UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

OPTIMIZACIÓN DE LA SELECTIVIDAD Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POR SOBRECORRIENTE Y FALLA A TIERRA PARA EL INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD OPERATIVA EN LA MINA COROCCOHUAYCO, CUSCO 2025

PRESENTADO POR:

Br. ARMANDO JACKIE CHAN QUISPE MAMANI

Br. JOSE GABRIEL HUANCACHOQUE MAMANI

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA

ASESOR:

Mgt. WASHINGTON VENANCIO COELLO TAIRO

CUSCO-PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** Mg. Washington Venancio Coello Tairo quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: "Optimización de la Selectividad y Coordinación de Protecciones por Sobrecorriente y Falla a Tierra para el Incremento de la Disponibilidad Operativa en la mina Corocochuayco, Cusco 2025"

Presentado por: Armando Jackie Chau Quispe Mamani DNI N° 72455253;
presentado por: Jose Gabriel Huanacuni Mamani DNI N°: 73639574
Para optar el título Profesional/Grado Académico de Ingeniero Electricista

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 03 **%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 21 de Setiembre de 2026

Firma

Post firma Washington V. Coello Tairo

Nro. de DNI 23862363

ORCID del Asesor 000-0002-1630-1647

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:626263477

OPTIMIZACIÓN DE LA SELECTIVIDAD Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POR SOBRECORRIENTE Y FALLA A TIERRA P...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:626263477

Fecha de entrega
18 sep 2026, 11:58 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
18 sep 2026, 12:02 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
OPTIMIZACIÓN DE LA SELECTIVIDAD Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POR SOBRECORRIENT....pdf

Tamaño del archivo
4.1 MB

155 páginas

30.673 palabras

174.813 caracteres

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Fuentes principales

3% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
2% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Anticipadamente agradezco a Dios por darme la fortaleza, salud y perseverancia para culminar esta etapa académica. Este trabajo dedico profundamente a mis padres, Aranibar Quispe Herencia y Elsa Norma Mamani Ordoñez, y a mi hermano Alberth Santiago Quispe Mamani, por todo el apoyo constante, comprensión y confianza durante todo este proceso. Asimismo, expreso mi gratitud a mis docentes y asesores, por sus orientaciones y aportes técnicos en el desarrollo de la presente investigación. Por último, me gustaría expresar mi agradecimiento hacia aquellas personas que me han ayudado de alguna manera, ya sea directa o indirectamente, a terminar mi tesis.

Atentamente:

Armando Jackie Chan Quispe Mamani

Expreso mi sincero agradecimiento a Dios por guiarme y darme la fortaleza para culminar esta etapa académica. A mis queridos padres, Victoriana Mamani Charca y León Huancachoque Quispe, por su amor, sacrificio, apoyo incondicional y por ser el pilar fundamental de mi formación personal y profesional. A mis hermanos, motivación y respaldo. Asimismo, agradezco a mis docentes y asesores por compartir sus conocimientos y brindar las orientaciones necesarias para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, con su experiencia y apoyo, contribuyeron a la culminación satisfactoria de la presente tesis.

Atentamente:

José Gabriel Huancachoque Mamani

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la vida, las oportunidades y las sabidurías necesarias para culminar satisfactoriamente nuestra formación profesional. En la misma línea, nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento al Mgt. Ing. Washington Venancio Coello Tairo, quien ha sido nuestro asesor para este proyecto de investigación. Cuyo cual ha demostrado ser una fuente inestimable de orientación, dedicación, paciencia y aportaciones intelectuales.

Asimismo, manifestamos el especial reconocimiento al Mgt. Ing. Nicolas Ronald Dueñas Ponce de León, por sus enseñanzas, orientación profesional y apoyo permanente, los cuales contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal. De la misma forma, agradezco al Dr. Ing. Porfirio Ulises Hurtado Chávez, por sus acertadas recomendaciones, disposición para compartir sus conocimientos y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

Además, queremos expresar nuestro agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco por habernos brindado la oportunidad de cursar nuestra formación profesional en sus aulas. Asimismo, queremos expresar nuestro agradecimiento a todo el profesorado de la escuela profesional de Ingeniería Eléctrica, por lo que, gracias a sus conocimientos, experiencia y compromiso, han contribuido a nuestro desarrollo profesional.

Finalmente, agradecemos también a todos los compañeros y amigos, que de una u otra manera, brindaron su conocimiento en el desarrollo y culminación de esta investigación.

Atentamente:

Armando Jackie Chan Quispe Mamani

José Gabriel Huancachoque Mamani

RESUMEN

El tema principal de este estudio es un análisis prospectivo de la coordinación y la selectividad de los métodos de protección de todo el sistema eléctrico destinado a suministrar electricidad a la mina de Coroccohuayco. El propósito principal es evaluar el comportamiento esperado de los dispositivos de protección encargados de detectar condiciones anormales de corriente en la red de distribución proyectada, con la finalidad de definir ajustes preliminares que permitan una respuesta adecuada frente a posibles eventos de falla y contribuyan a la continuidad del suministro eléctrico en las futuras áreas operativas.

Para el desarrollo del estudio se dimensionó el sistema eléctrico proyectado y se recopiló información técnica referencial, incluyendo características de los equipos seleccionados, parámetros eléctricos estimados, criterios normativos y antecedentes de instalaciones con condiciones similares. Con esta información se realizó el cálculo de corrientes de cortocircuito y el análisis de coordinación de las protecciones mediante herramientas de cálculo y simulación, considerando diferentes condiciones de funcionamiento y escenarios de falla.

Finalmente, los resultados obtenidos permitieron proponer modificaciones en la configuración y ajustes de los dispositivos de protección, orientadas a mejorar la coordinación y selectividad entre los diferentes niveles de protección. Estas medidas buscan limitar las interrupciones innecesarias, facilitar una actuación rápida y selectiva ante fallas y mejorar la disponibilidad y confiabilidad esperada de la infraestructura eléctrica destinada a respaldar la futura operación de la mina Coroccohuayco.

Palabras clave: Coordinación de protecciones, Selectividad de protecciones, Sobrecorriente, Falla a tierra, Sistemas de potencia.

ABSTRACT

The main focus of this study is a prospective analysis of the coordination and selectivity of the protection methods for the entire electrical system intended to supply electricity to the Coroccohuayco mine. The primary purpose is to evaluate the expected behavior of the protection devices responsible for detecting abnormal current conditions in the planned distribution network, in order to define preliminary adjustments that will allow for an adequate response to potential fault events and contribute to the continuity of electricity supply in future operational areas.

For the development of the study, the planned electrical system was sized, and reference technical information was compiled, including characteristics of the selected equipment, estimated electrical parameters, regulatory criteria, and background information on installations with similar conditions. Using this information, short-circuit currents were calculated, and the coordination of the protection devices was analyzed using calculation and simulation tools, considering different operating conditions and fault scenarios.

Finally, the results obtained allowed for proposed modifications to the configuration and settings of the protection devices, aimed at improving coordination and selectivity among the different levels of protection. These measures aim to limit unnecessary disruptions, facilitate a rapid and selective response to failures, and improve the expected availability and reliability of the electrical infrastructure intended to support the future operation of the Coroccohuayco mine.

Keywords: Protection coordination, Protection selectivity, Overcurrent, Ground fault, Power systems.

CONTENIDO GENERAL

DEDICATORIA 2
AGRADECIMIENTO 3
RESUMEN 4
ABSTRACT 5
CONTENIDO GENERAL 6
CONTENIDO DE FIGURAS 10
CONTENIDO DE TABLAS 13
CAPÍTULO I 14
1. FORMULACIÓN DE LA TESIS 14
1.1. Introducción 14
1.2. Delimitación del Estudio 16
1.2.1. Delimitación Geográfica del Estudio. 16
1.2.2. Delimitación del Periodo de Estudio 18
1.2.3. Alcances 19
1.3. Planteamiento del Problema 20
1.4. Formulación del Problema 25
1.4.1. Problema General 25
1.4.2. Problemas Específicos 25
1.5. Justificación de la Investigación 25
1.5.1. Conveniencia 25
1.5.2. Relevancia Social. 26
1.5.3. Implicancias Prácticas. 27
1.5.4. Valor Teórico. 28
1.5.5. Utilidad Metodológica. 28
1.6. Objetivos. 29
1.6.1. Objetivo General 29
1.6.2. Objetivos Específicos 29
1.7. Hipótesis 30
1.7.1. Hipótesis General 30
1.7.2. Hipótesis Específicas 30

CAPÍTULO II 31
2. MARCO TEÓRICO 31
2.1. Antecedentes de la Investigación 31
2.1.1. Internacionales 31
2.1.2. Nacionales 34
2.2. Códigos y Normas Aplicables 37
2.3. Bases Teóricas 37
2.3.1. Sistemas de Protección Eléctrica en Redes de Media Tensión 38
2.3.2. Selectividad de Protecciones 39
2.3.3. Coordinación de Protecciones por Sobrecorriente 39
2.3.4. Protección por Sobrecorriente ANSI 50/51 40
2.3.5. Protección de Falla a Tierra ANSI 50N/51N 43
2.3.6. Curvas Tiempo-Corriente y Criterios de Ajuste 43
2.3.7. Análisis de Flujo de Potencia y Cortocircuito 44
2.3.8. Simulación Eléctrica Mediante DIgSILENT PowerFactory 45
2.3.9. Disponibilidad Operativa y Confiabilidad Eléctrica 46
2.3.10. Optimización de la Selectividad y Coordinación de Protecciones 47
2.4. Definición de Términos 47
CAPÍTULO III 52
3. METODOLOGÍA 52
3.1. Enfoque de Investigación 52
3.2. Tipo y Nivel de Investigación 53
3.3. Diseño de la Investigación 53
3.4. Unidad de Análisis 54
3.5. Técnicas de Selección de Muestra 54
3.6. Técnicas de Recolección de Información 55
3.7. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información 56
3.8. Población de Estudio 56
3.9. Tamaño de Muestra 57
3.10. Variables, Dimensiones e Indicadores 57

3.10.1. Variable Independiente. Optimización de la selectividad y coordinación de protecciones. 57
3.10.2. Variable Dependiente. Disponibilidad operativa. 58
3.11. Operacionalización de Variables 60
CAPÍTULO IV 61
4. EVALUACIÓN, ANÁLISIS Y RESULTADOS 61
4.1. Descripción del Sistema Eléctrico 61
4.1.1. Sistema Eléctrico Coroccohuayco 61
4.1.2. Descripción del Sistema Eléctrico Bajo Estudio 64
4.1.3. Parámetros de las Líneas Proyectadas 65
4.2. Características de Equipos Eléctricos 69
4.2.1. Características de Transformadores 69
4.2.2. Características de Relés de Protección 79
4.2.3. Características de Interruptores y Circuit Breakers 83
4.3. Flujo de Potencia de la Unidad Minera (Original) 86
4.3.1. Reporte de Flujo de Potencia 87
4.4. Flujo de Potencia de la Unidad Minera (Banco de Condensadores) 89
4.4.1. Reporte de Flujo de Potencia 90
4.4.2. Corto Circuito Trifásico 93
4.4.3. Corto Circuito Bifásico 94
4.4.4. Corto Circuito Monofásico 95
4.4.5. Corto Circuito Monofásico con R_f= 50 Ohm 96
4.4.6. Reporte de fallas de Corto Circuito Trifásico, Bifásico, Monofásico y Monofásico con R_f = 50 Ohm 97
4.5. Análisis de Coordinación de Protecciones 98
4.5.1. Criterios de Ajuste para los Equipos de Protección 99
4.5.2. Marco Normativo de Coordinación: IEEE 242 (Buff Book) 99
4.5.3. Marco Normativo Matemático: IEC 60255-151 100
4.5.3.1. Tren de Celdas (Protección de Transformadores y Grandes Motores) 101
4.5.3.2. Línea de Distribución (Alimentador Principal) 102
4.5.3.3. Celda de Llegada (Cabecera del Sistema) 102

4.5.4. Criterios de Protección de Sobrecorriente / Funciones 50/51 y 50N/51N 103
4.5.4.1. Memoria de Cálculo del Recloser 104
4.5.4.2. Memoria de Cálculo para la Celda Intermedia (Acoplamiento de Barras) 107
4.5.4.3. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 1 y 2 (TR-01 y TR-02) 109
4.5.4.4. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 3 (TR-03) 112
4.5.4.5. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 4 y 5 (TR-04 y TR-05) 114
4.5.5. Protección de Falla a Tierra 116
4.5.6. Verificación de Selectividad del Transformador TR-01 117
4.5.7. Verificación de Selectividad del Transformador TR-02 119
4.5.8. Verificación de Selectividad del Transformador TR-03 121
4.5.9. Verificación de Selectividad del Transformador TR-04 123
4.5.10. Verificación de Selectividad del Transformador TR-05 125
4.5.11. Software Utilizado 127
4.6. Ajustes Propuestos de los Equipos de Protección 127
4.7. Discusión de Resultados 133
CONCLUSIONES 137
RECOMENDACIONES 139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 140
ANEXOS 146

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. *Representación satelital del ámbito de estudio* 17

Figura 2. *Distribución del proyecto* 18

Figura 3. *Características de operación de los relés de sobrecorriente* 42

Figura 4. *Diagrama unifilar de la mina Antapaccay de 220 kV según el SEIN* 62

Figura 5. *Sistema Eléctrico Interconectado Nacional* 63

Figura 6. *Diagrama unifilar de la carga proyectada de la mina Coroccohuayco* 64

Figura 7. *Disposición de los conductores* 66

Figura 8. *Diagrama unifilar de la Mina Coroccohuayco (Proyectado)* 76

Figura 9. *D.U. Línea Aérea (Proyectada)* 77

Figura 10. *D.U. de las celdas de M.T. en la mina de Coroccohuayco* 78

Figura 11. *Flujo de potencia sin banco capacitivo (Shunt C)* 86

Figura 12. *Simulación del Shunt/Filtro C en DigSilent Power Factory 2024* 88

Figura 13. *Flujo de potencia implementando el Shunt/Filtro C en el tren de celdas N°01* 89

Figura 14. *Tensiones en p.u. de cada barra* 91

Figura 15. *Cortocircuito trifásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024* 93

Figura 16. *Cortocircuito bifásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024* 94

Figura 17. *Cortocircuito monofásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024* 95

Figura 18. *Cortocircuito monofásico con Rf=50 ohm en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024* 96

Figura 19. *Relé de falla a tierra conectado a un transformador de corriente (CT)* 117

Figura 20. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.* 117

Figura 21. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.* 118

Figura 22. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.* 118

Figura 23. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-1.* 119

Figura 24. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.* 119

Figura 25. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.* 120

Figura 26. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.* 120

Figura 27. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-2.* 121

Figura 28. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.* 121

Figura 29. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.* 122

Figura 30. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.* 122

Figura 31. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-3.* 123

Figura 32. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.* 123

Figura 33. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.* 124

Figura 34. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.* 124

Figura 35. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-4.* 125

Figura 36. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.* 125

Figura 37. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.* 126

Figura 38. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.* 126

Figura 39. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-5.* 127

Figura 40. *Curvas de protección aguas arriba (Recloser y tren de celdas 01)* 147

Figura 41. *Armado de metal de doble terna propuesto para las líneas de 12 km* 148

Figura 42. *Conductor AAAC para las líneas de 12 km* 149

Figura 43. *Datos del conductor AAAC* 150

Figura 44. *Cable tipo XLPE* 151

Figura 45. *Datos de cable tipo XLPE* 152

Figura 46. *Resumen de resultados para ajuste de las curvas de relés en TCC* 153

Figura 47. *Cálculo de resultados 01* 153

Figura 48. *Cálculo de resultados 02* 153

Figura 49. *Cálculo de resultados 03* 154

Figura 50. *Cálculo de resultados 04* 154

Figura 51. *Cálculo de resultados 05* 155

Figura 52. *Características del relé SEL-751* 155

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. *Características de curvas de relés de sobrecorriente de fases* 42

Tabla 2. *Esquema de definición funcional de factores analizados* 60

Tabla 3. *Cuadro de características de conductores* 65

Tabla 4. *Cuadro de demandas individuales por equipo - Mina Coroccohuayco (Proyectado)* .. 70

Tabla 5. *Cuadro resumen por nivel de tensión* 74

Tabla 6. *Cuadro resumen transformador (Proyectado)* 74

Tabla 7. *Relación de dispositivos de protección (relés) del sistema eléctrico* 80

Tabla 8. *Interruptores (Circuit Breakers) de la Unidad Minera* 84

Tabla 9. *Resultados de F.P. según Digsilent Power Factory 2024* 87

Tabla 10. *Reporte de flujo de transformadores* 90

Tabla 11. *Reporte de flujo de potencia en barras* 90

Tabla 12. *Reporte de flujo de potencia en líneas* 92

Tabla 13. *Reporte de fallas de cortocircuito* 97

Tabla 14. *Análisis del tiempo actuado* 104

Tabla 15. *Lista de Ajustes Propuestos de Relés en la Unidad Minera* 127

Tabla 16. *Lista de Ajustes Propuestos de Relés* 130

Tabla 17. *Matriz de Consistencia* 146

CAPÍTULO I

1. FORMULACIÓN DE LA TESIS

1.1. Introducción

En las redes eléctricas industriales y mineras, los sistemas de seguridad aíslan fallas con velocidad y precisión para mantener la continuidad operativa. A escala global, calibrar estas protecciones de sobrecorriente es un desafío técnico, ya que exige minimizar los tiempos de desconexión garantizando un disparo escalonado y selectivo entre los equipos principales y sus respaldos. En este contexto, de acuerdo a las normas ANSI 50/51 y 50N/51N resultan fundamentales para proteger ante cortocircuitos entre fases y fallas a tierra, debido a que permiten establecer umbrales de actuación, temporizaciones y curvas tiempo-corriente capaces de aislar únicamente la zona fallada. Esta necesidad se vuelve más crítica en instalaciones productivas con cargas esenciales, donde una mala coordinación puede generar desconexiones no selectivas, energía no suministrada y paradas de equipos con impacto técnico y económico significativo (Pérez San Martín, 2021); (Laksono et al., 2022).

A nivel local, las investigaciones sobre la selectividad de salvaguardas en redes eléctricas de la industria extractiva demuestran que el examen del tránsito de potencia, la determinación de fallas por cortocircuito y el diagnóstico de las TCC (Time-Current Curve) son fases mandatarias para validar la integridad física y la continuidad del servicio en las infraestructuras de media tensión. Investigaciones desarrolladas en proyectos mineros peruanos han empleado herramientas computacionales para calcular niveles de tensión, sobrecarga, corrientes de falla, ajustes de relés y curvas tiempo-corriente, con el propósito de validar las condiciones técnicas de diseño antes de la operación. Asimismo, estudios realizados en sistemas de bombeo, palas, perforadoras y redes internas de mina muestran que la coordinación adecuada de protecciones permite evaluar la

capacidad de soportabilidad de los equipos, mejorar la confiabilidad del suministro y reducir el riesgo de interrupciones no deseadas en cargas críticas (Frias Serruto, 2022); (Chancasanampa Pacheco, 2019).

Estructuralmente, la segregación de fallas impone que los mecanismos de desconexión situados inmediatamente antes del desperfecto tengan prioridad de disparo, manteniendo bajo condiciones normales de energización a los circuitos remotos que se encuentran libres de perturbación. Para ello, los ajustes de sobrecorriente de fase deben considerar la corriente máxima de carga, la capacidad térmica de los equipos protegidos, la mínima corriente de falla detectable y los márgenes de coordinación entre dispositivos aguas arriba y aguas abajo. Ante eventos de cortocircuito homopolar, las funciones 50N/51N adquieren especial importancia, ya que permiten detectar corrientes residuales o de neutro mediante medición directa con transformadores de corriente dedicados, toroides o mediante cálculo vectorial de las corrientes de fase. Por tanto, una coordinación técnicamente adecuada no se limita a seleccionar valores de disparo, sino que exige verificar la sensibilidad, el tiempo de despeje, la capacidad de interrupción y la compatibilidad de las curvas de operación frente a diferentes escenarios de falla (Pumaquispe Ortega, 2024).

En el caso de la Mina Coroccohuayco, al tratarse de una unidad minera en etapa de proyecto, la problemática no debe entenderse como una deficiencia operativa ya comprobada mediante registros históricos de fallas, sino como la necesidad de validar anticipadamente el esquema proyectado de protección eléctrica antes de su futura puesta en servicio. Bajo este enfoque, el incremento de la disponibilidad operativa planteado en la investigación. Esto constituye una optimización prevista y técnicamente fundamentada tras perfeccionar la selectividad y sincronización de las salvaguardas de fase y de neutro. Esta precisión metodológica permite conservar el propósito del estudio sin atribuir a la mina eventos operativos que aún no

pueden verificarse en campo, orientando el análisis hacia la prevención de disparos no selectivos, la protección de activos eléctricos y la continuidad futura del suministro en las áreas críticas del proyecto minero (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025); (Chirhuana Aybar, 2020).

En ese sentido, la presente investigación desarrolló la optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra para el incremento esperado de la disponibilidad operativa en la Mina Coroccohuayco, Cusco, 2025. Para ello, se adoptó un enfoque aplicado y técnico, basado en el modelamiento del sistema eléctrico proyectado mediante DIgSILENT PowerFactory, el diagnóstico del flujo de potencia, el cómputo de fallas francas y la simulación de las curvas de disparo para las protecciones de fase y neutro permitieron estructurar consignas de calibración dirigidas a maximizar la velocidad, selectividad, sensibilidad y confiabilidad del esquema operativo; de esta manera, la nueva red posee un respaldo técnico estricto que blinda la infraestructura contra desconexiones erróneas o fuera de zona durante su funcionamiento habitual (Montesinos Cáceres, 2025); (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025).

1.2. Delimitación del Estudio.

1.2.1. Delimitación Geográfica del Estudio.

El estudio se delimita geográficamente a la Mina Coroccohuayco, ubicada en la provincia de Espinar, región Cusco, vinculada al proyecto de integración Coroccohuayco-Antapaccay Expansión Tintaya. De acuerdo con la información del proyecto, la Zona de Explotación Coroccohuayco se ubica aproximadamente a 12 km al sureste de la Zona de Beneficio Tintaya, en un área proyectada para la extracción de mineral de cobre. Asimismo, el yacimiento Coroccohuayco se plantea bajo un esquema de explotación a tajo abierto convencional, conformado por dos áreas de explotación denominadas Norte y Sur, con coordenadas referenciales 256 866 E; 8 345 662 N y 256 724 E; 8 344 806 N, respectivamente (Alata Huisa et al., 2018).

La delimitación espacial de la investigación se restringe al sistema eléctrico proyectado asociado a la Mina Coroccohuayco y a los componentes eléctricos internos que serán considerados en el modelamiento y simulación de coordinación de protecciones. Por tanto, el estudio no comprende el análisis de líneas externas de transmisión, redes de propiedad de terceros, estudios ambientales, estudios geotécnicos, diseño minero, evaluación metalúrgica ni aspectos económicos del proyecto minero. El análisis se centra únicamente en la evaluación técnica de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra del sistema eléctrico bajo estudio, conforme al alcance del título de la tesis y al enfoque metodológico basado en simulación (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025).

Figura 1. *Representación satelital del ámbito de estudio*



Nota. Elaboración propia (imagen extraída de Google Earth)

Figura 2. *Distribución del proyecto*



Nota. Senace.gob.pe (Modificación del Estudio de Impacto Ambiental - Integración Coroccohuayco)

1.2.2. Delimitación del Periodo de Estudio

El marco cronológico del análisis queda restringido al año 2025, en estricta concordancia con la ventana temporal establecida en la denominación oficial del proyecto. Dado que la Mina Coroccohuayco aún se encuentra en etapa de proyecto y no en operación, este periodo no corresponde a un intervalo de medición de fallas reales, registros históricos, oscilografías o implementación física de ajustes, sino al periodo de análisis técnico-documental, modelamiento y simulación del sistema eléctrico proyectado. Por lo tanto, el diagnóstico se ejecuta exclusivamente mediante estimaciones hipotéticas y modelados virtuales de tránsito de energía, fallas francas y

selectividad de salvaguardas, prescindiendo del registro de datos empíricos de un complejo minero en explotación activa. (Alata Huisa et al., 2018).

