UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA DE 220 KV PARA LA MODERNIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN CANDELARIA – MINERA CANDELARIA"

Profesor guía: Jose Gómez Vega

Nombre alumno:

Bastián Lopez Fuentes

Sergio Leyton Soto

Copiapó, Chile 2025

UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

"ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA DE 220 KV PARA LA MODERNIZACIÓN DE LA SUBESTACIÓN CANDELARIA – MINERA CANDELARIA"

Profesor guía: Jose Gómez Vega

Nombre alumno:

Bastián Lopez Fuentes

Sergio Leyton Soto

Copiapó, Chile 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, quienes me apoyaron en este largo camino. Fueron tres largos años de mucha paciencia, y compromiso.

Sergio Leyton Soto

DEDICATORIA

Dedico todo mi esfuerzo a mi familia, por su respaldo incondicional, su paciencia y su permanente disposición a acompañarme en cada etapa de este proceso académico.

Bastián Lopez Fuentes

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todo el cuerpo docente de la Universidad de Atacama, quienes fueron parte de este proceso de formación.

Sergio Leyton Soto

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente la guía, disposición y compromiso de mis profesores, cuyo apoyo fue fundamental para el desarrollo de esta tesis. Extiendo también mi gratitud a mi compañero de trabajo, por su dedicación, colaboración y esfuerzo constante durante todo el proceso.

Bastián Lopez Fuentes

INDICE

Contenido

CAPÍTULO I 1
INTRODUCCIÓN 1
1.1 Contexto general de la subestación y la importancia del proyecto 1
1.2 Objetivo general y específicos 3
1.3 Alcance y limitaciones 4

CAPÍTULO II 5
MARCO TEÓRICO 5
2.1 Principios de funcionamiento de interruptores de potencia en alta tensión 5
2.1.1 El principio de operación se basa en dos etapas fundamentales: 6
2.2 Tecnologías de interruptores existentes. 6
2.2.1. Subestación eléctrica Candelaria. 6
2.2.2 Subestación eléctrica Nueva Cardones. 10
2.3 Necesidad de cambio. 13
2.4 Normativas aplicables 13

CAPÍTULO III 15
3.1 Resumen Estadístico de Fallas de Interruptores en Subestaciones de Chile (2020–2025) 15
3.1.1 Distribución por región 16
3.1.2 Distribución por tecnología del interruptor. 17
3.1.3 Interpretación técnica. 18
3.2 Fallas recurrentes en interruptores de potencia en alta tensión: 19
3.3 Problemas detectados: Obsolescencia, seguridad, confiabilidad 20
3.4 Situación Actual en Subestación Candelaria y nueva Cardones. 21
3.4.1 Descripción de los interruptores existentes y su historial de fallas. 23
3.4.2 Costos asociados a fallas 30

CAPÍTULO IV **31**
ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS **31**
4.1 Interruptores propuestos 31
4.1.1 Ventajas y desventajas de los interruptores propuestos 35
4.1.2 Rango de precios en el mercado 36
4.2 Criterios de comparación 36
4.3. Puntuación a los criterios. 39
4.3.1 Justificación de los valores iniciales de la matriz 39
4.3.2 Matriz de comparación pareada 42
4.4 Sistema de puntajes. 43
4.5 Resultados del análisis comparativo (tablas, gráficas, matrices de decisión). 44

CAPÍTULO V **46**
PROPUESTA DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA **46**
5.1 Justificación de la tecnología seleccionada. 46
5.2 Beneficios técnicos, económicos y ambientales para Minera Candelaria. 47

CAPÍTULO VI **49**
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **49**
6.1 Conclusiones del análisis. 49
BIBLIOGRAFIA **51**

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1: Subestación Cardones 2
Figura 1.2: Subestación Nueva Cardones 2

CAPÍTULO II

Figura 2.1: Plano saneamiento Subestación Candelaria. 7
Figura 2.2: Interruptor Alstom GL314 Subestación Candelaria 8
Figura 2.3: Interruptor Nuova Magrini Subestación Candelaria. 9
Figura 2.4: Plano Interruptor Nuova Magrini Subestación Nueva Cardones. 10
Figura 2.5: Interruptor Nuova Magrini Subestación Nueva Cardones 11

CAPÍTULO III

Figura 3.1: Grafico, Cantidad de fallas en Chile entre 2020-2025 16
Figura 3.2: Gráfico, Cantidad de fallas en chile por regiones entre 2020-2025 17
Figura 3.3: Gráfico, Cantidad de fallas por tecnología entre 2020-2025 18
Figura 3.4: Unilineal minera Candelaria. 22
Figura 3.5: Criterios de renovación 24
Figura 3.6: Diagrama de consumos eléctricos Minera Candelaria. 25

CAPÍTULO IV

Figura 4.1: Interruptor ABB 245 KV con medio SF_6. 32
Figura 4.2: Interruptor Siemens en vacío 33
Figura 4.3: Interruptor libre de SF6 GE 34
Figura 4.4: Gráfico, Resultado de valorización para elección de interruptor. 45

INDICE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1: Datos de placa Interruptor Alstom GL314 8
Tabla 2.2: Datos de placa Interruptor Nuova Magrini. 9
Tabla 2.3: Datos de placa Interruptor Nuova Magini 11
Tabla 2.4: Resumen de Interruptores. 12

CAPÍTULO III

Tabla 3.1: Cantidad de fallas en chile entre 2020-2025 15
Tabla 3.2: Cantidad de fallas por región entre 2020-2025 16
Tabla 3.3: Cantidad de fallas por tecnología entre 2020-2025 17
Tabla 3.4: Parámetros de consumos eléctricos. 26
Tabla 3.5: Criterios por años de servicio 29
Tabla 3.6: Costos asociados a una posible falla eléctrica de un Interruptor. 30

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1: Ventajas y desventajas de los interruptores propuestos. 35
Tabla 4.2: Rango de valores aproximando de interruptores propuestos. 36
Tabla 4.3: Confiabilidad v/s resto de los criterios 39
Tabla 4.4: Integración SCADA vs resto de los criterios 40
Tabla 4.5: Disponibilidad de repuestos v/s resto de los criterios 41
Tabla 4.6: Costo del ciclo de vida vs resto de los criterios 41
Tabla 4.7: Seguridad operacional vs resto de los criterios 41
Tabla 4.8: Valorización de matriz pareada. 42
Tabla 4.9: Criterio de puntuación 43
Tabla 4.10: Resultado de valorización 44

RESUMEN

El presente trabajo desarrollo un análisis comparativo de tecnologías de interruptores de potencia de 220 kV, con el objetivo de fundamentar la selección óptima para la modernización de la Subestación Candelaria, perteneciente a Minera Candelaria. El estudio se basa en la evaluación técnica, económica y ambiental de tres alternativas disponibles en el mercado: ABB (SF_6 optimizado), Siemens (vacío) e Hitachi (AirPlus).

A partir de un enfoque metodológico basado en criterios ponderados como lo es la confiabilidad, integración a sistemas SCADA, soporte técnico, costo de ciclo de vida, seguridad y sostenibilidad ambiental, se determinó que la tecnología ABB en SF_6 optimizado representa la opción más equilibrada para las condiciones operativas del sistema. Los resultados indican que esta alternativa ofrece una alta confiabilidad, amplia disponibilidad de repuestos, cumplimiento normativo (IEC 62271) y una reducción significativa del riesgo operativo respecto a los equipos actuales.

Además, se plantea un plan de mantenimiento basado en condición, gestión ambiental del gas SF_6 y proyección futura hacia tecnologías libres de gases de efecto invernadero. En conjunto, los resultados sustentan una decisión técnica que favorece la continuidad, seguridad y sostenibilidad del suministro eléctrico en la faena minera.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of 220 kV power circuit breaker technologies, aimed at supporting the optimal selection for the modernization of the Candelaria Substation, operated by Minera Candelaria. The research is based on the technical, economic, and environmental evaluation of three market alternatives: ABB (optimized SF_6), Siemens (vacuum), and Hitachi (AirPlus). Using a weighted criteria methodology —reliability, SCADA integration, technical support, life-cycle cost, safety, and sustainability— the analysis determined that the ABB optimized SF_6 technology offers the most balanced solution for the operational requirements of the system. Results show that this alternative ensures high reliability, availability of spare parts, compliance with IEC 62271 standards, and a significant reduction of operational risk compared to the current equipment. Furthermore, a condition-based maintenance plan, SF_6 gas environmental management, and future projection toward eco-friendly technologies are proposed. Overall, the results support a technically sound decision that enhances the reliability, safety, and sustainability of the electrical supply in the mining operation.

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general de la subestación y la importancia del proyecto

La minería del cobre en Chile demanda un suministro eléctrico altamente confiable, dado que las interrupciones impactan directamente en la continuidad operativa, los costos de producción y la seguridad de los trabajadores. En este escenario, la **Subestación Candelaria**, operada por Minera Candelaria, constituye un punto crítico en la red de 220 kV que abastece los procesos productivos de la faena y que a lo largo de sus 30 años ha ido creciendo y demandando mayor potencia eléctrica.

Los interruptores de potencia actualmente en servicio corresponden a equipos **Alstom GL314 y Nuova Magrini Galileo MHMe-IP**, instalados entre 2012 y 1992, los cuales han superado la vida útil recomendada por el fabricante (25–30 años). Estos equipos presentan obsolescencia tecnológica, desgaste mecánico y restricciones en la disponibilidad de repuestos**,** además de operar con tecnologías basadas en SF_6 convencional, cuya huella ambiental es significativa.

En este contexto, la compañía ha abierto un proceso de licitación para el reemplazo de los interruptores de potencia de 220 kV, estableciendo requisitos técnicos y normativos que incluyen cumplimiento IEC, integración a sistemas SCADA, disponibilidad de repuestos, planes de mantenimiento y reducción de impacto ambiental**.**

El presente estudio se orienta a fundamentar, desde un enfoque académico y técnico, la selección de la mejor alternativa tecnológica para la modernización de los interruptores, comparando tres opciones disponibles en el mercado: ABB (SF_6 optimizado), Siemens (vacío) e Hitachi (AirPlus)**.**

Figura 1.1: Subestación Cardones

Figura 1.2: Subestación Nueva Cardones

1.2 Objetivo general y específicos

- ✓ **Objetivo General:**

Evaluar y comparar tecnologías de interruptores de potencia de 220 kV, evaluando aspectos técnicos, operativos y de confiabilidad, para justificar la elección óptima en la modernización de la Subestación Candelaria.

- ✓ **Objetivos específicos:**

- Describir las características técnicas y operativas de los interruptores actualmente instalados.
- Analizar las principales tecnologías disponibles en interruptores de potencia (SF_6, vacío, libres de gases de efecto invernadero).
- Comparar el desempeño en términos de confiabilidad, mantenimiento, costo de ciclo de vida, seguridad operativa y sostenibilidad ambiental.
- Evaluar la compatibilidad de las tecnologías con la integración a sistemas de protección y control (SCADA).
- Justificar la elección de la tecnología más adecuada para la continuidad y eficiencia del sistema eléctrico de la minera.

