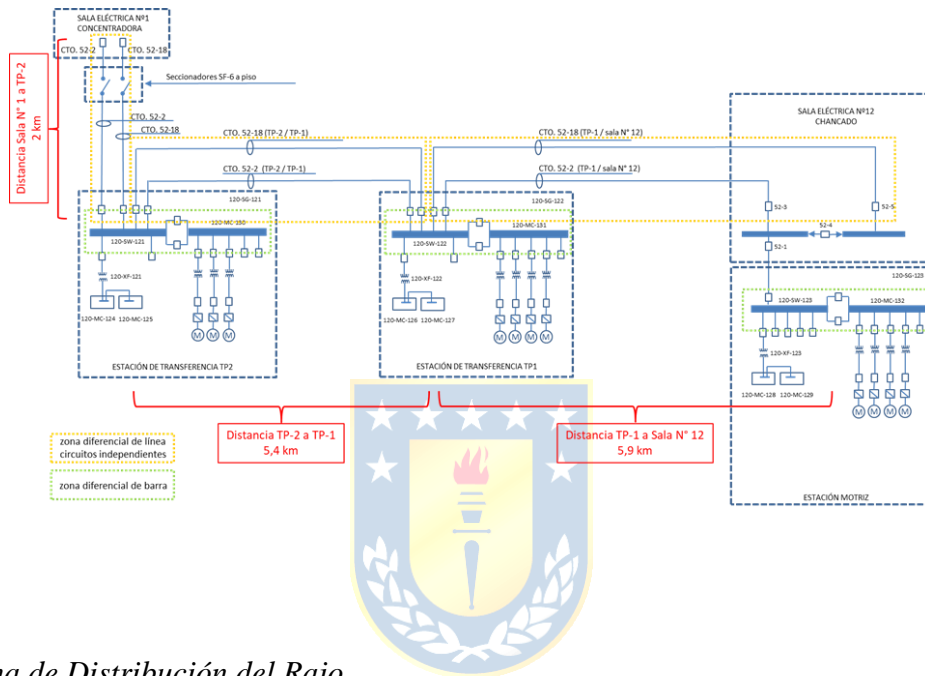
A. Línea 2x220 Quillota – Piuquenes

Esta línea se encuentra bajo una filosofía N-1, lo que significa que si uno de los dos circuitos de servicio falla, el circuito restante es capaz de proporcionar energía eléctrica a todo MLP. La línea cuenta con un punto de conexión denominado “TapOff El Mauro”, ubicado en el kilómetro 150 de la línea, y la nueva subestación “El Chacay”, ubicada 1.5 kilómetros antes de la subestación “Piuquenes”. El objetivo de estas instalaciones es permitir la conexión de un equipo STATCOM, que mantiene el voltaje de la zona de la subestación Piuquenes en caso de que un circuito falle. Este STATCOM es parte del proyecto de ampliación de procesos denominado INCO. Desde la construcción y puesta en servicio de MLP, se han desarrollado distintos proyectos de ampliación, llegando hoy en día a una demanda máxima proyectada de 210 MW una vez que el proyecto INCO entre en funcionamiento.

C. Alimentadores hacia el Rajo

Existen dos alimentadores de 23 kV que se originan en la barra de distribución principal de MLP y llegan hasta la sala número 12, conocidos como 52-2 y 52-18. Su función es proporcionar suministro eléctrico al Sistema de Transporte de Minera Grueso “STMG” y a las operaciones en el rajo.

Figura 5.2 Alimentadores 52-2 y 52-18.



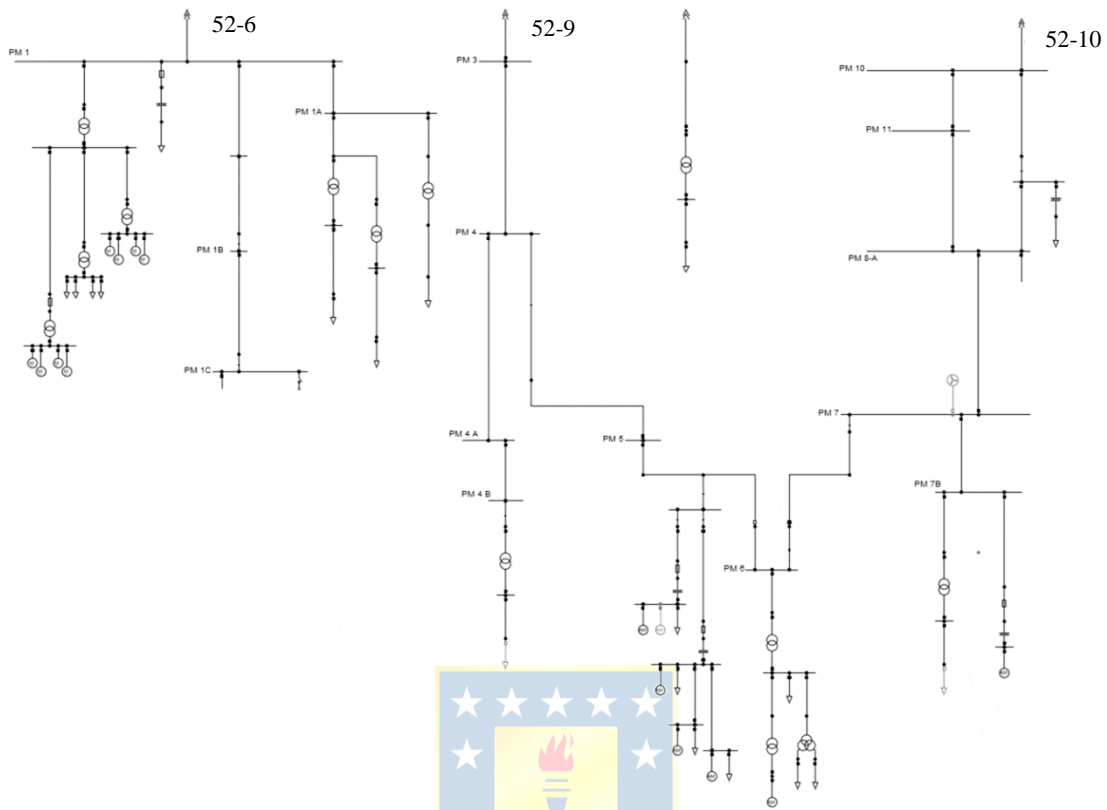
D. Sistema de Distribución del Rajo

Este sistema de distribución opera a 23 kV y consume aproximadamente 16 MW cuando se encuentran todas las cargas conectadas. Actualmente, consta de tres alimentadores que suministran energía eléctrica a los distintos frentes de operación en la mina. Estos frentes incluyen equipos como palas eléctricas, bombas de fondo de mina y perforadoras.

Dos de estos alimentadores forman parte del “Loop Mina”, que recorren los puntos más elevados del rajo y luego descienden hacia los puntos operativos mediante arranques en 23 kV. Estos arranques alimentan subestaciones móviles de 23/6,9 kV, cuya función es distribuir energía en la zona de cada uno de los frentes de trabajo.

La Figura 5.3 muestra el diagrama unilineal del loop mina, en el cual se pueden observar los tres alimentadores: 52-6, 52-9 y 52-10.

Figura 5.3 Unilineal Loop Mina.



El loop minero consta de distintos parrones ubicados alrededor del rajo, los cuales se encuentran representados en el unilineal como las barras PM. Estos parrones reciben energía en 23 kV, donde tres de los parrones reciben energía directamente desde la sala eléctrica 12.

- Parrón 1A: Se alimenta a través del alimentador 52-6 proveniente de la sala eléctrica 12 y suministra energía al sector fondo mina.
- Parrón 3: Se alimenta a través del alimentador 52-9 proveniente de la sala eléctrica 12 y abastece al sector este de la mina.
- Parrón 10: Se alimenta a través del alimentador 52-10 proveniente de la sala eléctrica 12 y provee energía al sector oeste de la mina.

A continuación, en la Tabla 5.1 se proporcionan los detalles de las distancias entre la sala eléctrica y parrones, junto con el tipo de cable utilizado en cada caso.

Tabla 5.1 Distancias entre parrones y sala eléctricas.

Desde	Hacia	Distancia [km]	Tipo de Conductor
Sala eléctrica 12	Parrón 1A	0.95	1x500 MCM / 3x250 MCM
Sala eléctrica 12	Parrón 3	3.0	Cable monopolar 750 MCM / 3x250 MCM
Parrón 3	Parrón 4	1.5	750 MCM
Parrón 4	Parrón 4A	0.3	3x250 MCM
Parrón 4	Parrón 5	0.9	750 MCM
Parrón 5	Parrón 6	2.7	3x250 MCM / 3c 1x750 MCM
Parrón 6	Parrón 7	0.3	Cable de línea 4/0 CU
Parrón 7	Parrón 8	4.2	3x250 MCM
Parrón 8	Parrón 11	3.0	3x250 MCM
Parrón 11	Parrón 10	3.0	3x250 MCM
Sala eléctrica 12	Parrón 10	1.1	750 MCM

5.2.2 Condición de Operación Normal Actual

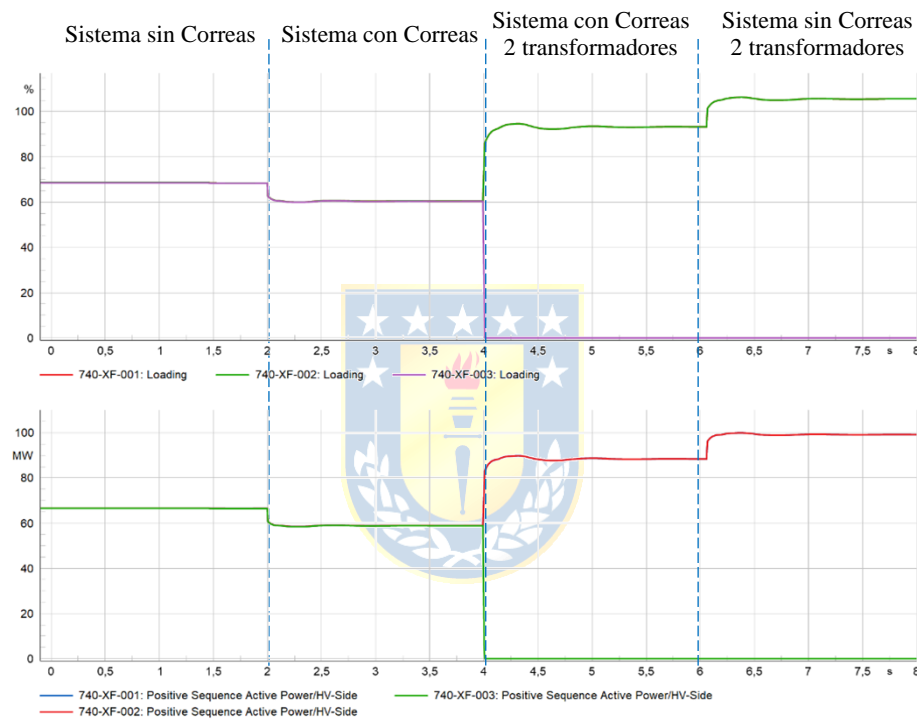
Minera los pelambres posee un sistema de correas regenerativas las cuales aportan aproximadamente 22 MW al sistema, sin embargo, estas correas no se encuentran operativas las 24 horas del día debido a mantenimientos diarios, lo que implica que para las simulaciones del sistema, es esencial no considerar estas correas regenerativas. Esto se debe a la necesidad de evaluar los límites del sistema en el peor escenario operativo. En consecuencia, todas las simulaciones deben considerar todas las cargas del sistema operativas.

Cuando el sistema opera con el sistema de correas regenerativas energizadas, no se observan problemas en la red de 220 kV, ya que al quedar fuera de servicio uno de los transformadores, los dos transformadores restantes operan sin salirse de sus límites, esto quiere decir, sin sobrecarga. En el caso de las líneas Quillota – Piuquenes, se encuentran en su límite con el 93% de carga.

Por otro lado, cuando el sistema opera sin las correas regenerativas, la operación bajo el criterio N-1 no se cumple. Los transformadores y las líneas muestran sobrecarga al salir de servicio uno de ellos. En este escenario, se hace necesario implementar un Esquema de Desconexión Automática de Carga (EDAC). Este mecanismo permite que, en ausencia de las correas regenerativas y en caso de que un transformador o una línea salga de servicio, el EDAC detecte condiciones anormales y desconecte cargas automáticamente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

Es importante destacar que los transformadores están diseñados para operar dentro de límites específicos de carga y temperatura establecidos por el fabricante. Operar continuamente con sobrecarga, ya sea mínima o grande, puede afectar negativamente la vida útil del transformador. Aunque algunos transformadores están diseñados para resistir sobrecargas temporales hasta cierto porcentaje, se debe considerar que esta capacidad de sobrecarga segura puede variar según el fabricante y las condiciones específicas del transformador.

Figura 5.4 Desconexión de transformador Subestación Piuquenes.



En la Figura 5.4 se observa el comportamiento de los transformadores ubicados en la subestación Piuquenes, pudiendo visualizar que desde los 6 segundos sale de servicio uno de los transformadores y el sistema se encuentra operando sin el sistema de correas, notándose la pequeña sobrecarga que presentan los otros dos transformadores

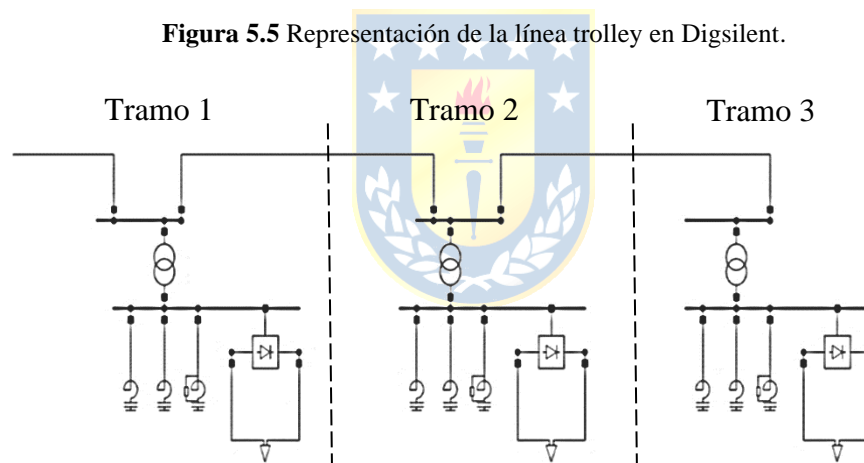
5.3. Modelo Piloto Trolley

Minera los Pelambres implementará un piloto trolley en el año 2024, ubicado en el sector botadero Hualtatas.