De igual modo, la ventana cronológica seleccionada abarca la ratificación analítica de los parámetros de disparo empleando el software DIgSILENT PowerFactory. Este enfoque metodológico se fundamenta en que el diseño de selectividad para redes eléctricas planeadas es viable mediante la caracterización de la infraestructura, el modelado matemático, la simulación del tránsito de potencia, la cuantificación de fallas, la dosificación de variables en los relés y la comprobación de sus gráficas TCC. Consecuentemente, este límite de tiempo no guarda relación con jornadas de registro empírico in situ ni con auditorías operativas comparativas, sino con el diagnóstico del comportamiento predictivo de los esquemas de seguridad informática dentro de la fase de diseño técnico y simulación virtual del proyecto. (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025); (Montesinos Cáceres, 2025).

1.2.3. Alcances

El marco del estudio abarca la simulación de la futura red eléctrica del proyecto minero Coroccohuayco utilizando la plataforma DIgSILENT PowerFactory, analizando el tránsito de carga, la magnitud de las fallas y la selectividad de las salvaguardas ante sobrecorrientes y bucles de retorno por el neutro. Asimismo, la investigación contempla el examen de los códigos ANSI 50/51 para contingencias entre fases y ANSI 50N/51N para eventos monofásicos, complementado con el diagnóstico de las curvas TCC, los retardos en el disparo, la precisión operativa de los relés y los intervalos de seguridad establecidos entre los elementos de primera línea y sus respectivas contingencias de respaldo. Estos elementos permiten establecer una propuesta técnica de ajustes orientada a mejorar la selectividad y coordinación del sistema de protección proyectado (Empresas Públicas de Medellín ESP, 2019); (IEEE Power and Energy Society, 2015).

El estudio no incluye mediciones reales de campo, pruebas de inyección secundaria, implementación física de ajustes, análisis de fallas históricas, evaluación de indicadores operativos reales ni verificación posterior a la puesta en servicio. Tampoco comprende el diseño de nuevas redes eléctricas, redimensionamiento de transformadores, selección de equipos de maniobra, análisis de protecciones diferenciales, protecciones de motores, estudios de arco eléctrico, estudios de estabilidad, calidad de energía o análisis económico del proyecto minero. La investigación se limita a la optimización y validación simulada de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, de modo que el incremento de la disponibilidad operativa debe entenderse como una contribución técnica esperada para la futura operación de la Mina Coroccohuayco (Pérez San Martín, 2021); (Moreno Maldonado, 2016).

Finalmente, los resultados de la investigación tendrán alcance técnico-propositivo, pues permitirán identificar ajustes y criterios de coordinación aplicables al sistema proyectado, pero no constituirán una certificación de desempeño operativo real. La contrastación se ejecutará a través de modelados virtuales, gráficas TCC y la colación de diversas contingencias, bajo la premisa de que los sistemas de despeje respondan con discriminación, precisión y robustez operativa frente a anomalías en la red. Con este enfoque, el análisis guarda estricta correspondencia con la hipótesis, las metas y la ruta metodológica del proyecto, restringiendo el alcance de los hallazgos a las fronteras que delimita la información de ingeniería de la cual se dispone. (Funmilayo et al., 2012); (IEEE Power and Energy Society, 2015).

1.3. Planteamiento del Problema

La actividad minera constituye uno de los sectores estratégicos para el desarrollo económico del Perú, debido a su aporte al producto bruto interno, a la generación de divisas, a la inversión privada y a la dinamización de actividades conexas. En el contexto nacional, la minería

representa aproximadamente entre el 9 % y 10 % del PBI, concentra alrededor del 60 % de las exportaciones nacionales y, entre enero y mayo de 2025, alcanzó exportaciones por US$ 21 684 millones, equivalentes al 66,0 % del valor total exportado por el país. Esta relevancia económica exige que los proyectos mineros dispongan de infraestructura eléctrica confiable, debido a que la continuidad del suministro energético condiciona la estabilidad de los procesos productivos, la competitividad y la sostenibilidad de las operaciones mineras (Instituto Peruano de Economía, 2018); (Ministerio de Energía y Minas, 2025).

La relación entre minería y energía resulta especialmente crítica porque el sector minero es una actividad intensiva en consumo eléctrico. En el Perú, la minería representa cerca del 34 % del consumo nacional de electricidad, habiendo incrementado su participación desde el 24 % registrado en 2013; además, en 2022 alcanzó un consumo anual de 17 175 GWh frente a un total nacional de 50 312 GWh. A nivel operativo, la electricidad puede representar alrededor del 20 % de los costos totales de grandes empresas mineras, mientras que la literatura internacional reporta que los costos de energía en minería pueden variar entre el 15 % y el 40 % de los gastos operativos. Por ello, el suministro eléctrico no constituye solo un insumo auxiliar, sino un componente estratégico que debe cumplir condiciones de alta disponibilidad, calidad, seguridad y confiabilidad (ENGIE, 2025); (Gestión, 2023).

En operaciones mineras, la disponibilidad de energía es determinante porque los procesos productivos suelen desarrollarse bajo esquemas continuos y con cargas críticas asociadas a extracción, transporte, chancado, molienda, bombeo, ventilación, procesamiento y servicios auxiliares. Los documentos revisados señalan que la gran minería opera bajo esquemas de continuidad 24 × 7, por lo que la interrupción de suministros esenciales, incluida la electricidad, puede generar costos elevados, paralización de servicios, afectación de contratistas y riesgos para

la continuidad normal de las operaciones. De manera complementaria, los estudios de minería y energía advierten que muchas unidades mineras se ubican en zonas alejadas, donde la infraestructura eléctrica y la confiabilidad del suministro adquieren mayor relevancia técnica y económica (Guizado Damiano, s.f.); (Pouresmaieli, 2023); (ENGIE, 2025).

Desde el punto de vista eléctrico, la continuidad del suministro depende en gran medida de que los sistemas de protección detecten y despejen fallas de forma rápida, selectiva, sensible y segura. La coordinación de protecciones consiste en seleccionar ajustes de corriente, tensión y temporización para que los dispositivos operen en un orden determinado, minimizando la interrupción del servicio y evitando el aislamiento innecesario de zonas sanas del sistema. Por ello, la selectividad obliga a que dispare antes la protección adyacente a la falla; la sensibilidad permite detectar fallas incluso de menor magnitud; y la seguridad evita operaciones indebidas cuando no corresponde el disparo. Estos criterios son esenciales en redes eléctricas mineras, donde una actuación no selectiva puede extender innecesariamente el área desconectada y comprometer la disponibilidad esperada de cargas críticas (IEEE Power and Energy Society, 2015).

La protección por sobrecorriente y falla a tierra cumple un rol central en sistemas eléctricos de media tensión, debido a que permite enfrentar fallas de fase, sobrecargas, cortocircuitos y corrientes residuales asociadas a fallas monofásicas a tierra. Los códigos ANSI 50/51 se calibran evaluando la carga pico, el cortocircuito mínimo, el límite térmico del equipamiento y el escalonamiento entre elementos principales y de respaldo. Del mismo modo, las funciones ANSI 50N/51N deben garantizar sensibilidad frente a fallas a tierra, evitando que corrientes residuales no sean detectadas o que una mala temporización provoque disparos innecesarios aguas arriba. Por tanto, el problema técnico no se limita a seleccionar relés, sino a definir ajustes coordinados que

permitan discriminar entre carga normal, transitorios admisibles y fallas reales (Pérez San Martín, 2021); (Empresas Públicas de Medellín ESP, 2019).

Los estudios revisados evidencian que una coordinación inadecuada puede originar la apertura de más de un equipo de protección aguas arriba de la falla, generando pérdida de continuidad del servicio y paradas no deseadas del proceso productivo. Asimismo, se establece que la coordinación debe verificarse mediante curvas tiempo-corriente, márgenes de coordinación y tiempos de actuación entre protecciones primarias y de respaldo. En investigaciones aplicadas a sistemas mineros e industriales, se reportan márgenes de coordinación del orden de 0,12 s a 0,24 s entre relés y fusibles, así como la necesidad de verificar gráficamente la separación entre curvas para evitar intersecciones indebidas. Estos antecedentes justifican que la optimización de la selectividad no sea un aspecto accesorio, sino un requisito para reducir el riesgo de desconexiones no selectivas y proteger la continuidad operativa futura (Pérez San Martín, 2021); (IEEE Power and Energy Society, 2015).

El diseño de selectividad en sistemas de seguridad eléctrica se sustenta analíticamente en el modelado del tránsito de energía, la cuantificación de fallas francas y el diagnóstico de las curvas TCC. Estas evaluaciones hacen posible establecer las demandas operativas del circuito, los valores extremos de cortocircuito, los límites de ruptura del aparataje, la selección de los TCs y las consignas de calibración definitivas para los relés. La literatura revisada muestra que DIgSILENT PowerFactory permite modelar sistemas eléctricos, simular diferentes escenarios de falla, obtener resultados de cortocircuito y validar ajustes de protección antes de su implementación física. Por ello, su uso resulta pertinente cuando se requiere evaluar técnicamente un sistema eléctrico proyectado sin recurrir a pruebas de campo o mediciones reales de operación (Castillo Rivera & Pérez Yauli, 2018).

En el caso de la Mina Coroccohuayco, al tratarse de una unidad minera en etapa de proyecto y no de una operación en servicio, la problemática no debe formularse como la corrección de fallas históricas, registros de eventos, oscilografías o interrupciones reales ya ocurridas. El archivo base plantea el estudio en términos de configuraciones actuales, registros de eventos y reducción de cortes; sin embargo, tales afirmaciones requieren evidencia operativa que no existe para una mina que aún no ha iniciado operación. Por ello, el problema debe reformularse como la necesidad de validar anticipadamente el esquema proyectado de protecciones, de manera que los ajustes de sobrecorriente y falla a tierra sean técnicamente consistentes antes de la futura puesta en servicio (Montesinos Cáceres, 2025).

En consecuencia, el problema de investigación se sustenta en la ausencia de una validación técnica previa que demuestre que el sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco contará con una coordinación selectiva, sensible y confiable de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra. Esta situación genera incertidumbre respecto a los tiempos de despeje, la actuación jerárquica de las protecciones, la sensibilidad frente a fallas de baja magnitud, la coordinación entre dispositivos principales y de respaldo, y la capacidad del sistema para aislar únicamente la zona afectada. Bajo este enfoque, la optimización de la selectividad y coordinación de protecciones mediante DIgSILENT PowerFactory no busca demostrar una mejora operativa ya materializada, sino establecer una contribución técnica esperada al incremento de la disponibilidad operativa futura de la Mina Coroccohuayco, Cusco, 2025 (IEEE Power and Energy Society, 2015).

1.4. Formulación del Problema

1.4.1. Problema General

¿De qué manera la optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?

1.4.2. Problemas Específicos

1) ¿Cómo determinar el análisis de flujo de potencia y cortocircuito mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?
2) ¿Cómo optimizar los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N para mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?
3) ¿En qué medida el análisis de las curvas tiempo-corriente y los márgenes de coordinación reducen los disparos intempestivos e incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?

1.5. Justificación de la Investigación

1.5.1. Conveniencia

La presente investigación resulta conveniente porque aborda una necesidad técnica propia de los sistemas eléctricos mineros en etapa de diseño: validar anticipadamente la selectividad y coordinación de las protecciones antes de la puesta en servicio. En el contexto peruano, la minería constituye una actividad estratégica para la economía nacional y depende de un suministro eléctrico confiable, competitivo y de alta disponibilidad, debido a que sus procesos productivos demandan continuidad energética. En ese sentido, optimizar las protecciones por sobrecorriente y

falla a tierra en la Mina Coroccohuayco permite establecer criterios técnicos para reducir el riesgo de desconexiones no selectivas durante la futura operación, sin asumir registros históricos o eventos reales que aún no existen por tratarse de un proyecto en etapa de desarrollo. La relevancia de la investigación radica en la importancia de predecir la respuesta dinámica de la red planeada a través de modelados computacionales en la plataforma DIgSILENT PowerFactory, complementados con evaluaciones de tránsito de energía, magnitudes de falla y gráficas TCC (ENGIE, 2025); (Ministerio de Energía y Minas, 2025).

1.5.2. Relevancia Social.

La trascendencia social del estudio reside en el beneficio colateral que una infraestructura eléctrica configurada bajo criterios de estricta discriminación y fiabilidad otorga a la explotación minera venidera, particularmente al salvaguardar la estabilidad del flujo energético, la integridad operativa y la prevención de apagones injustificados. En minería, la disponibilidad de energía es un factor crítico para sostener procesos productivos, servicios auxiliares, contratistas y actividades de soporte; por ello, una coordinación adecuada de protecciones contribuye a disminuir el riesgo de paralizaciones asociadas a fallas eléctricas mal despejadas. Asimismo, al tratarse de una actividad económica que genera inversión, empleo directo e indirecto, divisas e ingresos fiscales, el fortalecimiento técnico de la infraestructura eléctrica proyectada resulta relevante para la institución minera y su entorno operativo. No obstante, esta relevancia debe entenderse como un beneficio esperado y preventivo, derivado de la validación técnica del sistema proyectado, y no como un impacto social ya comprobado en campo (Instituto Peruano de Economía, 2018); (Ministerio de Energía y Minas, 2025).

1.5.3. Implicancias Prácticas.

Desde el punto de vista práctico, la presente investigación permitirá disponer de una propuesta técnica de coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra para el sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco. Al tratarse de una unidad minera en etapa de proyecto, la aplicación práctica del estudio no se orienta a corregir fallas reales ocurridas en campo, sino a validar anticipadamente el comportamiento esperado del sistema de protección mediante simulaciones. Este enfoque permitirá reducir incertidumbres técnicas relacionadas con la actuación de los relés, los tiempos de despeje, la sensibilidad frente a fallas y la selectividad entre protecciones principales y de respaldo antes de la futura puesta en servicio del sistema eléctrico (Moreno Maldonado, 2016).

La investigación tendrá una aplicación concreta en la determinación de ajustes para las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N, considerando condiciones de carga, corrientes de cortocircuito y curvas tiempo-corriente. En ese sentido, el estudio permitirá evaluar si los dispositivos de protección actúan de manera coordinada frente a fallas de fase y fallas a tierra, evitando que una falla localizada produzca la desconexión innecesaria de áreas no afectadas. Esta implicancia es relevante porque la selectividad y la sensibilidad son criterios fundamentales para que el sistema de protección opere únicamente cuando corresponde y sobre la zona que debe ser aislada (Empresas Públicas de Medellín ESP, 2019).

Adicionalmente, usar DIgSILENT PowerFactory permite estructurar la red planeada, simular fallas, analizar flujos de carga y verificar visualmente las curvas TCC. Esta herramienta facilita contrastar los parámetros iniciales frente a los optimizados, detectando cruces de funciones, pérdidas de selectividad o lentitud en los disparos. Así, los datos obtenidos servirán como soporte

analítico para el diseño, auditoría de calibraciones, comisionamiento o montaje de las protecciones en la mina (Funmilayo et al., 2012).

Finalmente, las implicancias prácticas de la investigación se reflejan en la posibilidad de establecer un esquema de protección más consistente para contribuir al incremento esperado de la disponibilidad operativa futura de la Mina Coroccohuayco. La adecuada coordinación de protecciones puede disminuir el riesgo de desconexiones no selectivas, limitar el área afectada ante una contingencia y proteger los equipos eléctricos del sistema proyectado (Pérez San Martín, 2021).

1.5.4. Valor Teórico.

El valor teórico de la investigación radica en integrar criterios de selectividad, sensibilidad, seguridad, confiabilidad y coordinación aplicados a protecciones por sobrecorriente y falla a tierra en un sistema eléctrico minero proyectado. La investigación enriquece el saber práctico al desglosar minuciosamente el comportamiento de los códigos ANSI 50/51 y 50N/51N, bajo la premisa de que la selectividad del sistema exige programar umbrales de corriente, familias de curvas y retardos cronométricos precisos para segregar exclusivamente el sector de la red bajo disturbio. Además, el estudio contribuye a diferenciar metodológicamente entre una evaluación operativa basada en registros reales y una validación técnica en etapa de proyecto basada en simulación, lo cual resulta relevante para investigaciones en sistemas eléctricos que aún no cuentan con operación en campo. (IEEE Power and Energy Society, 2015).

1.5.5. Utilidad Metodológica.

La utilidad metodológica de la investigación se sustenta en el uso de un procedimiento técnico basado en simulación computacional mediante DIgSILENT PowerFactory. Este enfoque viabiliza el análisis de una red eléctrica planeada prescindiendo de registros empíricos en campo,

estructurándose a través de fases sucesivas que abarcan el acopio de datos de ingeniería, la digitalización del sistema, la simulación de tránsitos de carga, la cuantificación de corrientes de falla, el diagnóstico de las curvas TCC y la determinación de las consignas de calibración para las salvaguardas. La metodología es útil porque permite validar escenarios de falla antes de la instalación y energización del sistema, reduciendo la dependencia de pruebas en campo y evitando asumir información operativa inexistente. Asimismo, este protocolo sirve como modelo para estudios homólogos de selectividad en redes mineras de media tensión, especialmente al evaluar de forma predictiva la respuesta de los relés ante fallas de fase y de tierra (Moreno Maldonado, 2016); (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025).

1.6. Objetivos.

1.6.1. Objetivo General

Optimizar la selectividad y coordinación de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra para incrementar la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.

1.6.2. Objetivos Específicos

1) Determinar el análisis de flujo de potencia y cortocircuito mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.
2) Optimizar los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N para mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.

3) Analizar las curvas tiempo-corriente y márgenes de coordinación para reducir disparos intempestivos e incrementar la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.

1.7. Hipótesis

1.7.1. Hipótesis General

La optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, bajo criterios normativos y simulación en software, incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.

1.7.2. Hipótesis Específicas

1) El análisis de flujo de potencia y cortocircuito, considerando corrientes de falla y sistema de aterramiento, se determina mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.
2) La optimización de los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N, con una coordinación entre protecciones principales y de respaldo, permite mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.
3) El análisis de las curvas tiempo-corriente y los márgenes de coordinación reduce significativamente los disparos intempestivos e incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

El estado del arte se estructura a partir de investigaciones globales y locales centradas en el diseño selectivo de sistemas de seguridad, el escalonamiento operativo de relevadores de sobrecorriente, la mitigación de fallas monofásicas a tierra y el empleo de entornos de simulación digital para diagnosticar redes de media tensión. La revisión se orienta a investigaciones que emplean análisis de flujo de potencia, cálculo de cortocircuito, curvas tiempo-corriente y ajustes de dispositivos de protección, debido a que estos procedimientos guardan relación directa con la optimización de las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N planteada para el sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco. Asimismo, se considera que la presente tesis se desarrolla mediante simulaciones en DIgSILENT PowerFactory, por lo que los antecedentes se interpretan como sustento técnico-metodológico y no como evidencia de operación real de la mina en estudio (Pérez San Martín, 2021).

2.1.1. Internacionales

Según (Pérez San Martín, 2021), en la Universidad de Chile, desarrolló la investigación titulada “Coordinación de protecciones de sistemas eléctricos de potencia mediante formulación de problema de optimización”, con fin de coordinar ajustes de protecciones eléctricas de sobrecorriente mediante un problema de optimización entero mixto no lineal. La metodología consistió en formular un modelo que considere las características de los relés de sobrecorriente, cuyo propósito fue optimizar los retardos de disparo asegurando la preservación del escalonamiento, la discriminación de zonas y la precisión ante fallas. Para ello, el autor desarrolló un programa en Python, resolvió el modelo mediante GEKKO y validó los resultados en ETAP.

El principal aporte de este antecedente es que demuestra que la coordinación de protecciones por sobrecorriente puede abordarse como un problema de optimización técnica, lo cual guarda relación con la presente investigación al buscar ajustes selectivos y sensibles para el sistema eléctrico proyectado de Coroccohuayco, aunque en este caso la validación se desarrolló mediante DIgSILENT PowerFactory.

En la investigación realizada por (Laksono et al., 2022), desarrollaron un estudio sobre ajustes de coordinación de relés de protección y su integración con PLC en el sistema eléctrico de PT Semen Padang. El objetivo fue evaluar los ajustes del sistema de protección, especialmente de relés de sobrecorriente, debido a que las configuraciones existentes no coordinaban adecuadamente y podían afectar cargas críticas del proceso productivo. La metodología incluyó cálculos de coordinación, comparación con el estado existente y diseño de un sistema automático de rechazo de carga mediante PLC Siemens S7-1500. Como resultado, se identificaron diferencias significativas entre los ajustes existentes y los calculados, concluyendo que los relés no coordinaban adecuadamente en el estado inicial, mientras que después del cálculo sí lograban una coordinación apropiada. Este antecedente aporta a la tesis al evidenciar la importancia de revisar y optimizar ajustes de relés para mantener selectividad, sensibilidad, confiabilidad y rapidez de actuación en sistemas industriales con cargas críticas.

(Capa Carrillo & Parrales Paladines, 2018), en Ecuador, realizaron el “Estudio de coordinación de protecciones del sistema de generador-transformador y línea de evacuación en la Unidad N.° 3 de la Central Hidroeléctrica Minas–San Francisco”. El objetivo fue plantear datos de coordinación de protecciones para el generador, transformador de potencia y línea corta, con la finalidad de proteger los equipos y evitar que la unidad quede fuera de servicio. La metodología comprendió recopilación de datos, cálculos eléctricos y simulaciones en DIgSILENT

PowerFactory, considerando flujo de potencia, fallas y ajustes de protecciones. Entre los aspectos técnicos relevantes, el estudio incluyó criterios para las funciones 51 y 51N, así como el uso de transformadores de corriente y parámetros de relés. Este antecedente resulta pertinente porque emplea DIgSILENT PowerFactory como herramienta de simulación y refuerza la necesidad de validar los ajustes de protección antes de su aplicación operativa.

(Tinoco Espinoza & González Avilés, 2025), en Nicaragua, se desarrolló un diagnóstico de selectividad para la subestación de bombeo del Ingenio Monte Rosa, orientado a elevar la continuidad operativa del suministro destinado al sector agrícola. El procedimiento analítico contempló la digitalización de la infraestructura en el entorno ETAP, el examen del flujo de potencia, la reproducción virtual de contingencias, el cálculo de corrientes de falla y la verificación de gráficas TCC bajo los estándares internacionales IEC y ANSI. Los hallazgos evidenciaron vulnerabilidades en el escalonamiento de las salvaguardas, lo que permitió definir consignas de calibración optimizadas para los relevadores, incrementando la precisión y robustez de la red. Dicha investigación aporta valor al proyecto actual al validar una ruta metodológica reproducible para auditar esquemas de seguridad mediante simulación, puntualmente en el contraste analítico de curvas temporizadas, retardos de disparo e intervalos de seguridad.

(Amador Orozco, 2023), en Costa Rica, realizó un diagnóstico del sistema eléctrico de Cooper Standard Cartago mediante análisis de corrientes de cortocircuito y arco eléctrico. El objetivo fue evaluar el sistema eléctrico de una planta industrial a partir del levantamiento de diagramas, cálculo de corrientes de cortocircuito, validación con ETAP y revisión de la capacidad de interrupción de las protecciones. La metodología incluyó levantamiento del diagrama unifilar, análisis de cargas, cálculo manual de cortocircuito y modelamiento en software de simulación. Los resultados permitieron establecer recomendaciones para robustecer el sistema, minimizar riesgos

asociados a fallas y mejorar la capacidad de respuesta de las protecciones. Su aporte a la tesis consiste en reforzar la importancia de contar con una base técnica confiable —diagrama unifilar, cargas, cortocircuitos y capacidad interruptiva— antes de definir ajustes de coordinación de protecciones.