1.3 Alcance y limitaciones

El estudio se centra en la comparación técnica y económica de tecnologías de interruptores de 220 kV aplicables a los interruptores de Subestación Candelaria y Cardones. Se consideran criterios de confiabilidad, seguridad, costo de ciclo de vida y sostenibilidad ambiental.

El alcance no incluye la ejecución física del reemplazo ni pruebas experimentales en terreno, dado que la subestación se encuentra energizada y no se dispone de interruptores para ensayos prácticos. El análisis se basa en documentación técnica, bibliografía especializada, normativas aplicables y consultas a expertos

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

El presente capítulo presentó el marco teórico que sustentó el desarrollo del estudio. Se abordaron los principios fundamentales de los sistemas eléctricos de potencia en alta tensión, el funcionamiento de los interruptores de potencia, las tecnologías disponibles (SF_6, vacío y alternativas libres de SF_6), así como la normativa técnica y de seguridad aplicable a instalaciones de 220 kV. El objetivo de este capítulo fue proporcionar los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión de los análisis realizados en los capítulos posteriores.

2.1 Principios de funcionamiento de interruptores de potencia en alta tensión

Los interruptores de potencia en alta tensión constituyen un elemento esencial dentro de los sistemas eléctricos de transmisión y distribución. Su función principal es la interrupción de corrientes eléctricas en condiciones normales de operación y, especialmente, durante fallas, tales como cortocircuitos, sobrecargas o maniobras de mantenimiento.

A diferencia de un interruptor convencional de baja tensión, los interruptores de alta potencia deben enfrentarse a corrientes de falla que por muy bajas o altas que sean pueden comprometer un proceso productivo. En este escenario, la dificultad radica en que, al abrirse los contactos móviles y fijos, se produce un arco eléctrico. Dicho arco se caracteriza por una altísima temperatura (del orden de los miles de grados Celsius), ionización del medio y gran poder destructivo.

2.1.1 El principio de operación se basa en dos etapas fundamentales.

a) Apertura de contactos: Al detectarse la orden de desconexión, los contactos del interruptor se separan, iniciando la formación del arco.
b) Extinción del arco eléctrico: Es la etapa crítica, donde interviene el medio de interrupción (gas, vacío o aire), que debe garantizar una rápida recuperación del aislamiento entre contactos.

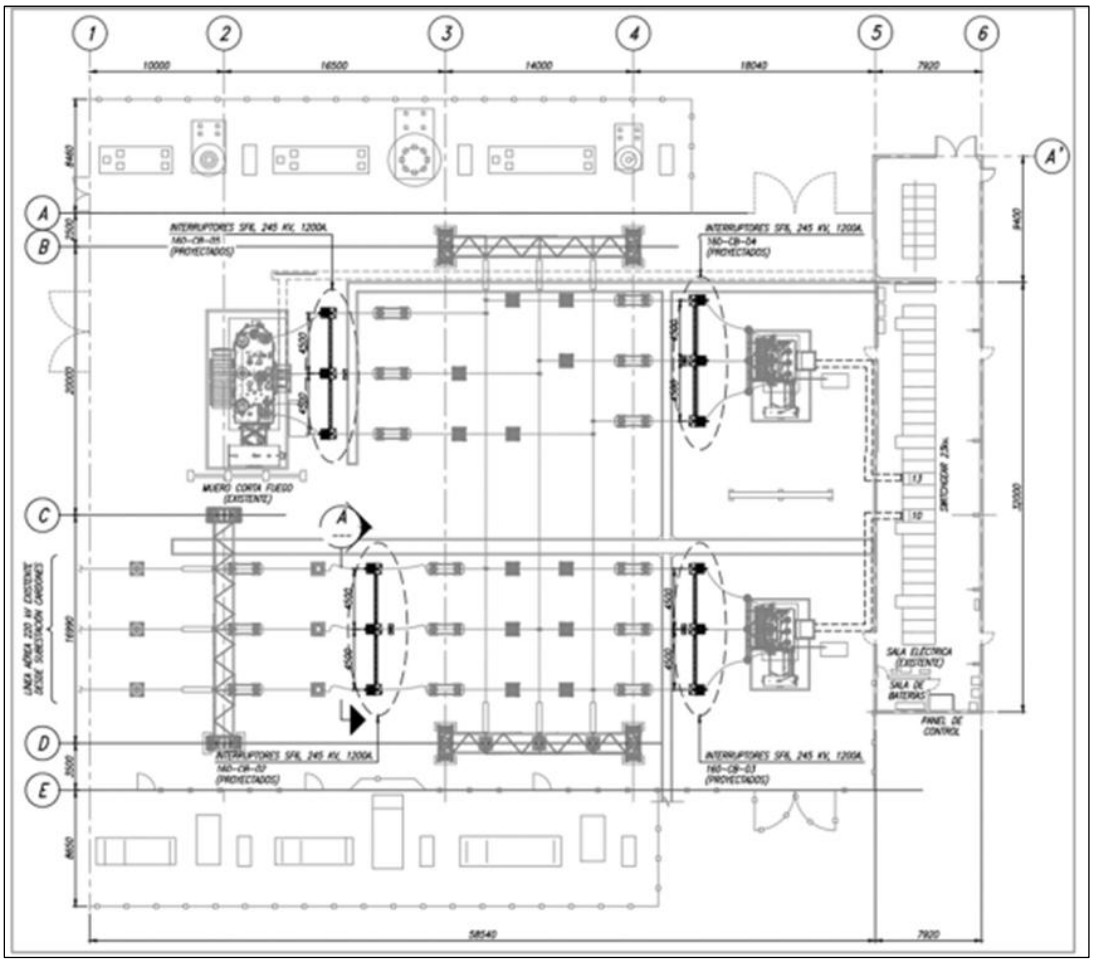
La eficacia del interruptor está directamente relacionada con su capacidad de corte, medida en kA, y con el tiempo de despeje de la falla, dos factores que juegan un papel primordial en caso de alguna interrupción repentina del sistema. Una correcta extinción del arco protege no solo al interruptor en sí, sino también al resto de los equipos conectados en la red (transformadores, generadores, líneas de transmisión, etc.), evitando daños de gran magnitud, lo cual se desea evitar ya que este costo por falla a los equipos dañados puede llevar a una detención parcial o total de la producción.

2.2 Tecnologías de interruptores existentes.

2.2.1. Subestación eléctrica Candelaria.

La Subestación Candelaria, operada por Minera Candelaria, cuenta actualmente con cuatro interruptores de potencia de 220 kV de fabricación Alstom y Nuova Magrini Galileo.

Figura 2.1: Plano saneamiento Subestación Candelaria.



- **Alstom GL314 (instalados en 2012):** Interruptor con tecnología SF_6, tensión nominal de 245 kV, corriente nominal de 3150 A y poder de corte de 40 kA.

  De este tipo de interruptor existe solo uno instalado en el Transformador N°3, de TAG 160-XF-003

Figura 2.2: Interruptor Alstom GL314 Subestación Candelaria

Tabla 2.1. Datos de placa Interruptor Alstom GL314

1	Fabricante	Alstom
2	Tipo	GL314
3	Año	2012
4	Voltaje Nominal	245 kV
5	Corriente Nominal	3150 A
6	Frecuencia	50 Hz
7	Poder de cortocircuito	40 kA
8	Tiempo de cortocircuito	3s
9	Bill	1050 kVp
10	Ciclo de operación	0-0,3seg C0-3ms..C0
11	Peso de gas por polo	9kg
12	Presión nominal gas	0,65 Mpa a 20°C
13	Normas	IEC

- **Nuova Magrini Galileo 245-MHMe-IP (instalados en 1992):** Interruptores con tecnología SF_6, tensión nominal de 245 kV, corriente nominal de 1200 A y poder de corte de 40 kA.

De este modelo se encuentran instalados 3 en subestación Candelaria. Uno en cada Transformador XF01/XF02 y un tercero que es el principal.

Figura 2.3: Interruptor Nuova Magrini Subestación Candelaria.

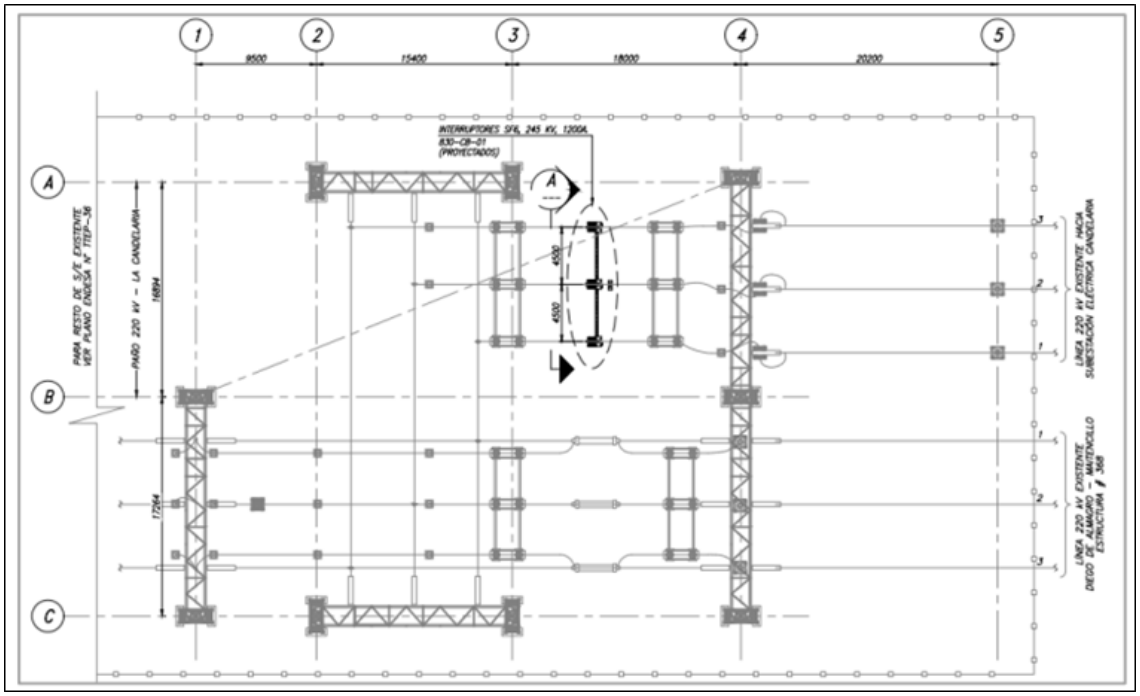
Tabla 2.2. Datos de placa Interruptor Nuova Magrini.

1	Fabricante	Nuova Magrini
2	Tipo	245 MHMe-1P
3	Año	1992
4	Voltaje Nominal	245 kV
5	Corriente Nominal	1200 A
6	Frecuencia	50 Hz
7	Capacidad interrupción simétrica	40 kA
8	Bill	1050 kVp
9	Ciclo de operación	0-0,3 seg C0-1min..C0
10	Peso de gas por polo	9kg
11	Presión nominal gas	0,6 Mpa a 20°C
12	Normas	IEC

2.2.2 Subestación eléctrica Nueva Cardones.

En subestación Cardones se cuenta con un interruptor fabricante Nuova Magrini Galileo, tomado desde uno de sus paños.