Para la simulación de este piloto, el sistema se diseña para suministrar energía eléctrica a un máximo de tres camiones en un trayecto de 1 kilómetro. Dada la demanda energética requerida para una línea alimentar a tres camiones de manera simultánea, el trayecto se divide en tres tramos. Cada uno de estos tramos consta de una solución eléctrica que proporciona un máximo de 4.5 MW a su respectivo tramo.

Se crean tres secciones eléctricamente aisladas en la catenaria, pero están mecánicamente unidas en un solo sistema. Esta configuración permite un solo camión en cada tramo.

El modelo que representa a una línea trolley se compone de tres cargas DC, tres transformadores, tres rectificadores y sus filtros respectivos, como se muestra a continuación.



El enfoque seccionado por tramos se considera el más adecuado debido a que al dividir la línea, se logra una distribución de carga más eficiente entre los transformadores y rectificadores individuales. Esto previene posibles sobrecargas, las cuales podrían ocurrir si se optara por un solo tramo con un transformador y rectificador para los tres camiones. Tal situación se originaría debido a la alta demanda de energía de los camiones.

Además de evitar sobrecargas, otra ventaja adicional de contar con tramos separados equipados con equipos individuales se refleja en la facilidad de mantenimiento. En caso de que uno de los equipos falle, los otros tramos pueden seguir operando sin interrupciones, minimizando así el impacto en la operación general del sistema. Esta capacidad de mantener la continuidad operativa,

incluso en situaciones de fallo, garantiza un funcionamiento estable y fiable del sistema en su conjunto.

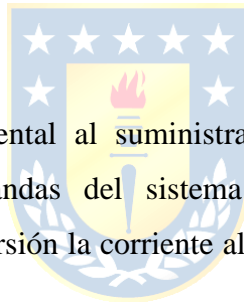
Cada transformador utilizado tiene la tarea de disminuir la tensión de entrada, a un valor de 2 kV en corriente alterna. Posteriormente, esta corriente alterna es transformada en corriente continua a través del rectificador. Es importante destacar que los terminales que emergen del rectificador y se conectan al camión representan las catenarias del sistema.

La representación del camión como una carga DC se hace debido a que se necesita representar una carga de manera específica sin entrar en detalles complejos que podrían no ser necesarios para el análisis particular que se quiere llevar a cabo.

5.3.1 Equipos a Utilizar

A. Grupo rectificador

Desempeñan un papel fundamental al suministrar la energía rectificada necesaria a la catenaria, de acuerdo con las demandas del sistema. Están compuestos por componentes semiconductores que permiten la conversión la corriente alterna en continua, con un nivel de rizado controlado.

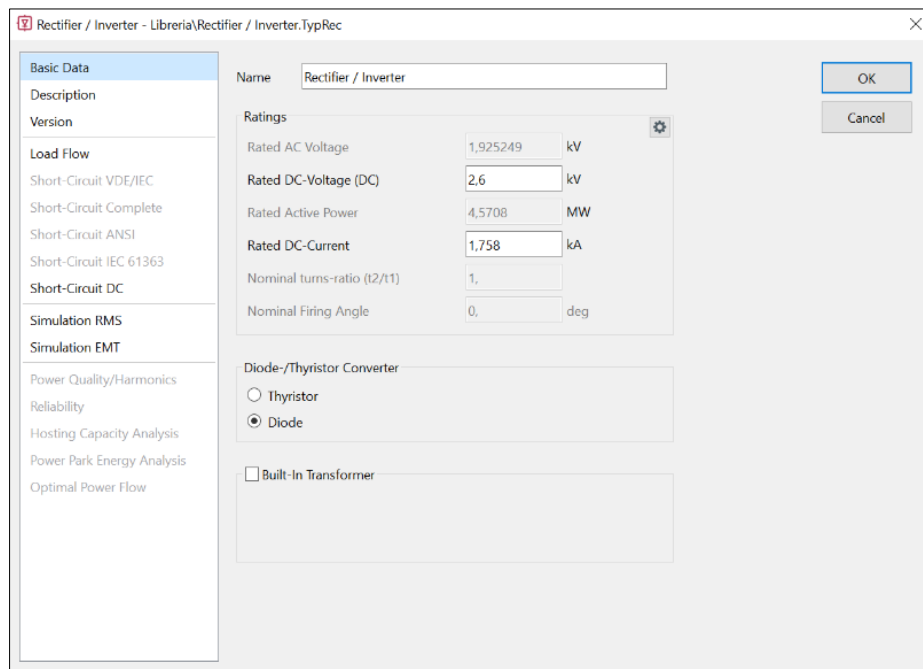


Actualmente, existen dos tipos de semiconductores utilizados en rectificadores: diodos y tiristores. La elección apropiada depende de varios factores, incluyendo la calidad de suministro eléctrico deseada y las condiciones operativas de la subestación rectificadora.

Un parámetro relevante al seleccionar el sistema de rectificación es el número de pulsos utilizado, ya que influye en la calidad de la corriente continua generada y en la generación de armónicos en el sistema. Un rectificador de seis pulsos presenta un rizado mucho menor que un rectificador de tres pulsos y tienen un costo menor que el de un rectificador de doce pulsos, pero presenta armónicas de orden $6k \pm 1$. Por otro lado, el rectificador de doce pulsos es beneficioso para reducir armónicos múltiplos de doce, minimizando así su impacto tanto en la corriente alterna como en la continua. desde el punto de vista de la reducción de armónicos en la red, ya que este rectificador produce armónicos $12k \pm 1$, causando menor impacto en la red tanto en alterna como en continua.

En el contexto del sistema descrito, se ha optado por la utilización de un rectificador a diodos de doce pulsos debido a su capacidad de reducir los armónicos de alto orden, lo que, a su vez, disminuye el impacto en la red eléctrica y reduce los costos asociados con la filtración de armónicos. Los rectificadores empleados comprenden diodos y tiristores, cada uno de los cuales posee características específicas y aplicaciones dentro del sistema de tracción.

Figura 5.6 Configuración rectificador.



B. Transformador

Para esta aplicación, se emplean transformadores de potencia sumergidos en aceite. Esta elección se justifica por su menor costo de instalación en comparación con los transformadores en seco. Además, estos transformadores son más robustos y están diseñados para funcionar en exteriores, lo que los hace adecuados para operar en condiciones climáticas adversas.

A continuación, se proporcionan los datos utilizados para la configuración de los transformadores.

Figura 5.7 Configuración transformador.

Parameter	Value	Unit
Name	2-Winding Transformer Type	
Technology	Three Phase Transformer	
Rated Power	5,2	MVA
Nominal Frequency	50,	Hz
Rated Voltage HV-Side	23,	kV
Rated Voltage LV-Side	2,	kV
Vector Group HV-Side	D	
Vector Group LV-Side	YN	
Phase Shift	1,	*30deg
Name	Dyn1	
Short-Circuit Voltage uk	3,	%
Copper Losses	0,	kW
Short-Circuit Voltage uk0	3,	%
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0,	%

C. Carga

En la representación del camión conectados a las catenarias, se utiliza una carga DC de dos terminales. Estos terminales se conectan directamente a los terminales en continua del rectificador.

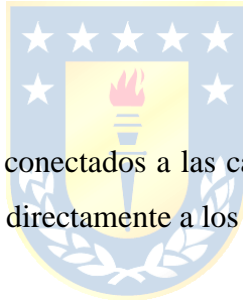
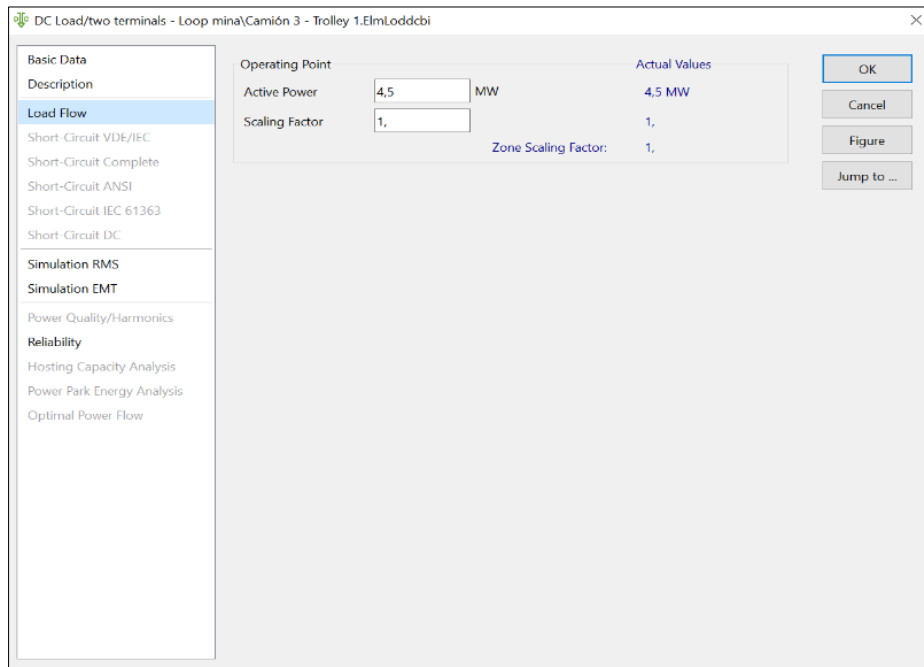


Figura 5.8 Configuración carga.



5.3.2 Contenido armónico

El contenido armónico es un aspecto fundamental en el análisis de sistemas eléctricos. Estas armónicas, que pueden ser generadas por cargas no lineales como rectificadores eléctricos, tienen el potencial de impactar negativamente tanto la calidad de suministro eléctrico como la operación de los equipos. Por lo tanto, el estudio y mitigación de las armónicas son fundamentales para garantizar un suministro eléctrico confiable.

En el caso de un rectificador de 12 pulsos, se observa que las componentes armónicas de mayor amplitud corresponden a la 11^o, 13^o, 23^o y 25^o, tal como se muestra en la Figura 5.9. Estas armónicas alcanzan valores significativos en comparación con la corriente fundamental, lo que resulta en un factor de distorsión armónica igual al 25,13% en relación con la corriente fundamental, obtenido mediante de la ecuación (5.3).

$$h = n \cdot k \pm 1 \tag{5.1}$$

Donde:

n: Número de pulsos del convertidor.

h: Orden de armónica.

k: Números enteros positivos.

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_f \quad (5.2)$$

Donde:

I_h : Amplitud de corriente armónica según su orden.

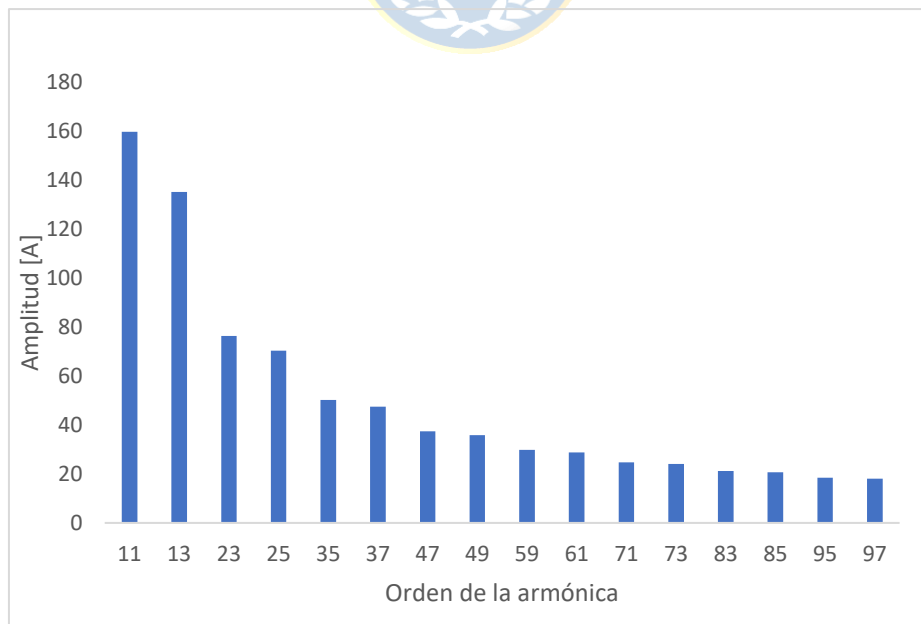
I_f : Amplitud de la corriente fundamental.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=11}^n I_h^2}}{I_f} \quad (5.3)$$

Donde:

THD_I: Total Distorsión Armónica de Corriente.

Figura 5.9 Amplitud de componentes armónicas de rectificador 12 pulsos.



Debido al alto nivel de distorsión presente en el sistema, se han implementado medidas para mitigar las armónicas no deseadas. Estas medidas incluyen la instalación de filtros diseñados específicamente para suprimir frecuencias armónicas particulares y mejorar la calidad de suministro eléctrico. Para diseñar estos filtros, se han tenido en cuenta las armónicas predominantes. En este contexto, se han elegido dos tipos de filtros: para las armónicas de mayor amplitud, especialmente las de orden 11° y 13°, se han seleccionado filtros tipo pasa banda. Para abordar las armónicas de orden 23° y 25°, se opta por implementar un filtro de tipo pasa alto.

A. *Diseño Filtro Pasa Banda*

Los componentes del filtro pasa banda se determinan mediante las ecuaciones (5.4), (5.5) y (5.6) [19].

$$C = \frac{(h^2 - 1) \cdot Q_1}{2\pi \cdot f_1 \cdot h^2 \cdot V_1^2} \quad (5.4)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_1^2 \cdot h^2 \cdot C} \quad (5.5)$$

$$R = \frac{2\pi \cdot h \cdot f_1 \cdot L}{q} \quad (5.6)$$



Donde:

Q_1 : Potencia reactiva necesaria para compensar la componente fundamental de la corriente.

f_1 : Frecuencia nominal del sistema.

V_1 : Voltaje de la barra donde se conecta el filtro.

q : Factor de calidad.

Para efectos de diseño se considera un factor de calidad de 15. Es importante destacar que el factor de calidad no tiene ningún impacto adicional en el ancho de banda del filtro.

Tabla 5.2 Componentes filtro pasivo pasa banda.

Orden armónica	Capacitancia [μF]	Inductancia [mH]	Resistencia [Ω]
11°	134,16	0,62	0,144
13°	134,48	0,44	0,120

B. Diseño Filtro Pasa Alto

Los componentes del filtro pasa alto se determinan mediante las ecuaciones (5.7), (5.8) y (5.9)

$$C = \frac{Q_1}{2\pi \cdot f_1 \cdot V_1^2} \quad (5.7)$$

$$L = \frac{V_1^2}{2\pi \cdot f_1 \cdot h^2 \cdot Q_1} \quad (5.8)$$

$$R = m \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.9)$$



Donde:

m: Constante de diseño.