2.1.2. Nacionales

(Chirhuana Aybar, 2020), en la Universidad Nacional de Ingeniería, se elaboró la investigación titulada "Estudio de cortocircuito y coordinación de protección del sistema eléctrico en 33 kV y 10 kV del proyecto Planta PTAE de Minera Antapaccay". Este trabajo tuvo como meta central evaluar el comportamiento del flujo de carga, las magnitudes de falla y el escalonamiento de las salvaguardas en dicha infraestructura, con el fin de definir los parámetros de calibración de los relés para asegurar un despeje veloz, discriminado y preciso ante anomalías operativas. La metodología empleó ETAP para modelar el sistema desde la red equivalente Thévenin del SEIN, calcular niveles de tensión, sobrecarga, corrientes de cortocircuito y graficar curvas de protección. Los resultados verificaron la capacidad de interrupción de los equipos y permitieron seleccionar curvas conforme a recomendaciones IEEE. Este antecedente es especialmente relevante por tratarse de un proyecto minero asociado a Antapaccay, cercano al contexto técnico de Coroccohuayco, y porque plantea la coordinación como una validación previa del sistema eléctrico proyectado.

(Vilcahuamán De La Cruz, 2021), en la Universidad Nacional del Centro del Perú, realizó el "Estudio de coordinación de protecciones del sistema eléctrico de media tensión de la Unidad Minera Kolpa, Huancavelica El proyecto se enfocó en diagnosticar el aislamiento coordinado de una red extractiva en media tensión (22 kV), ejecutando modelados de tránsito de potencia, cuantificación de corrientes de falla y parametrización de relevadores. La arquitectura analítica

contempló la configuración de las prestaciones de sobrecorriente para contingencias entre líneas (50P/51P) y derivaciones a tierra (50N/51N), complementada con la determinación de umbrales operativos y ensayos funcionales en los dispositivos de maniobra. Este antecedente aporta directamente a la presente investigación porque aborda funciones equivalentes a las consideradas en Coroccohuayco y confirma la pertinencia de evaluar por separado fallas de fase y fallas a tierra en sistemas mineros de media tensión.

(Frias Serruto, 2022) desarrolló un estudio de coordinación de protección eléctrica para equipos de palas y perforadoras en la mina Cuajone. La metodología fue de tipo cuasi experimental y correlacional, empleando el software ETAP v.16 para modelar palas, perforadoras, switch house y subestaciones, con el fin de proponer nuevos grupos de ajustes y esquemas de protección. El estudio consideró funciones temporizadas de fase 51P y tierra 51G, aplicando criterios como 0,6 veces la corriente nominal para fallas temporizadas de fase y 0,1 veces la corriente nominal para fallas temporizadas a tierra, además de curvas de característica muy inversa. En los resultados se compararon indicadores de disponibilidad física y mecánica antes y después del estudio de coordinación, reportándose incrementos en varios equipos.

(Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025) realizaron el “Estudio de coordinación de protecciones para evaluar la operatividad de un nuevo sistema de bombeo en una minera, San Marcos - 2021”. La meta central consistió en elaborar un diagnóstico de selectividad en las salvaguardas para validar la continuidad y seguridad operativa de una infraestructura de bombeo de agua de proceso recientemente proyectada. La metodología tuvo enfoque cuantitativo, diseño cuasi experimental transversal y aplicó simulaciones en DIgSILENT PowerFactory sobre 23 dispositivos de protección, considerando normas ANSI e IEEE y cuatro casos de estudio bajo condiciones normales y de contingencia. Los resultados determinaron corrientes máximas de falla

de 29.76 kA en la barra de 23 kV y 44.37 kA en la barra de 4.16 kV para determinados casos, además de identificar escenarios donde se superaba la capacidad de soporte de interruptores. Este antecedente aporta al presente estudio porque demuestra la utilidad de DIgSILENT PowerFactory para evaluar sistemas eléctricos mineros nuevos mediante flujo de potencia, cortocircuito, coordinación y verificación de soportabilidad de equipos.

(Montesinos Cáceres, 2025), en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, desarrolló el trabajo "Diseño de la coordinación de la protección de sobrecorriente en cargas móviles de mina", aplicado a Shougang Hierro Perú. La finalidad fue lograr la confiabilidad del sistema eléctrico de la mina mediante un esquema coordinado de relés ante fallas de sobrecorriente. La metodología incluyó recolección de información técnica en campo, digitalización de diagramas, modelamiento de la red eléctrica en DIgSILENT y ajuste de parámetros de protección a partir de simulaciones de falla. El estudio aporta a la presente tesis porque aborda protecciones de sobrecorriente en cargas mineras, utilizando un procedimiento progresivo de levantamiento técnico, modelamiento, análisis de cortocircuito y ajuste de relés, criterios compatibles con la metodología propuesta para Coroccohuayco.

(Cáceres Jiménez, 2025), también en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, realizó el "Análisis de coordinación de protecciones del sistema eléctrico del anillo mina Toquepala". El estudio se desarrolló en una red minera con cargas de comportamiento variable, considerando que la corriente de arranque de perforadoras eléctricas puede alcanzar hasta siete veces la corriente nominal, lo que genera fluctuaciones de tensión y exige criterios adecuados de coordinación. La estrategia implicó recopilar datos con registradores de redes, simular flujos de carga, calcular cortocircuitos y coordinar las protecciones. Además, la persona que elaboró la investigación, señaló que la pérdida económica por una pala detenida durante una hora puede

ubicarse entre US$ 12 000 y US$ 50 000, dependiendo del tamaño del equipo y la zona de operación. Este antecedente fortalece la justificación técnica de la presente tesis, al evidenciar que las cargas mineras variables requieren ajustes de protección cuidadosamente coordinados para evitar disparos no deseados y pérdidas operativas.

2.2. Códigos y Normas Aplicables

- IEEE Std. 242-2001: Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power System.
- IEEE Std C37.91-2021: Guide for Protecting Power Transformers.
- IEEE Std C141-1993: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- IEEE Std C57.12.59-2015 Guide for Dry-Type Transformer Through-Fault Current Duration.
- IEC 60255-151:2009 Partie 151: Exigences fonctionnelles pour les protections à minimum et maximum de courant.
- COES: Criterios de Ajuste y Coordinacion de los Sistemas de Proteccion del SEIN 2022.

2.3. Bases Teóricas

El sustento científico y conceptual que respalda el desarrollo de este estudio, comprenden los fundamentos técnicos necesarios para sustentar la optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra en un sistema eléctrico minero proyectado. Bajo este enfoque, se abordan los fundamentos de seguridad de redes, el escalonamiento de relés, los códigos de sobrecorriente de fase y neutro, las curvas TCC, los flujos de potencia, el cálculo de cortocircuitos, la simulación en DIgSILENT PowerFactory y la

continuidad operativa prevista. Estos fundamentos permiten establecer una base técnica coherente con el enfoque de la tesis, considerando que la Mina Coroccohuayco se encuentra en etapa de proyecto y que el análisis se realizará mediante simulación, sin asumir registros reales de operación (Montesinos Cáceres, 2025).

2.3.1. Sistemas de Protección Eléctrica en Redes de Media Tensión

Los sistemas de protección eléctrica tienen como finalidad detectar condiciones anormales de operación, aislar la zona afectada por una falla y preservar la continuidad del suministro en las zonas no comprometidas. En redes de media tensión, estas arquitecturas integran relés, disyuntores, transformadores de medida y componentes auxiliares que registran los parámetros eléctricos, los contrastan con umbrales preestablecidos y ordenan el disparo del circuito al superarse las condiciones admisibles. Por ello, la protección eléctrica no solo cumple una función de seguridad para equipos y personas, sino también una función operativa vinculada con la continuidad del servicio (IEEE Power and Energy Society, 2015).

En sistemas industriales y mineros, la protección eléctrica adquiere mayor relevancia debido a la presencia de cargas críticas, alimentadores de media tensión, transformadores, motores, subestaciones y procesos que dependen de la disponibilidad continua de energía. La literatura técnica señala que, cuando las protecciones no actúan de manera clara, confiable y selectiva, pueden producirse desconexiones no deseadas, interrupciones de suministro y salida de cargas que no forman parte de la zona fallada. Por tanto, un sistema de protección debe diseñarse y ajustarse considerando confiabilidad, sensibilidad, selectividad, rapidez y seguridad de operación (Klyuev et al., 2021).

2.3.2. Selectividad de Protecciones

La selectividad es la capacidad del sistema de protección para lograr que opere el dispositivo más cercano al punto de falla, evitando que se desconecten zonas sanas del sistema eléctrico. Este principio permite limitar la extensión del área afectada y mantener energizadas las cargas que no se encuentran comprometidas por la contingencia. En una red con múltiples niveles de seguridad, la selectividad exige un orden jerárquico donde las protecciones de respaldo actúen únicamente si el dispositivo principal falla al despejar el disturbio (IEEE Power and Energy Society, 2015).

Bajo criterios de ingeniería, la selectividad se valida contrastando retardos de disparo, umbrales de arranque, gráficas TCC y márgenes de seguridad. Si el respaldo se anticipa a la protección principal, la zona desenergizada se expande injustificadamente, comprometiendo la continuidad del suministro eléctrico. Por ello, la selectividad constituye una condición esencial para la optimización del sistema de protecciones, especialmente en redes industriales donde una falla localizada no debe ocasionar la desconexión de alimentadores principales o barras no afectadas (Pérez San Martín, 2021).

2.3.3. Coordinación de Protecciones por Sobrecorriente

El diseño de selectividad por sobrecorriente radica en determinar las consignas de corriente y los retardos cronométricos en los sistemas de salvaguarda para garantizar una desconexión escalonada ante anomalías operativas. Este procedimiento técnico exige la caracterización de la arquitectura de la red, las demandas de carga, los valores extremos de falla, las especificaciones de los relés, el comportamiento de las curvas TCC y los intervalos de seguridad establecidos entre las unidades de primera línea y sus respectivas reservas. En sistemas radiales, la coordinación se

realiza normalmente desde las cargas hacia la fuente, asegurando que la protección ubicada aguas abajo actúe primero ante una falla en su zona de cobertura (Boaski et al., 2017).

La coordinación adecuada permite reducir el riesgo de desconexiones no selectivas, proteger los equipos frente a esfuerzos térmicos y electrodinámicos, y mejorar la confiabilidad del suministro. En redes mineras, este criterio es relevante porque una falla mal despejada puede provocar la desconexión de más de un circuito, afectar cargas críticas y reducir la continuidad operativa. Por ello, la coordinación no debe limitarse a seleccionar dispositivos de protección, sino que debe validar su comportamiento frente a distintos escenarios de falla mediante cálculos y simulaciones (Kostin & Minakova, 2017).

2.3.4. Protección por Sobrecorriente ANSI 50/51

Las funciones ANSI 50/51 responden a protecciones de sobrecorriente de fase. El código ANSI 50 responde de forma inmediata al rebasarse un umbral de corriente parametrizado, en tanto que la prestación ANSI 51 introduce un desfase cronométrico en el disparo determinado por el perfil de una curva de operación. La función instantánea resulta útil para despejar fallas de alta magnitud en tiempos reducidos, mientras que la función temporizada permite coordinar con protecciones aguas abajo y evitar disparos innecesarios ante corrientes transitorias o condiciones de carga admisibles (Vilcahuamán De La Cruz, 2021).

La calibración de las prestaciones ANSI 50/51 demanda ponderar la demanda pico del circuito y la magnitud de cortocircuito más baja registrada dentro del sector bajo resguardo, la capacidad térmica de conductores y equipos, la relación de los transformadores de corriente y la curva de operación del relé. Si el ajuste de arranque es demasiado bajo, el relé puede operar ante condiciones normales o transitorias; si es demasiado alto, puede perder sensibilidad frente a fallas de baja magnitud. Por ello, la optimización de la función 50/51 implica equilibrar sensibilidad,

rapidez y selectividad, asegurando que la protección opere ante fallas de fase sin comprometer la continuidad de zonas sanas del sistema (Pérez San Martín, 2021).

$$t_{op} = \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{OP}}{I_s}\right)^{B} - C} + D \right) . TMS$$

- t_{OP}: Tiempo de actuación del Relé (variable dependiente)
- I_{OP}: Corriente que mide el Relé (variable independiente)
- A: Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- B: Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- C: Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- D: Parámetro que define la curva característica de operación del Relé
- Is: Corriente de Arranque del Relé
- TMS: Dial o Constante de ajuste del Relé

Código ANSI 51.

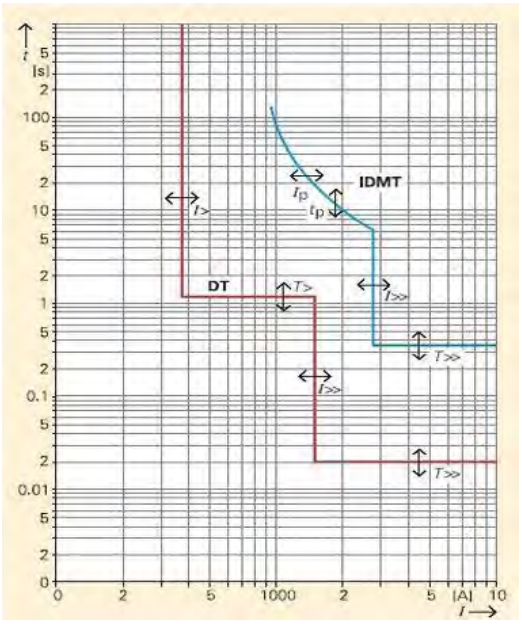
- La corriente de arranque del relé Is, magnitud mínima de corriente que activa la operación diferida del relevador.
- La constante TMS, parámetro que calibra el retardo del disparo en función de la curva seleccionada.

Código ANSI 50.

- La corriente de arranque Is, es el umbral de corriente más bajo para ordenar una desconexión de forma inmediata.
- Su temporización es con retardo mínimo remanente que incorporan ciertos equipos por diseño, pese a ser una función instantánea.

Se muestra el contraste analítico entre la calibración de un relevador de sobrecorriente temporizado inverso junto a un elemento instantáneo, frente a la parametrización de un dispositivo de sobrecorriente de tiempo independiente configurado con dos escalones de activación (50/51).

Figura 3. *Características de operación de los relés de sobrecorriente*



Nota. COES SINAC Criterios de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN

El perfil inverso está supeditado a los coeficientes numéricos A, B, C y D, vinculados con las demás variables del relé según los estándares normativos. En la tabla 1 se detallan dichas magnitudes.

Tabla 1. *Características de curvas de relés de sobrecorriente de fases*

Característica		IEC/BS				ANSI/IEEE			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Tiempo definido		-		0	1				
Normal Inverso	NI	0.14	0.02	1	0	8.9341	2.0938	1	0.17966
Muy Inverso	VI	13.5	1	1	0	3.922	2	1	0.0982
Extremadamente Inverso	EI	80	2	1	0	5.64	2	1	0.02434
Inverso de Larga duración	LI	120	1	1	0	5.6143	1	1	2.18592

Nota. COES, 2022.

2.3.5. Protección de Falla a Tierra ANSI 50N/51N

Los códigos ANSI 50N/51N corresponden a protecciones de sobrecorriente de neutro o tierra. Estas funciones permiten detectar corrientes residuales asociadas a fallas monofásicas a tierra, las cuales pueden presentar magnitudes menores que las fallas trifásicas o bifásicas, dependiendo del sistema de puesta a tierra y de la impedancia del camino de falla. La función 50N actúa de manera instantánea ante una corriente residual elevada, mientras que la función 51N opera con retardo de tiempo para permitir coordinación con otros dispositivos del sistema (Chirhuana Aybar, 2020).

El análisis de fallas a tierra requiere considerar las componentes simétricas del sistema eléctrico. La componente de secuencia cero aparece cuando la falla involucra tierra, mientras que la secuencia negativa se asocia a condiciones desbalanceadas como fallas fase-fase, fase-tierra y doble fase a tierra. Por ello, las protecciones de falla a tierra deben ser suficientemente sensibles para detectar corrientes residuales, pero no tan sensibles como para operar ante desbalances normales o corrientes no asociadas a una falla real. En sistemas mineros, esta condición es especialmente importante porque las fallas monofásicas a tierra pueden evolucionar hacia fallas multifásicas si no son detectadas y despejadas oportunamente (Kojovic & Witte, 2002); (Zheng et al., 2011); (Klyuev et al., 2021).

2.3.6. Curvas Tiempo-Corriente y Criterios de Ajuste

Las gráficas TCC ilustran la correspondencia entre la intensidad de corriente que transita por una salvaguarda y su retardo de desconexión. Estas representaciones viabilizan el contraste operativo entre relés, disyuntores y fusibles, corroborando la existencia de un margen de seguridad suficiente entre el esquema principal y su reserva. En la coordinación de protecciones, las curvas

TCC permiten identificar traslapes, intersecciones, pérdida de selectividad o tiempos de despeje inadecuados (Tinoco Espinoza & González Avilés, 2025).

Las curvas de tiempo inverso responden al principio de que, mientras mayor sea la corriente de falla, menor será el tiempo de actuación del dispositivo. Bajo el estándar IEC, el retardo de desconexión se determina mediante la corriente de cortocircuito, el umbral de captación y el dial de tiempo. Al respecto, se formula el modelo matemático generalizado, asociando la corriente de falla, el *pickup* y el TDS, incorporando coeficientes para perfiles normal, muy, extremadamente, ultra inverso y de tiempo largo. Estos fundamentos guían la selección de la curva según la severidad del disturbio, la precisión requerida y el escalonamiento secuencial con las salvaguardas aguas arriba y aguas abajo (Kim et al., 2019).

El intervalo de selectividad establecido entre las salvaguardas debe calcularse integrando el retardo propio del relevador, el tiempo de desenergización del disyuntor, las desviaciones de medición, las imprecisiones intrínsecas de los TCs y los márgenes de dispersión operativos de los componentes. Si el margen es insuficiente, las curvas pueden superponerse y producir disparos no selectivos; si el margen es excesivo, el despeje de la falla puede resultar demasiado lento y aumentar los esfuerzos térmicos sobre los equipos. Por ello, la optimización de protecciones debe buscar un equilibrio entre rapidez y selectividad (Pérez San Martín, 2021).

2.3.7. Análisis de Flujo de Potencia y Cortocircuito

El examen del tránsito de carga viabiliza la determinación de las variables operativas de la red en estado estacionario, abarcando las magnitudes de voltaje, los flujos de potencia activa y reactiva, el factor de potencia y los índices de saturación en conductores, transformadores de potencia y demás activos de la infraestructura. Este análisis es necesario porque los ajustes de protección deben diferenciar entre corrientes normales de carga, sobrecargas admisibles, arranques

de motores y corrientes de falla. En sistemas proyectados, el flujo de potencia permite verificar si las condiciones de operación esperadas se mantienen dentro de límites técnicamente aceptables antes de definir ajustes de protección (Chirhuana Aybar, 2020).

El cómputo de fallas determina las corrientes extremas de cortocircuito en los nodos de la red. Los valores máximos validan el poder de corte de la aparamenta ante esfuerzos térmicos y electrodinámicos, mientras que los registros mínimos comprueban la sensibilidad de los relés. Los estudios revisados muestran que el cálculo de fallas trifásicas, monofásicas, bifásicas y bifásicas a tierra es una etapa indispensable para coordinar protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, ya que los ajustes deben garantizar operación adecuada tanto frente a fallas de alta magnitud como frente a fallas de menor corriente (Boaski et al., 2017).

2.3.8. Simulación Eléctrica Mediante DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT PowerFactory es una herramienta de simulación utilizada en estudios de sistemas eléctricos para modelar redes, ejecutar flujo de potencia, calcular cortocircuitos, parametrizar dispositivos de protección y verificar curvas de coordinación. Su aplicación permite analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios sin necesidad de intervenir físicamente la instalación. En investigaciones aplicadas a sistemas mineros, esta herramienta ha sido empleada para modelar redes eléctricas, calcular parámetros equivalentes, simular fallas y validar ajustes de protección (Moreno Maldonado, 2016).

La adopción de DIgSILENT PowerFactory se adecúa a la fase de diseño de Coroccohuayco, ya que viabiliza el diagnóstico predictivo de la red antes de su puesta en servicio. Mediante la digitalización del sistema, el flujo de carga, el cálculo de fallas y las gráficas TCC, se corrobora si los parámetros de los códigos ANSI 50/51 y 50N/51N cumplen con los criterios de selectividad, precisión y sincronía necesarios. De esta manera, la simulación constituye una

herramienta de validación técnica anticipada y no una sustitución de registros reales de operación (Capa Carrillo & Parrales Paladines, 2018).

2.3.9. Disponibilidad Operativa y Confiabilidad Eléctrica

La disponibilidad operativa de un sistema eléctrico se relaciona con la capacidad de mantenerse en condiciones de suministrar energía a las cargas durante el periodo requerido. En sistemas eléctricos industriales y mineros, esta disponibilidad depende de diversos factores, entre ellos la confiabilidad de los equipos, la mantenibilidad, la rapidez de reposición del servicio y la correcta operación de las protecciones. La fiabilidad, por su parte, se define como la expectativa matemática de que la red opere correctamente dentro de un intervalo temporal específico, mitigando la ocurrencia de desconexiones forzadas o imprevistas (Chancasanampa Pacheco, 2019).

La coordinación de protecciones influye en la disponibilidad porque determina qué parte del sistema será desconectada ante una falla y cuánto tiempo permanecerá fuera de servicio. Un esquema de protección no selectivo puede ampliar innecesariamente el área afectada, incrementar la duración de la interrupción y dificultar la localización del evento. En cambio, una coordinación adecuada permite aislar la zona fallada, limitar la afectación a cargas no comprometidas y favorecer la continuidad del suministro. Por ello, los estudios de confiabilidad consideran que la protección tiene impacto directo sobre indicadores de interrupción y energía no suministrada (Boaski et al., 2017); (Klyuev et al., 2021).

En la presente tesis, la disponibilidad operativa debe entenderse como una contribución técnica esperada para la futura operación de la Mina Coroccohuayco, no como un indicador histórico medido en campo. Al tratarse de un sistema eléctrico proyectado, no corresponde afirmar valores reales de SAIFI, SAIDI, MTBF, MTTR o energía no suministrada propios de la mina. Sin

embargo, estos conceptos son útiles como referencia teórica para explicar por qué una coordinación selectiva y sensible puede reducir el riesgo de desconexiones no selectivas y contribuir a una mayor continuidad futura del suministro eléctrico (Chancasanampa Pacheco, 2019); (Boaski et al., 2017).

2.3.10. Optimización de la Selectividad y Coordinación de Protecciones

La optimización de la selectividad y coordinación de protecciones consiste en ajustar técnicamente los parámetros de los relés para mejorar su desempeño frente a fallas simuladas, manteniendo la operación jerárquica entre protecciones principales y de respaldo. Esta optimización involucra la selección de curvas, corrientes de pickup, retardos de tiempo, funciones instantáneas, temporizadas y elementos de neutro o tierra. Su finalidad es lograr que la protección actúe con rapidez suficiente para limitar daños, pero con el retardo necesario para preservar la selectividad entre dispositivos (Pérez San Martín, 2021).

En el caso de la Mina Coroccohuayco, la optimización se orienta a las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N del sistema eléctrico proyectado. Así, el procedimiento técnico arranca con el modelado en DIgSILENT PowerFactory, avanza mediante las simulaciones de potencia y fallas, y finaliza comprobando la selectividad de las curvas TCC y sus márgenes de protección. Bajo este enfoque, la optimización no demuestra una mejora operativa ya ocurrida, sino que establece una propuesta técnica de ajustes para reducir el riesgo de disparos no selectivos durante la futura operación del sistema eléctrico minero (Huaynate Sanchez & Nova Diaz, 2025).