Figura 2.4: Plano Interruptor Nuova Magrini Subestación Nueva Cardones.



- **Nuova Magrini Galileo 245-MHMe-IP (instalado en 1992):** Interruptor con tecnología SF_6, tensión nominal de 245 kV, corriente nominal de 1200 A y poder de corte de 40 kA.

Figura 2.5: Interruptor Nuova Magrini Subestación Nueva Cardones

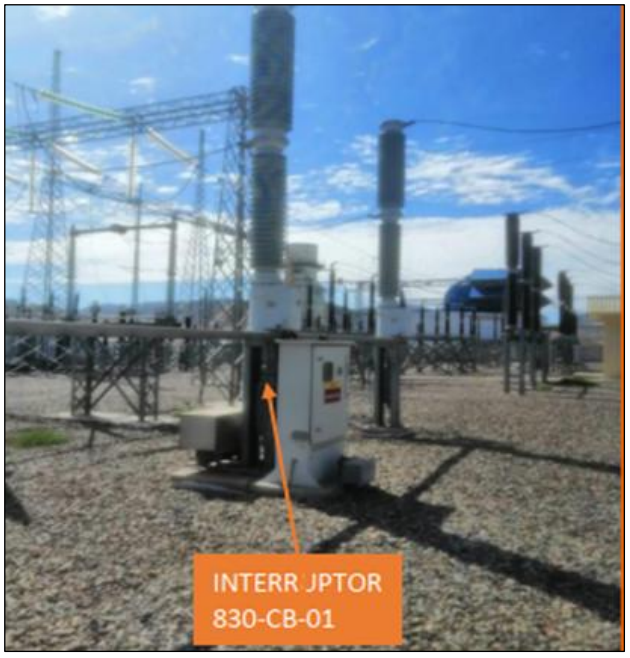


Tabla 2.3. Datos de placa Interruptor Nuova Magini

1	Fabricante	Nuova Magrini
2	Tipo	245 MHMe-1P
3	Año	1992
4	Voltaje Nominal	245kV
5	Corriente Nominal	1200A
6	Frecuencia	50 Hz
7	Capacidad interrupción simétrica	40 kA
8	Bill	1050 kVp
9	Ciclo de operación	0-0,3seg C0-1min..C0
10	Peso de gas por polo	9 kg
11	Presión nominal gas	0,6 Mpa a 20°C
12	Normas	IEC

Ambos modelos en las distintas ubicaciones emplean SF_6 como medio aislante y de extinción de arco, y aunque han demostrado un desempeño confiable en su vida útil, presentan importantes limitaciones:

- Los equipos Nuova Magrini MHMe-IP ya superan los 30 años de servicio, excediendo el rango de vida útil recomendado por el fabricante (20–25 años).
- El equipo GL314, si bien es más reciente, se enfrenta a problemas de obsolescencia tecnológica, especialmente en cuanto a integración con sistemas modernos de control (SCADA) y disponibilidad de repuestos.
- Ambos fabricantes, ya no produce ni brinda soporte extendido a estos modelos, lo que incrementa los riesgos de indisponibilidad y los costos de mantenimiento correctivo. Cabe mencionar que ambas tecnologías emigraron a GE. Pero por la antigüedad de ambos modelos hoy en día Minera candelaria enfrenta problemas de respuestas.

Estas condiciones reflejan la necesidad urgente de modernizar los interruptores de potencia de la subestación, ya que la confiabilidad del suministro eléctrico es crítica para la continuidad operativa de los procesos mineros**.**

Tabla 2.4. Resumen de Interruptores.

Item	Subestación eléctrica	Fabricante	Cantidad	Tensión	Corriente nominal	Presión Gas(SF6)
1	Candelaria	Nuova Magrini Galileo	3	220kV/23kV	1200A	87 psi
		Alstom	1	220kV/23kV	3150A	94 Psi
2	Cardones	Nuova Magrini Galileo	1	220kV/23kV	1200A	87 Psi

2.3 Necesidad de cambio

El análisis de la situación actual evidencia que los interruptores de la Subestación Candelaria ya no cumplen con los estándares modernos de confiabilidad, seguridad operativa ni sostenibilidad ambiental. La transición hacia nuevas tecnologías es imprescindible para:

- Garantizar la continuidad del suministro eléctrico en la operación minera.
- Asegurar la compatibilidad con sistemas SCADA y de protección modernos.
- Cumplir con normativas internacionales (IEC 62271, IEC 62271-203) y regulaciones chilenas.
- Reducir el riesgo operacional asociado a fallas y la dependencia de repuestos obsoletos.

En este escenario, el reemplazo mediante un proceso de licitación permite evaluar comparativamente las alternativas tecnológicas disponibles, orientando la decisión hacia la opción más conveniente para los intereses estratégicos y operativos de Minera Candelaria.

2.4 Normativas aplicables

Las normativas para interruptores de alta tensión incluyen las normas internacionales IEC 62271-100 y IEC 62271-203 para el diseño y características de los interruptores, así como normativas nacionales y sectoriales chilenas, como el DS 132 y DS 72, que establecen los requisitos de seguridad eléctrica y de operación en instalaciones de alta tensión, especialmente en el contexto minero.

a) **Normas Internacionales (IEC): IEC 62271-100:**

Proporciona los requisitos generales para interruptores automáticos de alta tensión, incluyendo el diseño, pruebas, rendimiento, y guías para su selección, instalación, operación y mantenimiento.

IEC 62271-203: Se enfoca específicamente en las características y especificaciones de los interruptores aislados en gas (GIE) utilizados en sistemas de alta tensión, es decir, aquellos para tensiones superiores o iguales a 72.5 kV.

b) Normativa Minera DS 132 y DS 72 (Decretos Supremos): Estas normativas establecen exigencias específicas de seguridad industrial aplicables a las instalaciones eléctricas dentro de las faenas mineras chilenas, complementando los requisitos generales.

- **IEC 62271-100:** Requisitos generales para interruptores de alta tensión.
- **IEC 62271-203:** Interruptores aislados en gas para tensiones ≥ 72,5 kV.
- **Normativa minera (DS 132 y DS 72):** Exigencias de seguridad industrial aplicables a instalaciones eléctricas en faenas mineras.

CAPÍTULO III
FALLAS DE INTERRUPTORES Y JUSTIFICACIÓN

El presente capítulo presenta el estado actual del sistema eléctrico asociado a la Subestación Candelaria, incluyendo la configuración de la subestación, los transformadores de potencia, los interruptores existentes y su historial operativo. Asimismo, se analizaron antecedentes de fallas, mantenimientos y restricciones operacionales relevantes. Esta caracterización permitió identificar las limitaciones del sistema actual y justificó la necesidad de evaluar alternativas de modernización.

3.1 Resumen Estadístico de Fallas de Interruptores en Subestaciones de Chile (2020–2025)

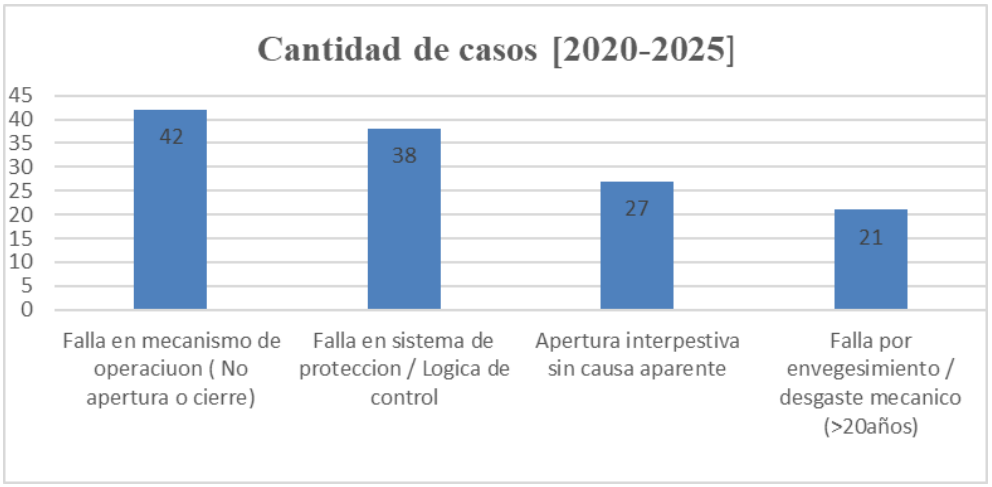
Los siguientes datos se basan en los Estudios para Análisis de Falla (EAF) publicados por el Coordinador Eléctrico Nacional entre 2020 y 2025. El objetivo es presentar una visión cuantitativa y técnica sobre los modos de falla más frecuentes en interruptores de subestaciones chilenas, así como su distribución geográfica y tecnológica.

Tabla 3.1: Cantidad de fallas en chile entre 2020-2025

Tipo de falla	Cantidad de casos (2020–2025)	Porcentaje %	Descripción / Ejemplo real (fuente CEN)
Falla en mecanismo de operación (no apertura o cierre)	42	28	Ej. EAF 410/2023 y 236/2025 – interruptor no cierra o se traba durante maniobra.
Falla en sistema de protección / lógica de control	38	25	Ej. EAF 089/2025 (apagón nacional) – apertura intempestiva por teleprotección.
Apertura intempestiva sin causa aparente (falsa orden)	27	18	EAF 388/2024 – disparo no programado de interruptor 52CT1.

Falla por envejecimiento / desgaste mecánico (>20 años)	21	14	Subestaciones con interruptores Alstom 1990–2000 reportan fallas repetidas.

Figura 3.1 Grafico, Cantidad de fallas en Chile entre 2020-2025



3.1.1 Distribución por región

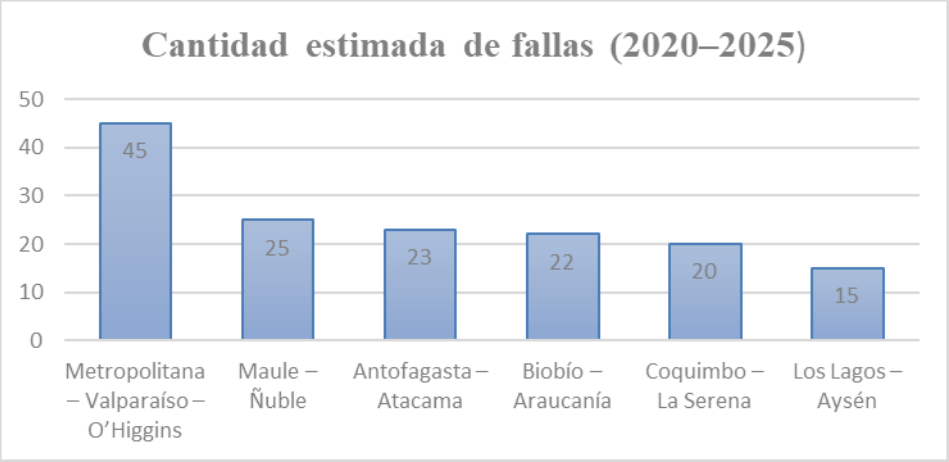
A continuación, se presenta por regiones en número de fallas ocurridas en los últimos 5 años en chile, en donde se recogieron un total de 150 fallas.