En el diseño del filtro pasa alto, se utiliza una constante de diseño de 10. El factor m en el filtro pasa alto tiene un efecto similar al factor de calidad en el filtro pasa banda. Sin embargo, en este caso, el valor de m también influye en el factor de atenuación en frecuencias altas.

Tabla 5.3 Componentes filtro pasivo pasa alto.

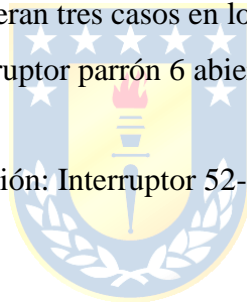
Orden armónica	Capacitancia [μF]	Inductancia [mH]	Resistencia [Ω]
23°	135,28	0,14	10,23

5.3.3 Resultados de Simulación

La simulación del flujo de carga con las línea de trolley incorporada en el sistema, se realiza con el sistema de correas desconectado. Esto se hace para obtener los requisitos que el sistema eléctrico necesita en el peor escenario posible, ya que el sistema de correas tiene mantenimientos separados y en conjunto de forma periódica. Además, se modela con todas las cargas conectadas correspondientes a las palas y sistema de bombas en el fondo de la mina. Aunque en situaciones reales, no siempre todas las cargas funcionan al mismo tiempo, es necesario que el sistema esté preparado para operar con todas las cargas conectadas y con la línea trolley funcionando con tres camiones en simultaneo.

El sistema de potencia del rajo cuenta con 3 interruptores en distintos puntos de su sistema eléctrico, ubicados estratégicamente para hacer frente a fallas o problemas en el suministro eléctrico. En condiciones normales de operación, el interruptor ubicado en el parrón 6 se encuentra abierto, mientras los interruptores ubicados en los alimentadores 52-9 y 52-10 están cerrados. Para la simulación del sistema trolley se consideran tres casos en los que la mina puede operar.

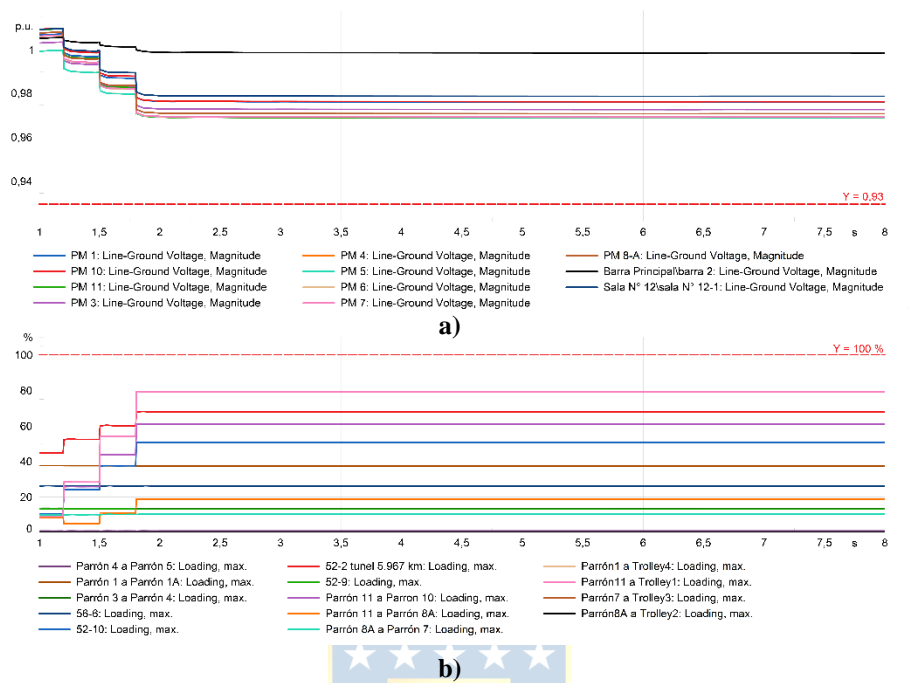
- A. Operación Normal: Interruptor parrón 6 abierto
- B. Interruptor 52-9 abierto
- C. Peor condición de operación: Interruptor 52-10 abierto



A. Operación Normal

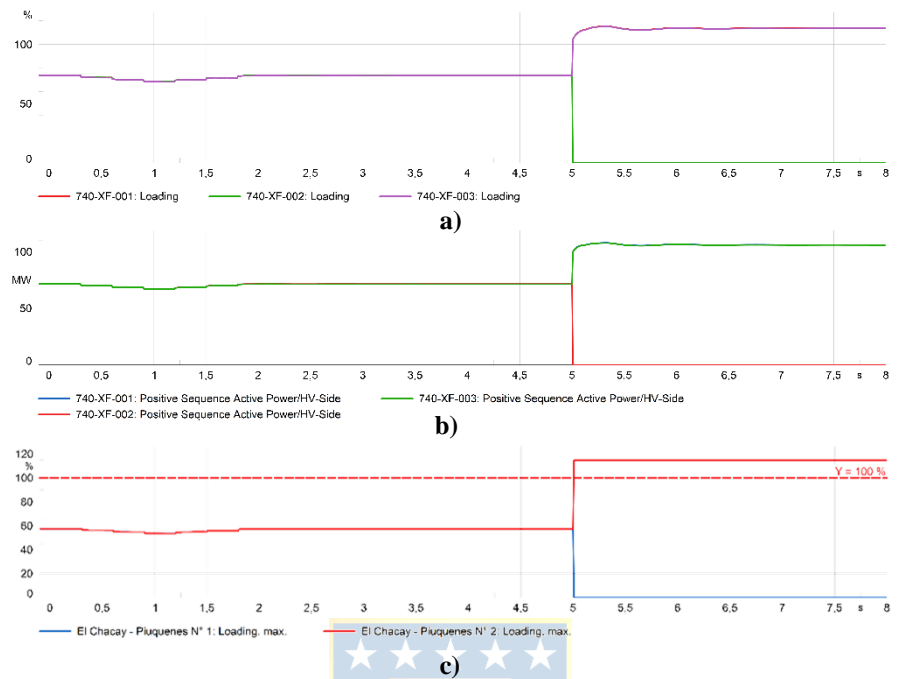
La Figura 5.10 muestra las tensiones obtenidas en las barras de interés tras la incorporación de los camiones al sistema, con el objetivo de observar cómo afecta en la regulación de tensión la incorporación progresiva de los camiones. Se muestra además la sobrecarga de los transformadores y de las líneas.

Figura 5.10 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso A. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas.



Como se puede observar, la conexión simultanea de tres camiones no provoca valores que se encuentren fuera de norma en las barras del sistema ni sobrecarga en las líneas. No obstante, se identifica una sobrecarga en los transformadores de la subestación Piuquenes cuando uno de ellos queda fuera de servicio, lo que resulta en la no conformidad con el criterio N-1, como se puede ver en las figuras 5.11a y 5.11b (segundo 5). Similarmente, se registra una sobrecarga del 14% en la línea entre las subestaciones El Chacay y Piuquenes cuando una de las líneas sale de servicio, como se puede apreciar en la figura 5.11c.

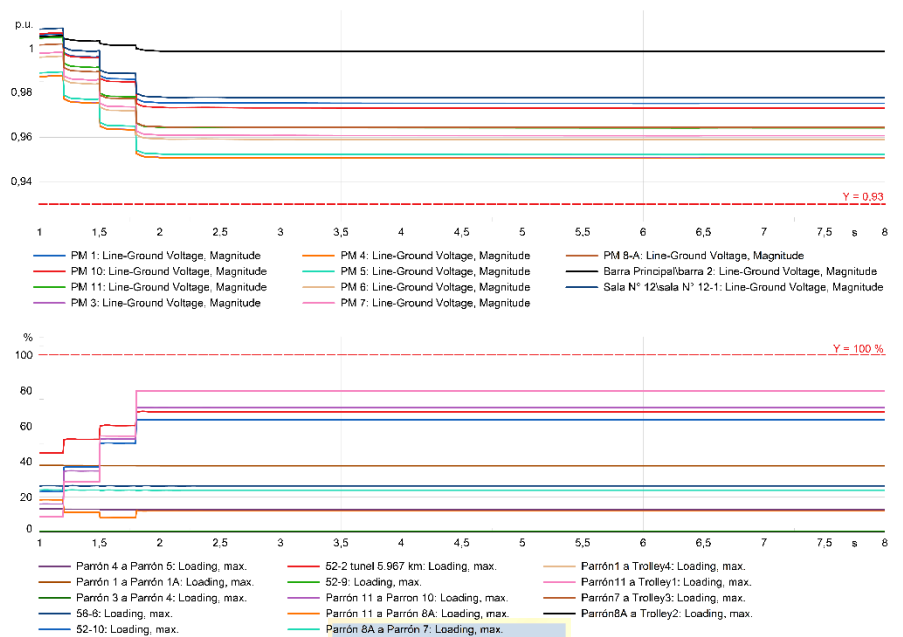
Figura 5.11 Criterio N-1 sistema 220 kV. **a)** Sobrecarga transformadores. **b)** Potencia transformadores. **c)** Sobrecarga líneas.



B. Interruptor 52-9 Abierto

En la operación del sistema bajo este caso y con el sistema en 220 kV funcionando correctamente, el sistema no presenta valores fuera de lo estipulado por la norma en el caso de las barras, y las líneas del sistema se encuentran sin sobrecarga como se muestra en la Figura 5.12.

Figura 5.12 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso B. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas.



Sin embargo, de manera similar al escenario anterior, cuando uno de los transformadores o líneas del sistema de 220 kV queda fuera de servicio, el sistema no cumple con el criterio N-1, como se ilustra en la Figura 5.13.

Debido a que el sistema se alimenta únicamente desde el alimentador 52-10 cuando uno de los transformadores de subestación Piuquenes se desconecta, las áreas más distantes al parrón donde llega el alimentador experimentan una caída de tensión por debajo de los estándares establecidos, como se muestra en la Figura 5.14.

Este fenómeno se debe a la que a medida que las barras se encuentran más alejadas de la fuente de energía principal, el trayecto que la electricidad de recorrer es más larga, lo que resulta una mayor resistencia eléctrica y, por lo tanto, en mayores pérdidas de energía debido a la resistencia eléctrica. Estas pérdidas de energía son las responsables de la mayor caída de tensión en las barras más distantes.

Figura 5.13 Criterio N-1 sistema 220 kV. **a)** Sobrecarga transformadores. **b)** Potencia transformadores. **c)** Sobrecarga líneas.

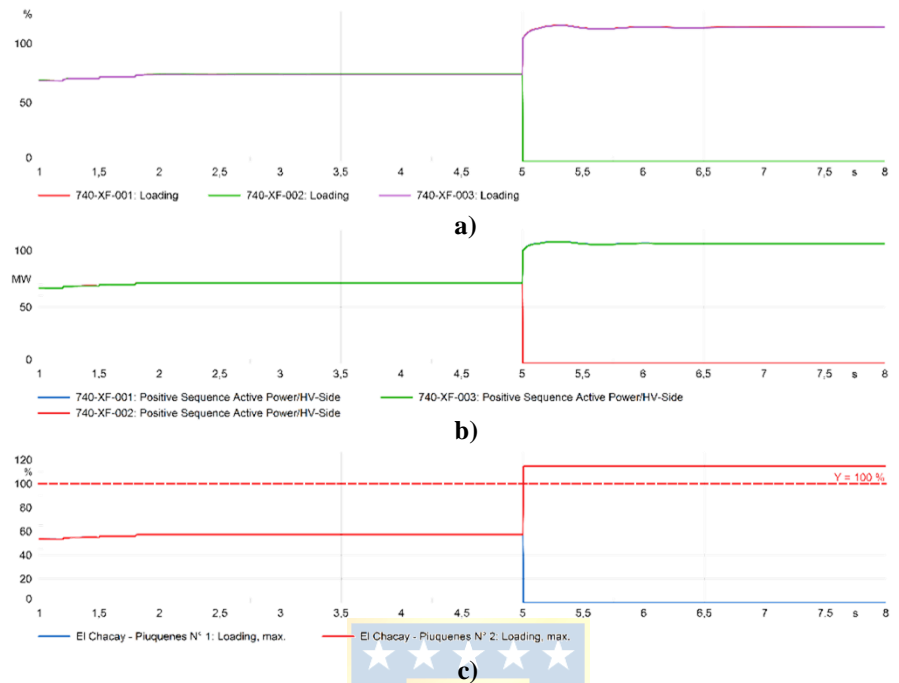
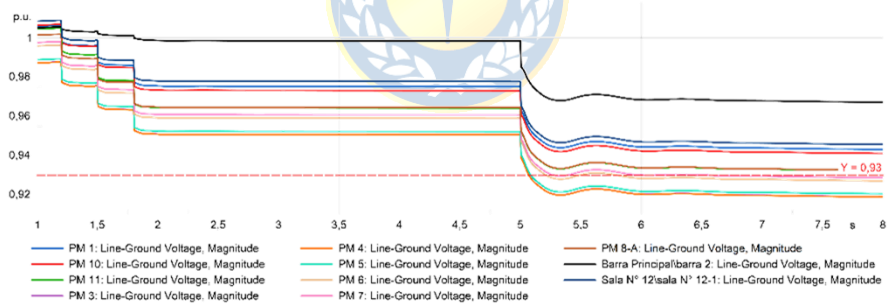


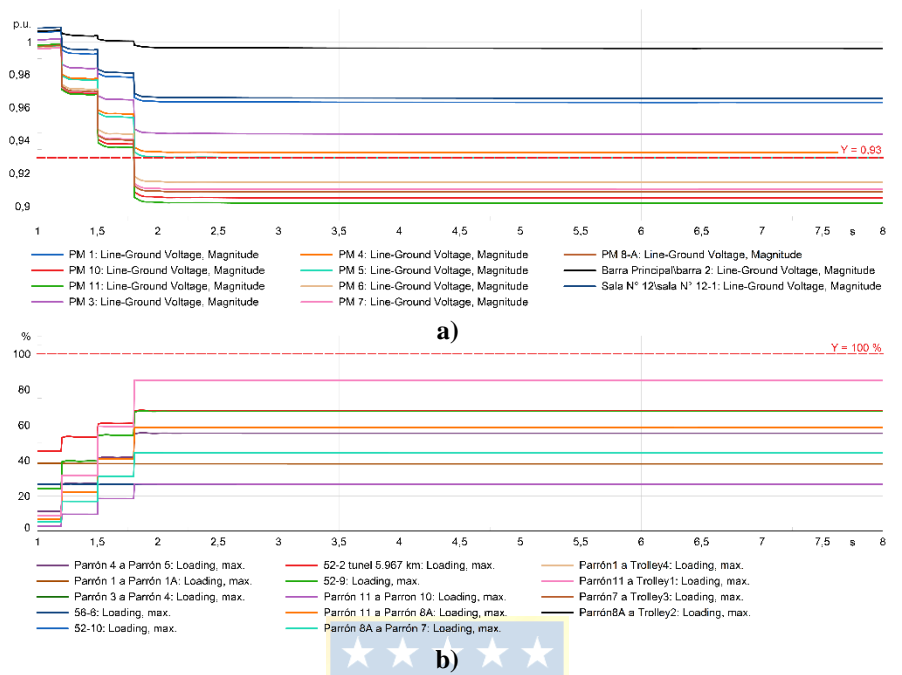
Figura 5.14 Tensión en las barras ante la desconexión de un transformador en Piuquenes.