2.4. Definición de Términos

Protección por Sobrecorriente ANSI 50/51. Protección que detecta corrientes de fase superiores al ajuste definido, operando de forma instantánea mediante ANSI 50 o temporizada mediante ANSI 51.

Protección de Falla a Tierra ANSI 50N/51N. Protección que detecta corrientes residuales o de neutro asociadas a fallas a tierra, operando de forma instantánea o temporizada según el ajuste establecido.

Relé de Protección. Dispositivo electrónico que mide variables eléctricas, compara sus valores con ajustes configurados y ordena el disparo del interruptor ante condiciones de falla.

Intelligent Electronic Device (IED). Equipo electrónico basado en microprocesador que integra funciones de protección, medición, control, comunicación y registro de eventos eléctricos.

Interruptor de Potencia. Equipo de maniobra capaz de abrir o cerrar circuitos eléctricos e interrumpir corrientes de falla dentro de su capacidad nominal.

Circuit Breaker. Interruptor automático utilizado para proteger equipos, barras o alimentadores, despejando fallas mediante unidades de disparo o relés asociados.

Recloser. Equipo de protección instalado en la derivación de 35.5 kV, capaz de interrumpir fallas y realizar reconexiones automáticas programadas.

Transformador de Potencia. Equipo que modifica el nivel de tensión del sistema, permitiendo alimentar barras de 4.16 kV o 0.44 kV desde la red de 35.5 kV.

Impedancia de Cortocircuito (Zcc). Parámetro del transformador que limita la corriente de falla y permite estimar los niveles de cortocircuito en sus barras secundarias.

Transformador de Corriente (TC). Equipo que reduce la corriente primaria a un valor secundario proporcional, adecuado para medición y protección mediante relés.

Neutral Grounding Resistor (NGR). Resistencia conectada al neutro para limitar la corriente de falla a tierra y permitir su detección mediante protecciones 50N/51N.

Sistema de Aterramiento. Configuración de enlace del punto neutro o carcasas metálicas a la malla de tierra, cuyo diseño condiciona directamente la severidad de las corrientes de cortocircuito homopolar y los parámetros de calibración de los esquemas de protección.

Diagrama Unifilar. Representación simplificada del sistema eléctrico que muestra niveles de tensión, transformadores, barras, alimentadores, interruptores y relés principales.

Corriente de Cortocircuito (Icc). Corriente que circula durante una falla eléctrica, utilizada para verificar capacidad interruptiva, sensibilidad y coordinación de protecciones.

Resistencia de Falla (Rf). Resistencia presente en el punto de falla o trayectoria hacia tierra, considerada para evaluar la severidad y detectabilidad de la falla.

Curva TCC (Time-Current Curve). Gráfica que relaciona corriente y tiempo de operación de protecciones, utilizada para verificar coordinación y selectividad.

Curva Normal Inversa (NI). Curva de tiempo inverso usada en alimentadores y respaldos, cuyo tiempo de operación disminuye al aumentar la corriente.

Curva Muy Inversa (VI). Curva de mayor pendiente que la NI, empleada cuando se requiere respuesta más rápida ante fallas elevadas manteniendo selectividad.

Curva Extremadamente Inversa (EI). Curva de alta pendiente utilizada para coordinación con fusibles o cargas con características particulares de arranque o falla.

Inversa de Largo Tiempo (LI). Curva de actuación prolongada aplicada en sobrecargas sostenidas o respaldos donde se admiten mayores tiempos de operación.

Pickup. Corriente mínima de operación a partir de la cual el relé inicia su temporización o disparo.

Tap. Ajuste del relé referido a la corriente secundaria del TC, usado para definir el nivel de actuación de la protección.

Time Multiplier Setting (TMS). Factor de tiempo en curvas IEC que desplaza la curva de operación para lograr coordinación entre protecciones.

Time Dial (TD). Ajuste de tiempo en curvas ANSI equivalente al TMS, utilizado para coordinar la actuación del relé.

Margen de Coordinación (Δt). Diferencia de tiempo entre la protección principal y la de respaldo, necesaria para asegurar actuación selectiva.

Protección Diferencial. Salvaguarda que contrasta los flujos de corriente entrantes y salientes de un perímetro delimitado para detectar e interrumpir anomalías internas de forma inmediata.

Saturación de Transformadores de Corriente. Condición en la que el TC pierde proporcionalidad por corrientes elevadas, afectando la medición del relé.

Secuencia Cero. Componente asociada a corrientes de falla a tierra, utilizada para detectar corrientes residuales mediante TC o toroides.

Secuencia Negativa. Componente producida por desbalances eléctricos, relevante por su efecto térmico en motores y equipos rotativos.

Corriente de Inserción (inrush). Corriente transitoria elevada producida al energizar transformadores, que debe distinguirse de una falla real.

Bloqueo de Segundo Armónico. Función que evita disparos indebidos durante la corriente de inserción del transformador.

Protección de Jam. Protección de motores que detecta rotor bloqueado o atasco mecánico para evitar daños térmicos y mecánicos.

Protección de Sobrecarga Térmica. Protección que estima el calentamiento acumulado del equipo y ordena el disparo antes de superar su límite térmico.

Load, Short, Instantaneous and Ground (LSIG). Lógica de protección en baja tensión que integra largo tiempo, corto tiempo, instantáneo y falla a tierra.

DIgSILENT PowerFactory 2024. Entorno de simulación digital empleado para la estructuración virtual de redes eléctricas, la evaluación del tránsito de energía, la cuantificación de fallas operativas y la fiscalización del entrelazamiento selectivo de los sistemas de seguridad.

SIGMA. Formato o plataforma para organizar ajustes de relés e interruptores, facilitando la revisión y trazabilidad de parámetros de protección

RTC. Es la Relación de Transformación del Transformador de Corriente (TC), que reduce las altas corrientes del sistema a niveles seguros.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de Investigación

Este estudio se enmarca en una metodología cuantitativa, en vista de que el diagnóstico se sustenta en variables físicas medibles y sujetas a contrastación estadística, abarcando los niveles de voltaje, el tránsito de carga, las intensidades de cortocircuito, los umbrales de captación de los relevadores, los retardos cronométricos de disparo, los intervalos de selectividad y las métricas derivadas del modelado virtual de contingencias. Estos valores permitirán evaluar técnicamente el comportamiento del sistema de protección proyectado de la Mina Coroccohuayco.

El estudio se desarrolla mediante revisión documental técnica, modelamiento del sistema eléctrico proyectado y simulaciones en DIgSILENT PowerFactory. En ese sentido, la metodología no comprenderá mediciones reales de campo, registros históricos de fallas, oscilografías ni implementación física de ajustes, debido a que la Mina Coroccohuayco aún se encuentra en etapa de proyecto. Por tanto, la evaluación se orientará a validar anticipadamente la selectividad y coordinación de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, considerando escenarios eléctricos simulados.

La ruta metodológica contempla el acopio de datos de ingeniería del sistema, el inventario de activos principales, relevadores y disyuntores, la digitalización de la infraestructura, el modelado de los flujos de carga, el cómputo de fallas de cortocircuito, el diagnóstico de los códigos de sobrecorriente de fase y neutro, y la fiscalización de las gráficas TCC. Con base en este diagnóstico, se formularán consignas de calibración perfeccionadas que optimicen la discriminación, precisión y sincronía de los esquemas de seguridad, propiciando el incremento proyectado en la tasa de continuidad operativa.

3.2. Tipo y Nivel de Investigación

El estudio se clasifica como una investigación aplicada, puesto que se orienta a solucionar un requerimiento técnico específico vinculado al diseño selectivo de las salvaguardas de la futura red eléctrica del yacimiento Coroccohuayco. El propósito no radica en formular constructos teóricos abstractos, sino en instrumentar principios de ingeniería, cálculos de fallas, tránsitos de potencia y escalonamiento de relevadores para determinar los parámetros operativos idóneos en las prestaciones ante contingencias de fase y lazos de retorno por el neutro.

Asimismo, la investigación presenta carácter tecnológico, debido a que emplea herramientas de simulación eléctrica para modelar el sistema, representar condiciones de operación y falla, y validar el desempeño de los dispositivos de protección. El uso de DIgSILENT PowerFactory permitirá analizar de manera computacional el comportamiento del sistema proyectado, sin intervenir físicamente la instalación ni asumir condiciones reales de operación.

El estudio se sitúa en un nivel descriptivo-propositivo. Posee una naturaleza descriptiva al pormenorizar las propiedades de la red planeada, inventariar su equipamiento crítico, relés y disyuntores, y diagnosticar las magnitudes de voltaje, las intensidades de cortocircuito y las restricciones operativas de selectividad. Además, tiene alcance explicativo técnico en la medida en que relaciona los ajustes de protección con el desempeño esperado del sistema frente a fallas simuladas.

3.3. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal y basado en simulación. Es no experimental porque no se manipulará físicamente el sistema eléctrico ni se ejecutaron pruebas reales sobre equipos instalados en operación. La evaluación se realizará sobre el sistema eléctrico proyectado, mediante modelamiento y análisis computacional.

Es transversal porque el estudio se desarrolla considerando la información técnica disponible del proyecto en un periodo definido, correspondiente al año 2025. No se evaluará una evolución histórica de eventos, fallas o indicadores operativos, sino una condición técnica proyectada del sistema eléctrico bajo escenarios de simulación.

El diseño también es técnico-comparativo, porque se evaluará el comportamiento de los ajustes de protección y se comparará su desempeño respecto a criterios de selectividad, sensibilidad, tiempos de actuación y márgenes de coordinación. Esta comparación permitirá determinar si los ajustes propuestos cumplen con la actuación jerárquica esperada entre protecciones principales y de respaldo.

3.4. Unidad de Análisis

El objeto de estudio queda constituido por la futura infraestructura eléctrica del yacimiento Coroccohuayco y, puntualmente, por los componentes de salvaguarda vinculados a los esquemas de sobrecorriente y derivaciones por el neutro. Dentro de esta unidad se consideran los relés, interruptores, barras, alimentadores, transformadores, celdas y demás elementos eléctricos necesarios para evaluar la coordinación de protecciones.

La unidad de análisis se delimita a los componentes que intervienen directamente en la actuación de las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N. Por ello, no forman parte de la unidad de análisis los estudios ambientales, geotécnicos, metalúrgicos, económicos, mecánicos o de diseño minero, salvo que aporten información estrictamente necesaria para representar el sistema eléctrico proyectado.

3.5. Técnicas de Selección de Muestra

La técnica de selección de muestra será no probabilística por criterio técnico o intencional. Se seleccionarán los equipos y escenarios que tengan relación directa con la coordinación de

protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, priorizando aquellos puntos del sistema donde sea necesario verificar la selectividad y sensibilidad.

El criterio de inclusión contempla los activos eléctricos integrados en las trayectorias de selectividad entre las salvaguardas de primera línea y sus contingencias de reserva; de igual modo, se incorporan las condiciones de disturbio indispensables para diagnosticar la respuesta dinámica de los códigos ANSI 50/51 y 50N/51N ante cortocircuitos entre fases y derivaciones monofásicas a masa. No se empleará muestreo aleatorio porque la investigación requiere analizar componentes específicos del sistema eléctrico proyectado.

3.6. Técnicas de Recolección de Información

Las técnicas de recolección de información serán la revisión documental técnica y el registro de datos eléctricos del proyecto. La revisión documental comprenderá planos unifilares, memorias descriptivas, especificaciones técnicas, hojas de datos de transformadores, relés e interruptores, parámetros de ajuste disponibles, características de equipos y demás información necesaria para representar el sistema eléctrico en DIgSILENT PowerFactory.

También se utilizará una ficha técnica de recopilación de datos para organizar la información de cada componente eléctrico, incluyendo nivel de tensión, potencia nominal, relación de transformación, impedancias, capacidad de interrupción, relación de transformadores de corriente, funciones de protección disponibles, curvas de operación y parámetros de ajuste. Esta información será utilizada como entrada para el modelamiento del sistema, el cálculo de cortocircuito y la evaluación de coordinación.

No se considerará como técnica de recolección la medición directa en campo ni el levantamiento de registros históricos de operación, debido a que la mina aún no se encuentra

operativa. La información será obtenida exclusivamente de la documentación técnica disponible del proyecto y de los resultados generados mediante simulación eléctrica.

3.7. Técnicas de Análisis e Interpretación de la Información

El análisis de la información se desarrolla mediante modelamiento eléctrico, simulación computacional y evaluación técnica de resultados. En primer lugar, se representará el sistema eléctrico proyectado en DIgSILENT PowerFactory, incorporando barras, transformadores, alimentadores, cargas, relés, interruptores y demás elementos necesarios para el estudio de protecciones.

Posteriormente, se corrió el flujo de carga para fiscalizar voltajes, cargabilidad de equipos y estabilidad de la red. Luego se calculará el cortocircuito para cuantificar las fallas extremas de fase y tierra en los nodos de interés; estos registros servirán de base para diagnosticar la sensibilidad de los relés y calibrar las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N.

El diagnóstico de los hallazgos se efectuará mediante la fiscalización de las gráficas TCC, los retardos de disparo, los intervalos de selectividad, el factor de sensibilidad y la cronología de actuación secuencial entre los esquemas de primera línea y sus respectivas reservas. Se verificará que la protección más cercana al punto de falla actúe primero y que las protecciones aguas arriba operen únicamente como respaldo. Asimismo, se evaluará si los ajustes propuestos reducen el riesgo de desconexiones no selectivas y contribuyen al incremento esperado de la disponibilidad operativa futura del sistema eléctrico proyectado.

3.8. Población de Estudio

La población de estudio está constituida por los elementos eléctricos del sistema proyectado de la Mina Coroccohuayco que intervienen en la coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra. Esta población comprende la totalidad de los componentes de

potencia, maniobra, control y protección del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco.

Asimismo, se consideran como parte de la población los escenarios eléctricos necesarios para evaluar la actuación del sistema de protección, tales como condiciones de operación normal, máxima demanda y fallas de fase o fallas a tierra simuladas. Estos escenarios permitirán determinar corrientes de carga, corrientes de cortocircuito, tiempos de operación y márgenes de coordinación.

3.9. Tamaño de Muestra

El tamaño de muestra corresponde a los elementos del sistema eléctrico proyectado que serán incorporados en el modelo de DIgSILENT PowerFactory 2024 y que tengan incidencia directa en la coordinación de protecciones ANSI 50/51 y 50N/51N. Por ende, la muestra integra los relés, disyuntores, transformadores, barras y circuitos seleccionados para las simulaciones de carga, cortocircuito y gráficas TCC.

La muestra no se determinará mediante procedimientos estadísticos probabilísticos, debido a que la investigación no trabaja con individuos ni con una población aleatoria, sino con elementos técnicos de un sistema eléctrico proyectado. Por ello, el tamaño de muestra se definirá según la pertinencia técnica de los equipos y zonas eléctricas involucradas en la coordinación de protecciones.

3.10. Variables, Dimensiones e Indicadores

3.10.1. Variable Independiente. Optimización de la selectividad y coordinación de protecciones.

Determinación y ajuste computacional de los parámetros ANSI 50/51 y 50N/51N, medido a través de umbrales de corriente (pickups) e intervalos de tiempo (Δt) que garanticen el despeje jerárquico de fallas mediante simulaciones del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco.

a) **Dimensión 1.** Análisis eléctrico del sistema proyectado.

Comprende la determinación de las condiciones eléctricas de operación y falla que sirven de base para definir los ajustes de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra.

Indicador 1. Resultados de flujo de potencia.

Indicador 2. Corrientes de cortocircuito máximas y mínimas.

b) **Dimensión 2.** Coordinación de protecciones ANSI 50/51 y 50N/51N.

Comprende la parametrización de las funciones instantáneas y temporizadas de sobrecorriente de fase y falla a tierra, considerando corrientes de carga, corrientes de falla, sistema de aterramiento, curvas tiempo-corriente y tiempos de actuación.

Indicador 1. Ipickup de fase y tierra

Indicador 2. Tap, TMS / TD y curva de actuación.

c) **Dimensión 3.** Verificación de coordinación tiempo-corriente.

Comprende la evaluación de las curvas tiempo-corriente, tiempos de actuación y márgenes de coordinación entre protecciones principales y de respaldo, con el propósito de verificar la selectividad del sistema frente a fallas simuladas.

Indicador 1. Tiempo de actuación de las funciones 50/51 y 50N/51N.

Indicador 2. Margen de coordinación entre protección principal y respaldo.

3.10.2. Variable Dependiente. Disponibilidad operativa.

Capacidad proyectada del sistema eléctrico para mantener la continuidad del servicio ante fallas, medida cuantitativamente mediante la reducción simulada de disparos intempestivos y desconexiones no selectivas, para mantener la continuidad de suministro de la mina Coroccohuayco.

a) **Dimensión 1.** Selectividad y sensibilidad operativa simulada.

Evalúa si las protecciones actúan en el orden correcto y con la sensibilidad necesaria, asegurando que opere primero el dispositivo más cercano a la falla y que las protecciones de respaldo actúen solo cuando corresponda.

Indicador 1. Escenarios de falla con actuación selectiva.

Indicador 2. Relación de sensibilidad de protección.

b) Dimensión 2. Reducción del riesgo de desconexiones no selectivas.

Evalúa la capacidad del sistema de protección para aislar únicamente la zona fallada, evitando la salida innecesaria de cargas, alimentadores o barras que no se encuentran comprometidos por la falla.

Indicador 1. Escenarios sin desconexión no selectiva.

Indicador 2. Zonas o cargas sanas mantenidas en servicio.

c) Dimensión 3. Disponibilidad operativa futura esperada.

Evalúa el efecto esperado de la coordinación de protecciones sobre la continuidad del suministro eléctrico proyectado, considerando el tiempo de despeje de falla y la permanencia operativa de las zonas no afectadas.

Indicador 1. Tiempo total de despeje de falla.

Indicador 2. Continuidad operativa proyectada del suministro.

3.11. Operacionalización de Variables

Tabla 2. *Esquema de definición funcional de factores analizados*

OPTIMIZACIÓN DE LA SELECTIVIDAD Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POR SOBRECORRIENTE Y FALLA A TIERRA PARA EL INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD OPERATIVA EN LA MINA COROCCOHUAYCO, CUSCO 2025					
Variables	**Definición Conceptual**	**Definición Operacional**	**Dimensiones**	**Indicadores**	**Índices / Fórmulas**
Variable Independiente: Optimización de la selectividad y coordinación de protecciones	La optimización de la selectividad y coordinación de protecciones consiste en ajustar técnicamente los parámetros de los relés para mejorar su desempeño frente a fallas simuladas, manteniendo la operación jerárquica entre protecciones principales y de respaldo (Pérez San Martín, 2021); (Kim et al., 2019).	Determinación y ajuste computacional de los parámetros ANSI 50/51 y 50N/51N, medido a través de umbrales de corriente (pickups) e intervalos de tiempo (Δt) que garanticen el despeje jerárquico de fallas mediante simulaciones de red.	D1: Análisis eléctrico del sistema proyectado.	1. Resultados de flujo de potencia. 2. Corrientes de cortocircuito máximas y mínimas.	1. Nivel de tensión en barras: Vpu o kV 2. Corriente de cortocircuito: Icc máx. / Icc mín. en kA
			D2: Coordinacion de protecciones ANSI 50/51 y 50N/51N.	1. Ipickup de fase y tierra. 2. Tap, TMS / TD y curva de actuación.	1. Margen de carga: Ipickup fase / Icarga máxima 2. Ajuste temporal: TMS o TD según curva IEC/ANSI 3. Relación de sensibilidad: Icc mínima / Ipickup
			D3: Verificación de coordinación tiempo-corriente.	1. Tiempo de actuación de las funciones 50/51 y 50N/51N. 2. Margen de coordinación entre protección principal y respaldo.	1. Tiempo de operación: Top 50/51 y 50N/51N en segundos 2. Δt = T respaldo − T principal
Variable Dependiente: Disponibilidad operativa	La disponibilidad operativa de un sistema eléctrico se relaciona con la capacidad de mantenerse en condiciones de suministrar energía a las cargas durante el periodo requerido (Boaski et al., 2017); (Chancasanampa Pacheco, 2019).	Capacidad proyectada del sistema eléctrico para mantener la continuidad del servicio ante fallas, medida cuantitativamente mediante la reducción simulada de disparos intempestivos y desconexiones no selectivas.	D1: Selectividad y sensibilidad operativa simulada.	1. Escenarios de falla con actuación selectiva. 2. Relación de sensibilidad de protección.	1. Selectividad simulada = Escenarios selectivos / Escenarios simulados × 100 2. Sensibilidad = I falla mínima / Ipickup
			D2: Reducción del riesgo de desconexiones no selectivas.	1. Escenarios sin desconexión no selectiva. 2. Zonas o cargas sanas mantenidas en servicio.	1. Escenarios sin disparo no selectivo / Escenarios simulados × 100 2. Zonas sanas energizadas / Zonas sanas evaluadas × 100
			D3: Disponibilidad operativa futura esperada.	1. Tiempo total de despeje de falla. 2. Continuidad operativa proyectada del suministro.	1. T despeje = T relé + T interruptor 2. Continuidad proyectada = Cargas sanas en servicio / Cargas sanas evaluadas × 100

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

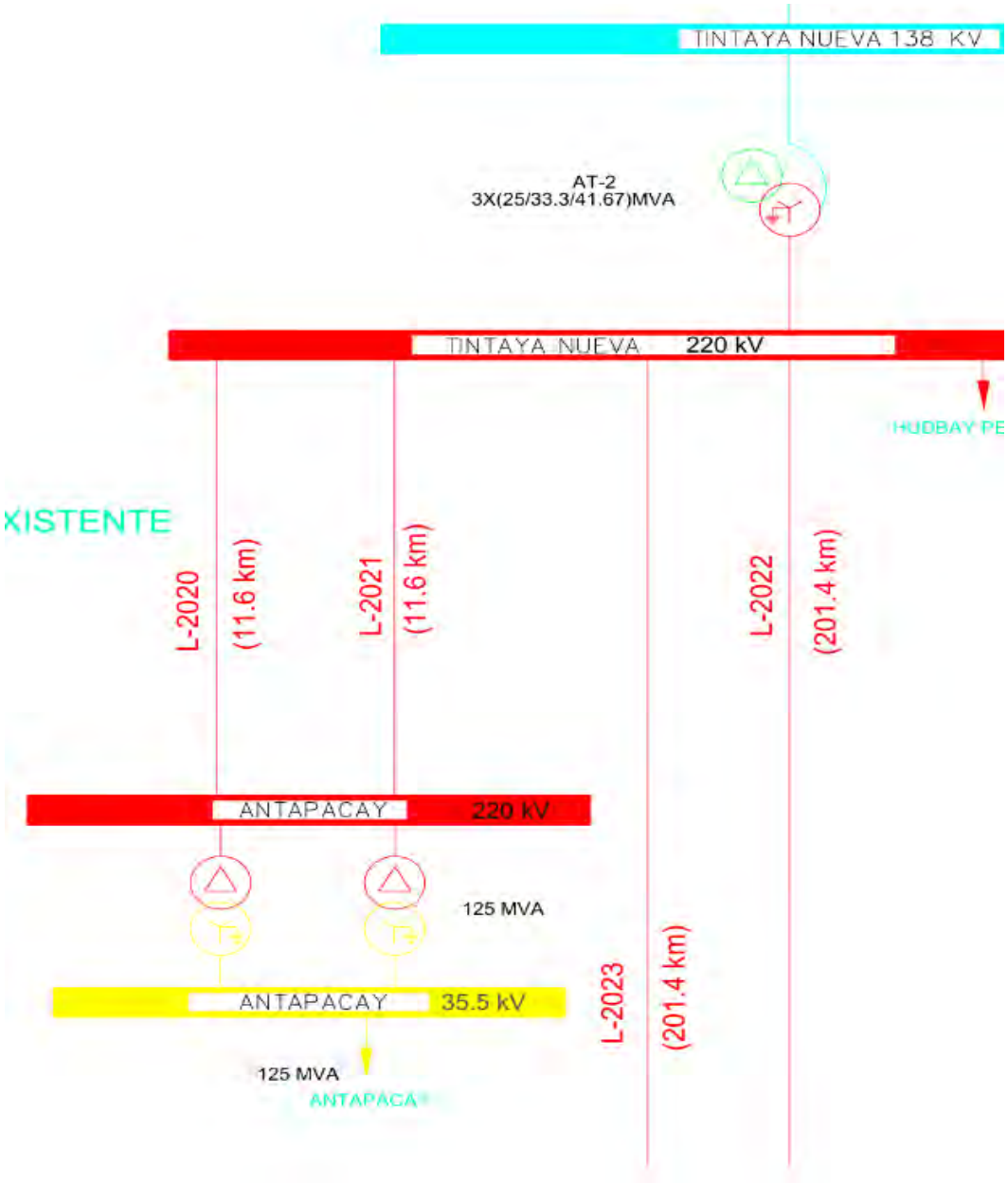
4. EVALUACIÓN, ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Descripción del Sistema Eléctrico