Tabla 3.2: Cantidad de fallas por región entre 2020-2025

Región	**Cantidad estimada de fallas (2020–2025)**	**Porcentaje**	**Subestaciones destacadas**
Metropolitana – Valparaíso – O'Higgins	45	30 %	Quillota, Quintero, Polpaico, Cerro Navia
Maule – Ñuble	25	17 %	Piduco, Santa Elvira, Itahue
Antofagasta – Atacama	23	15 %	Mejillones, Pan de Azúcar, Candelaria

Biobío – Araucanía	22	15 %	Charrúa, Chiguayante, Collipulli
Coquimbo – La Serena	20	13 %	Punitaqui, Pan de Azúcar, Illapel
Los Lagos – Aysén	15	10 %	Puerto Montt, Ancud

Figura 3.2: Gráfico, Cantidad de fallas en chile por regiones entre 2020-2025



3.1.2 Distribución por tecnología del interruptor.

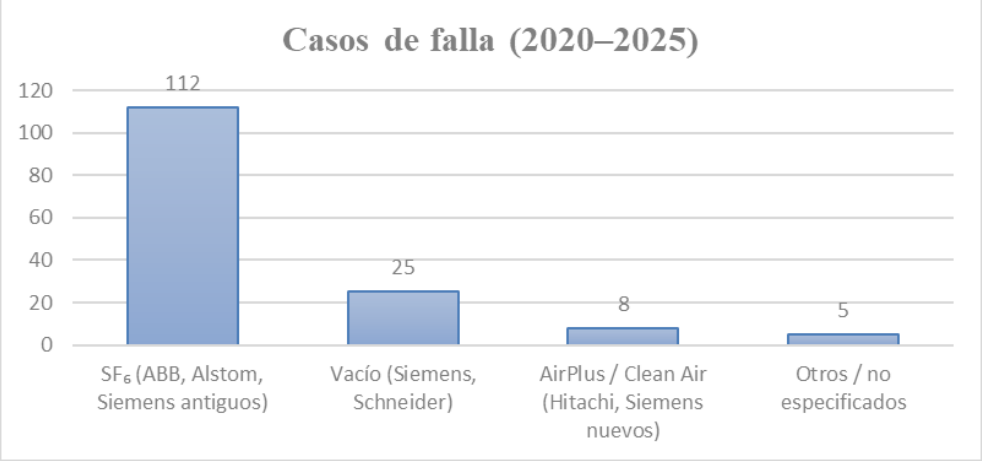
A continuación, se presenta las tecnologías con más fallas a nivel país durante los últimos 5 años.

Tabla 3.3: Cantidad de fallas por tecnología entre 2020-2025

Tipo de tecnología	Edad promedio de equipos	Casos de falla (2020–2025)	Porcentaje	Observaciones
SF_6 (ABB, Alstom, Siemens antiguos)	18–25 años	112	75 %	Alta confiabilidad, pero con envejecimiento y fugas de gas.

Vacío (Siemens, Schneider)	5–10 años	25	17 %	Muy pocas fallas, casi todas de control o enclavamiento.
AirPlus / Clean Air (Hitachi, Siemens nuevos)	<5 años	8	5 %	Solo fallas en pruebas o puesta en servicio.
Otros / no especificados	—	5	3 %	Datos incompletos.

Figura 3.3: Gráfico, Cantidad de fallas por tecnología entre 2020-2025



3.1.3 Interpretación técnica.

Más del 50 % de las fallas se concentran en problemas de mecanismos y sistemas de control, lo que demuestra la necesidad de renovación tecnológica y mantenimiento predictivo.

La mayoría de los equipos con fallas tiene más de 20 años de operación, reforzando la importancia del criterio 'vida útil remanente'.

Las regiones con climas extremos muestran mayor recurrencia de fallas externas, mientras que las tecnologías libres de SF_6 presentan baja tasa de fallas aunque aún con poca penetración.

3.2 Fallas recurrentes en interruptores de potencia en alta tensión:

a) Sistemas auxiliares de mando y control.

- **Relés de apertura y cierre**: Fallas por envejecimiento de contactos eléctricos, sobrecalentamiento o problemas de calibración.

- **Bobinas de disparo:** Pueden presentar quemaduras o pérdida de fuerza magnética.

- **Circuitos de control auxiliares**: Falsos contactos, desgaste de bornes o fallas en cableado.

b) Sistema de gas aislante (SF_6)

- **Fugas leves de gas**: Por deterioro de empaquetaduras, sellos o válvulas.

- **Disminución de presión nominal**: Obliga a realizar recargas frecuentes.

- **Contaminación del gas (humedad o partículas):** Puede reducir la rigidez dieléctrica, aunque esto es más raro con mantenimientos regulares.

c) Mecanismos de operación.

- **Desgaste de componentes mecánicos**: Resortes, palancas y rodamientos.

- **Retrasos en la secuencia de apertura/cierre:** Afectan los tiempos de despeje de falla.
- **Necesidad de lubricación frecuente:** Si no se cumple, se produce fricción excesiva y fallas en la velocidad de disparo.

d) Componentes eléctricos de potencia.

- **Carbonización de contactos principales**: Por interrupciones sucesivas de cortocircuito.
- **Problemas de alineación de contactos**: Que generan sobrecalentamientos.

e) Otros problemas reportados en campo.

- **Instrumentación asociada (manómetros, sensores de densidad de SF_6):** Fallas en la lectura pueden generar alarmas falsas o impedir una detección temprana de fugas.
- **Obsolescencia de repuestos:** Mayor tiempo de indisponibilidad cuando ocurre una falla, incluso si esta no es crítica.

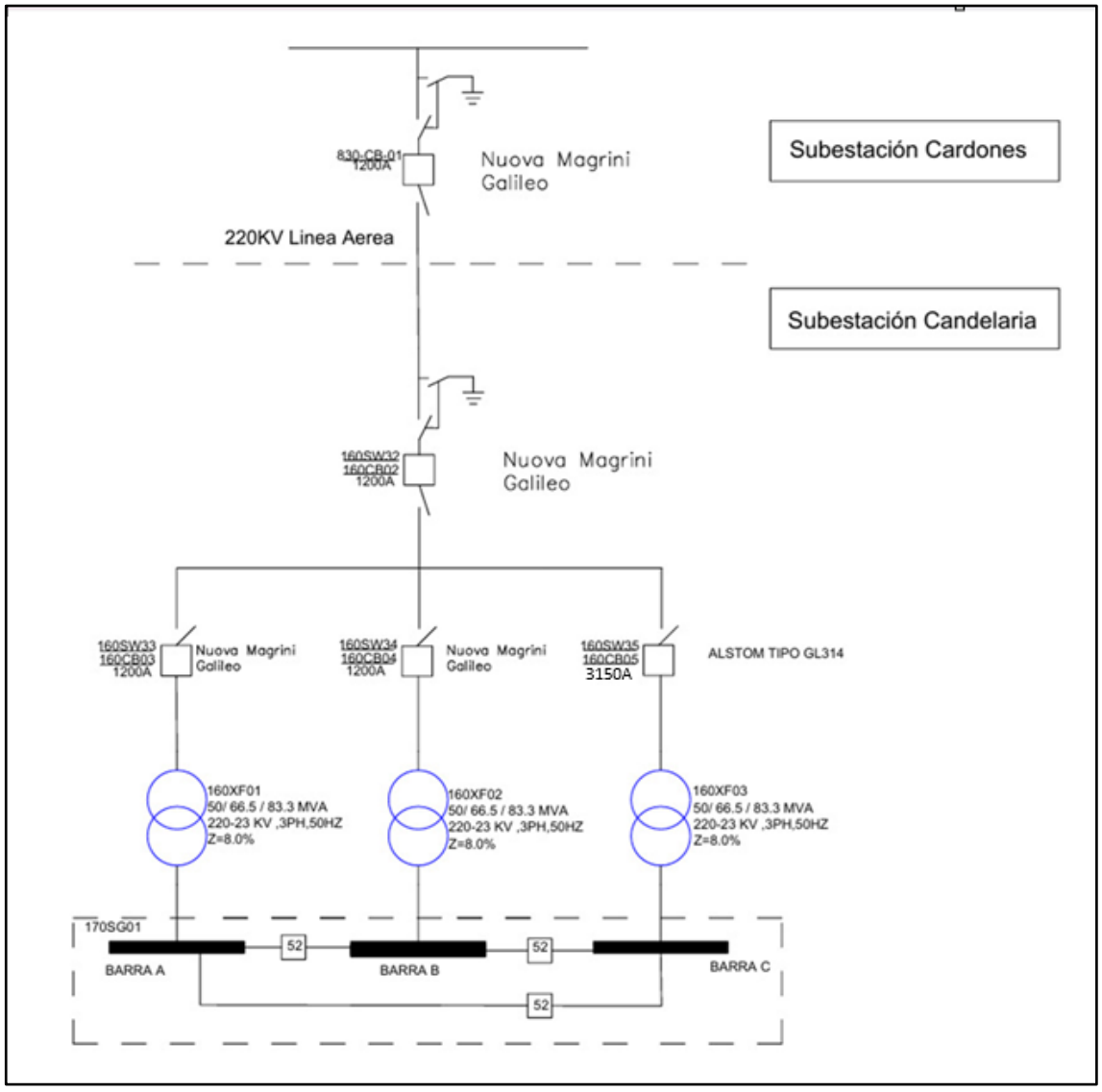
3.3 Problemas detectados: Obsolescencia, seguridad, confiabilidad

- **Obsolescencia tecnológica:** diseños antiguos sin integración digital ni monitoreo avanzado de gases.
- **Seguridad operativa reducida:** riesgo de disparos intempestivos o fallas de interrupción durante corrientes de falla.
- **Confiabilidad limitada:** tiempos de indisponibilidad crecientes por mantenimientos correctivos.
- **Costos de operación elevados:** necesidad de repuestos importados y frecuentes intervenciones de especialistas.
- **Impacto ambiental:** potenciales fugas de SF_6 sin sistemas avanzados de detección y mitigación, contraviniendo tendencias regulatorias.

3.4 Situación Actual en Subestación Candelaria y nueva Cardones.

En base al estudio anteriormente descrito pasamos a describir el contexto que se vive en Candelaria, con los interruptores vigentes tanto en subestación Cardones como en subestación Candelaria, en donde como ya hemos mencionado contamos con 5 interruptores de dos modelos o fabricantes distintos.

Figura 3.4 Unilineal minera Candelaria.



3.4.1 Descripción de los interruptores existentes y su historial de fallas.

La Subestación Candelaria cuenta con interruptores **Alstom GL314 y Magrini MHMe-IP**, instalados entre 1992 y 2012. Estos equipos han cumplido o superado su vida útil recomendada (25–30 años), presentando desgaste mecánico en sus mecanismos de operación, aumento de mantenimientos correctivos y limitaciones en la disponibilidad de repuestos, por otro lado la obsolecia es una de las justificaciones mas importantes a la hora de defender el reemplazo de los interruptores, a los ejecutivos.