C. Interruptor 52-10 Abierto

Cuando el interruptor 52-10 se encuentra abierto, la energía proviene del alimentador 52-9, lo que ocasiona una disminución en la tensión en las barras ubicadas en las zonas más alejadas, como se muestra en la Figura 5.15.

Figura 5.15 Conexión de camiones piloto trolley a catenarias caso C. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas.



En el escenario donde uno de los transformadores de la subestación Piuquenes falla o una de las líneas entre Quillota y Piuquenes queda fuera de servicio, todas las barras ubicadas en el circuito minero experimentan una caída de tensión por debajo de los niveles establecidos, como se evidencia a continuación.

Figura 5.16 Criterio N-1 sistema 220 kV. **a)** Sobrecarga transformadores. **b)** Potencia transformadores. **c)** Sobrecarga líneas.

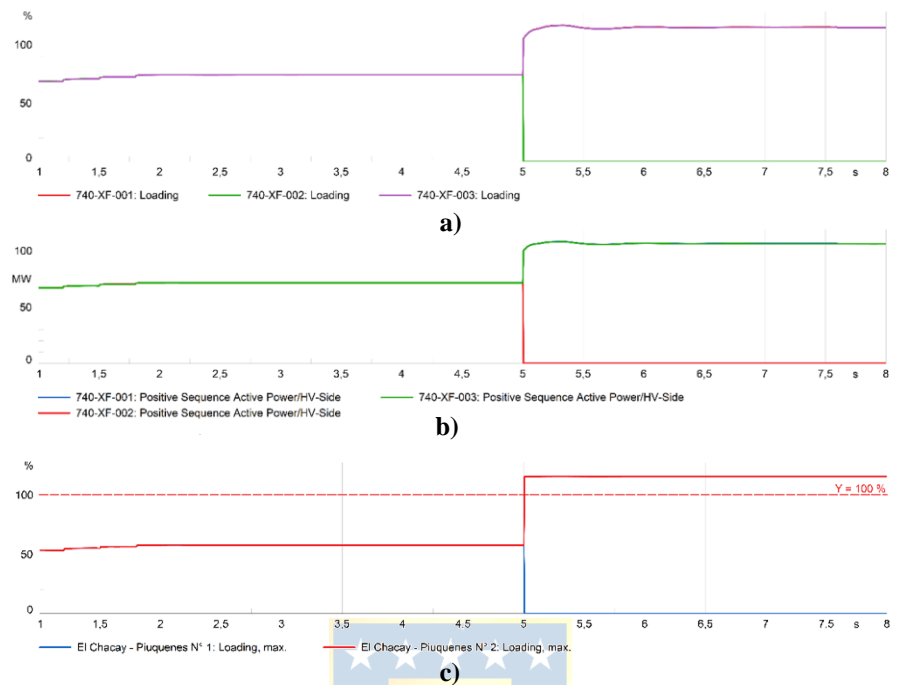
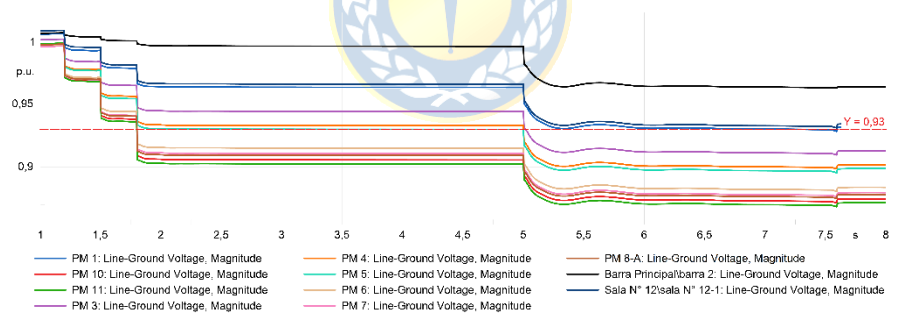


Figura 5.17 Tensión en las barras ante la desconexión de un transformador en Piuquenes.



5.3.4 Conclusión

Se evidencia que, para la operación de este proyecto piloto trolley, el sistema debe funcionar en su configuración normal (con el interruptor parrón 6 abierto) y únicamente cuando el sistema de correas está activado. Esto es esencial para prevenir la sobrecarga de los transformadores de Piuquenes y las líneas entre Quillota y Piuquenes en caso de que alguno de ellos falle.

En los otros escenarios analizados, se hace imperativo considerar la implementación de una nueva infraestructura en el circuito minero. Esta expansión podría implicar la incorporación de un equipo STATCOM junto con la instalación de nuevos alimentadores y líneas. Esta medida es esencial para evitar que las barras del sistema experimenten caídas de tensión por debajo de los estándares establecidos.

En resumen, se podría asegurar un funcionamiento adecuado del sistema trolley en todos los escenarios analizados mediante la conexión de un solo camión a las catenarias.

Por otro lado, si se busca implementar de un piloto trolley en el botadero Hualtatas con tres camiones operando de manera simultánea, es necesario añadir un equipo STATCOM de 30 MVA para mantener los niveles de tensión en las barras del sistema en valores óptimos y también instalar nuevos alimentadores y líneas en el circuito minero. Además, es esencial que el piloto esté operativo cuando el sistema de correas regenerativas esté activado, garantizando así la integridad del sistema y evitando posibles sobrecargas en los transformadores y las líneas en caso de fallos.

La operación del sistema fuera de los parámetros normativos ya sea en términos de tensión en las barras o en el cumplimiento del criterio N-1, puede tener diversas consecuencias. Entre ellas se incluyen posibles daños a los equipos conectados al sistema eléctrico, pérdida de la calidad del servicio y la exposición a sanciones y penalizaciones derivadas del incumplimiento de las regulaciones y normativas establecidas por los organismos reguladores en Chile.

5.4. Modelo de Transición Completa

La Figura 5.18 muestra una vista satelital de la mina, en que se pueden identificar los distintos parrones que componen el loop minero, así como los tramos propuestos para la ubicación de las distintas líneas trolley. Estas líneas se han ubicado estratégicamente en áreas donde el sistema trolley permite un transporte de carga más eficiente, como es el caso de las líneas 1-3. En cuanto a la línea 4, a pesar de que el camión operaría en forma descargada, la pendiente de subida hace que la incorporación de este sistema sea viable, lo que contribuiría al ahorro de combustible.

Figura 5.18 Ubicaciones propuestas MLP.



Se contemplan líneas con una longitud de un kilómetro y cada una de esta líneas presenta una pendiente diferente. Se contemplan además tres zonas de carga estratégicamente ubicadas alrededor del loop minero, donde los trabajadores suelen tomar sus descansos o pausas.

La primera zona de carga se encuentra en el fondo mina, en la zona de descanso de la faena, y está conectada al parrón 1A. En esta área, se instalarán un total de 4 cargadores. La segunda zona de carga se encuentra en el sector botadero Hualtatas, donde los trabajadores suelen tomarse un tiempo

de descanso. Esta zona está conectada al parrón 10 y dispondrá de 1 cargador. Por último, la tercera zona de carga se encuentra en el botadero Cerro Amarillo, donde también los trabajadores suelen tomar su tiempo de descanso. Esta área se conecta al parrón 6 y contará con 1 cargador.

5.4.1 Dimensionamiento de los Cargadores

Para determinar la potencia necesaria de un cargador para un camión eléctrico, se deben tener en cuenta diversos datos, aunque en este caso, estos datos deben ser supuestos debido a la falta de camiones mineros de gran tonelaje completamente eléctricos en el mercado a la fecha.

La capacidad de la batería hace referencia a la máxima cantidad de carga eléctrica que una batería puede almacenar a una tensión específica. Indica cuanta corriente puede suministrar la batería durante un periodo de tiempo específico antes de descargarse por completo, y se calcula mediante la expresión (5.10).

$$\text{Capacidad de batería [Ah]} = \frac{P_{\text{consumida}} [\text{kW}]}{V [\text{V}]} \cdot \text{Tiempo de autonomía [h]} \quad (5.10)$$



Por otro lado, la energía de la batería representa el total de energía que esta puede almacenar y liberar a lo largo de su ciclo de vida. Indica cuanta energía puede suministrar la batería antes de agotarse por completo, y se calcula utilizando la expresión (5.11).

$$\text{Energía batería [MWh]} = \text{Capacidad [Ah]} \cdot V [\text{V}] \quad (5.11)$$

La potencia del cargador, por su parte, se refiere a la tasa a la cual el cargador puede suministrar energía eléctrica a la batería para cargarla. Es decir, representa la velocidad a la que se puede cargar la batería del camión eléctrico. Cuanto mayor sea la potencia del cargador, más rápido se podrá cargar la batería. Esta magnitud se calcula mediante la expresión (5.12).

$$\text{Potencia del Cargador [MW]} = \frac{\text{Energía batería [MWh]}}{\text{Tiempo de carga [h]}} \quad (5.12)$$

En este contexto, se parte del supuesto de que el camión eléctrico tiene un consumo de energía de 2 [MWh] y un tiempo de carga de 1 hora. Según estos parámetros, se determina que la potencia requerida para cargar la batería en ese lapso es de 2 [MW].

5.4.2 Simulación Líneas Trolley

Es esencial tener en cuenta que, para el análisis del sistema con la incorporación de camiones al sistema trolley, el criterio N-1 no será considerado. Esto se debe a que el sistema, incluso sin la incorporación de camiones, ya está operando en su capacidad máxima bajo ese criterio.

A. Operación Normal

La Figura 5.19 muestra las tensiones obtenidas en las barras de interés tras la incorporación de los camiones al sistema, con el objetivo de observar cómo afecta en la regulación de tensión la incorporación progresiva de los camiones hasta un máximo de 12 camiones funcionando simultáneamente. Se muestra además la sobrecarga de los transformadores y de las líneas.

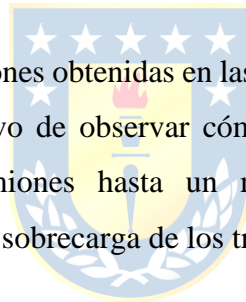
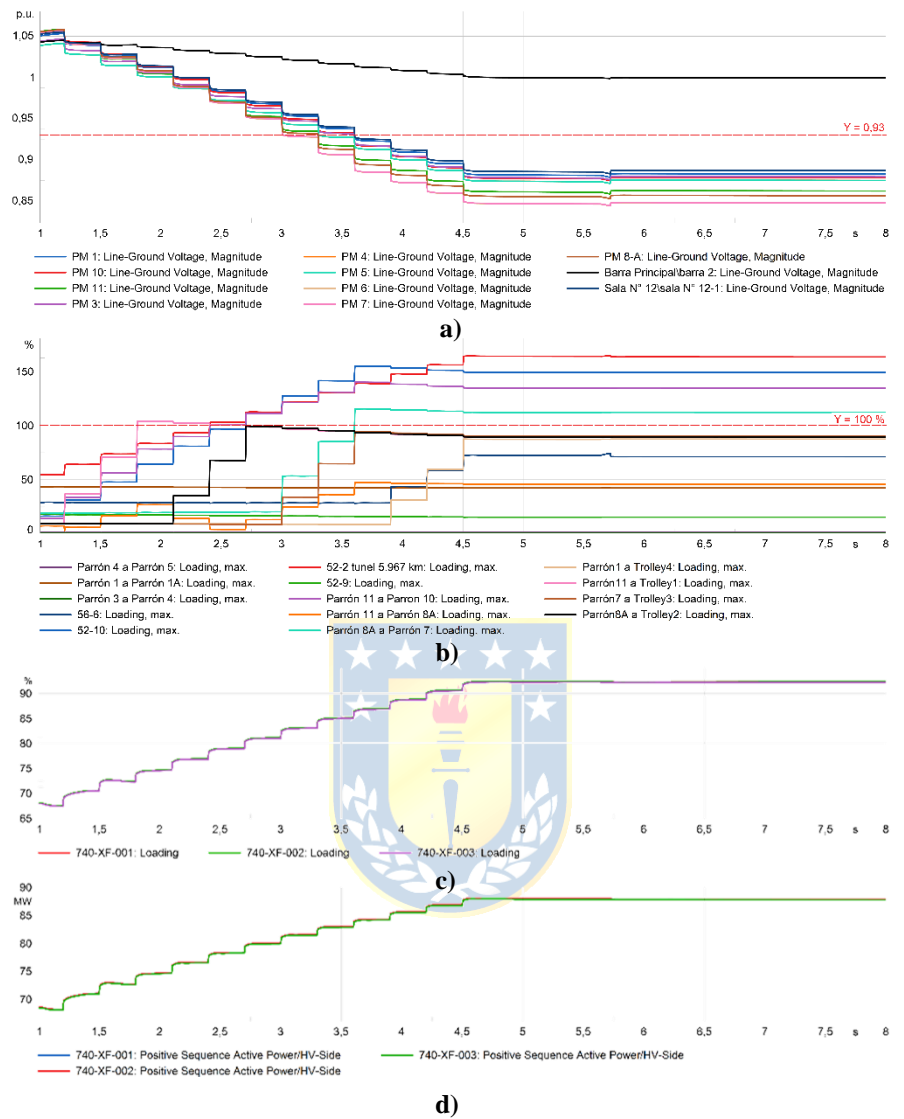


Figura 5.19 Conexión de 12 camiones a catenarias caso A. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



Basándonos en las figuras anteriores, se puede concluir que el sistema puede operar correctamente con hasta cuatro camiones funcionando simultáneamente. Esto significa que el sistema puede manejar la carga adicional de estos camiones sin que la regulación de tensión en las barras del sistema caiga por debajo de la norma. Además, las líneas y/o alimentadores no se sobrecargan con la operación de estos cuatro camiones.