4.1.1. Sistema Eléctrico Coroccohuayco

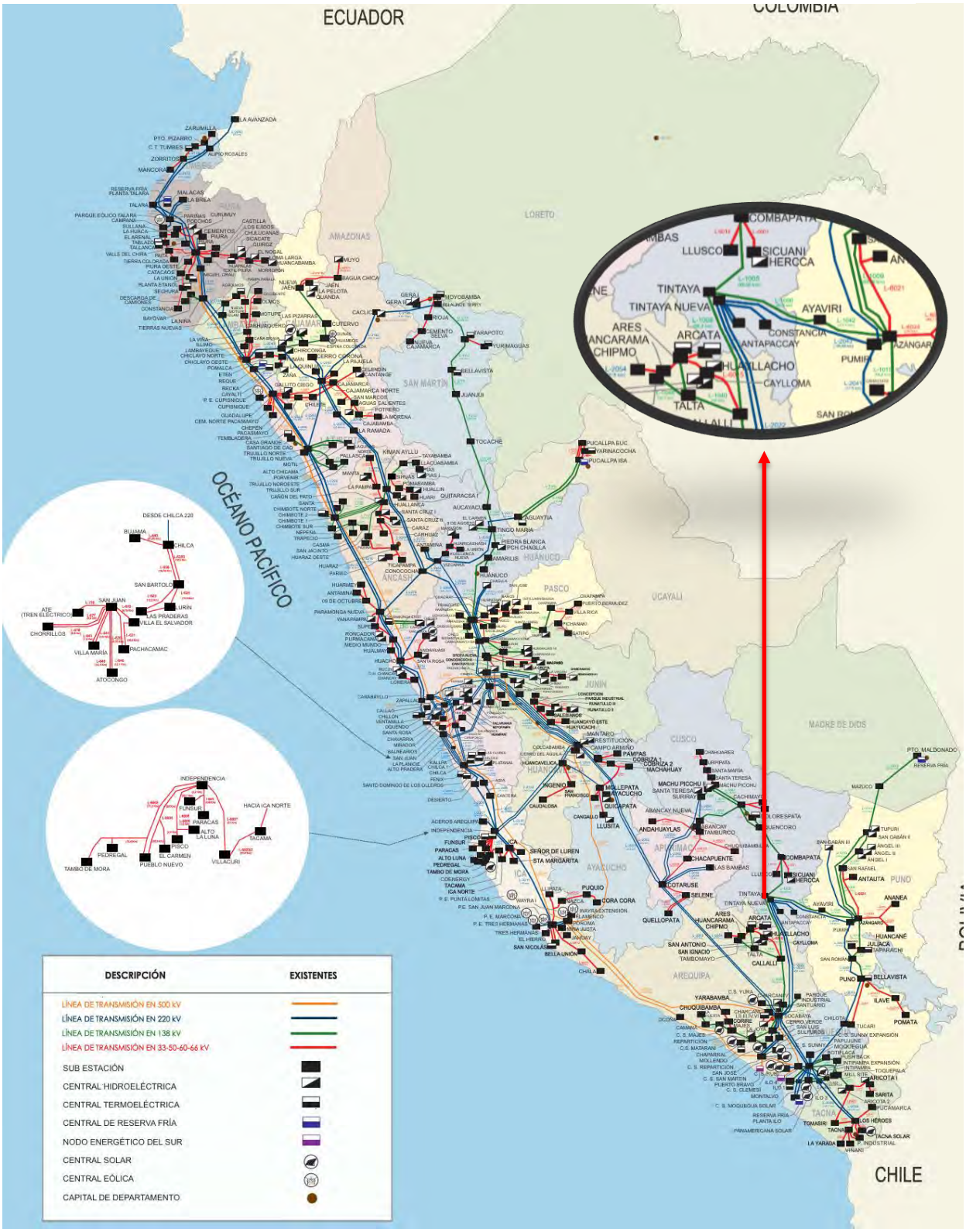
La configuración y el diseño del suministro energético en la unidad minera se articulan mediante una interconexión estratégica de alta confiabilidad con el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), asegurando la potencia firme requerida para las demandas de la planta y mina. Esta vinculación se materializa formalmente a través de dos subestaciones base, las cuales actúan como el nodo de origen y despacho para los circuitos de las ternas L-2020 y L-2021. Desde este punto, el flujo eléctrico converge de manera simétrica hacia las dos subestaciones principales de Antapaccay de 125 MVA, infraestructura crítica que centraliza, regula y distribuye la energía hacia la totalidad de los procesos de la operación minera. Con el propósito de mitigar riesgos de desabastecimiento, la robustez del esquema se ve reforzada por los circuitos de las líneas de transmisión L-2022 y L-2023 operando a un voltaje de 220 kV, conectadas en la Subestación de Distribución (SED) Tintaya Nueva, la cual alberga la unidad de transformación AT-2 con una capacidad nominal de 3x(25/33.3/41.67) MVA. Este conjunto de activos electromecánicos constituye la columna vertebral del respaldo operativo del sistema, ofreciendo una alta flexibilidad para transferencias de carga y configuraciones de contingencia ante salidas intempestivas en el sistema principal; criterios de continuidad y comportamiento ante fallas que se verifican analíticamente a través del soporte gráfico de las siguientes imágenes.

Figura 4. *Diagrama unifilar de la mina Antapaccay de 220 kV según el SEIN*



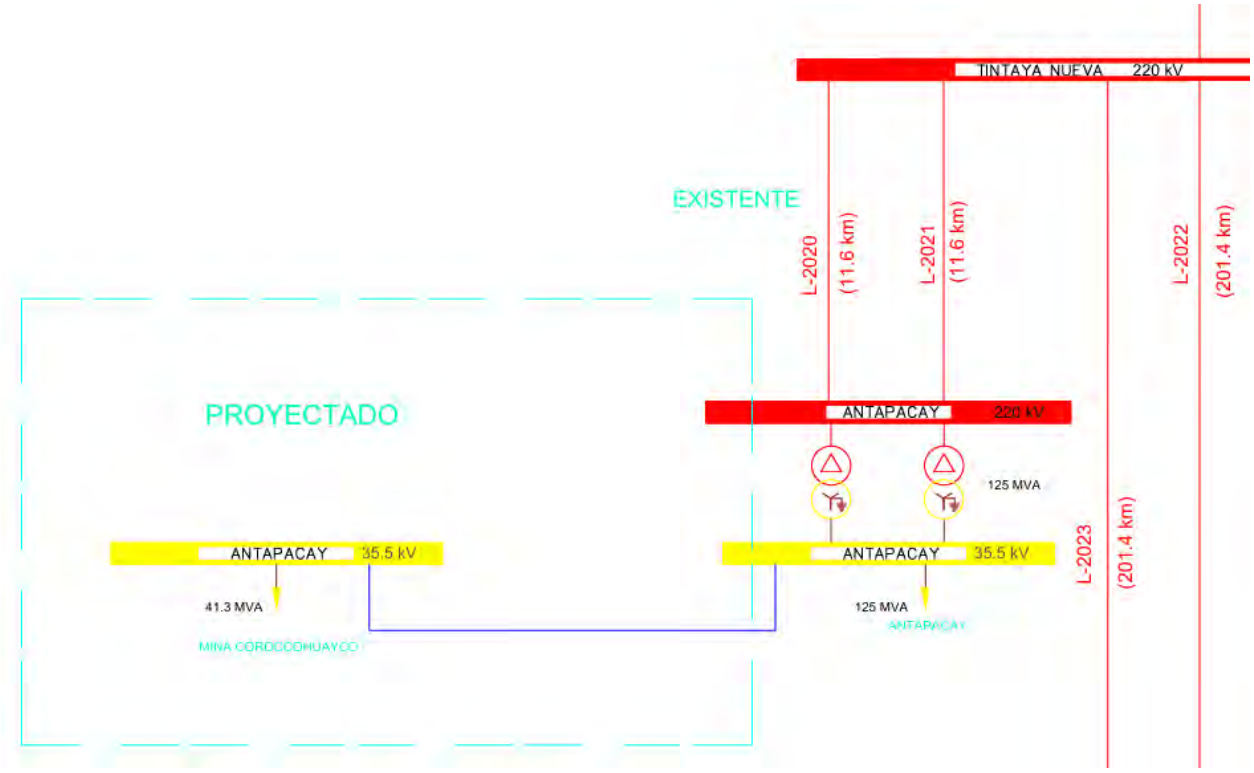
Nota. Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)

Figura 5. *Sistema Eléctrico Interconectado Nacional*



Nota. COES SINAC

Figura 6. *Diagrama unifilar de la carga proyectada de la mina Coroccohuayco*



Nota. Elaboración propia

4.1.2. Descripción del Sistema Eléctrico Bajo Estudio

La infraestructura energética objeto de análisis se estructura a partir de una acometida primaria que opera en un nivel de tensión de 35.5 kV, distribuyendo el flujo hacia cinco subestaciones de transformación de fuerza y servicios auxiliares vinculadas con los núcleos de demanda de la fase inicial a través de dos circuitos aéreos. Los transformadores T1 y T2 tienen una capacidad de 12.5 MVA cada uno y una relación de transformación de 35.5/4.16 kV; el transformador T3 tiene una capacidad de 10.0 MVA con relación 35.5/4.16 kV; y los transformadores T4 y T5 tienen una capacidad de 3.15 MVA cada uno con relación 35.5/0.44 kV. De esta manera, las cargas de mayor potencia se alimentan en media tensión, mientras que los servicios auxiliares se concentran en baja tensión.

Subestación principal: la distribución interna se organiza por centros de carga funcionales. El transformador T1 alimenta las cargas de chancado primario y transporte de mineral; el transformador T2 atiende las cargas de molienda y proceso asociado; el transformador T3 concentra las cargas de bombeo, flotación, compresión, mina y perforación; y los transformadores T4 y T5 alimentan los servicios auxiliares de baja tensión. Esta sectorización evita concentrar toda la demanda en un único equipo, mejora la continuidad del servicio y permite establecer rutas de coordinación más claras entre protecciones principales y de respaldo.

La distribución por transformadores responde a criterios de continuidad operativa, confiabilidad, facilidad de mantenimiento y crecimiento futuro. Las cargas conectadas a 4.16 kV corresponden principalmente a motores, variadores, bombas, molinos, fajas transportadoras, chancadora, compresores y perforadoras; mientras que las cargas de 0.44 kV comprenden servicios auxiliares, iluminación, HVAC, instrumentación, comunicaciones, tableros de control, talleres, campamento y sistemas esenciales. Esta diferenciación permite aplicar criterios de protección acordes con la naturaleza de cada nivel de tensión.

4.1.3. Parámetros de las Líneas Proyectadas

En el trabajo de investigación se consideraron parámetros para la línea aérea, subterránea para los conductores de media y baja tensión de 35.5 kV, 4.16 kV y 0.44 kV, los cuales se describirán a continuación.

Tabla 3. *Cuadro de características de conductores*

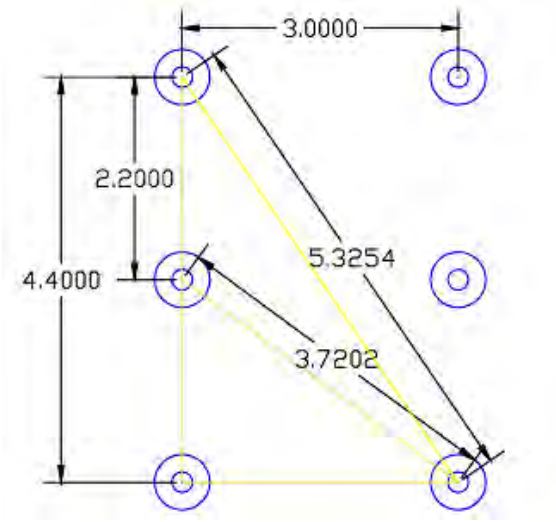
Tramo	Tensión (KV)	Sección mm2	R(+) Ohm/ km	X(+) Ohm/ km	R(0) Ohm/ km	X(0) Ohm/ km	Longitud (m)
Derivación – Recloser (barra de seccionamiento)	35.5	swich	-	-	-	-	-
Recloser-Barra1 L1	35.5	240	0.142	0.2027	0.3196	0.8638	12000

Tramo	Tensión (KV)	Sección mm2	R(+) Ohm/ km	X(+) Ohm/ km	R(0) Ohm/ km	X(0) Ohm/ km	Longitud (m)
Recloser-Barra1 L2	35.5	240	0.142	0.2027	0.3196	0.8638	12000
Celda1 - TR1	35.5	400	0.077	0.127	0.2310	0.2540	50
Celda1 - TR2	35.5	400	0.077	0.127	0.2310	0.2540	50
Celda1 - TR3	35.5	400	0.077	0.127	0.2310	0.2540	50
Celda1 - TR4	35.5	400	0.077	0.127	0.2310	0.2540	50
Celda1 - TR5	35.5	400	0.077	0.127	0.2310	0.2540	50
TR1 - Barra 4.16 kV	4.16	Barra	0.0103	0.0057	0.0309	0.0171	1
TR2 - Barra 4.16 kV	4.16	Barra	0.0103	0.0057	0.0309	0.0171	1
TR3 - Barra 4.16 kV	4.16	Barra	0.0103	0.0057	0.0309	0.0171	1
TR4 - Barra 0.44 kV	0.44	Barra	0.0103	0.0057	0.0309	0.0171	1
TR5 - Barra 0.44 kV	0.44	Barra	0.0103	0.0057	0.0309	0.0171	1

Nota. Elaboración propia

Cálculo de la Impedancia de la Línea de MT 12 Km.

Figura 7. *Disposición de los conductores*



Nota. Elaboración propia

A continuación, se detalla el procedimiento de cálculo bajo la secuencia óptima de fases invertidas (A-B-C y C'-B'-A') para mantener la reactancia lo más baja posible:

Ubicación Geométrica de las Fases en la Torre

Para cumplir con los parámetros (**2,2 metros entre fases adyacentes** y **3 metros de separación horizontal** entre los dos circuitos), la disposición tridimensional de los cables se define bajo la siguiente matriz de coordenadas (eje X horizontal, eje Y vertical):

- ***Circuito 1 (Lado Izquierdo).***
  - **Fase A (Arriba):** x = -1,5 m y = 4,4 m
  - **Fase B (Centro):** x = -1,5 m, y = 2,2 m
  - **Fase C (Abajo):** x = -1,5 m, y = 0,0 m
- ***Circuito 2 (Lado Derecho - Invertido).***
  - **Fase C' (Arriba):** x = 1,5 m, y = 4,4 m
  - **Fase B' (Centro):** x = 1,5 m, y = 2,2 m
  - **Fase A' (Abajo):** x = 1,5 m, y = 0,0 m

La distancia horizontal neta de centro a centro entre ambos circuitos es exactamente de 1,5 - (-1,5) = 3,0 m.

Distancia entre Conductores:

$$\boldsymbol{D_{AA'} = 5.3\ m;\ D_{BB'} = 3m\ ;\ D_{CC'} = 5.3254\ m}$$

Radio Medio Geométrico Equivalente (RMG)

$$GMD_{bA} = \sqrt{0.00772 \cdot 5.3254} \approx 0.2027\ m$$

$$GMD_{bB} = \sqrt{0.00772 \cdot 3.0} \approx 0.1521\ m$$

$$GMD_{bC} = \sqrt{0.00772 \cdot 5.3254} \approx 0.2027\ m$$

$$GMD_{total} = \sqrt[3]{GMR_{bA} \cdot GMR_{bB} \cdot GMR_{bC}} = GMD_{total} \approx \sqrt[3]{0.2027\ \cdot 0.1521 \cdot 0.2027}$$

$$\boldsymbol{GMD_{total} \approx 0.1844\ m}$$

Distancia Media Geométrica Equivalente (DMG)

Resolviendo las distancias promedio cruzadas entre los grupos de fases (AB, BC, AC), la configuración vertical con espaciamiento de 2,2 m y ancho de 3 m arroja una distancia mutua de:

$$D_{AB.eq} = \sqrt[4]{D_{AB} \cdot D_{AB'} \cdot D_{A'B} \cdot D_{A'B'}} = \sqrt[4]{2.2 \cdot 3.7202 \cdot 3.7202 \cdot 2.2} = 2.8617\ m$$

$$D_{AB.eq} = D_{BC.eq} = 2.8617\ m$$

$$D_{AB.eq} = \sqrt[4]{D_{AC} \cdot D_{AC'} \cdot D_{A'C} \cdot D_{A'C'}} = \sqrt[4]{4.4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4.4} = 3.6332\ m$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB.eq} \cdot D_{BC.eq} \cdot D_{AC.eq}} = GMD = \sqrt[3]{2.8617 \cdot 2.8617 \cdot 3.6332}$$

$$GMD = 2.9874\ m$$

Inductancia y Reactancia Final (60 Hz)

Calculamos la inductancia neta equivalente de los circuitos en paralelo:

$$L = 0.2 \cdot \ln\left(\frac{2.9874}{0.1844}\right) = 0.2 \cdot \ln(16.199) \approx 0.5570 mH/Km$$

Convertimos a reactancia inductiva para **60 Hz** ($2\pi \cdot f \cdot L$)

$$X = 2\pi \cdot 60 \cdot (0.5570.557 \times 10^{-3}) = \boldsymbol{0.210\ \Omega/km}$$

Considerando estos valores obtendremos la impedancia de la línea 12 km

Resistencia Óhmica Total, la resistencia se reduce a la mitad por ser doble terna

$$\boldsymbol{0.0710\ \Omega/km x 12km = 0.8520\ \Omega}$$

Reactancia Inductiva Total

$$\boldsymbol{0.210\Omega\ /km x 12km = 2.5200\ \Omega}$$

Impedancia Completa Exacta de la línea de 12 km

$$\boldsymbol{Z = 0.8520 + j2.5200\ \Omega}$$

$$\boldsymbol{Z = 2.6601\Omega < 71.32°}$$

$$|Z| = 2.6601\Omega$$

Impedancia de la red equivalente entes de la fuente (según DIgSILENT - SEIN):

$$|Z| \approx 1.32\Omega$$

Impedancia Total

$$|Z_T| = 2.6601 + 1.32 = 3.9841\ \Omega$$

Cálculo de cortocircuito máximo en el tren de celdas (Trifásica).

$$I_{cc} = \frac{35.500\ V}{\sqrt{3} \times 3.784\ \Omega} = 5416\ A\ (5.42\ kA)$$

Cálculo de Cortocircuito Máximo en el Tren de Celdas (Bifásica).

$$I_{cc_bif} = I_{CC} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 5.416 \times 0.866 = 4690.26\ A\ (4.690\ kA)$$

4.2. Características de Equipos Eléctricos

4.2.1. Características de Transformadores

Se efectuó la caracterización técnica de las unidades de transformación consideradas para la primera etapa del sistema eléctrico proyectado. La potencia de diseño, la razón de transformación, la configuración vectorial, el voltaje en el lado de baja, la carga pico proyectada, el factor de carga y el margen de holgura remanente representan las variables críticas para diagnosticar el comportamiento de cada nodo de consumo, así como su impacto directo en las magnitudes de falla franca y el entrelazamiento de los esquemas de seguridad.

Tabla 4. *Cuadro de demandas individuales por equipo - Mina Coroccohuayco (Proyectado)*

N.º	Nombre del equipo	Área / proceso	Potencia nominal (kW)	FP	Potencia aparente (kVA)	Factor de demanda	Factor de utilización	Demanda máxima (kW)	Demanda máxima (kVA)	Tensión secundaria	Justificación técnica del nivel de tensión	SED MVA	Relación de transformación	Utilización del transformador	Reserva disponible (MVA)
1	Chancadora primaria	Chancado primario	4,000	0.9	4,444	0.9	0.85	3060	3,400	4.16 kV	Motor de gran potencia; en BT generaría corrientes elevadas	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
2	Alimentador apron feeder y grizzly	Chancado primario	700	0.9	778	0.8	0.8	448	498	4.16 kV	Carga motriz asociada a chancado primario	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
3	Faja transportadora overland	Transporte de mineral	4,500	0.9	5,000	0.9	0.9	3645	4,050	4.16 kV	Accionamiento continuo de alta potencia	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
4	Fajas de transferencia y tripper	Transporte de mineral	1,200	0.9	1,333	0.85	0.8	816	907	4.16 kV	Motores medianos agrupados, operación continua	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
5	Supresión de polvo y ventiladores locales	Chancado / transporte	350	0.85	412	0.7	0.7	171.5	202	4.16 kV	Asociado al centro de carga de chancado	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
6	Puente grúa y auxiliares de chancado	Chancado primario	250	0.8	313	0.5	0.5	62.5	78	4.16 kV	Carga auxiliar ubicada en sala de chancado	T1 12.5	35.5/4.16 kV	77.5 %	3.07
7	Molino SAG / accionamiento equivalente	Molienda	5,000	0.9	5,556	0.9	0.9	4050	4,500	4.16 kV	Motor de gran potencia, requiere alimentación en MT	T2 12.5	35.5/4.16 kV	75.0%	3.36

N.º	Nombre del equipo	Área / proceso	Potencia nominal (kW)	FP	Potencia aparente (kVA)	Factor de demanda	Factor de utilización	Demanda máxima (kW)	Demanda máxima (kVA)	Tensión secundaria	Justificación técnica del nivel de tensión	SED MVA	Relación de transformación	Utilización del transformador	Reserva disponible (MVA)
8	Molino de bolas / remolienda equivalente	Molienda	3,500	0.9	3,889	0.85	0.85	2528.75	2,810	4.16 kV	Motor de gran potencia, no recomendable en BT	T2 12.5	35.5/4.16 kV	75.00%	3.36
9	Zarandas, alimentadores y auxiliares de molienda	Molienda	700	0.88	795	0.85	0.8	476	541	4.16 kV	Motores medianos agrupados al centro de molienda	T2 12.5	35.5/4.16 kV	75.00%	3.36
10	Bombas de ciclones	Molienda	1,000	0.88	1,136	0.85	0.9	765	869	4.16 kV	Bomba de potencia media-alta y operación continua	T2 12.5	35.5/4.16 kV	75.00%	3.36
11	Auxiliares de proceso de molienda	Molienda	500	0.88	568	0.8	0.8	320	363.64	4.16 kV	Carga asociada al proceso de molienda	T2 12.5	35.5/4.16 kV	75.10%	3.36
12	Bombas principales de relaves / pulpa	Bombeo de proceso	1,500	0.88	1,705	0.85	0.85	1083.75	1231.53	4.16 kV	Bombeo crítico, potencia elevada	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
13	Bombas de agua recuperada / fresca	Bombeo de proceso	1,500	0.88	1,705	0.85	0.85	1083.75	1231.53	4.16 kV	Bombas de operación continua	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
14	Sopladores de flotación / compresores de proceso	Flotación	1,600	0.9	1,778	0.85	0.85	1156	1284.44	4.16 kV	Carga motriz continua de media potencia	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
15	Compresores de aire de planta	Servicios industriales	1,000	0.88	1,136	0.8	0.85	680	772.73	4.16 kV	Motor de potencia media, mejor en MT	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65