Los registros de operación evidencian fallas en sistemas auxiliares y en mecanismos de cierre/apertura, así como la necesidad de ajustes frecuentes, lo que compromete la confiabilidad del sistema eléctrico

En minera Candelaria el criterio más fuerte es la obsolescencia ya que por plan de mantenimiento se han tenido muy pocas fallas.

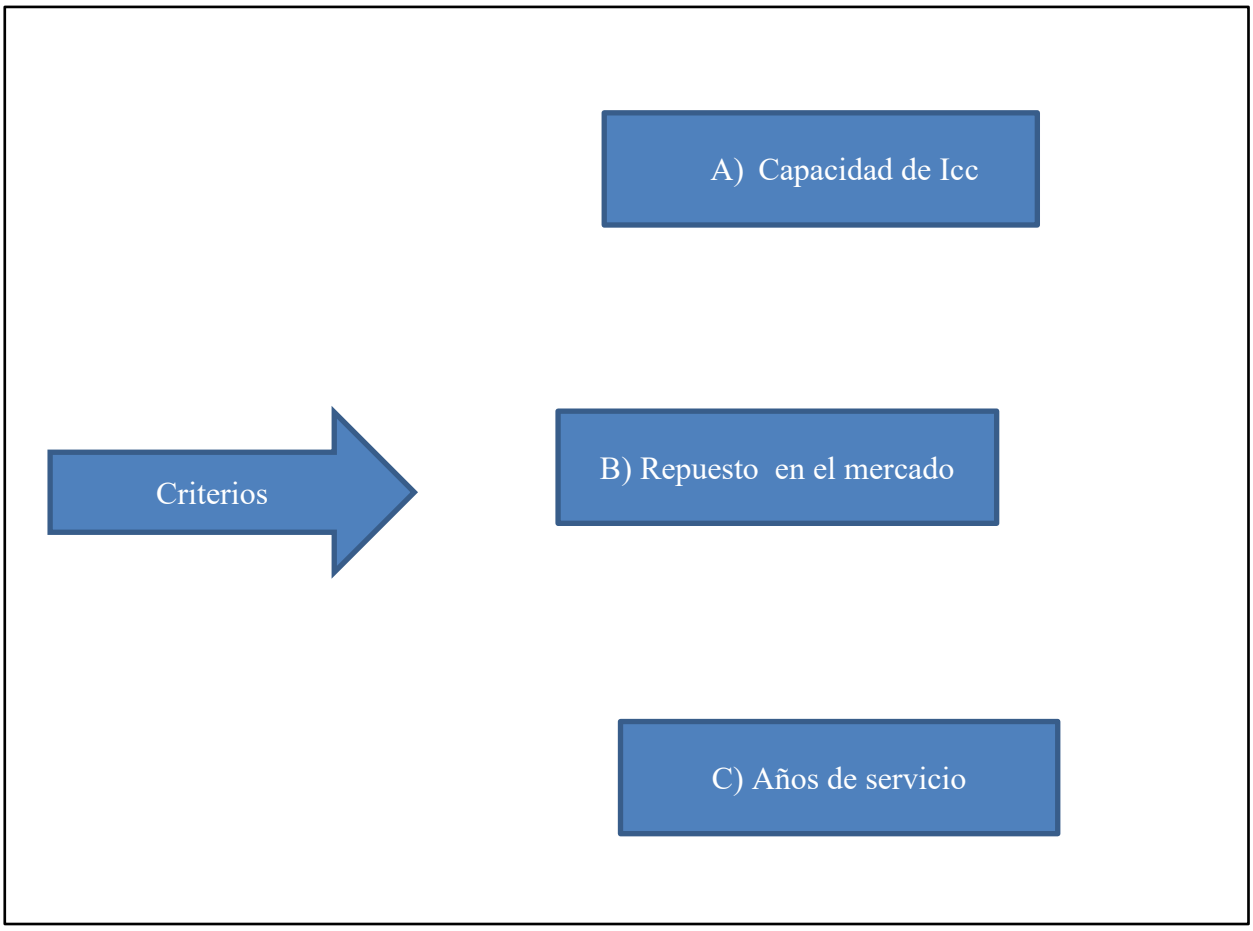
Por otro lado, la frecuencia de apertura y cierre a lo largo de su utilización han sido no más de una al año.

A continuación, y según lo recopilado en terreno con los técnicos especialistas, definimos tres criterios:

Criterios a definir:

A continuación, se presentarán tres criterios a definir según lo que se recogió como experiencia en terreno con técnicos y especialistas del área eléctrica de minera Candelaria.

Figura 3.5: Criterios de renovación



Criterio A: Capacidad de Corriente.

Dado los consumos y datos obtenidos podemos calcular las corrientes en el lado de alta, de los dos transformadores que actualmente se encuentran en servicio.

Figura 3.6: Diagrama de consumos eléctricos Minera Candelaria.

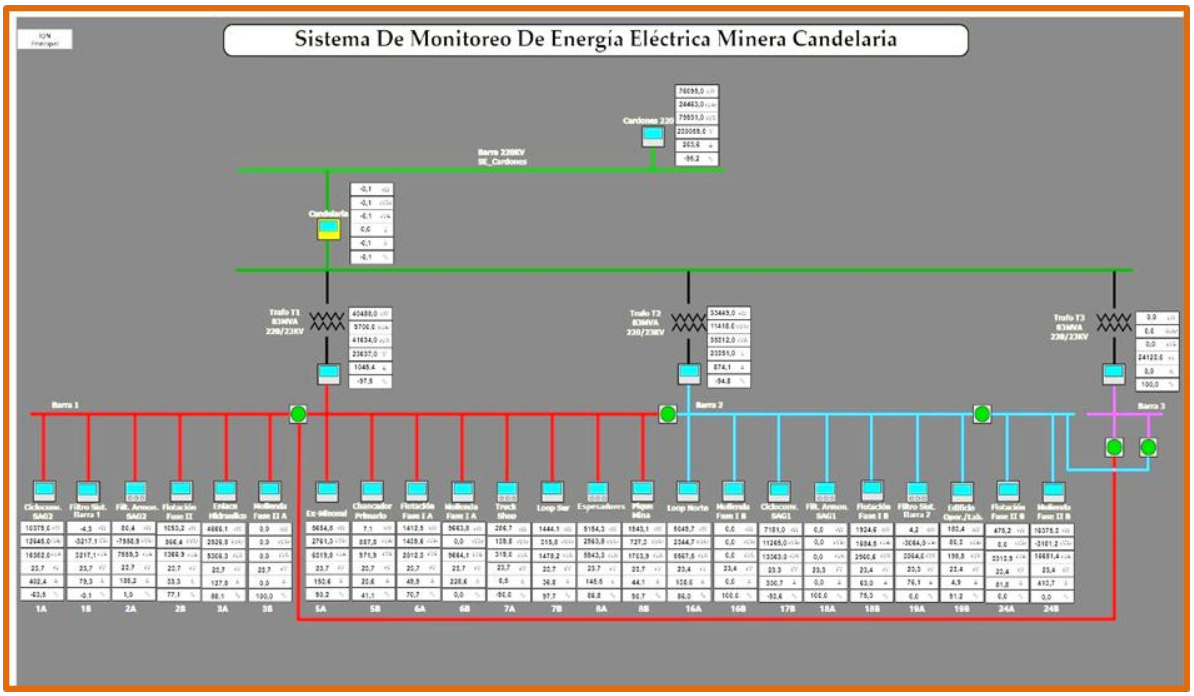
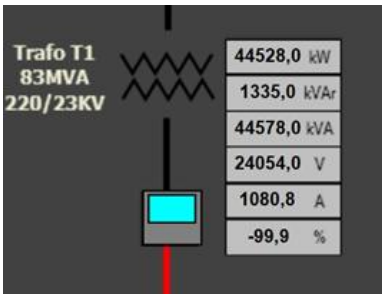
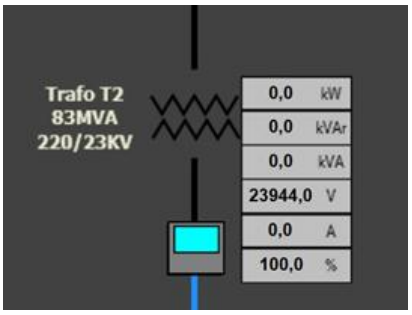
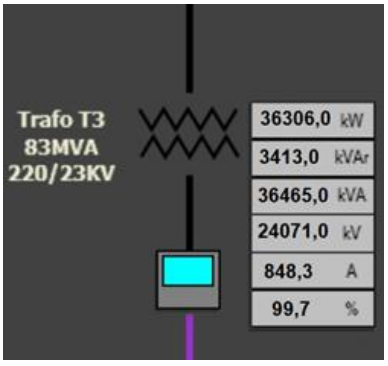
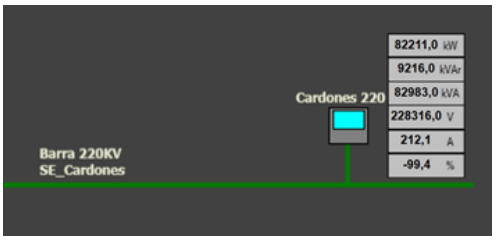


Tabla 3.4: Parámetros de consumos eléctricos.

1	Parámetros eléctricos Transformador T1	
2	Parámetros eléctricos Transformador T2	
3	Parámetros eléctricos Transformador T3	
4	Parámetros eléctricos Subestación Cardones.	

- **Transformador N°1:** S_1 = **44.578 kVA** (es decir 44,578·10³ VA)
- **Transformador N°3:** S_3 = **36.465 kVA** (es decir 36,465·10³ VA)

En condiciones ideales se puede asumir que la potencia en el lado de alta del transformador y en el lado de baja son iguales:

$$S_1 \approx S_2$$

$$V_1 * I_1\sqrt{3} = V_2 * I_2 * \sqrt{3}$$

Por lo tanto:

$$I_1 = I_2 * \frac{V_2}{V_1}$$

Si queremos estimar la corriente en el lado de alta del transformador la formulada quedaría de la siguiente forma:

$$S_{HV} = S_{LV} \Rightarrow I_{HV} = \frac{S_{LV}}{\sqrt{3} * V_{HV}}$$

Tensión de alta (lado HV): **V = 220 kV = 220·10³ V**

Sistema trifásico → fórmula: $I = \frac{S}{\sqrt{3} * V}$

Transformador N°1

- $si,$ $S_1 = 44.578$ kVA
- $Entonces,$ $I_1 = \frac{44.578}{\sqrt{3} * 220} = 116{,}98$ A

Transformador N°3:

- $Si,$ $S_3 = 36.465$ kVA
- $Entonces,$ $I_3 = \frac{36.465}{\sqrt{3}*220} = 95{,}69$ A

- **Conclusión del criterio:** Según los cálculos realizados, las corrientes en alta tensión (I_1 = 116,98 A y I_3 = 95,69 A) son bajas respecto a la corriente nominal de 218 A por transformador. Esto indica que los equipos operan aproximadamente al 50% de su capacidad, lo que reduce el esfuerzo térmico y eléctrico. Además, dichas corrientes representan aproximadamente del 10% de la corriente nominal de los interruptores, confirmando que el sistema opera dentro de márgenes seguros y confiables.