El análisis de sobrecarga de las líneas de alimentación del sistema revela que los alimentadores que van de la barra principal a la sala 12 muestran sobrecarga desde la conexión del quinto camión al

sistema, alcanzando una sobrecarga máxima de 63,4%. Por otro lado, el alimentador 52-10, que conecta la sala 12 con el parrón 10, presenta sobrecarga desde la conexión del sexto camión al sistema, con una sobrecarga máxima del 49,2% después de conectar los doce camiones.

En resumen, sin considerar el criterio N-1 del sistema en 220 kV, se concluye que el sistema puede funcionar correctamente con su configuración actual, correas no operando y todas las cargas del sistema operativas, con hasta cuatro camiones operando simultáneamente, independientemente de la línea trolley en la que se conecten los camiones.

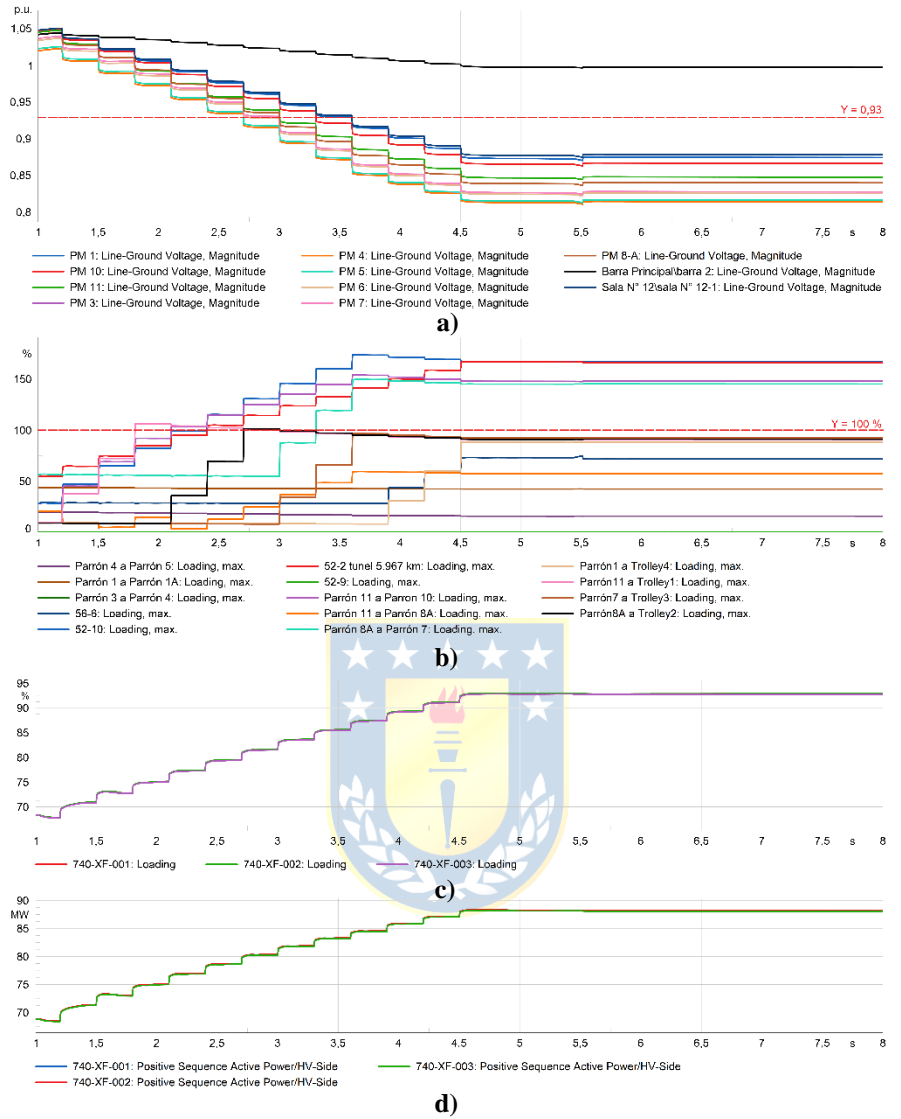
B. Interruptor 52-9 Abierto

En este caso, se observa que el voltaje en los parrones 3, 4 y 5 se sale de los límites de la norma ante la conexión del sexto camión al sistema, como se ilustra en la Figura 5.20a. Este fenómeno se debe a la que a medida que las barras se encuentran más alejadas de la fuente de energía principal, el trayecto que la electricidad de recorrer es más larga, lo que resulta una mayor resistencia eléctrica y, por lo tanto, en mayores pérdidas de energía debido a la resistencia eléctrica. Estas pérdidas de energía son las responsables de la mayor caída de tensión en las barras más distantes.

Además, la sobrecarga de los alimentadores aumenta significativamente en este caso, especialmente en el alimentador 52-10 y 52-2/52-18, así como en la línea que conecta el parrón 11 y el parrón 10, la línea que une al parrón 8A con el parrón 7 y la línea que une al parrón 11 con el parrón 8A. La sobrecarga se incrementa debido a que, al abrir el interruptor en el alimentador 52-9, se reducen las rutas de suministro disponibles para satisfacer la demanda de energía en el rajo. Como resultado, esta demanda adicional se dirige hacia el alimentador que permanece conectado, que en este caso es el alimentador 52-10, lo que provoca una carga adicional en este alimentador, como se muestra en la Figura 5.20b.

Analizando los gráficos, se concluye que el sistema operando bajo esta condición podría operar con solo dos camiones simultáneamente, independiente de la ubicación de conexión.

Figura 5.20 Conexión de camiones a catenarias caso B. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



C. Interruptor 52-10 Abierto

En el escenario en que el interruptor 52-10 se encuentra abierto, la conexión de los doce camiones al sistema eléctrico no es posible. El software de simulación, DigSilent, no ha podido converger, lo que significa que no ha encontrado un conjunto de valores de voltaje y corriente que cumplan con todas las ecuaciones y restricciones del flujo de carga.

Sin embargo, el sistema aún podría operar de manera limitada con dos camiones conectados en cualquiera de las líneas trolley 1, 2 o 3 y con tres camiones conectados en la línea trolley 4.

D. Conclusión

Para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema en los tres escenarios de operación, se requiere la incorporación de un compensador sincrónico estático (STATCOM). Este dispositivo flexible de transmisión de corriente alterna se utiliza para reducir las pérdidas en las líneas de transmisión, mejorar la estabilidad del sistema de potencia y aumentar la capacidad de transferencia de potencia [18].

El STATCOM se ubicaría en la barra de alta sensibilidad de voltaje, como el parrón 10, lo que permitiría una efectiva regulación de voltaje en el loop minero. Además de la adición del STATCOM, se deben implementar dos nuevos alimentadores desde la barra principal hasta la sala 12. Estos alimentadores de tipo 3x500 MCM, los cuales constan de tres conductores, cada uno con una sección transversal de 500 mil circular mils.

En lo que respecta a la sobrecarga detectada en las líneas del loop minero, se ha observado que el sistema presenta su peor comportamiento cuando el interruptor 52-10 está abierto, lo que resulta en la saturación de muchas líneas del sistema. Para la sobrecarga de las conexiones entre el parrón 10 y el parrón 11, así como entre el parrón 8A y el parrón 7, se están utilizando cables de 3x250 MCM. Para resolver esta sobrecarga, existen dos opciones viables: la adición de una nueva línea en paralelo o el cambio del cableado a uno de mayor capacidad.

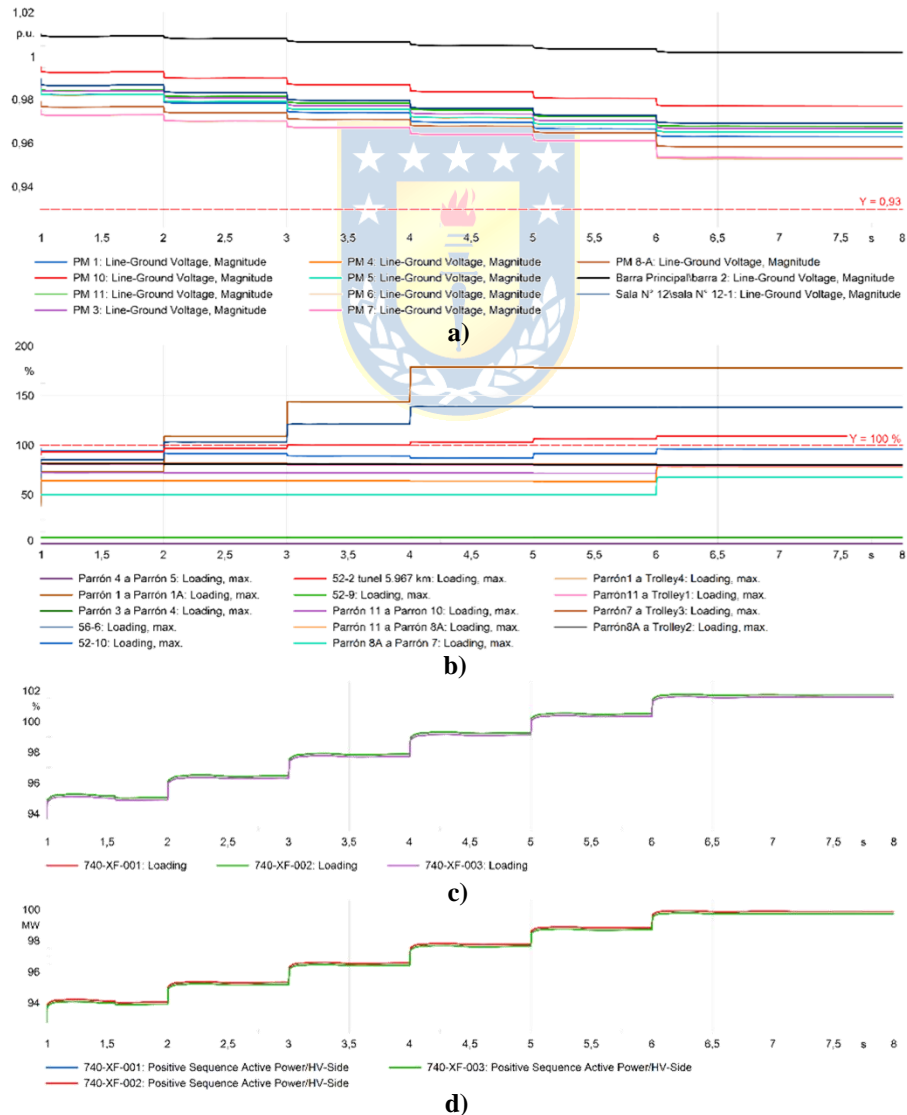
Para abordar la sobrecarga en las demás líneas, se requiere añadir líneas en paralelo para una distribución de carga más eficiente. Además, los alimentadores 52-9 y 52-10 también experimentan sobrecarga en los distintos escenarios, por lo que se debe agregar otro alimentador en paralelo a ellos para resolver este problema.

5.4.3 Simulación Conexión de Camiones BEV a Cargadores Eléctricos

A. Operación Normal

La conexión de los camiones a los diferentes cargadores eléctricos ubicados en el rajo se realiza de manera progresiva en el proceso de simulación. Al llegar al término de dicha simulación, se tiene un total de doce camiones conectados al sistema trolley, mientras que otros seis camiones se enlazan con los cargadores eléctricos. Cabe resaltar que esta simulación se ejecuta de manera conjunta con la infraestructura previamente mencionada y aplicada en el sistema.

Figura 5.21 Incorporación cargadores eléctricos Caso A. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



La introducción de las nuevas cargas no ha generado situaciones que excedan los parámetros estándar en las barras del sistema. Sin embargo, es vital prestar atención a la influencia en el sistema de 220 kV. Los transformadores en la subestación Piuquenes están experimentando una sobrecarga de aproximadamente 2%, lo que destaca la importancia de reforzar la estructura para asegurar la integridad del sistema eléctrico.

En cuanto a las líneas y alimentadores, la situación más crítica se presenta en la línea que conecta el parrón 1 con el parrón 1A, con una sobrecarga de aproximadamente 78%. Esta línea es principalmente afectada debido a la concentración de cargadores eléctricos (24 MW). Además, el alimentador 56-6, que transporta energía desde la sala N°12 al parrón 1, muestra una sobrecarga del 38%. Los alimentadores 52-2/52-18, que habían sido reforzados anteriormente con nueva infraestructura, también presentan una pequeña sobrecarga debido a la incorporación de camiones eléctricos en los respectivos cargadores.

B. Interruptor 52-9 Abierto

En este escenario, el sistema sigue comportándose de manera similar a la situación anterior en cuanto a las barras y transformadores, así como en los alimentadores y líneas mencionadas. Sin embargo, en el alimentador 52-10, que ya había sido reforzado con nueva infraestructura al agregar un alimentador en paralelo, se observa una sobrecarga mínima del 0,6%. Esta sobrecarga es mínima y no tiene impacto significativo en el sistema.