N.º	Nombre del equipo	Área / proceso	Potencia nominal (kW)	FP	Potencia aparente (kVA)	Factor de demanda	Factor de utilización	Demanda máxima (kW)	Demanda máxima (kVA)	Tensión secundaria	Justificación técnica del nivel de tensión	SED MVA	Relación de transformación	Utilización del transformador	Reserva disponible (MVA)
16	Espesador: rastras y bombas asociadas	Espesamiento	500	0.85	588	0.6	0.7	210	247.06	4.16 kV	Carga asociada al centro de proceso	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
17	Reactivos: agitadores y bombas principales	Reactivos	600	0.85	706	0.75	0.75	337.5	397.06	4.16 kV	Motores de proceso agrupados	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
18	Ventilación de salas eléctricas MT	Servicios eléctricos	400	0.85	471	0.8	0.8	256	301.18	4.16 kV	Se mantiene en el centro de carga MT	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
19	Perforadora eléctrica 12 1/4 in N.° 1	Mina tajo abierto	900	0.85	1,059	0.6	0.7	378	444.71	4.16 kV	Equipo minero móvil de potencia elevada	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
20	Perforadora eléctrica 12 1/4 in N.° 2	Mina tajo abierto	900	0.85	1,059	0.6	0.7	378	444.71	4.16 kV	Equipo minero móvil de potencia elevada	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
21	Bombeo de mina / drenaje operativo	Mina tajo abierto	1,200	0.88	1,364	0.6	0.75	540	614	4.16 kV	Carga crítica de continuidad operativa	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
22	Taller de mina y cargadores auxiliares	Mina / taller	700	0.85	824	0.6	0.7	294	346	4.16 kV	Carga motriz auxiliar asociada al tajo	T3 10	35.5/4.16 kV	75.50%	2.65
23	Servicios auxiliares de planta - MCC BT	Auxiliares BT	1,200	0.85	1,412	0.75	0.8	720	847.06	0.44 kV	Carga distribuida de baja tensión	T4 3.15	35.5/0.44 kV	76.90%	0.76
24	HVAC y ventilación de salas de control	Auxiliares BT	700	0.85	824	0.8	0.8	448	527.06	0.44 kV	Carga auxiliar de baja tensión	T4 3.15	35.5/0.44 kV	76.90%	0.76

N.º	Nombre del equipo	Área / proceso	Potencia nominal (kW)	FP	Potencia aparente (kVA)	Factor de demanda	Factor de utilización	Demanda máxima (kW)	Demanda máxima (kVA)	Tensión secundaria	Justificación técnica del nivel de tensión	SED MVA	Relación de transformación	Utilización del transformador	Reserva disponible (MVA)
25	Iluminación exterior, vías y edificios	Auxiliares BT	700	0.95	737	0.8	0.8	448	471.58	0.44 kV	Iluminación y servicios menores en BT	T4 3.15	35.5/0.44 kV	76.90%	0.76
26	Control, instrumentación, comunicaciones y SCADA	Auxiliares BT	500	0.9	556	0.8	0.8	320	355.56	0.44 kV	Carga sensible de baja tensión	T4 3.15	35.5/0.44 kV	76.90%	0.76
27	UPS, cargadores DC y servicios esenciales	Auxiliares BT	300	0.9	333	0.7	0.8	168	186.67	0.44 kV	Carga crítica de control, baja potencia	T4 3.15	35.5/0.44 kV	76.90%	0.76
28	Talleres, soldadura, almacenes y mantenimiento	Auxiliares BT	1,000	0.82	1,220	0.65	0.7	455	554.88	0.44 kV	Carga distribuida e intermitente	T5 3.15	35.5/0.44 kV	72.00%	0.94
29	Campamento operativo y oficinas	Auxiliares BT	1,000	0.85	1,176	0.65	0.7	455	535.29	0.44 kV	Carga de utilización en baja tensión	T5 3.15	35.5/0.44 kV	72.00%	0.94
30	Sistema contra incendio y bombeo menor	Auxiliares BT	600	0.85	706	0.8	0.8	384	451.76	0.44 kV	Motores menores, tableros BT	T5 3.15	35.5/0.44 kV	72.00%	0.94
31	Laboratorio, almacén y servicios generales	Auxiliares BT	400	0.85	471	0.65	0.7	182	214.12	0.44 kV	Servicios menores en baja tensión	T5 3.15	35.5/0.44 kV	72.00%	0.94
32	Reserva BT etapa 1	Reserva BT	650	0.85	765	0.8	0.75	390	458.82	0.44 kV	Reserva de crecimiento en BT	T5 3.15	35.5/0.44 kV	72.00%	0.94

Nota. Elaboración propia

Tabla 5. *Cuadro resumen por nivel de tensión*

Nivel de tensión secundaria	Potencia nominal instalada (kW)	Potencia aparente instalada (kVA)	Demanda máxima diversificada (kVA)	Tipo de cargas principales
4.16 kV	32,500.00	36,617.02	81.71%	Chancado, transporte, molienda, bombeo, compresión, perforación
0.44 kV	7,050.00	8,198.18	18.29%	Servicios auxiliares, iluminación, control, talleres, HVAC
Total	39,550.00	44,815.20	100.00%	Sistema eléctrico primera etapa

Nota. Elaboración propia

Tabla 6. *Cuadro resumen transformador (Proyectado)*

TR	Relación de transformación	Procesos alimentados	Grupo de Conexión	Z_{cc} (%)	$I_{nominal}$	$I_{ninrush}$ (Ip/In)	Potencia aparente instalada (kVA)	Demanda máxima asignada (kVA)	Capacidad comercial seleccionada (MVA)	Utilización.
T1	$35.5 \pm 3\%/4.16$ kV	Chancado primario y transporte de mineral	Dyn5	6	203.4 A	10	12,279.82	9,850.64	12.50	77.50 %
T2	$35.5 \pm 3\%/4.16$ kV	Molienda y proceso asociado	Dyn5	6	203.4 A	10	11,944.44	9,423.86	12.50	75.00 %
T3	$35.5 \pm 3\%/4.16$ kV	Bombeo, flotación, compresión, mina y perforación	Dyn5	6	162.7 A	10	12,392.75	8,404.91	10.00	75.50 %
T4	$35.5 \pm 3\%/0.44$ kV	Servicios auxiliares críticos de planta, HVAC, iluminación, control y UPS	Dyn5	6	51.3 A	12	3,861.03	2,608.31	3.15	76.90 %
T5	$35.5 \pm 3\%/0.44$ kV	Talleres, campamento, contra incendio, laboratorio y reserva BT	Dyn5	6	51.3 A	12	4,337.16	2,214.88	3.15	72.00 %
Total							44,815.20	32,502.60	41.30	75.38 %

Nota. Elaboración propia

Cálculo de Corriente de Carga

$$S_{diseño} = S_{Total} \times 0.7538 = 41.3\ MVA \times 0.7538 = 31.132\ MVA$$

$$I_{diseño} = \frac{S_{diseño}}{\sqrt{3} \times V_L} \rightarrow \frac{31.132\ \ MVA}{\sqrt{3} \times 35.5\ kV} = \mathbf{506.31\ A}$$

La determinación de la corriente de carga de diseño para las protecciones generales (Celda Intermedia de acoplamiento) se realizó bajo las directrices de la norma IEEE 241. Se consideró la potencia total instalada del cuarto de celdas correspondiente a 41.3 MVA, a

la cual se le aplicó un factor de simultaneidad y coincidencia de 0.67, representativo de la demanda futura estimada de la Mina Coroccohuayco. Empleando la ecuación de corriente para sistemas trifásicos simétricos a una tensión nominal (Un) de 35.5 kV, se estableció que la corriente de carga de diseño es de 506.31 A, magnitud que balancea adecuadamente la máxima demanda esperada sin subdimensionar la robustez del sistema.

Cálculo de Tensión de Cortocircuito. $U_{cc}(V) = U_{nom}(V) x \frac{Z_{cc}\%}{100}$

Donde los datos de entrada para ese transformador específico son:

- $U_{nominal}$ (Tensión nominal de la línea en el primario): 35.5 kV
- U_{cc} % (Tensión de cortocircuito porcentual): 6 %

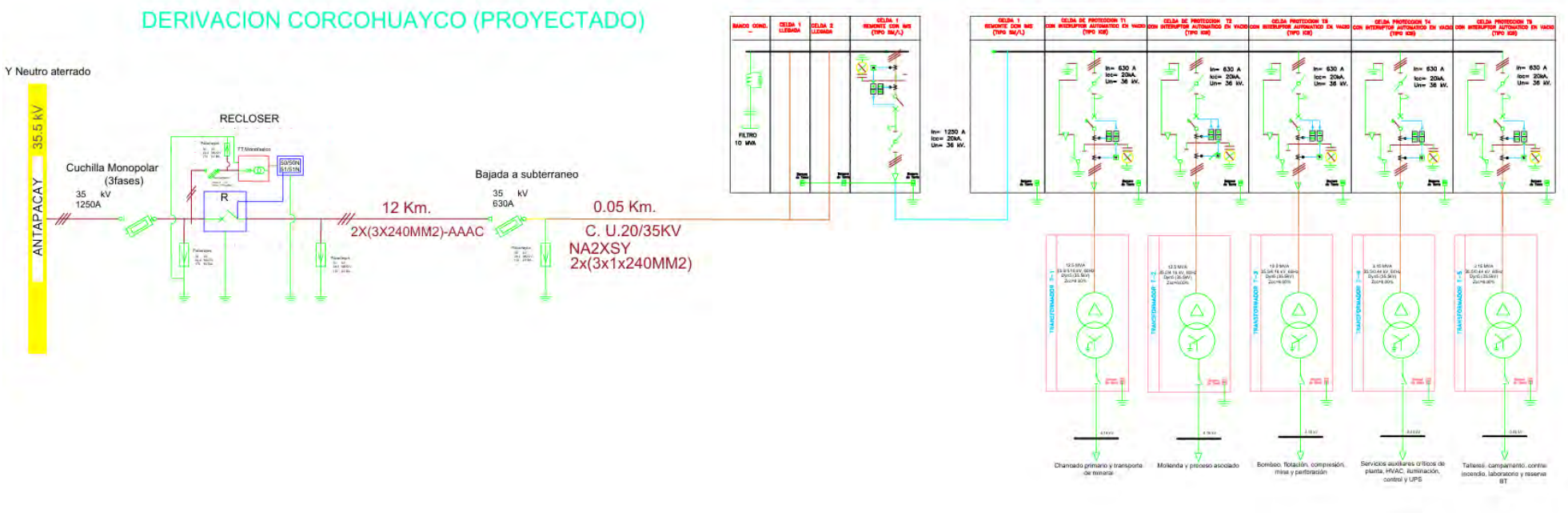
Se tiene U_{cc} resulta **2,130 V.**

Cálculo de Impedancia de Cortocircuito. $Z_{cc} = \frac{U_n^2}{S_n} x \frac{Z_{cc}\%}{100}$

Donde los datos de entrada para ese transformador específico son:

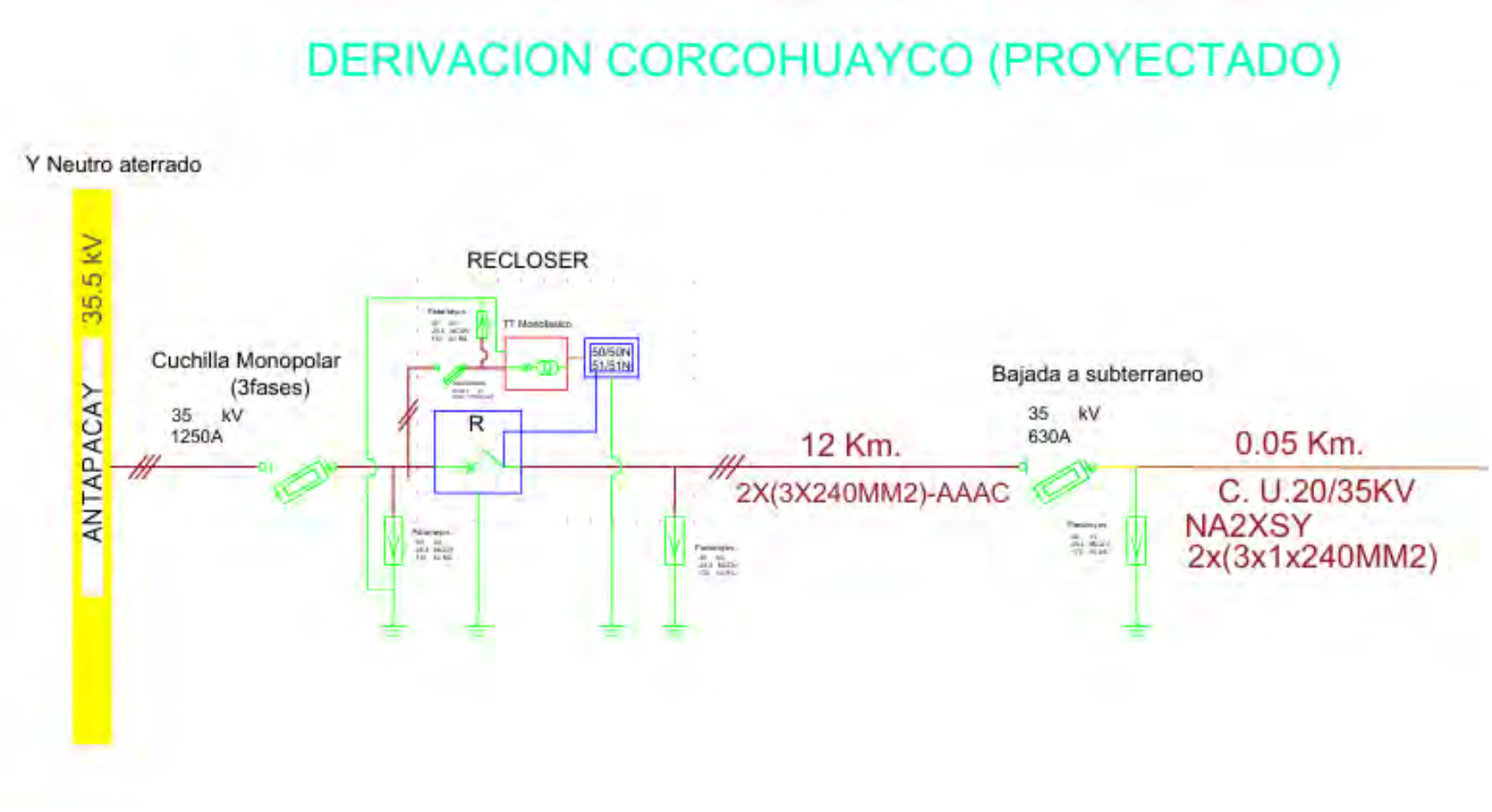
- U_n (Tensión nominal de la línea): 35.5 kV
- S_n (Potencia nominal del transformador): 12.5 MVA, 10 MVA y 3.15 MVA
- Z_{cc}% (Impedancia porcentual de placa considerado): 6 %

Figura 8. *Diagrama unifilar de la Mina Coroccohuayco (Proyectado)*



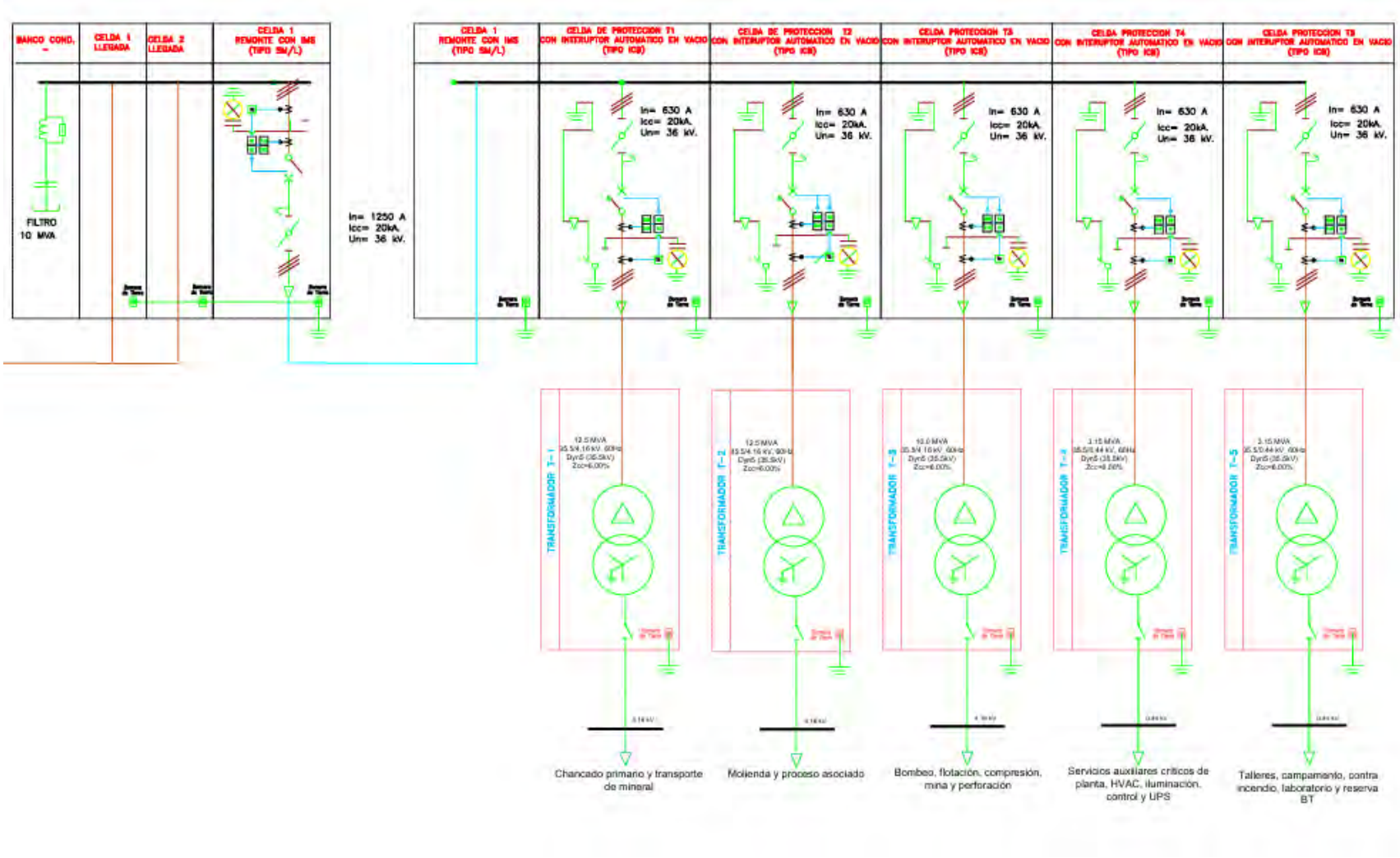
Nota. Elaboración propia

Figura 9. D.U. Línea Aérea (Proyectada)



Nota. Elaboración propia

Figura 10. *D.U. de las celdas de M.T. en la mina de Coroccohuayco*



Nota. Elaboración propia

El análisis de los transformadores proyectados evidencia una distribución coherente con la demanda máxima diversificada del sistema. Los transformadores T1, T2 y T3 alimentan barras de 4.16 kV destinadas a cargas motrices y de proceso, mientras que el transformador T4 y T5 alimentan barras de 0.44 kV para servicios auxiliares. En conjunto, la demanda máxima diversificada asciende a 32.502 MVA frente a una capacidad comercial instalada de 41.30 MVA, lo que proporciona una reserva global adecuada para variaciones operativas y crecimiento moderado de la primera etapa.

4.2.2. Características de Relés de Protección

Con el propósito de consolidar la filosofía de protección y garantizar el funcionamiento selectivo del sistema eléctrico proyectado para la Unidad Minera Coroccohuayco, se estructuró una matriz integral que define la jerarquía operativa y los criterios de diseño de cada relé multifunción. Este ordenamiento se fundamenta en un principio cardinal de la ingeniería de protecciones: el despeje de fallas debe ejecutarse de forma secuencial y en sentido inverso al flujo de potencia, yendo desde las cargas aguas abajo hacia la subestación fuente aguas arriba (según a la normativa de la IEEE 242).

Tabla 7. *Relación de dispositivos de protección (relés) del sistema eléctrico*

Derivación	TAG	Voltaje (kV)	Potencia (kVA)	Grupo de Conexión	Sistema de Aterramiento	Interruptor asociado	Alimentador asociado	Modelo relé	Criterio Técnico y Relación de TC
Barra Principal	R-RP-35-01	35.5	41300 (demandada)	Dyn5	Neutro, fuente y sólidamente aterrado	-	Barra Principal Subestación Fuente	-	Respaldo general
Derivación 35.5 kV	REC-35-01	35.5	41300	N/A	Neutro, fuente Y sólidamente aterrado	REC-35-01	Doble Terna 12 km Antapaccay-Coroccohuayco	SEL-751	Protección de la línea de 12 km. Coordina con Celda Intermedia Bloqueo de *Inrush* global. TC 800/5 (RTC=160).
Tren de celdas 01 35.5 kV	INT-35-01	35.5	41300	N/A	N/A (Acoplamiento)	INT-01	Celda Intermedia - Enlace de Barras	SEL-751	Protección de la segunda barra colectora y respaldo local. Coordina con celdas de trafos. TC 800/5 (RTC=160).
Tren de celdas 02 35.5 kV	T1-P-P	35.5	12500	Dyn5	HV Delta / LV Neutro Sólido	CB-T1-35	Primario T1 - Chancado y transporte	SEL-751	Ajuste temporizado al 125% de la I_n (203.41 A). Instantáneo (ANSI 50) a 2.2 kA para bloquear *Inrush*. TC 300/5 (RTC=60).

Derivación	TAG	Voltaje (kV)	Potencia (kVA)	Grupo de Conexión	Sistema de Aterramiento	Interruptor asociado	Alimentador asociado	Modelo relé	Criterio Técnico y Relación de TC
Tren de celdas 02 35.5 kV	T2-P-P	35.5	12500	Dyn5	HV Delta / LV	CB-T2-35	Primario T2 - Molienda y proceso	SEL-751	Ajuste temporizado al 125% de la I_n (203.41 A). Instantáneo (ANSI 50) a 2.2 kA para bloquear *Inrush*. TC 300/5 (RTC=60).
Tren de celdas 02 35.5 kV	T3-P-P	35.5	10000	Dyn5	HV Delta / LV Neutro Sólido	CB-T3-35	Primario T3 - Bombeo, flotación y mina	SEL-751	Ajuste temporizado al 125% de la I_n (162.7 A). Instantáneo (ANSI 50) a 1.92 kA para bloquear *Inrush*. TC 300/5 (RTC=60).
Tren de celdas 02 35.5 kV	T4-P-P	35.5	3150	Dyn5	HV Delta / LV Neutro Sólido	CB-T4-35	Primario T4 - Auxiliares críticos BT	SEL-751	Ajuste de fase sensible al 125% de la I_n (51.26 A). Despeje instantáneo ante cortocircuito de barra. TC 100/1 (RTC=100).
Tren de celdas 02 35.5 kV	T5-P-P	35.5	3150	Dyn5	HV Delta / LV Neutro Sólido	CB-T5-35	Primario T5 - Servicios generales BT	SEL-751	Ajuste de fase sensible al 125% de la I_n (51.26 A). Despeje instantáneo ante cortocircuito de barra. TC 100/1 (RTC=100).