Criterio B: Repuestos en el mercado

La disponibilidad de repuestos es un factor crítico para garantizar la continuidad operativa de un interruptor de potencia. En el caso de los interruptores instalados en Minera Candelaria (Alstom GL314 y Nuova Magrini Galileo MHMe-IP), ambos modelos presentan actualmente una disponibilidad reducida y no garantizada de repuestos debido a:

- La descontinuación de la fabricación de ambos modelos.
- La adquisición de la división de interruptores de alta tensión de Alstom/Nuova Magrini por parte de GE Grid Solutions (ahora GE Vernova), lo que desplazó la cadena original de repuestos.
- Dependencia de mercado secundario o remanufacturado, sin disponibilidad inmediata en Chile.

Esto implica que ante una falla crítica (contactos, mecanismo de operación o válvula de gas, etc), el tiempo de reposición puede extenderse de semanas o incluso meses.

La baja disponibilidad de repuestos aumenta los costos correctivos y afecta la confiabilidad general del sistema eléctrico de la minera.

- **Conclusión del criterio:** los repuestos no están asegurados y existe riesgo operativo por obsolescencia logística.

Criterio C: Años de servicio.

Este criterio considera la vida útil consumida del equipo y su impacto en la probabilidad de falla.

Los interruptores instalados actualmente en Candelaria presentan:

Tabla 3.5: Criterios por años de servicio

Modelo	**Año de instalación**	**Edad actual (2025)**	**Vida útil recomendada**	**Estado**
Nuova Magrini MHMe-IP	1992	33 años	20–25 años	Vida útil superada
Alstom GL314	2012	13 años	25–30 años	En límite de obsolescencia por fabricante

Al superar su vida útil, los equipos presentan:

- Mayor desgaste mecánico en mecanismos de apertura/cierre.
- Incremento en ajustes y requerimiento de mantenimiento correctivo.
- Riesgo de falla en maniobras de despeje de falla bajo condiciones de cortocircuito.

Si bien el número de operaciones anuales es bajo (≤ 1 operación/año), el envejecimiento de componentes internos (sellos, resortes, empaquetaduras, contactos) afecta el desempeño y la confiabilidad del sistema.

- **Conclusión del criterio:** Los años de servicio excedidos incrementan el riesgo de falla y justifican el reemplazo preventivo del equipo.

3.4.2 Costos asociados a fallas

A continuación, presentaremos los costos por falla, según lo recopilado por los especialistas y lo indagado en la internet.

Tabla 3.6: Costos asociados a una posible falla eléctrica de un Interruptor.

Tipo de Impacto	Descripción	Estimación
Pérdida de producción minera	Paralización total del proceso concentrador y equipos auxiliares	$6.000.000 CLP por día
Daños en equipos eléctricos	Destrucción o falla de interruptores, barras o transformadores	US$200.000 – US$400.000
Tiempo fuera de servicio	Reposición lenta por falta de repuestos Alstom	15 – 30 días
Penalización regulatoria	Reporte obligatorio a CEN y SEC por indisponibilidad > 1 hora	Multas / pérdida de índices de confiabilidad

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS

El presente capítulo desarrolla la evaluación comparativa de las alternativas tecnológicas de interruptores de potencia para la subestación en estudio. Se definieron los criterios técnicos, económicos, operacionales y ambientales, y se aplicó una metodología de análisis multicriterio mediante comparaciones pareadas. A través de matrices de evaluación y ponderación, se obtuvo una valoración cuantitativa que permitió jerarquizar las alternativas y fundamentar técnicamente la selección de la opción más adecuada.

4.1 Interruptores propuestos

En los sistemas eléctricos de alta tensión, la selección de la tecnología de interruptores depende de factores como confiabilidad, costo de ciclo de vida, disponibilidad de repuestos, impacto ambiental y cumplimiento normativo.

El mercado nos brinda tres clases de interruptores distintos para discutir y presentar como propuesta.

a) Interruptores en SF_6 optimizado (ABB)

El hexafluoruro de azufre (SF_6) se consolidó desde mediados del siglo XX como el gas aislante por excelencia en interruptores de alta tensión. Sus principales ventajas son:

- Alta rigidez dieléctrica (aprox. tres veces superior al aire).
- Elevada capacidad de enfriamiento del arco eléctrico.
- Estabilidad química y confiabilidad probada en tensiones superiores a 72,5 kV.
- Diseños compactos que reducen espacio en subestaciones.

Gracias a estas características, los interruptores de SF_6 se han convertido en la tecnología más madura y difundida en el mundo para tensiones de 220 kV y superiores. No obstante, el SF_6 es un gas de efecto invernadero (GWP ≈ 23.500 veces CO_2), lo que genera presión regulatoria y obliga a contar con programas de monitoreo y reducción de emisiones.

Figura 4.1: Interruptor ABB 245 KV con medio SF_6.

b) Interruptores en vacío (Siemens)

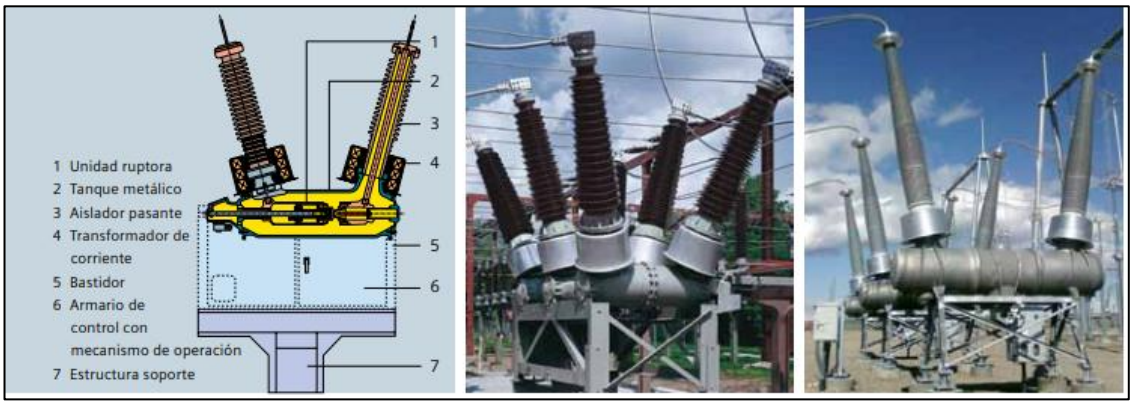
La tecnología de vacío ha sido ampliamente utilizada en media tensión y, en la última década, se ha extendido progresivamente a niveles de alta tensión (145–245 kV). Entre sus características destacan:

- Extinción del arco en un medio de vacío, lo que evita el uso de gases contaminantes.

- Mantenimiento reducido, ya que no requiere recarga de gases.
- Alta capacidad para maniobras frecuentes, siendo ideal en aplicaciones con alta conmutación.

Sin embargo, en tensiones de 220 kV todavía se considera una tecnología emergente, con menor nivel de estandarización y con costos iniciales más elevados en comparación con SF_6.

Figura 4.2: Interruptor Siemens en vacío



c) Interruptores libres de SF_6 (Hitachi – AirPlus, Siemens Clean Air, GE g^3)

En respuesta a las restricciones ambientales, los fabricantes han desarrollado tecnologías alternativas basadas en mezclas de gases con bajo GWP o en aire comprimido. Ejemplos: AirPlus (Hitachi/ABB), Clean Air (Siemens) y g^3 (GE).

Estas soluciones ofrecen:

- Reducción de hasta 99% en emisiones de GEI respecto a SF_6.
- Cumplimiento con regulaciones ambientales internacionales (UE, Acuerdo de París).
- Confiabilidad comparable en aplicaciones piloto y primeras implementaciones comerciales.

No obstante, sus principales desventajas son:

- Altos costos de inversión.
- Menor disponibilidad de repuestos y soporte local en comparación con tecnologías maduras.
- Aún no cuentan con la misma masificación ni historial operativo que los equipos SF_6.

Figura 4.3: Interruptor libre de SF6 GE

4.1.1 Ventajas y desventajas de los interruptores propuestos

A continuación, se resumirá los tres interruptores propuestos, resumiendo sus ventajas y desventajas, con la objetividad que nos da el mercado.

Tabla 4.1: Ventajas y desventajas de los interruptores propuestos.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
ABB (SF_6 optimizado)	• Tecnología madura, alta disponibilidad de modelos comerciales en 220 kV. • Soporte técnico consolidado, repuestos regionales. • Buen desempeño frente a fallo de cortocircuito, cumplimiento normativo bien establecido.	• Utiliza SF_6, gas con alto GWP, responsabilidad ambiental mayor. • Requiere gestión de gas, seguimiento de regulaciones, posibles recargos futuros ambientales. • Puede ser más costosa inicialmente que opciones más estándar.
Siemens (Vacío)	• Tecnología libre de SF_6, menor impacto ambiental. • Mantenimiento reducido (menos gas, menos sellos). • Buena confiabilidad mecánica y electrónica.	• Puede tener menor disponibilidad de modelos certificados 220 kV en ciertos mercados. • Repuestos, experiencia local pueden estar menos extendidos que SF_6 tradicionales. • Puede requerir adaptaciones del sistema existente.
Hitachi (AirPlus / mezcla gas alternativa)	• Menor impacto ambiental que SF_6 puro, alineado con tendencias de sostenibilidad. • Imagen moderna, futura compatibilidad con normativas más restrictivas.	• Tecnología relativamente más reciente en 220 kV, menor historia de campo. • Posible mayor prima de costo y mayores riesgos de soporte local. • Si la infraestructura actual no está diseñada para esta tecnología, puede requerir adaptaciones.

4.1.2 Rango de precios en el mercado

A continuación, una tabla con "Estimación de Costos" con rango bajo-alto.
Cabe mencionar que los costos reales dependen de una cotización en el que depende de muchos factores (capacidad, repuestos, asesorías, integración, etc)

Tabla 4.2: Rango de valores aproximando de interruptores propuestos.

Alternativa	**Tecnología**	**Rango estimativo de coste (USD US)**
ABB	SF_6 optimizado	400.000 – 600.000
Siemens	Vacío	550.000 – 750 000
Hitachi	Gas alternativa (AirPlus)	600 000 – 800 000

4.2 Criterios de comparación

A continuación, se definieron 6 criterios para la toma de decisiones, las cuales son fundamentadas para respaldo de estas.
Por otro lado, se otorgó la puntuación de cada criterio y definió el puntaje a otorgar.

a) Confiabilidad probada en 220 kV:

La confiabilidad hace referencia a qué tan seguro y estable es un interruptor cuando se utiliza en sistemas eléctricos de 220 kV. En este criterio se analiza si la tecnología ya se ha usado ampliamente en el mundo, si ha pasado pruebas de laboratorio y de campo, y cuál ha sido su historial de fallas en operación real.
Mientras más experiencia tenga un fabricante en este nivel de tensión, más confianza da al operador, ya que significa que los problemas ya fueron

identificados y corregidos. Una tecnología con mucha trayectoria reduce el riesgo de fallas inesperadas y aporta mayor seguridad a la red eléctrica.

b) Integración a SCADA y telecontrol:

Hoy en día, los sistemas eléctricos modernos no solo funcionan de forma manual, sino que deben poder ser monitoreados y controlados a distancia. Para esto se usan sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), que permiten ver en tiempo real el estado de los equipos y enviar órdenes desde un centro de control.