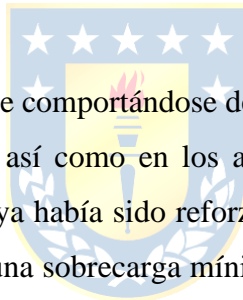
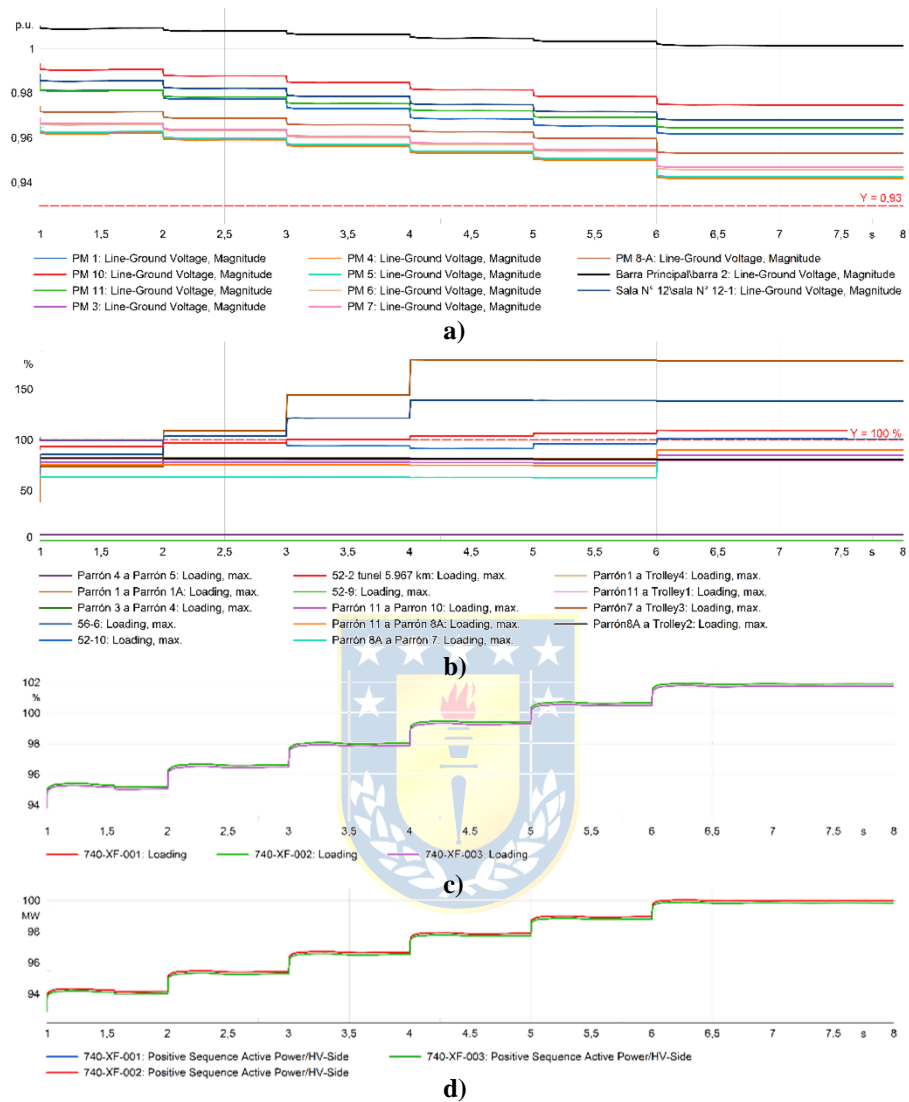


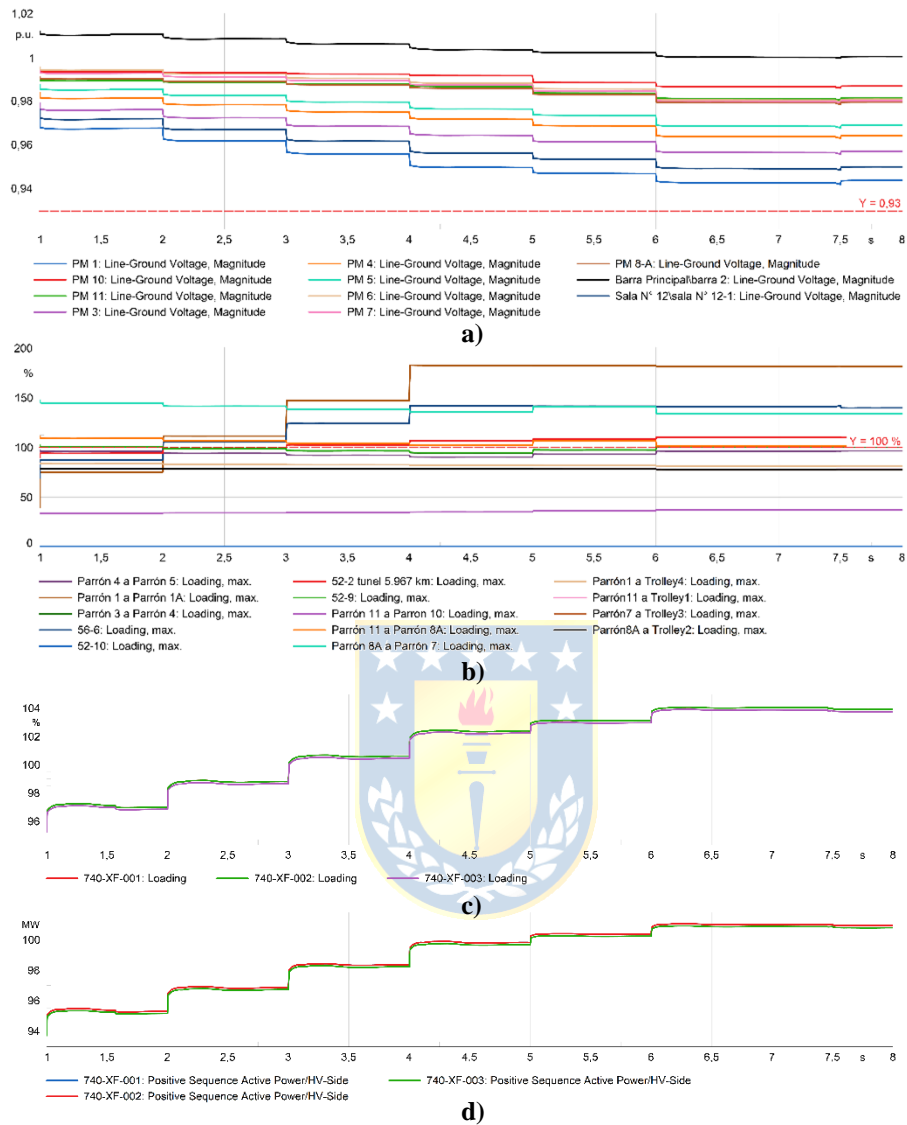
Figura 5.22 Incorporación cargadores eléctricos Caso B. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



C. Interruptor 52-10 Abierto

Este caso al encontrarse con los interruptores 52-10 abiertos, hace que el alimentador 52-9 el cual se le había añadido un alimentador en paralelo anteriormente tengan una mínima sobrecarga, al igual que las líneas entre el parrón 3 y parrón 4, con 0,4% y 0,2% de sobrecarga respectivamente. Se tiene también que la línea entre el parrón 8A y parrón 7 la cual ya había sido reforzada implementado una nueva línea en paralelo vuelva a presentar sobrecargas cercanas al 38%.

Figura 5.23 Incorporación cargadores eléctricos Caso C. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



D. Conclusión

El sistema se ha modelado con las mejoras propuestas en la sección 5.4.2. En relación con el voltaje en las barras, el sistema funciona de manera adecuada con la implementación del STATCOM en el parrón 10, aunque este está operando cerca de su capacidad máxima. Es importante tener en cuenta que, si en el futuro se planea añadir más cargas, como cargadores eléctricos o sistemas trolley adicionales, se requerirá un STATCOM de mayor capacidad para gestionar estas nuevas demandas.

Se ha añadido un alimentador en paralelo al 52-6 para aliviar la sobrecarga, siguiendo la misma estrategia implementada anteriormente. Del mismo modo, para la línea entre el parrón 1 y el parrón 1A, se ha añadido una línea en paralelo.

En cuanto a la línea entre el parrón 8A y el parrón 7, que ya había sido reforzada mediante la adición de una nueva línea en paralelo, se sugiere otra alternativa. En lugar de añadir otra línea adicional (lo que sumaría 3 líneas en total), se propone añadir dos líneas paralelas utilizando un tipo de cable de mayor capacidad como 3x750 MCM, y retirar de servicio la línea antigua. Esta opción optimizará la capacidad de transmisión y asegurará una distribución de carga más equitativa en el sistema. La infraestructura añadida se muestra en la sección 5.5.

Para el caso de los alimentadores 52-2/52-18, presentan una pequeña sobrecarga nuevamente, sin embargo, no es posible añadir nuevos alimentadores en paralelo, puesto que el túnel por donde pasan estos alimentadores ya se encuentra saturado.

En el contexto de la operación minera y electrificación de los camiones, la falta de información sobre la topología específica de los cargadores eléctricos complica el análisis de contenido armónico. Debido a la variabilidad de las topologías y la falta de detalles técnicos, no es posible determinar si los cargadores inyectan contenido armónico al sistema eléctrico.

Dado este desconocimiento, es prudente omitir el análisis de contenido armónico en esta etapa. La evaluación precisa de los armónicos requeriría información detallada sobre la configuración interna de los cargadores eléctricos, como la presencia de rectificadores, inversores u otros dispositivos electrónicos que puedan generar armónicos.

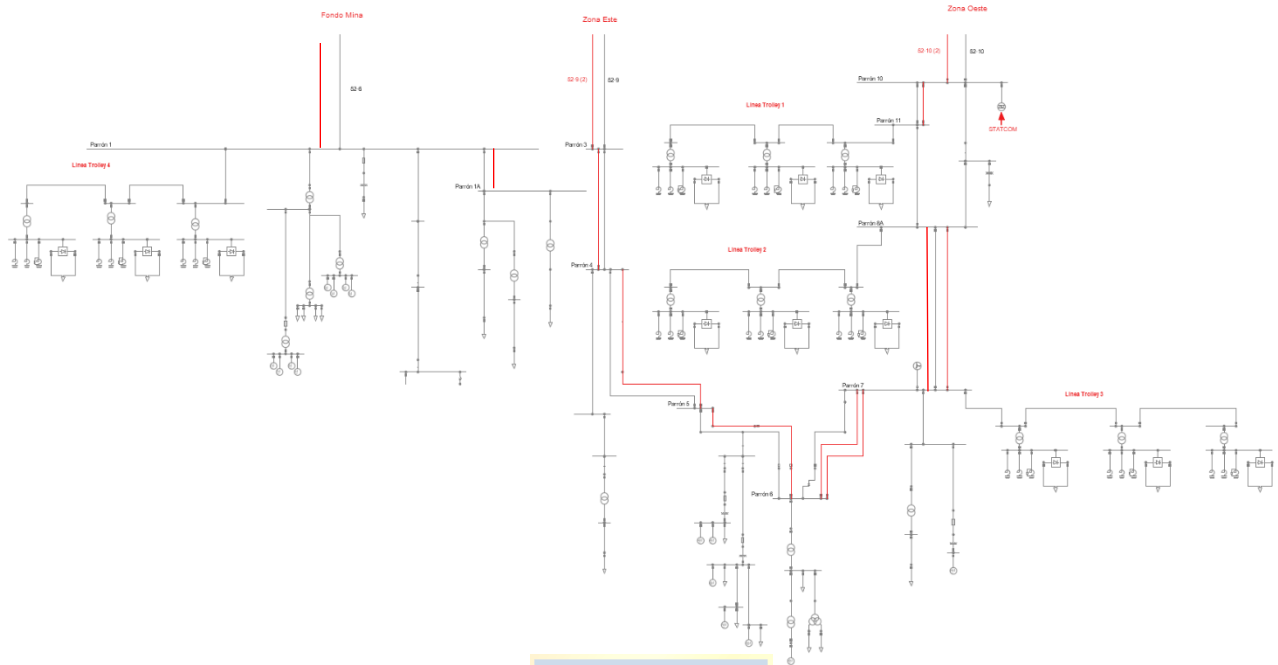
5.5. Implementación de Nueva Infraestructura

Como se puede apreciar en las figuras presentadas a continuación, el sistema, cuando no se tiene en cuenta el criterio N-1, demuestra su capacidad para operar con doce camiones conectado a las catenarias y con seis camiones cargándose simultáneamente. Esto se logra mediante la adición de nueva infraestructura en su sistema eléctrico, incluyendo alimentadores, líneas y STATCOM. Sin embargo, los problemas del sistema se centran en el sistema en 220 kV y en la Barra principal. En el sistema de 220 kV, los transformadores de subestación Piuquenes presentan una pequeña sobrecarga y en la barra principal, los alimentadores que unen la barra principal con la sala N° 12 presentan una sobrecarga no menor.

Tabla 5.4 Listado de infraestructura añadida para mejorar la calidad de suministro.

Elemento	Ubicación	Características
STATCOM	Parrón 10	30 MVA
Alimentador x 2	Barra Principal – Sala 12	3x500 MCM
Alimentador	Sala 12 – Parrón 3	3x750 MCM
Alimentador	Sala 12 – Parrón 10	3x750 MCM
Línea	Parrón 10 – Parrón 11	3x250 MCM
Línea	Parrón 3 – Parrón 4	3x750 MCM
Línea	Parrón 4 – Parrón 5	3x750 MCM
Línea	Parrón 5 – Parrón 6	3x500 MCM / 3x750 MCM
Línea x 2	Parrón 6 – Parrón 7	3x500 MCM
Alimentador	Sala 12 – Parrón 1	3x750 MCM
Línea	Parrón 1 – Parrón 1A	2x250 MCM
Línea x2	Parrón 8A – Parrón 7	2x750 MCM

Figura 5.24 Visualización de infraestructura nueva de sistema trolley en diagrama unilineal.



Para el caso A, se identifica una sobrecarga en los transformadores de la subestación Piuquenes y en los alimentadores que conectan la barra principal con la sala N° 12. En cuanto al loop minero, con la infraestructura adicional, el sistema funciona correctamente.

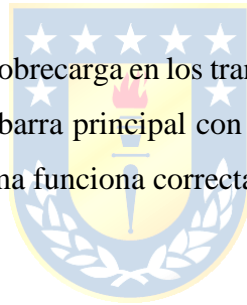


Figura 5.25 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso A. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.