Derivación	TAG	Voltaje (kV)	Potencia (kVA)	Grupo de Conexión	Sistema de Aterramiento	Interruptor asociado	Alimentador asociado	Modelo relé	Criterio Técnico y Relación de TC
SE 4.16 kV T1	R-T1-S	4.16	12500	Dyn5	NGR 400 A	CB-T1-416	Barra secundaria T1 4.16 kV	SEL-751	Protección secundaria de cabecera de barra. Coordinación homopolar de tierra con TC toroidal de ventana.
SE 4.16 kV T2	R-T2-S	4.16	12500	Dyn5	NGR 400 A	CB-T2-416	Barra secundaria T2 4.16 kV	SEL-751	Protección secundaria de cabecera de barra. Coordinación homopolar de tierra con TC toroidal de ventana.
SE 4.16 kV T3	R-T3-S	4.16	10000	Dyn5	NGR 400 A	CB-T3-416	Barra secundaria T3 4.16 kV	SEL-751	Protección secundaria de cabecera de barra. Coordinación homopolar de tierra con TC toroidal de ventana.
SE 0.44 kV T4	R-T4-S	0.44	3150	Dyn5	Neutro sólido a tierra	ACB-T4-044	Tablero principal BT T4	SEL-751	Unidad de disparo electrónica integrada. Calibrada para coordinar con interruptores secundarios de BT.

Derivación	TAG	Voltaje (kV)	Potencia (kVA)	Grupo de Conexión	Sistema de Aterramiento	Interruptor asociado	Alimentador asociado	Modelo relé	Criterio Técnico y Relación de TC
SE 0.44 kV T5	R-T5-S	0.44	3150	Dyn5	Neutro sólido a tierra	ACB-T5-044	Tablero principal BT T5	SEL-751	Unidad de disparo electrónica integrada. Calibrada para coordinar con interruptores secundarios de BT.

Nota. Elaboración propia

4.2.3. Características de Interruptores y Circuit Breakers

Los interruptores y circuit breakers constituyen los equipos de maniobra y despeje de falla del sistema eléctrico. Su selección se relaciona con el nivel de tensión, la corriente nominal del alimentador protegido, la capacidad interruptiva requerida y la ubicación dentro del esquema de distribución. En el sistema proyectado se consideran equipos de 35.5 kV para la derivación, llegada y alimentadores de transformadores; interruptores de 4.16 kV para las barras secundarias de T1, T2 y T3; y circuit breakers de baja tensión para el tablero principal asociado a los transformadores T4 y T5.

Tabla 8. *Interruptores (Circuit Breakers) de la Unidad Minera*

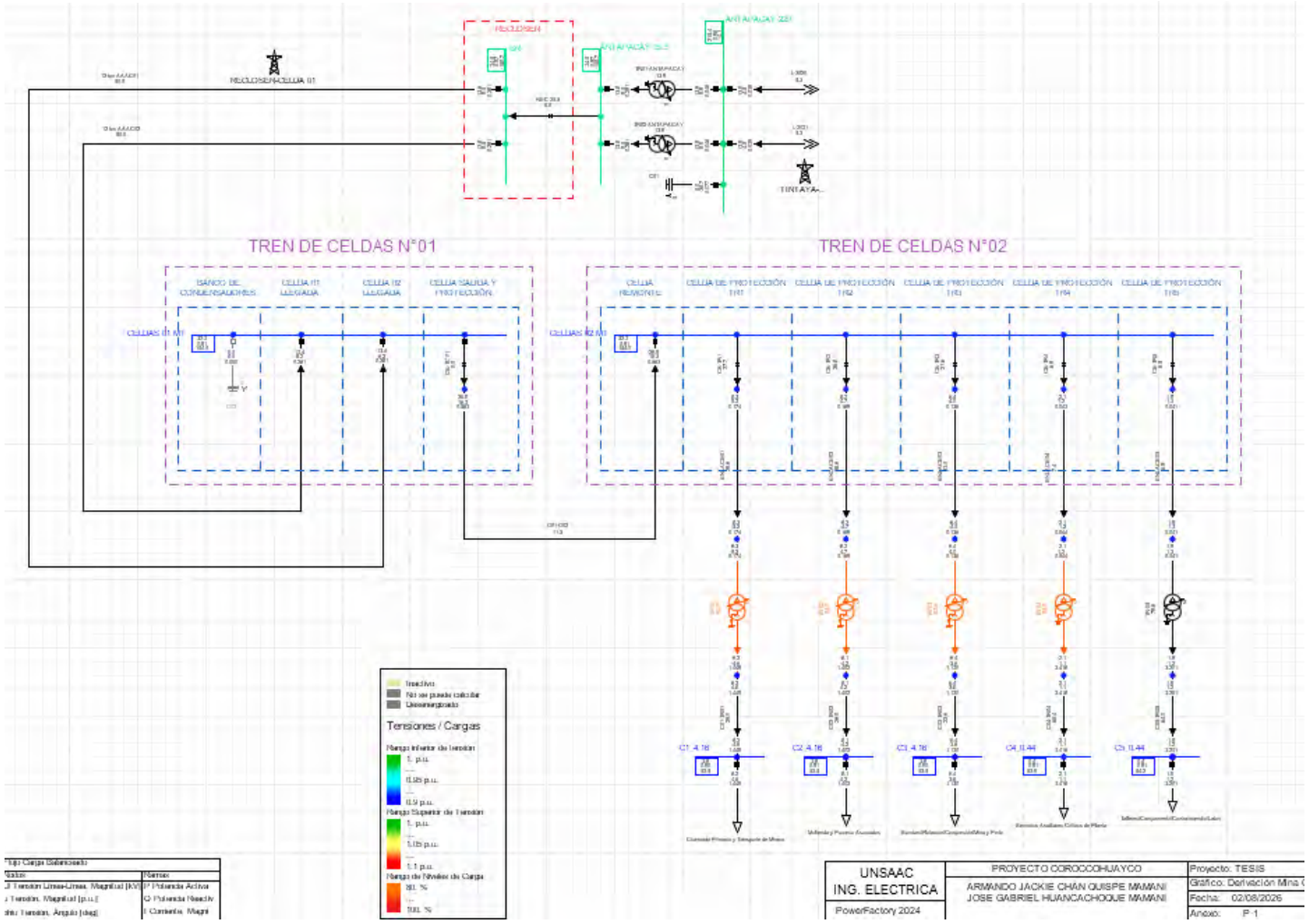
Derivación	ID	Corriente nominal In (A)	Capacidad Interruptiva (kA)	Voltaje (kV)	Equipo protegido	Observación
Derivación 35.5 kV	REC-35.5	1250	50	35.5	Línea Doble Terna 12 km	Recloser de cabecera
Tren de Celda 01 35.5 kV	CB-TC-01	1250	50	35.5	Enlace de Barras	Celda intermedia de salida/acoplamiento entre tableros de MT.
Tren de Celda 02 35.5 kV	CB-TR1	630	50	35.5	Primario Transformador 1	Celda de salida hacia transformador de 12.5 MVA.
Tren de Celda 02 35.5 kV	CB-TR2	630	50	35.5	Primario Transformador 2	Celda de salida hacia transformador de 12.5 MVA.
Tren de Celda 02 35.5 kV	CB-TR3	630	50	35.5	Primario Transformador 3	Celda de salida hacia transformador de 10.0 MVA.
Tren de Celda 02 35.5 kV	CB-TR4	630	50	35.5	Primario Transformador 4	Celda de salida hacia transformador de 3.15 MVA.
Tren de Celda 02 35.5 kV	CB-TR5	630	50	35.5	Primario Transformador 5	Celda de salida hacia transformador de 3.15 MVA.

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la Tabla anterior, las especificaciones técnicas de los interruptores (circuit breakers) seleccionados ratifican la robustez electromecánica del diseño. Frente a una corriente de cortocircuito trifásica máxima calculada de 5.408 kA al final de los 12 km de la doble terna aérea, el establecimiento de una capacidad interruptiva homogénea de 50 kA en el nivel de 35.5 kV otorga un factor de seguridad del 924%, garantizando la extinción segura del arco eléctrico en las cámaras de vacío. Asimismo, el dimensionamiento de las corrientes nominales continuas (1250 A para cabeceras y enlaces, y 630 A para alimentadores de transformadores) cubre holgadamente la corriente de carga de diseño simultánea de 509.4 A y la máxima demanda unitaria de 203.4 A, asegurando la estabilidad térmica del tren de celdas ante fluctuaciones operativas de la unidad minera.

4.3. Flujo de Potencia de la Unidad Minera (Original)

Figura 11. *Flujo de potencia sin banco capacitivo (Shunt C)*



Nota. Elaboración propia

4.3.1. Reporte de Flujo de Potencia

Tabla 9. *Resultados de F.P. según Digsilent Power Factory 2024*

Nombre de Barras	L-L V. Nom.	Ul, Mag	u, Mag	U, Angulo
	kV	kV	p.u._	Deg_
ANTAPACAY 220	220	215.4	0.979	-0.1
ANTAPACAY 35.5	35.5	34.5	0.971	-150.7
BR	35.5	34.5	0.971	-150.7
C1_4.16	4.2	3.8	0.903	53.5
C2_4.16	4.2	3.8	0.905	53.5
C3_4.16	4.2	3.8	0.903	53.5
C4_0.44	0.4	0.4	0.908	53.9
C5_0.44	0.4	0.4	0.906	54.2
CELDAS 01 MT	35.5	32.3	0.909	-154
CELDAS 02 MT	35.5	32.3	0.909	-154

Nota. Elaboración propia

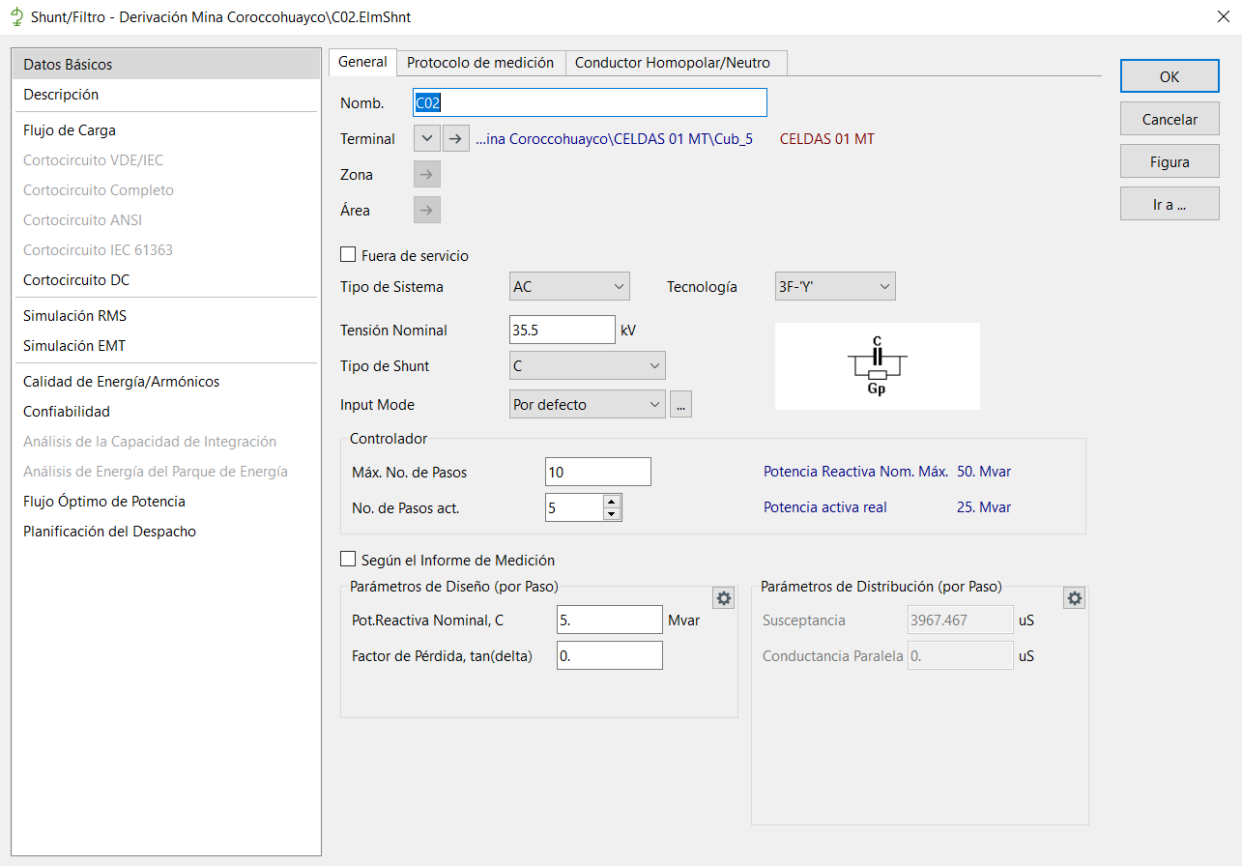
En la Tabla se expone el perfil de tensiones en régimen permanente del sistema bajo el escenario base. Se constata de forma crítica que las barras pertenecientes a las celdas de media tensión (CELDAS 01 MT y CELDAS 02 MT), así como los niveles de distribución interna en baja tensión (4.16 kV y 0.44 kV), registran magnitudes de voltaje inferiores a 0.91 p.u. Esto representa una caída de tensión que supera el límite máximo permisible del 5% ($\Delta V > 5\%$) estipulado por normativas de calidad del suministro eléctrico para la operación segura de equipos mineros.

Esta degradación del perfil de voltajes es atribuible principalmente a la impedancia longitudinal de la línea de transmisión de 12 km combinada con la alta demanda reactiva de los transformadores y grandes motores. Con el propósito de mitigar este fenómeno, optimizar la regulación de tensión en bornes y compensar el factor de potencia local, se diseñó e implementó

un banco de condensadores centralizado, logrando estabilizar las tensiones de las barras dentro del rango operativo normalizado.

A continuación, se observa la configuración que se le dio al banco de condensadores:

Figura 12. *Simulación del Shunt/Filtro C en DigSilent Power Factory 2024*

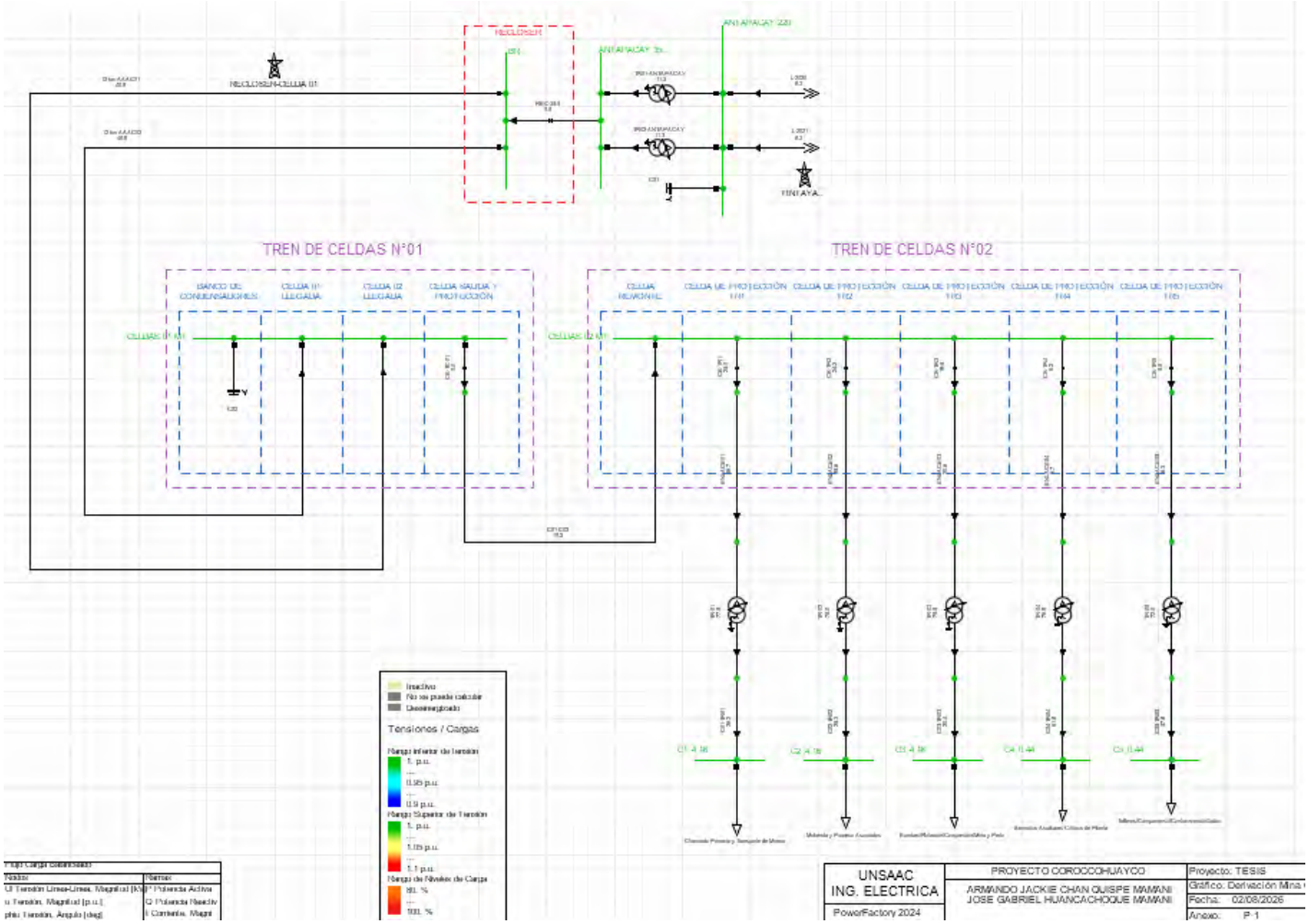


Nota. Elaboración propia

Implementado se logra estabilizar el sistema propuesto y se muestra a continuación en las siguientes imágenes.

4.4. Flujo de Potencia de la Unidad Minera (Banco de Condensadores)

Figura 13. *Flujo de potencia implementando el Shunt/Filtro C en el tren de celdas N°01*



Nota. Elaboración propia

4.4.1. Reporte de Flujo de Potencia

Tabla 10. *Reporte de flujo de transformadores*

Nombre de SED	Lado AT	Lado BT	u, Magnitud	u, Magnitud	Cargab.	Tap 1, Posición Actual	Tap 1, Posición Mínima	Tap 1, Posición Máxima
	Barras	Barras	Lado AT in p.u.	Lado BT in p.u.	%			
TR-01	Borne AT TR-01	Borne BT TR-01	1	1	77.5	-2	-3	3
TR-02	Borne AT TR-02	Borne BT TR-02	1	1.002	75	-2	-3	3
TR-03	Borne AT TR-03	Borne BT TR-03	1	1	75.5	-2	-3	3
TR-04	Borne AT TR-04	Borne BT TR-04	1	1.005	76.9	-2	-3	3
TR-05	Borne AT TR-05	Borne BT TR-05	1	1.003	72	-2	-3	3
TR01-ANTAPACAY	ANTAPACAY 220	ANTAPACAY 35.5	0.998	1	11.3	0	-8	8
TR02-ANTAPACAY	ANTAPACAY 220	ANTAPACAY 35.5	0.998	1	11.3	0	-8	8

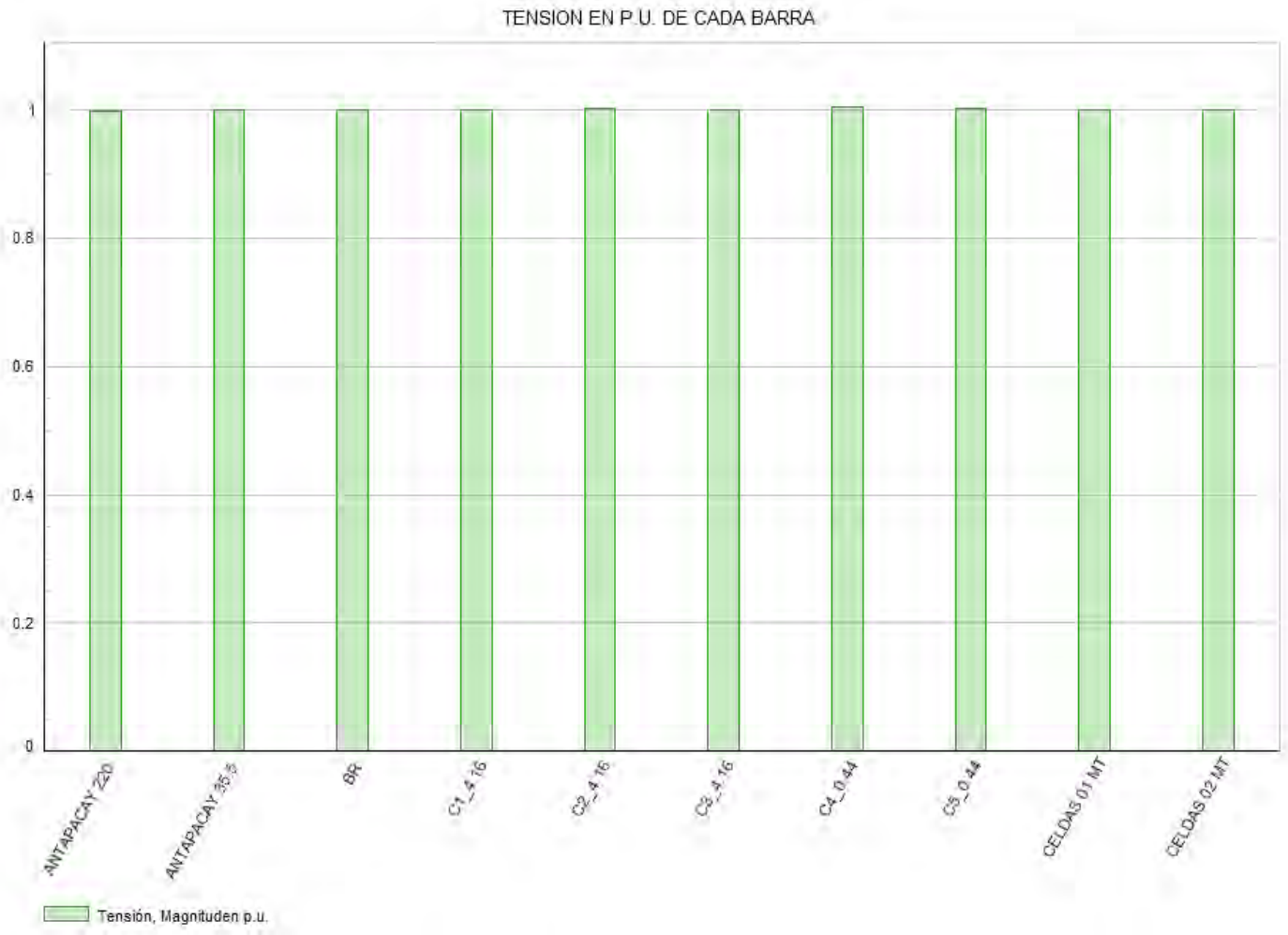
Nota. Elaboración propia

Tabla 11. *Reporte de flujo de potencia en barras*

Nombre de Barra	L-L V.Nom.	Ul, Mag	u, Mag	U, Angulo
	kV	kV	p.u.	deg
ANTAPACAY 220	220	219.5	0.998	-0.1
ANTAPACAY 35.5	35.5	35.5	1	-150.7
BR	35.5	35.5	1	-150.7
C1_4.16	4.2	4.2	1	53.4
C2_4.16	4.2	4.2	1.002	53.4
C3_4.16	4.2	4.2	1	53.4
C4_0.44	0.4	0.4	1.004	53.7
C5_0.44	0.4	0.4	1.003	53.9
CELDAS 01 MT	35.5	35.5	1	-154.6
CELDAS 02 MT	35.5	35.5	1	-154.6