Este criterio mide qué tan fácil es conectar cada interruptor a esos sistemas, si es compatible con protocolos de comunicación estándar, y si entrega suficiente información (como alarmas, estados de interruptor, tiempos de operación, etc.). Una buena integración mejora la eficiencia operativa y permite una gestión más inteligente de la red.

c) Disponibilidad de repuestos y soporte técnico:

Un interruptor no es un equipo desechable, sino que tiene una vida útil que puede superar los 20 o 30 años. Durante ese tiempo puede requerir mantenimientos o reemplazo de piezas específicas. Este criterio analiza si el fabricante tiene repuestos disponibles en la región, si cuenta con personal técnico local o capacitado, y qué tan rápido puede responder ante fallas o mantenimientos.

Una alta disponibilidad de soporte significa menos tiempo de interrupción del servicio eléctrico y menores costos para el operador, lo que convierte este factor en algo decisivo al momento de elegir una tecnología.

d) Costo del ciclo de vida (CAPEX + OPEX):

Al comparar tecnologías no basta con mirar el precio de compra (CAPEX, es decir, inversión inicial). También es necesario considerar cuánto costará mantener y operar el equipo durante toda su vida útil (OPEX).

Este criterio engloba todos los gastos: desde la instalación, operación, inspecciones periódicas, consumo de materiales (como gases aislantes), hasta reparaciones y posibles reemplazos. Una tecnología que quizás es más cara al inicio puede resultar más barata a largo plazo si requiere poco mantenimiento o tiene una vida útil más extensa.

e) Seguridad operacional:

La seguridad es fundamental en equipos de alta tensión, ya que cualquier falla puede poner en riesgo tanto al personal como a las instalaciones. En este criterio se evalúa el diseño del interruptor: si está construido para evitar explosiones internas, si tiene sistemas de contención de gases en caso de fuga, si facilita maniobras seguras de operación y mantenimiento, y si cumple con normativas internacionales de seguridad.

Una buena calificación aquí significa que el equipo protege al personal de riesgos eléctricos y mecánicos, reduciendo la posibilidad de accidentes graves.

f) Sostenibilidad ambiental:

Dado que los sistemas eléctricos modernos buscan ser más amigables con el medioambiente, este criterio evalúa el impacto ambiental de cada tecnología. Se considera, por ejemplo, si usa gases de efecto invernadero como el SF_6 (uno de los más contaminantes en la industria eléctrica) o si emplea alternativas más limpias como aire comprimido o mezclas con bajo potencial de calentamiento global.

También se analiza la capacidad de reciclar materiales al final de la vida útil del equipo y la reducción de emisiones indirectas. Una alta puntuación refleja tecnologías que ayudan a cumplir metas ambientales y regulaciones internacionales sobre cambio climático.

4.3. Puntuación a los criterios.

A continuación, se describe una matriz de comparación pareada, la que se utilizó para la ponderación de criterios en la selección de interruptores de potencia de 220 kV en la Subestación Candelaria y nueva Cardones. Dicha matriz de comparación pareada se usa en la toma de decisiones, investigación de usuarios, evaluación de desempeño, investigación académica y análisis de marketing/productos, para priorizar opciones subjetivas o complejas comparando elementos dos a dos y determinando preferencias, ayudando a establecer jerarquías claras cuando los criterios son difíciles de cuantificar numéricamente.

4.3.1 Justificación de los valores iniciales de la matriz

Los valores se definieron en base a la importancia técnica de cada criterio para la operación de una subestación minera.

A continuación, se desarrollarán 5 tablas de comparación entre criterios, en donde se valorizará la importancia que tiene uno por sobre el otro, para pasar al desarrollo de la matriz de valorización.

Tabla 4.3: Confiabilidad v/s resto de los criterios

Comparación	Valor asignado	Justificación técnica
Confiabilidad vs Integración SCADA	2	La confiabilidad es aproximadamente el doble de importante que la integración SCADA, porque un equipo no confiable interrumpe la operación incluso si está automatizado.
Confiabilidad vs Disponibilidad de repuestos	1.2	La confiabilidad reduce la necesidad de mantenimiento o repuestos, pero ambos criterios son casi igual de relevantes.
Confiabilidad vs Costo	1.2	El costo total (CAPEX+OPEX) es importante, pero la confiabilidad evita

de ciclo de vida		paradas que generan pérdidas mayores.
Confiabilidad vs Seguridad operacional	3	Una falla del interruptor puede afectar toda la barra, por lo tanto la confiabilidad tiene una influencia operacional aproximadamente tres veces superior.
Confiabilidad vs Sostenibilidad ambiental	3	Aunque el impacto ambiental es importante, el criterio de continuidad operativa prevalece.

Tabla 4.4: Integración SCADA vs resto de los criterios

Comparación	Valor asignado	Justificación técnica
Integración SCADA vs Disponibilidad de repuestos.	0,9	La integración SCADA facilita el diagnóstico y mantenimiento predictivo, pero la disponibilidad física de repuestos impacta levemente mas.
Integración SCADA vs Costo de ciclo de vida	0,9	SCADA aporta eficiencia operativa, sin embargo, el LCC determina vialidad financiera a largo plazo
Integración SCADA vs seguridad operaciones	1,5	SCADA tiene un peso mayor que la seguridad, ya que la supervisión remota reduce errores operativos.
Integración SCADA vs sostenibilidad ambiental	1,5	SCADA tiene leve peso por sobre sostenibilidad ambiental.

Tabla 4.5: Disponibilidad de repuestos v/s resto de los criterios

Comparación	Valor asignado	Justificación técnica
Disponibilidad de repuestos vs Costo de ciclo de vida	1	Ambos criterios muy correlacionados; la disponibilidad de repuestos y el LCC afectan en forma directa la operación y los costos.
Disponibilidad de repuestos vs Seguridad operacional	1,1	Repuestos reducen tiempos de exposición a riesgo (si hay fallas, se repone rápido), por eso ligeramente más relevante.
Disponibilidad de repuestos vs Sostenibilidad ambiental	1,1	En tu juicio, la disponibilidad tiene algo más peso que sostenibilidad (impacta continuidad).

Tabla 4.6 — Costo del ciclo de vida vs resto de los criterios

Comparación	Valor asignado	Justificación técnica
Costo ciclo de vida vs Seguridad operacional	1,1	Ambos criterios considerados con peso similar dada la normativa y costos.
Costo ciclo de vida vs Sostenibilidad ambiental	1,1	LCC algo más influyente que sostenibilidad en la evaluación económica actual.

Tabla 4.7 — Seguridad operacional vs resto de los criterios

Comparación	Valor asignado	Justificación técnica
Seguridad vs Sostenibilidad ambiental	1	En tu matriz la comparación entre seguridad y sostenibilidad aparece como 1 (igual importancia). Esto indica que, aunque la seguridad normalmente prevalece, en tu juicio ambas tienen peso similar en decisión final.

4.3.2 Matriz de comparación pareada

Como ya se definieron las comparaciones entre criterios y sus puntuaciones, pasamos a desarrollar la *matriz de valorización pareada* para dar fundamento a la toma de decisiones, del interruptor a escoger.

Esta se elabora de la siguiente manera:

- **Diagonal superior:** Se deben agregar los valores asignados en las tablas de comparación, antes descritas.

- **Diagonal inferior:** Este lado de la matriz corresponde al cociente entre 1 y su posición recíproca.

Tabla 4.8: Valorización de matriz pareada.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1,00	2,00	1,20	1,20	3,00	3,00
C2	0,50	1,00	0,90	0,90	1,50	1,50
C3	0,83	1,11	1,00	1,00	1,10	1,10
C4	0,83	1,11	1,00	1,00	1,10	1,10
C5	0,33	0,67	0,91	0,91	1,00	1,00
C6	0,33	0,67	0,91	0,91	1,00	1,00
SUMA	3,83	6,56	5,92	5,92	8,70	8,70

- Valorización final: Este corresponde al cociente entre 1 y la suma de cada criterio, obteniendo los siguientes valores.

1/SUMA	0,26	0,15	0,17	0,17	0,11	0,11

Entonces la puntuación por cada criterio correspondería a:

- C1: Confiabilidad : 0,26
- C2: Integración SCADA : 0,15
- C3: Disponibilidad repuesto : 0,17
- C4: Costo ciclo de vida : 0,17
- C5: Seguridad operacional : 0,11
- C6: Sostenibilidad ambiental : 0,11

Tabla 4.9: Criterio de puntuación

Item	Criterio	Puntuación
1	Confiabilidad probada en 220 kV	0,26
2	Integración a SCADA y telecontrol	0,15
3	Disponibilidad de repuestos y soporte técnico	0,17
4	Costo del ciclo de vida (CAPEX + OPEX):	0,17
5	Seguridad operacional	0,11
6	Sostenibilidad ambiental	0,11

4.4 Sistema de puntajes.

- Cada **criterio** tiene una **ponderación** (peso relativo en la evaluación).
- A cada tecnología se le asigna un **puntaje de 1 a 5** en ese criterio, según su desempeño:
    - **5** = Desempeño excelente
    - **4** = Desempeño alto
    - **3** = Desempeño aceptable
    - **2** = Desempeño bajo
    - **1** = Desempeño muy deficiente

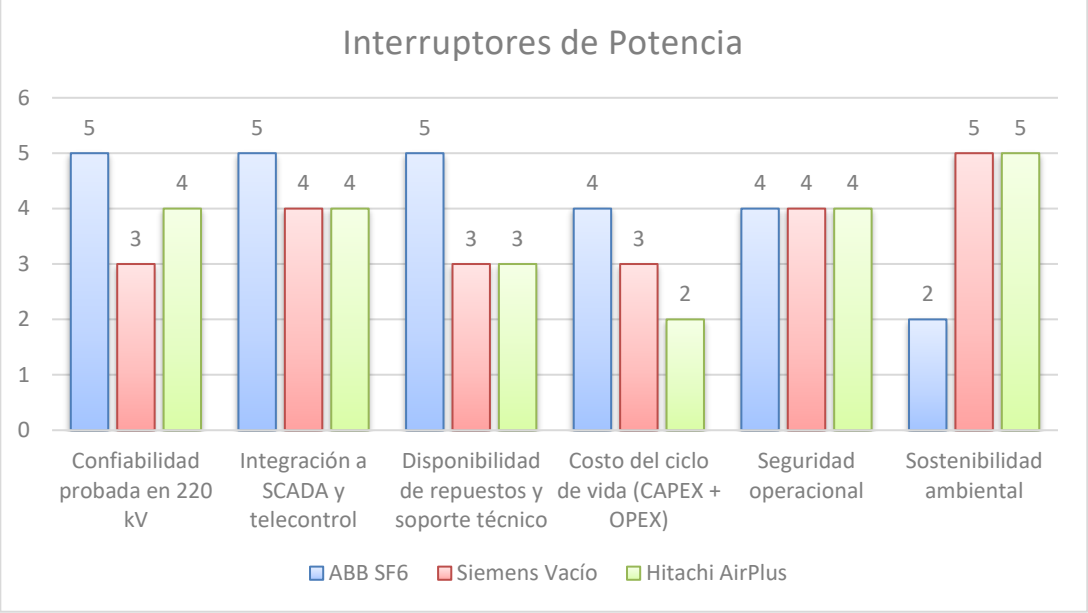
La **nota final** se obtiene multiplicando cada puntaje por su ponderación y sumando los resultados.