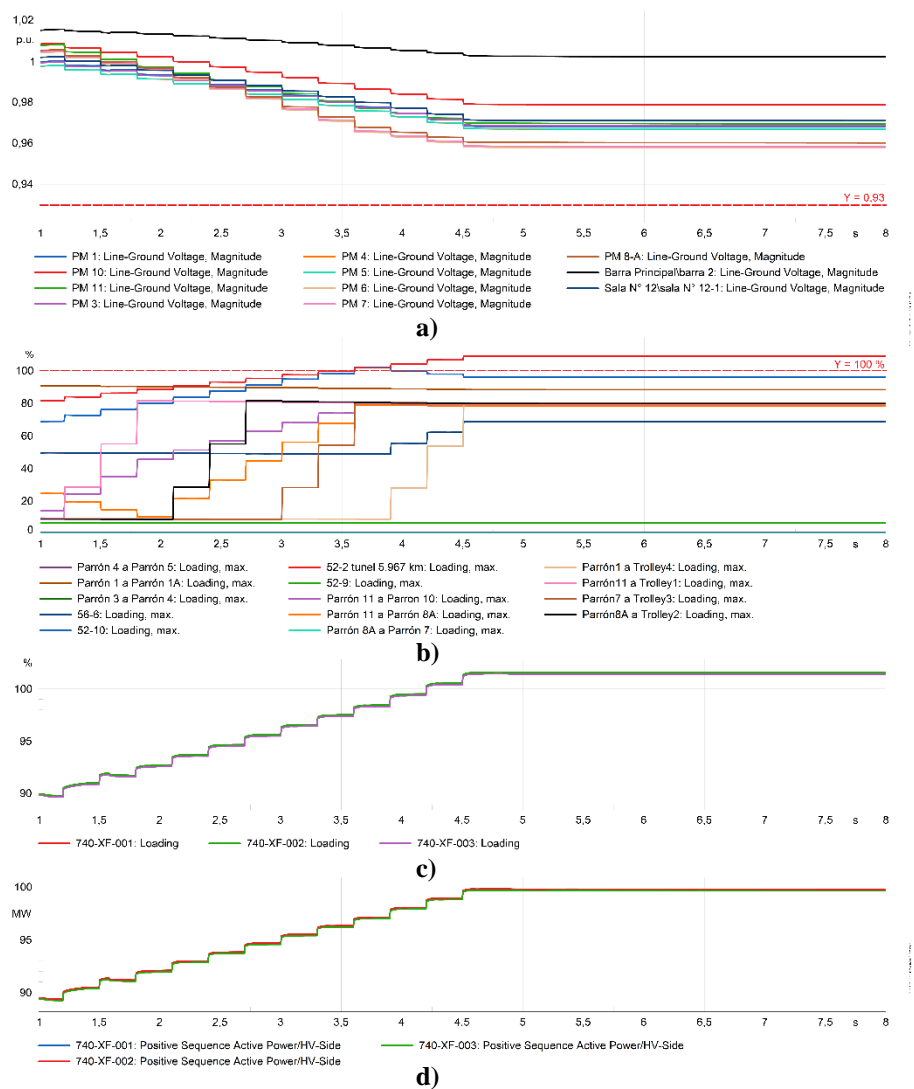
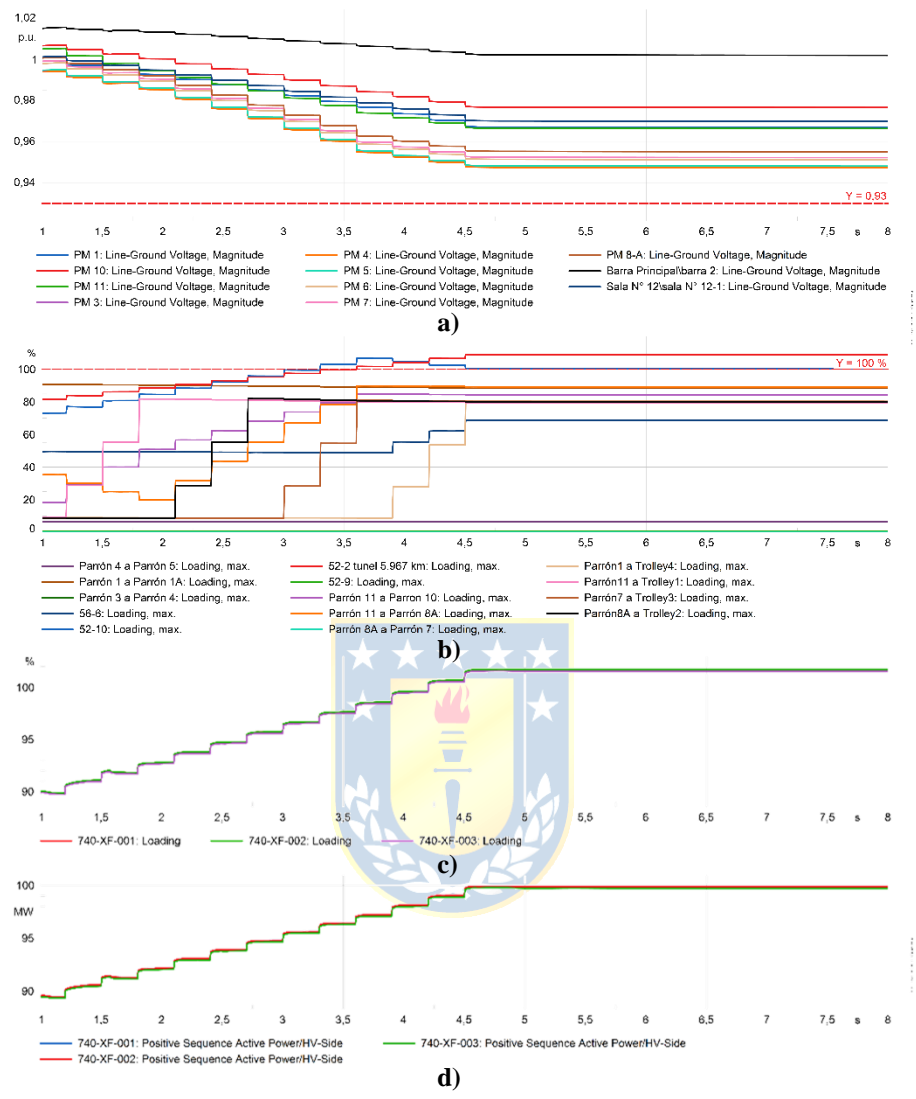
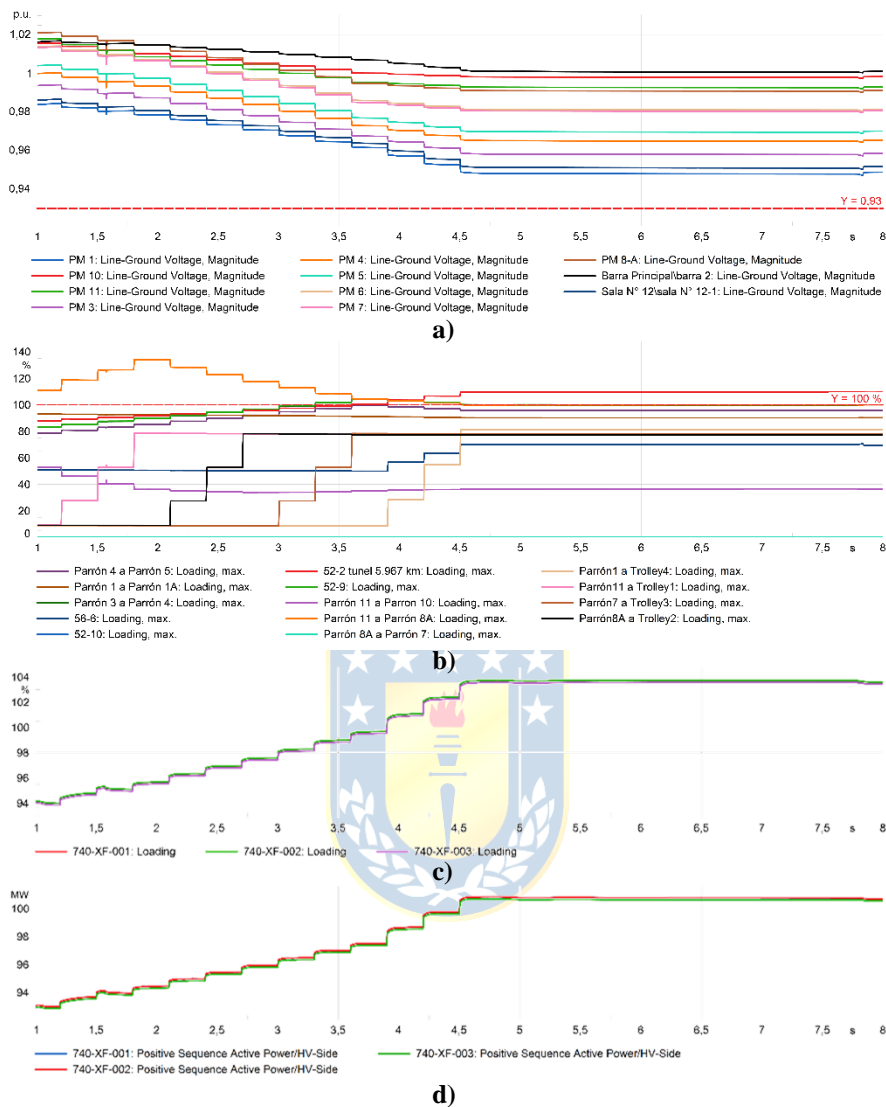


Figura 5.26 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso B. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



En el caso B, se observa la misma situación que se mencionó anteriormente en el caso A, con sobrecarga en los transformadores y alimentadores que van desde la barra principal hacia la sala N° 12. No obstante, en el loop minero, el alimentador 52-10 presenta una sobrecarga mínima del 0,4%. Esta carga adicional es insignificante y no afecta de manera significativa el sistema.

Figura 5.27 Simulación transición completa con nueva infraestructura caso C. **a)** Tensión en las barras. **b)** Sobrecarga en las líneas. **c)** Sobrecarga transformadores Piuquenes. **d)** Potencia transformadores Piuquenes.



Para el caso C, el alimentador 52-9 se encuentra en su límite de carga. Si se observa la Figura 5.27b, se presenta un pico de corriente en la línea que une el parrón 11 con el parrón 8A después de la conexión del tercer camión al sistema. Este fenómeno se explica por el aumento de la corriente cuando estos camiones se conectan, ya que las cargas que demandan potencia se encuentran al final del recorrido de la energía proveniente del alimentador 52-9. Posteriormente, al conectar las demás cargas, parte del flujo de potencia activa y la corriente se desvían hacia estas, lo que conlleva a una disminución en la corriente que pasa a través de esas líneas.

A pesar de esta variación, es importante destacar que las cargas siguen funcionando de manera óptima y el voltaje no se ve afectado. Este comportamiento se debe al efecto del STATCOM, que

inyecta potencia reactiva al sistema para mantener el voltaje de las barras en niveles óptimos. Gracias a esta regulación activa, el sistema puede manejar las fluctuaciones de carga y garantizar un suministro eléctrico estable incluso durante los picos de corriente.

5.6. Conclusiones

El sistema eléctrico actual de MLP no está preparado para realizar una transición masiva de su flota de camiones CAEX. Para abordar este desafío, es necesario implementar una nueva infraestructura, incluyendo la adición de nuevos alimentadores, líneas y un dispositivo STATCOM. A pesar de las mejoras propuestas, esta infraestructura adicional no resolvería por completo los problemas existentes. La sobrecarga en el sistema de 220 kV persiste y los alimentadores que conectan la barra principal con la sala N°12 continúan experimentando sobrecarga.

A partir del año 2024, entrará en funcionamiento una nueva subestación ubicada a 30 kilómetros de la subestación El Chacay, con una potencia de 1000 MVA. Para abortar la sobrecarga de los transformadores, una posible solución es conectar la nueva subestación Centella con la subestación Piuquenes mediante una línea de 31,5 kilómetros y añadir un nuevo transformador en la subestación Piuquenes. Esto garantizará que los transformadores no sufran sobrecargas y que, en caso de que uno de ellos salga de servicio, los otros puedan suplir la energía requerida.

Sin embargo, esta solución no aborda el problema de sobrecarga en los alimentadores que unen la barra principal con la sala N° 12. Para resolver tanto la sobrecarga como el criterio N-1 en el sistema de 220 kV y mejorar la situación de los alimentadores mencionados, se propone la conexión de la nueva subestación “Centella” mencionada anteriormente directamente a una nueva subestación que se ubicaría en la mina, equipada con dos transformadores de 150 MVA o 3 transformadores de 100 MVA. Esta solución no solo resolverá los problemas actuales, sino que también preparará el sistema para el futuro, cuando la flota sea 100% eléctrica, evitando posibles complicaciones.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los escenarios previamente mencionados, detallando la cantidad de camiones que pueden operar en cada caso y los puntos específicos de sobrecarga que podría experimentar el sistema en el caso de que todos los camiones estén operando. Es importante destacar que estos datos corresponden a situaciones en las que el sistema de correas regenerativas no está en funcionamiento.

Tabla 5.5 Resumen de los escenarios de operación.

Escenario	N° máximo de camiones operando TA o BEV	Cumplimiento criterio N-1	Puntos de sobrecarga ante la conexión total de camiones
Operación Normal (Parrón 6 abierto)	-	Si (al límite)	No presenta
Operación Normal (52-9 abierto)	-	Si (al límite)	No presenta
Operación Normal (52-10 abierto)	-	Si (al límite)	No presenta
Sistema Trolley (Parrón 6 abierto)	4 (TA)	No	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentadores 52-2 / 52-18 • Línea parrón 8 a parrón 7 • Línea parrón 11 a parrón 10 • Alimentador 52-10
Sistema Trolley (52-9 abierto)	2 (TA)	No	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentadores 52-2 / 52-18 • Línea parrón 8 a parrón 7 • Línea parrón 11 a parrón 10

Escenario	N° máximo de camiones operando TA o BEV	Cumplimiento criterio N-1	Puntos de sobrecarga ante la conexión total de camiones
			<ul style="list-style-type: none"> Alimentador 52-10
Sistema Trolley (52-10 abierto)	1 (TA)	No	<ul style="list-style-type: none"> Alimentadores 52-2 / 52-18 Alimentador 52-9 Líneas del loop minero (Software no converge)
Incorporación de Nueva Infraestructura			
Transición Completa (parrón 6 abierto)	12 (TA) y 6 (BEV)	No	<ul style="list-style-type: none"> Alimentadores 52-2 / 52-18 Transformadores Subestación Piuquenes
Transición Completa (52-9 abierto)	12 (TA) y 6 (BEV)	No	<ul style="list-style-type: none"> Alimentadores 52-2 / 52-18 Transformadores Subestación Piuquenes Alimentador 52-10 (0,4%)
Transición Completa (52-10 abierto)	12 (TA) y 6 (BEV)	No	<ul style="list-style-type: none"> Alimentadores 52-2 / 52-18 Transformadores Subestación Piuquenes

6. Conclusiones

6.1. Sumario

El informe inicia con un análisis detallado de diversas tecnologías para CAEX de alto tonelaje, evaluando su madurez tecnológica (TRL), costos de capital y operativos, así como sus emisiones. Luego, se establece un ranking de estas tecnologías para determinar las más adecuadas para implementarse en una faena minera, seleccionando el camión convencional, el camión diésel con asistencia trolley y el camión eléctrico a batería.

Luego, se detallaron varias consideraciones esenciales para la implementación de un sistema trolley en un rajo minero, como el ancho de los caminos y su mantenimiento. Se llevó a cabo una comparación exhaustiva entre distintos rajos (MLP, ANT, CEN-Encuentros y CEN-ESP) a través de una tabla que detalla las características técnicas de cada uno. Posteriormente, se creó una matriz de toma de decisiones, asignando puntuaciones a cada rajo según los criterios vistos en la tabla de características técnicas.

El informe presenta los requisitos de flota de tres compañías (MLP, ANT y CEN), adaptando las tecnologías según las necesidades de cada una. Se analizan los costos de inversión (CAPEX) y operativos (OPEX) para cada tecnología, considerando combustible, mantenimiento, energía, carbon tax y costos de motor, y se compara utilizando el Valor Actual de Costos (VAC) con una tasa del 8%. Esta comparación determina si la infraestructura trolley se amortiza en los 15 años proyectados.

Finalmente, se simula la electrificación del rajo en dos fases: primero, solo con línea trolley y luego, al incorporar los cargadores eléctricos de camiones BEV. Estas simulaciones se realizan para tres casos operativos del rajo y se evalúan con el sistema de correas regenerativas desactivado y con las cargas de la mina activadas, proporcionando una visión del impacto de la electrificación en el sistema eléctrico de la mina.

6.2. Conclusiones

- La implementación del sistema trolley en camiones diésel eléctricos reduce el consumo de combustible en aproximadamente un 30%, lo que conlleva a una significativa reducción de la huella de carbono. Además, este sistema permite la disminución de la flota debido al aumento de velocidad, generando un ahorro de 0,48 [M\$US] por cada camión. La inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) se comparan mediante el Valor Actual de Costos (VAC), demostrando un retorno a la inversión de la infraestructura trolley en el caso de los camiones diésel con asistencia trolley en el segundo año del proyecto debido a la reducción de flota. Es importante considerar que a medida que aumenta el precio del diésel o disminuye el costo de la electricidad, la implementación de sistemas diésel con asistencia trolley se vuelve aún más conveniente.
- En el caso de los camiones BEV, el costo actual hace que su implementación no sea factible. Sin embargo, se espera una disminución tanto en el costo de adquisición de estos camiones como en el precio de las baterías. Además, con el aumento proyectado en el consumo de energía en el rajo en los próximos años, existe la posibilidad de renegociar los precios de la energía, lo que podría favorecer la viabilidad de implementar estos camiones.
- En cuanto a la operación normal del sistema (sin sistema trolley ni camiones eléctricos), al operar con el sistema de correas regenerativas desactivado y con la carga máxima en la mina, el sistema en 220 kV no cumpliría con el criterio N-1. En este escenario, las líneas y los transformadores experimentan una ligera sobrecarga, lo que requiere la activación de un EDAC para aliviarla. La NTSyCS no acepta un aumento de consumo que comprometa la condición N-1.
- En cualquiera de los escenarios analizados, Minera Los Pelambres tiene capacidad de operar con un máximo de 1 camión conectado a catenarias únicamente si el sistema de correas regenerativas está en funcionamiento. En caso de que las correas regenerativas no estén operativas, el sistema no cumpliría con el criterio N-1.
Por otro lado, la operación con hasta tres camiones es posible únicamente bajo la condición de que el sistema esté operando en condiciones normales, es decir, con el interruptor del parrón 6 abierto, y que las correas regenerativas estén operativas. Esta configuración garantiza el cumplimiento del criterio N-1.

- El mayor problema que tiene el sistema es la capacidad de transmisión la cual se ve restringida por la infraestructura actual, abarcando la transformación (220/23 kV), transmisión (220 kV) y distribución (23 kV). La principal limitante para llevar a cabo una completa electrificación de los camiones en MLP es la saturación de esta infraestructura.
- Para lograr una transición completa en las operaciones de la mina, se requiere un refuerzo en la alimentación de alta tensión. Esto implica la extensión de una línea de 220 kV desde la nueva subestación Centella hasta la mina. Además, se planifica la creación de una nueva subestación en el rajo, conectada mediante dos alimentadores de 220 kV provenientes de la subestación Centella. La infraestructura de esta nueva subestación en el rajo incluiría tres transformadores (220/23 kV) de 100 MVA para garantizar la capacidad necesaria.

La modificación propuesta implica que los alimentadores 52-6, 52-9 y 52-10 se conectarían directamente desde la nueva subestación en el rajo, como se detalla en la Figura A.1.

Además del reforzamiento en alta tensión, es necesario fortalecer el loop minero en media tensión. Los detalles de esta infraestructura se encuentran especificados en la Tabla 5.4. Estas modificaciones son esenciales para respaldar las modificaciones previamente mencionadas.

- Se considera la posibilidad de incorporar equipos de almacenamiento de energía por baterías (BESS), los cuales tienen la capacidad de acumular energía durante periodos de baja demanda para posteriormente liberarla durante los momentos de alta demanda. Estos sistemas ofrecen la ventaja de suministrar energía a las catenarias de los sistemas trolley, así como de proveer energía durante las etapas de carga de los camiones eléctricos. En situaciones de interrupciones en la alimentación principal, los BESS pueden actuar como fuentes de respaldo inmediatas, asegurando la continuidad de las operaciones sin depender exclusivamente de la red eléctrica convencional.
- Como se mencionó anteriormente, al final de su ciclo de vida útil, las baterías de los camiones eléctricos son sustituidas. Estas baterías retiradas, si bien pueden no ser idóneas para impulsar los camiones, aún conservan capacidad residual que las hace aptas para ser reutilizadas como sistemas de almacenamiento estacionario. Esta alternativa se presenta como una opción económicamente viable para la mina,

permitiéndole aprovechar la capacidad remanente de las baterías retiradas y evitando así la necesidad de invertir en nuevas unidades de almacenamiento de energía.

6.3. Trabajos Futuros

- Realizar estudios de factibilidad detallados para la construcción de nuevas infraestructuras como la línea en 220 kV hacia la mina, considerando tanto los costos como los beneficios a largo plazo para determinar la viabilidad de estos proyectos.
- Investigar sistemas de almacenamiento de energía, como baterías de gran escala, para gestionar la viabilidad de la demanda y almacenar energía para su posterior uso durante periodos peak.
- Realizar un análisis dinámico detallado junto con un estudio minucioso de las componentes armónicas presentes en el sistema.



Referencias

- [1] Minera Los Pelambres. (s.f.). Mercado. Recuperado de: <https://web.pelambres.cl/que-hacemos/mercado/>.
- [2] Consejo Minero. (s.f.). Antofagasta Minerals. Recuperado de: <https://consejominero.cl/nosotros/socios/antofagasta-minerals/>.
- [3] Ley Número 20.780, 43 congreso, primera sesión. Artículo 8, Santiago, Chile.
- [4] J. Mazumdar, W. Koellner y R. Moghe, “Interface Issues of Mining Haul Trucks Operations on Trolley Systems”. Publicado en *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010 IEEE, pp 1158 – 1165, Feb 2010.
- [5] Brodkorb, A. Truck Trolley System, Siemens 2014.
- [6] W. G. Koellner, G. M. Brown, J. Rodríguez, J. Pontt, P. Cortes y H. Miranda, “Recent Advances in Mining Haul Trucks”, publicado en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp 312-329, abril 2004.
- [7] Ley N, A., & Nicolás, G. (s/f). Implementación del Impuesto Verde en Chile. Bcn.cl. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/26723/1/BCN___Implementacion_de_Impuesto_Verde_en_Chile.pdf
- [8] Subdepartamento Informatica-Comisión Nacional Energía. (s/f). *Cargo por Servicio Público - Comisión Nacional de Energía*. Comisión Nacional de Energía. <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/cargo-por-servicio-publico/>
- [9] Ministerio de Energía, (2023, 11 de julio). Gobierno ingresa proyecto de ley de Transición Energética que busca incentivar la inversión en el sector. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/gobierno-ingresa-proyecto-de-ley-de-transicion-energetica-que-busca-incentivar-la-inversion-en-el-sector>
- [10] Galindo A. (2016, 03 de noviembre). "Propuesta de una subestación rectificadora de tracción para cercanía de metro en la Quinta Región". Escuela de Ingeniería Eléctrica PUCV.
- [11] Castillo, O., Álvarez, R., & Domingo, R. (2020). Opportunities and barriers of hydrogen–electric hybrid powertrain vans: A systematic literature review. *Processes (Basel, Switzerland)*, 8(10), 1261. <https://doi.org/10.3390/pr8101261>

- [12] (2014, 14 de noviembre). Audi in new e-fuels project: Synthetic diesel from water, air-captured CO₂ and green electricity; “Blue Crude”. *Green Car Congress*. <https://www.greencarcongress.com/2014/11/20141114-audibluecrude.html>
- [13] CNE, (2020, septiembre). Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.
- [14] Días, G., & Contreras, J. (2021). *Servicios Diseños Mineros Prefactibilidad para Implementación de Tecnología AHS y TAR. Minera Los Pelambres*.
- [15] Greenpeace. (s/f). Cambio climático. Greenpeace España. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/>
- [16] Acuerdo de París, COP21, el 12 de diciembre de 2015, United Nations Climate Change, <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- [17] *Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual*. (s/f). Cochilco.
- [18] S. Arabi and P. Kundur, "A versatile FACTS device model for powerflow and stability simulations," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1944-1950, Nov. 1996.
- [19] L. Morán, C. Albistur and R. Burgos, "Multi-mega VAR passive filters for mining applications: Practical limitations and technical considerations," *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Addison.
- [20] (2022, noviembre). *Plan descarbonización abastecimiento*. Gerencia Corporativa de Abastecimiento. Antofagasta Minerals.
- [21] (2023, mayo 23). *AMSA Encuentros Dynamic Energy Transfer Modeling*. Caterpillar.

A. Anexos

A.1. Referencias de Sistemas Trolley empresa Siemens

A continuación se detallan las faenas en las que Siemens ha desarrollado sistemas trolley alrededor del mundo y sus características básicas.

Tabla A.1 Características de sistemas trolley aplicadas a faenas.

Faena	Extensión Trolley [km]	Voltaje [V]	Subestación [MVA]	Número de Subestaciones	Camiones Modificados	Año
Lumwana Mining Company, Zambia	4.0	2.400	10.0	5	27	2009
Barrick Goldstrike mine, USA	5.5	1.500	6.5	7	11	1994
Gécamines, Democratic Republic of Congo	3.5	1.200	2.4	4	22	1986/89
Rössing Mine Company, Namibia	8.5	1.200	3.0	5	30	1986
Palabora Mining Company, South Africa	8.0	1.200	5.0	7	80	1981

A.2. Tiempos ASARCO

- **Tiempo Nominal (TN):** Tiempo calendario de operación en la faena (turno, día, año).
- **Tiempo Disponible (TD):** Tiempo en el cual el equipo está en condiciones mecánicas adecuadas para realizar la labor para la cual fue diseñado.
- **Tiempo Mecánica (TM):** Tiempo comprendido desde que el equipo no es operable en su función de diseño, hasta que el equipo está en un área de trabajo o estacionamiento, y en condiciones de operación.
- **Tiempo Operativo (TO):** Tiempo en el cual el equipo está disponible con operador y en condiciones de ser usado.

- **Tiempo Reserva (TR):** Horas en las que la instalación o equipo, estando en condiciones de cumplir su objetivo, no es utilizado.
- **Tiempo Efectivo (TE):** Tiempo en el cual el equipo está operando y realizando la función para la cual fue diseñado.
- **Demoras Programadas (DP):** Corresponde al tiempo en que el equipo está detenido debido a las actividades de cambio de turno y colación del operador.
- **Demoras No Programadas (DNP):** Tiempo en que el equipo está detenido debido a situaciones operacionales no programadas o imprevistas [14].

A.3. Ahorro por Periodo y Acumulado con Reducción de Flota

A continuación se muestra detallado el ahorro por periodo y acumulado de las dos tecnologías respecto al caso base. Para el camión diésel con asistencia trolley se considera un total de 43 camiones, mientras que para el camión BEV se considera la totalidad de camiones pero se reduce el costo del CAPEX y el costo de la batería.



Tabla A.2 Ahorro por periodo y acumulado de DE + trolley con reducción de flota con respecto al caso base.

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC DE + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
Inversión		16,40	-16,40	-16,40
A1	283,22	270,84	12,38	-4,02
A2	56,10	42,93	13,17	9,15
A3	49,48	37,78	11,71	20,86
A4	83,22	66,97	16,25	37,11
A5	62,48	49,55	12,93	50,03
A6	44,01	33,98	10,03	60,06
A7	43,62	33,90	9,72	69,79
A8	51,60	41,03	10,57	80,36
A9	45,12	35,70	9,42	89,78
A10	40,65	31,97	8,67	98,45
A11	41,32	32,74	8,57	107,03
A12	25,48	19,33	6,15	113,17

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC DE + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
A13	38,14	30,41	7,73	120,90
A14	22,12	16,81	5,31	126,21
A15	33,13	26,45	6,69	132,90

Tabla A.3 Ahorro por periodo y acumulado de BEV + trolley con reducción costos con respecto al caso base.

Periodo	VAC Caso Base [M\$US]	VAC DE + Trolley [M\$US]	Ahorro [M\$US]	Ahorro Acumulado [M\$US]
Inversión		16,40	-16,40	-16,40
A1	283,22	355,30	-72,08	-88,48
A2	56,10	48,29	7,82	-80,66
A3	49,48	48,07	1,42	-79,25
A4	83,22	59,18	24,04	-55,20
A5	62,48	60,91	1,56	-53,64
A6	44,01	38,43	5,58	-48,05
A7	43,62	42,13	1,49	-46,56
A8	51,60	34,06	17,53	-29,03
A9	45,12	43,84	1,28	-27,75
A10	40,65	35,95	4,70	-23,05
A11	41,32	26,84	14,47	-8,58
A12	25,48	23,96	1,53	-7,05
A13	38,14	34,32	3,83	-3,23
A14	22,12	20,81	1,31	-1,92
A15	33,13	22,50	10,64	8,72

A.4. Datasheet Rectificador

Tabla A.4 Datasheet rectificador.

Datos Operativos	
Altitud de instalación sobre el nivel del mar	4000 m
Temperatura ambiente máxima	30°C para operación, 40°C para mantenimiento
Temperatura ambiente mínima	5°C
Humedad relativa	<90%
Voltaje de Suministro Auxiliar	
Para diagnóstico y mediciones	110 Vdc
Para iluminación y calefacción	230 Vac
Parámetros Técnicos del Rectificador	
Rectificador de diodos / rectificador de tiristores	Rectificador de diodos: TDR-29S/2.6
Normativas	IEC 60146; EN 50328
Potencia nominal de CC	4600 kW // 7500 kW
Voltaje directo nominal	1800 Vdc // 2600 Vdc (2590 V)
Voltaje directo convencional en vacío	1950 Vdc // 2800 Vdc
Voltaje directo real en vacío	≈1970 Vdc // ≈2820 Vdc
Depende de los parámetros del transformador	
Voltaje máximo permitido de CC	3000 Vdc
Corriente continua básica (100% carga)	2555 A // 2890 A; máx. 2900 A

A.5. Conexión directa del sistema 220 kV al sector mina

Figura A.1 Conexión sistema 220 kV directamente al sector mina.