4.5 Resultados del análisis comparativo (tablas, gráficas, matrices de decisión).

Tabla 4.10: Resultado de valorización

	Criterio	Ponderación	ABB SF_6	Producto	Siemens Vacío	Producto	Hitachi AirPlus	Producto
1	Confiabilidad probada en 220 kV	0,26	5	**1,3**	3	**0,78**	4	**1,04**
2	Integración a SCADA y telecontrol	0,15	5	**0,75**	4	**0,6**	4	**0,6**
3	Disponibilidad de repuestos y soporte técnico	0,17	5	**0,85**	3	**0,51**	3	**0,51**
4	Costo del ciclo de vida (CAPEX + OPEX)	0,17	4	**0,68**	3	**0,51**	2	**0,34**
5	Seguridad operacional	0,11	4	**0,44**	4	**0,44**	4	**0,44**
6	Sostenibilidad Ambiental	0,11	2	**0,22**	5	**0,55**	5	**0,55**
	TOTAL			**4,24**		**3,39**		**3,48**

Figura 4.4: Gráfico, Resultado de valorización para elección de interruptor.



CAPÍTULO V
PROPUESTA DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA

En este capítulo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología de evaluación definida. Se interpretaron los puntajes finales, la influencia de cada criterio en la decisión y la robustez de los resultados frente a variaciones en las ponderaciones. El análisis permitió validar la consistencia del modelo aplicado y confirmar la alternativa recomendada desde un punto de vista técnico y económico.

5.1 Justificación de la tecnología seleccionada.

El análisis comparativo desarrollado en el Capítulo IV determinó que la alternativa más conveniente corresponde a la utilización de **interruptores ABB en tecnología SF_6 optimizado**, debido a su mejor equilibrio entre confiabilidad, soporte técnico disponible y costo total de propiedad.

La elección se justifica en los siguientes puntos técnicos:
Cumplimiento normativo: Los interruptores ABB cumplen con la norma **IEC 62271-100** para interruptores de alta tensión.

Capacidad de interrupción y seguridad operacional:
Los equipos seleccionados poseen capacidad de interrupción de **40 kA a 220 kV**.

Vida útil y confiabilidad: Se garantiza una vida mecánica superior a **10.000 operaciones** y una vida eléctrica adecuada a las condiciones de maniobra de subestaciones de transmisión, lo que respalda su fiabilidad a largo plazo.

Integración con sistemas de control: El proyecto considera la configuración e integración de la lógica de protección y señales al sistema SCADA existente, lo que

asegura compatibilidad operativa y capacidad de supervisión remota

Soporte local y disponibilidad de repuestos: ABB cuenta con presencia regional y stock de repuestos, lo que minimiza tiempos de indisponibilidad frente a fallas o mantenimientos programados.

Por lo tanto, la selección de esta tecnología responde tanto a criterios de desempeño técnico como a la viabilidad de operación, mantenimiento y disponibilidad de soporte durante todo el ciclo de vida del proyecto.

5.2 Beneficios técnicos, económicos y ambientales para Minera Candelaria.

a) Beneficios técnicos:

Alta confiabilidad en la operación de apertura y cierre, con tiempos de interrupción que cumplen con las exigencias de la norma IEC 62271, garantizando la protección de transformadores, barras y líneas de 220 kV.

Reducción de fallas mecánicas y eléctricas respecto a los interruptores actualmente en servicio, reforzado por el requisito contractual de realizar pruebas de precomisionamiento, puesta en marcha e integración al SCADA.

Mayor seguridad para el personal, dado que los procedimientos de montaje, conexionado y bloqueo están normados en las bases técnicas del proyecto

b) Beneficios económicos:

Optimización del costo total de propiedad (CAPEX + OPEX), al considerar una vida útil superior a 25 años y menores costos asociados a paradas no programadas.

Estandarización con equipos ABB que simplifica la gestión de repuestos, disminuyendo costos logísticos y de mantenimiento.

Mayor eficiencia en la operación al disponer de equipos de diagnóstico y monitoreo

integrados en el sistema de control, lo que permite implementar mantenimiento predictivo.

c) Beneficios ambientales:

Aunque la tecnología seleccionada utiliza SF_6, los nuevos interruptores incorporan sistemas de contención y monitoreo de presión de gas, reduciendo la probabilidad de fugas respecto a los equipos antiguos.

Se establece un plan de gestión de gas SF_6, con recuperación, reciclaje y reporte de emisiones, en línea con los compromisos regulatorios internacionales.

Se abre la posibilidad de migrar en el futuro a tecnologías con menor impacto ambiental (mezclas de bajo GWP como AirPlus), dado que ABB desarrolla soluciones compatibles.

CAPÍTULO VI
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El capítulo final sintetiza los principales hallazgos del estudio y presentó las conclusiones derivadas del análisis técnico y comparativo realizado. Asimismo, se formularon recomendaciones orientadas a la operación, mantenimiento y futuros proyectos de modernización de la Subestación Candelaria. Finalmente, se incluyó una reflexión sobre la importancia de la confiabilidad y sostenibilidad en los sistemas de transmisión de alta tensión dentro del contexto minero.

6.1 Conclusiones del análisis.

El análisis realizado permitió evaluar integralmente la situación actual de los interruptores de potencia de 220 kV en la Subestación Candelaria y comparar distintas alternativas tecnológicas disponibles en el mercado. A partir del diagnóstico técnico, operativo y logístico, se confirmó que los interruptores existentes —Alstom GL314 y Nuova Magrini MHMe-IP— han superado su vida útil recomendada, presentan obsolescencia tecnológica y cuentan con disponibilidad limitada de repuestos, lo que genera un riesgo creciente para la continuidad del suministro eléctrico en la operación minera.

El estudio comparativo consideró tres tecnologías de reemplazo: ABB (SF_6 optimizado), Siemens (vacío) y Hitachi (AirPlus). Para evaluarlas se emplearon criterios ponderados de confiabilidad, integración SCADA, disponibilidad de soporte técnico, costo del ciclo de vida, seguridad y sostenibilidad ambiental. Esta metodología permitió identificar las ventajas y limitaciones de cada alternativa y obtener una visión objetiva de su desempeño en condiciones reales de operación.

Los resultados demostraron que la tecnología ABB en SF_6 optimizado obtuvo el mayor puntaje global, destacando por su confiabilidad comprobada en tensiones de 220 kV, amplia disponibilidad de repuestos, soporte regional consolidado y compatibilidad

directa con los sistemas de control y protección existentes. Si bien continúa utilizando SF_6, la solución incorpora sistemas modernos de contención y monitoreo que reducen significativamente el riesgo de fugas y cumplen con las normativas internacionales y nacionales vigentes. Además, su costo total de propiedad es competitivo frente a las alternativas evaluadas, especialmente considerando el bajo nivel de maniobras anuales de la subestación y la necesidad de asegurar continuidad operacional.

Por otro lado, si bien las tecnologías libres de SF_6 (como AirPlus) representan una alternativa ambientalmente superior, todavía presentan costos más elevados, disponibilidad limitada de repuestos y menor madurez operacional en tensiones de 220 kV. En el caso de los interruptores en vacío, aunque ofrecen ventajas en sostenibilidad y mantenimiento, aún muestran menor estandarización en esta categoría de tensión y requieren adecuaciones técnicas adicionales.

En conjunto, el análisis demuestra que la selección de interruptores ABB en SF_6 optimizado constituye la opción más adecuada para la modernización de la Subestación Candelaria. Esta elección garantiza un equilibrio óptimo entre confiabilidad, seguridad, viabilidad económica y continuidad operativa, factores prioritarios para una instalación crítica dentro del sistema eléctrico minero. Asimismo, permite establecer una base tecnológica sólida que facilita futuras etapas de modernización y una eventual transición hacia tecnologías de bajo impacto ambiental.

Finalmente, el estudio confirma la importancia de adoptar metodologías de evaluación comparativa para la toma de decisiones en infraestructura eléctrica. Estas herramientas no solo permiten justificar técnicamente las inversiones, sino también asegurar que las soluciones seleccionadas respondan de manera efectiva a los desafíos actuales y proyectados del sistema eléctrico de la minera. La modernización propuesta representa un avance estratégico hacia una operación más segura, eficiente y alineada con las tendencias de sostenibilidad y digitalización que caracterizan a la industria energética moderna.

BIBLIOGRAFIA

- ABB. (2022). *Tecnología AirPlus: alternativa al SF_6 para equipos de alta tensión*. ABB Sustainability Report. https://global.abb/group/en/sustainability

- ABB. (2023). *Interruptores de potencia de alta tensión tipo Live Tank HPL 245 kV – Catálogo técnico*. ABB Group. https://new.abb.com/high-voltage/circuit-breakers/live-tank/hpl

- Comisión Nacional de Energía. (2023). *Informe técnico sobre confiabilidad del sistema de transmisión eléctrica chileno 2023*. Santiago, Chile.

- Coordinador Eléctrico Nacional. (2024). *Reglamento de Coordinación y Operación del Sistema Eléctrico Nacional*. https://www.coordinador.cl

- Coordinador Eléctrico Nacional. (2025). *Estudios para Análisis de Fallas (EAF) 2020–2025*. Santiago, Chile.

- General Electric. (2023). *Green Gas for Grid (g^3) High-Voltage Circuit Breakers – Technical Overview*. GE Grid Solutions.

- Hitachi Energy. (2024). *AirPlus™ Gas-insulated Switchgear Technology Overview*. Hitachi Energy Technical Paper. https://www.hitachienergy.com

- International Electrotechnical Commission. (2012). *IEC 62271-203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*. IEC.

- International Electrotechnical Commission. (2019). *IEC 62271-1: Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear*. IEC.

- International Electrotechnical Commission. (2021). *IEC 62271-100: Alternating-current circuit-breakers*. IEC.

- Khramshin, A. S., Maklakov, A. S., & Radionov, A. A. (2024). Comprehensive structural reliability assessment when choosing switchgear circuits for 35–220 kV step-up substations. *Energies, 17*(7), 1630. https://doi.org/10.3390/en17071630

- Ministerio de Energía de Chile. (2017). *Decreto Supremo N.º 72: Reglamento de Seguridad de las Instalaciones Eléctricas*. Diario Oficial de la República de Chile.

- Ministerio de Energía de Chile. (2022). *Decreto Supremo N.º 109: Reglamento de seguridad de instalaciones eléctricas de producción, transporte, distribución y almacenamiento de energía eléctrica*. Diario Oficial de Chile.

- Ministerio de Minería de Chile. (2015). *Decreto Supremo N.º 132: Reglamento de Seguridad Minera*. Diario Oficial de la República de Chile.

- Siemens Energy. (2023). *3AQ High-Voltage Vacuum Circuit Breakers – Technical Data Sheet*. Siemens Energy.