Nota. Elaboración propia

Figura 14. *Tensiones en p.u. de cada barra*



Nota. Elaboración propia

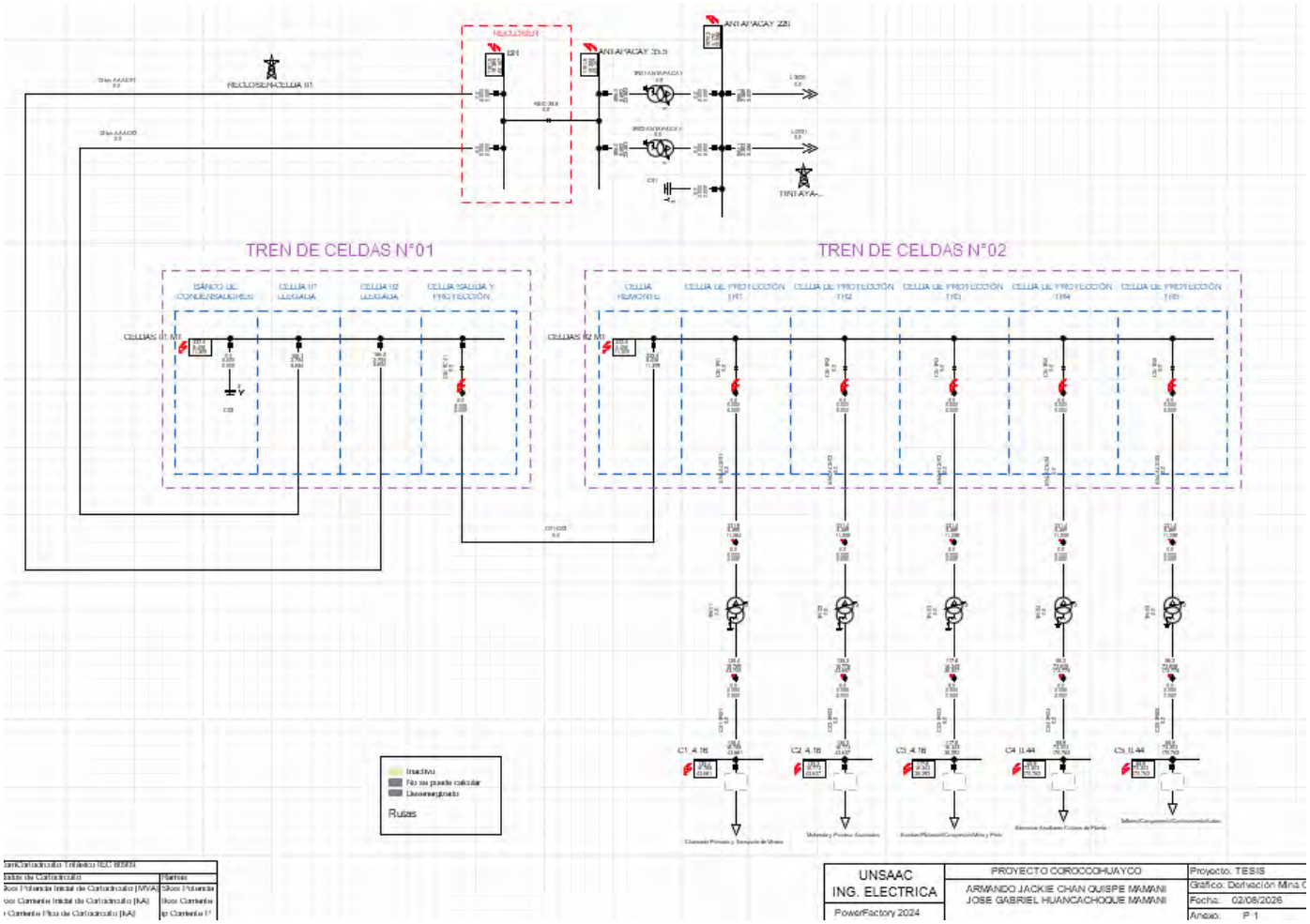
Tabla 12. *Reporte de flujo de potencia en líneas*

Nombre de Línea	Terminal i	Terminal j	u, Magnitud	u, Magnitud	Cargab.	Pérdidas Capacitivas
	Barras	Barras	Terminal i in p.u.	Terminal j in p.u.	%	Mvar
12 km AAAC01	BR	CELDAS 01 MT	1	1	40.9	0.1
12 km AAAC02	BR	CELDAS 01 MT	1	1	40.9	0.1
C01-C02	Nodo Celda01-Celda02	CELDAS 02 MT	1	1	10.2	0
C01-TR01	Borne BT TR-01	C1_4.16	1	1	26.2	0
C02-TR02	Borne BT TR-02	C2_4.16	1.002	1.002	25.3	0
C03-TR03	Borne BT TR-03	C3_4.16	1	1	20.4	0
C04-TR04	Borne BT TR-04	C4_0.44	1.005	1.004	61.8	0
C05-TR05	Borne BT TR-05	C5_0.44	1.003	1.003	57.8	0
ENLACE01	Nodo 01	Borne AT TR-01	1	1	26.7	0
ENLACE02	Nodo 02	Borne AT TR-02	1	1	25.8	0
ENLACE03	Nodo 03	Borne AT TR-03	1	1	20.8	0
ENLACE04	Nodo 04	Borne AT TR-04	1	1	6.7	0
ENLACE05	Nodo 05	Borne AT TR-05	1	1	6.3	0

Nota. Elaboración propia

4.4.2. Corto Circuito Trifásico

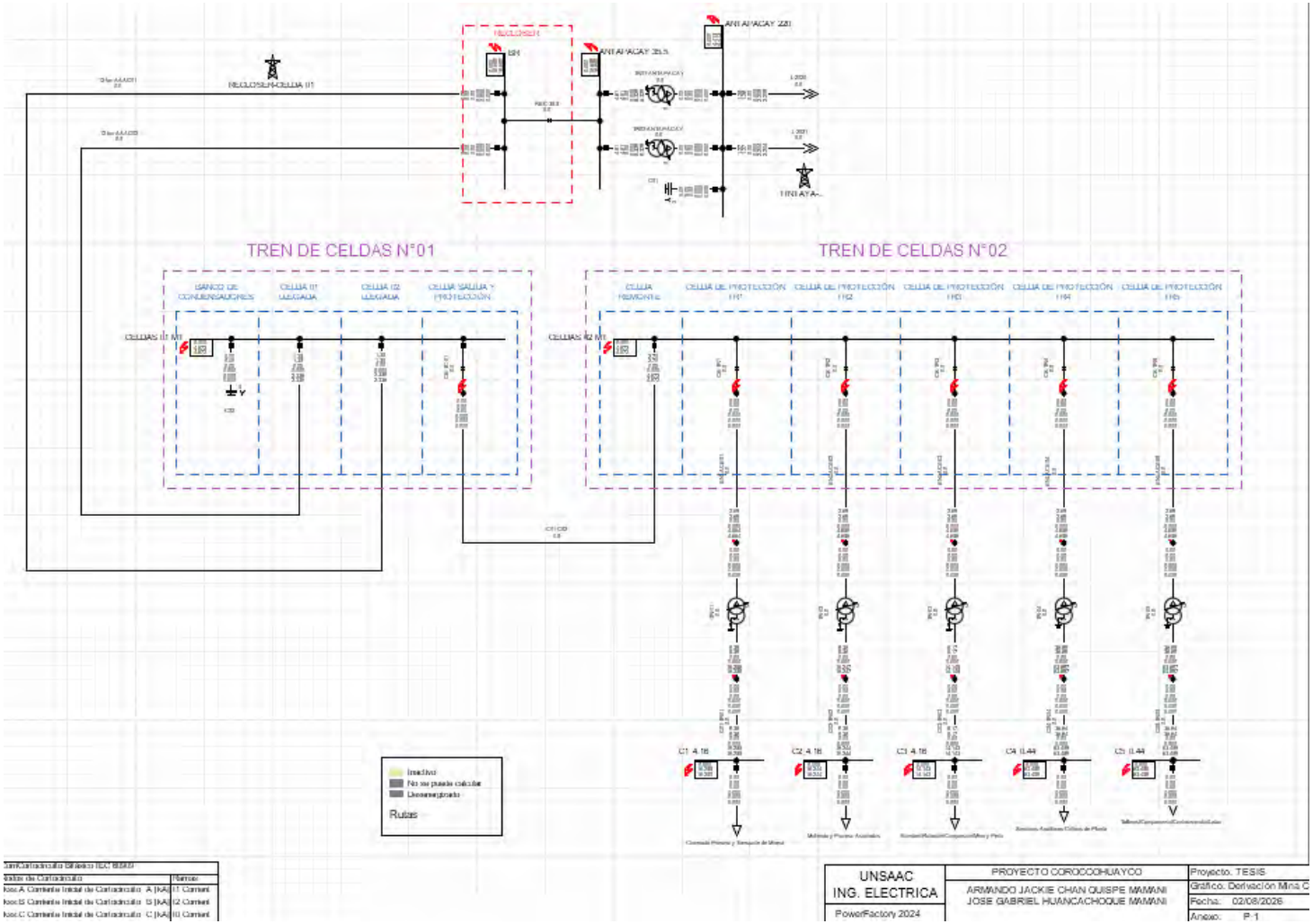
Figura 15. *Cortocircuito trifásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024*



Nota. Elaboración propia

4.4.3. Corto Circuito Bifásico

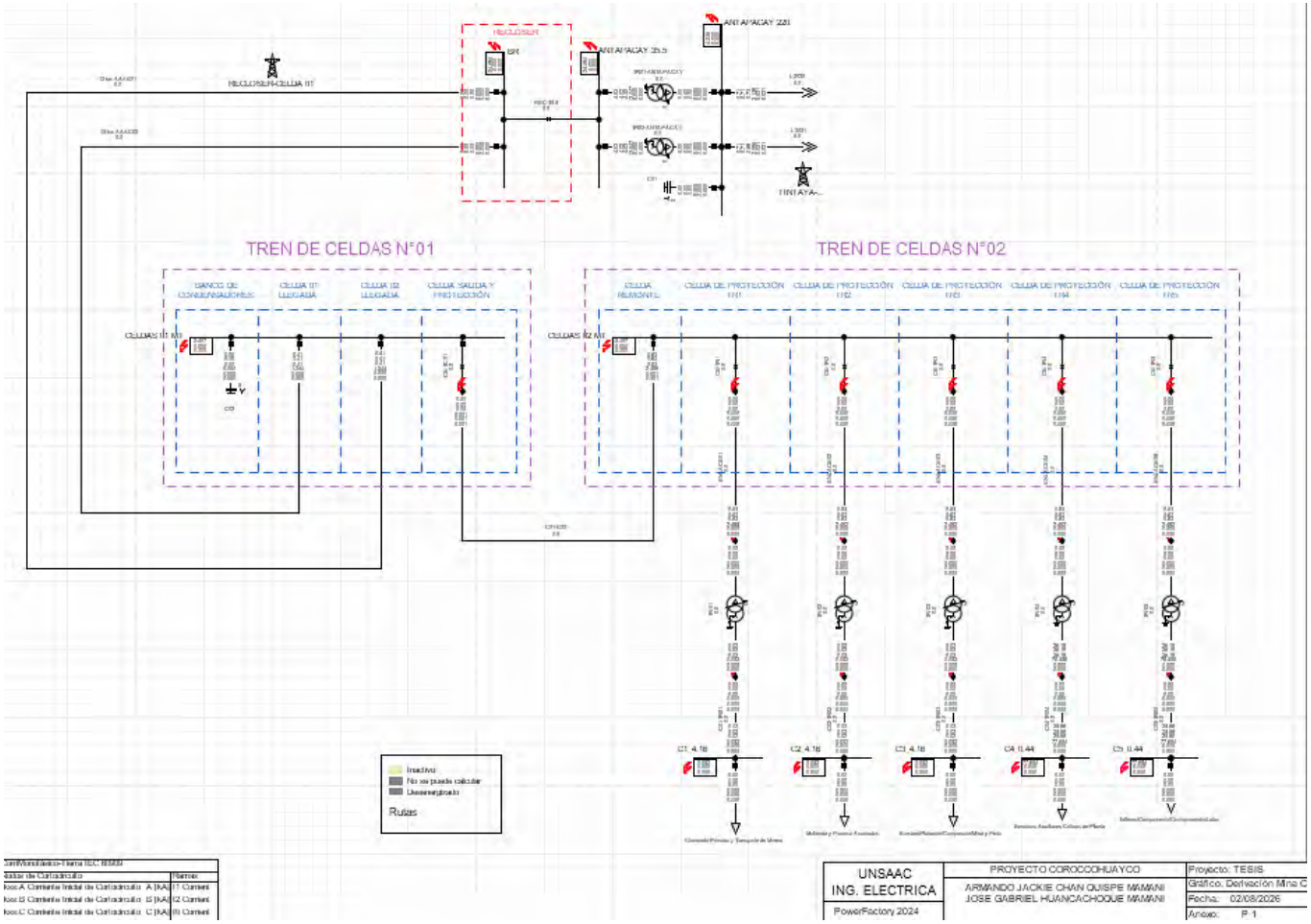
Figura 16. *Cortocircuito bifásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024*



Nota. Elaboración propia

4.4.4. Corto Circuito Monofásico

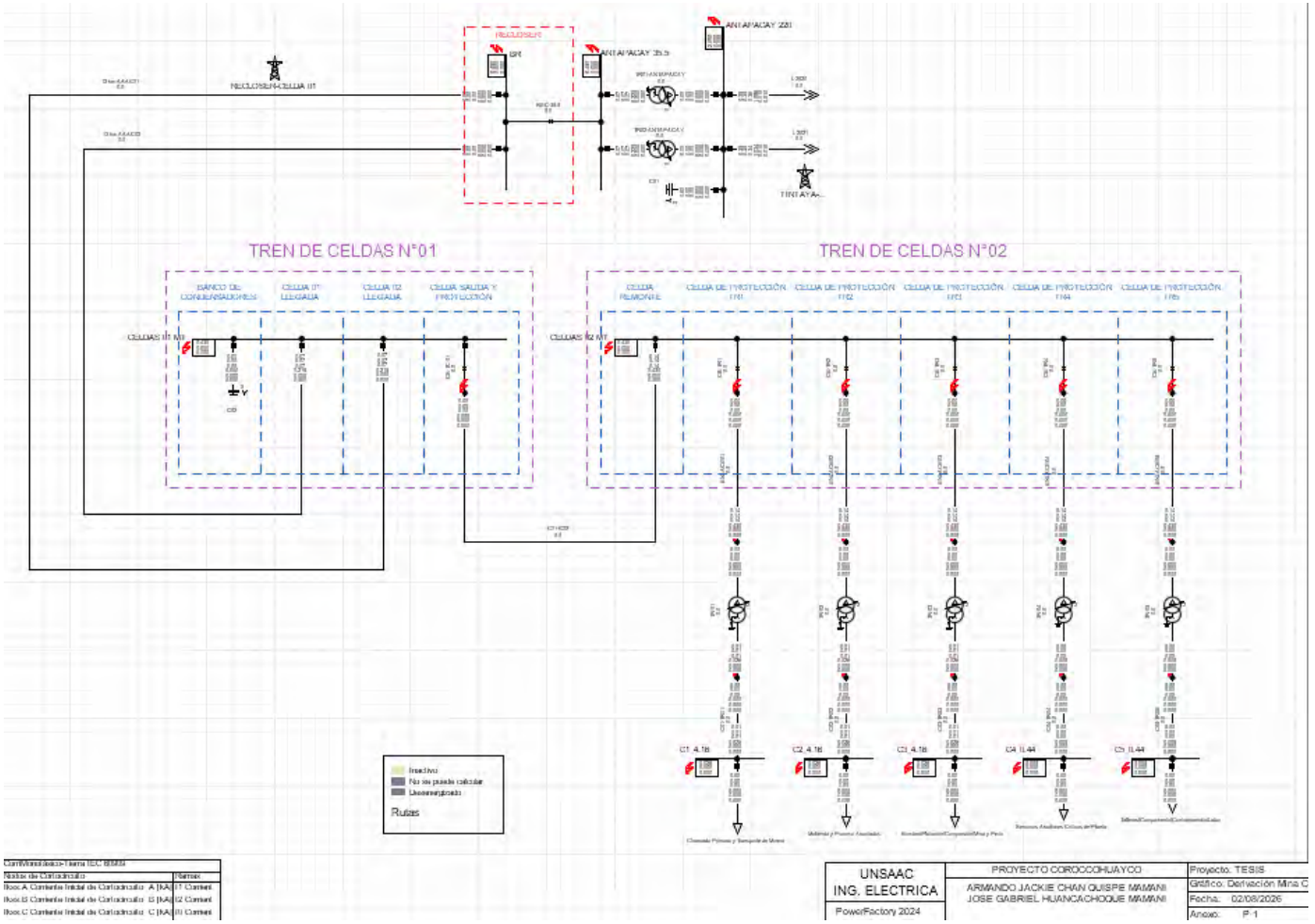
Figura 17. *Cortocircuito monofásico en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024*



Nota. Elaboración propia

4.4.5. Corto Circuito Monofásico con R_f= 50 Ohm

Figura 18. *Cortocircuito monofásico con Rf=50 ohm en barras/nodos en Digsilent Power Factory 2024*



Nota. Elaboración propia

4.4.6. Reporte de fallas de Corto Circuito Trifásico, Bifásico, Monofásico y Monofásico con R_f = 50 Ohm

Tabla 13. *Reporte de fallas de cortocircuito*

Nombre de Barra	Cortocircuito Trifásico	Cortocircuito Bifásico			Cortocircuito Monofásico			Cortocircuito Monofásico (R = 50 ohmios)		
	Ik"	Ik" A	Ik" B	Ik" C	Ik" A	Ik" B	Ik" C	Ik" A	Ik" B	Ik" C
	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
ANTAPACAY 220	5.17	0	4.413	4.413	4.235	0	0	2.09	0	0
ANTAPACAY 35.5	19.385	0	16.659	16.659	24.094	0	0	0.45	0	0
BR	19.385	0	16.659	16.659	24.094	0	0	0.45	0	0
Borne AT TR-01	5.399	0	4.664	4.664	2.485	0	0	0.43	0	0
Borne AT TR-02	5.389	0	4.656	4.656	2.482	0	0	0.43	0	0
Borne AT TR-03	5.389	0	4.656	4.656	2.482	0	0	0.43	0	0
Borne AT TR-04	5.389	0	4.656	4.656	2.482	0	0	0.43	0	0
Borne AT TR-05	5.389	0	4.656	4.656	2.482	0	0	0.43	0	0
Borne BT TR-01	18.789	0	16.258	16.258	0.052	0	0	0.026	0	0
Borne BT TR-02	18.776	0	16.247	16.247	0.052	0	0	0.026	0	0
Borne BT TR-03	16.345	0	14.145	14.145	0.052	0	0	0.026	0	0
Borne BT TR-04	73.808	0	63.897	63.897	78.558	0	0	0.005	0	0
Borne BT TR-05	73.808	0	63.897	63.897	78.558	0	0	0.005	0	0
C1_4.16	18.785	0	16.255	16.255	0.052	0	0	0.026	0	0
C2_4.16	18.773	0	16.244	16.244	0.052	0	0	0.026	0	0
C3_4.16	16.343	0	14.143	14.143	0.052	0	0	0.026	0	0
C4_0.44	73.303	0	63.459	63.459	77.654	0	0	0.005	0	0
C5_0.44	73.303	0	63.459	63.459	77.654	0	0	0.005	0	0
CELDAS 01 MT	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
CELDAS 02 MT	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
Nodo 01	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0

Nombre de Barra	Cortocircuito Trifásico	Cortocircuito Bifásico			Cortocircuito Monofásico			Cortocircuito Monofásico (R = 50 ohmios)		
	Ik"	Ik" A	Ik" B	Ik" C	Ik" A	Ik" B	Ik" C	Ik" A	Ik" B	Ik" C
	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
Nodo 02	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
Nodo 03	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
Nodo 04	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
Nodo 05	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0
Nodo Celda01-Celda02	5.408	0	4.672	4.672	2.487	0	0	0.43	0	0

Nota. Elaboración propia

4.5. Análisis de Coordinación de Protecciones

El diseño del esquema de protección se fundamenta en la información técnica del diagrama unifilar, el cuadro de demanda, las capacidades de los transformadores, los niveles de tensión y la selección de interruptores. El estudio considera la condición de máxima demanda diversificada como escenario de referencia para la verificación de ajustes, de modo que las protecciones actúen con sensibilidad suficiente ante fallas y permanezcan estables durante la operación normal de las cargas.

El procedimiento de análisis comprende la consolidación de la base de datos eléctrica, el cálculo de corrientes nominales por transformador y alimentador, la estimación de niveles de cortocircuito, la selección de funciones ANSI y la propuesta de ajustes para los relés e interruptores. Posteriormente, los valores definidos se organizan en tablas de ajuste y en una lista compatible con SIGMA, a fin de facilitar su posterior validación, simulación o carga en los dispositivos correspondientes.

4.5.1. Criterios de Ajuste para los Equipos de Protección

La definición y optimización de los parámetros de ajuste para los relés multifunción del tren de celdas de 35.5 kV de la Unidad Minera Coroccohuayco se fundamentan en un equilibrio técnico entre tres principios fundamentales: **sensibilidad** para detectar fallas incipientes, **rapidez** para minimizar el estrés térmico en los conductores de 240 mm² y transformadores, y **selectividad** para asegurar que únicamente el interruptor más cercano al punto de falla despeje el evento, maximizando la continuidad del servicio.

Para el desarrollo de las curvas de sobrecorriente temporizada y el cálculo de los tiempos de actuación, se adoptan formalmente las siguientes bases normativas internacionales:

4.5.2. Marco Normativo de Coordinación: IEEE 242 (Buff Book)

Siguiendo las directrices del estándar IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE 242), se establece el criterio de Coordinación Cronométrica. La norma exige mantener un Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI, por sus siglas en inglés) mínimo para absorber los tiempos de operación mecánicos y eléctricos del sistema. Para los relés microprocesados digitales proyectados en el tren de celdas, el CTI se calcula mediante la siguiente distribución de tiempos individuales:

- **Tiempo de apertura propio del interruptor de vacío:** 35 ms a 50 ms (equivalente a 2 o 3 ciclos de red a 60 Hz).
- **Tiempo de caída o tolerancia del relé digital (*Dropout / Reset Time*):** 10 ms a 20 ms.
- **Margen de seguridad por tolerancias de fabricación y error de saturación de TCs:** 100 ms a 150 ms.

Sumando estos componentes tecnológicos, la presente tesis adopta un CTI objetivo de entre 0.20 y 0.35 segundos para la separación cronométrica de las curvas de actuación. Este margen garantiza una selectividad total entre los relés individuales de las celdas de los transformadores (3.15 MVA, 10 MVA y 12.5 MVA), celda de remonte y el recloser de cabecera ubicado aguas arriba, evitando disparos intempestivos.

4.5.3. Marco Normativo Matemático: IEC 60255-151

Para modelar las funciones de sobrecorriente de fases (ANSI 51) y falla a tierra (ANSI 51N), se emplean las ecuaciones características normalizadas por el estándar Measuring relays and protection equipment (IEC 60255-151). El tiempo de operación del relé (t) para cualquier perfil inverso se calcula mediante la relación matemática:

$$t = \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1} \right) TMS$$

Donde:

- t: Tiempo de operación resultante en seg.
- TMS: Factor del Dial de Tiempo (Time Multiplier Setting), que desplaza la curva verticalmente.
- I: Corriente de falla real vista por el rele (A).
- I_s: Corriente de arranque seleccionada o Pick-up (A).
- k, α: Constantes de diseño que definen la pendiente de la curva según la norma.

Para la protección de la línea de 12 km y protección del tren de celdas de la mina, se justifica la selección de la curva **IEC Muy Inversa** (k = 13.5; α = 1.0) y **IEC Extremadamente Inversa** (k = 80; α = 2.0). Está pendiente pronunciada garantiza una excelente selectividad y disminuye drásticamente los tiempos de actuación cuando la corriente de falla alcanza los 8.57 kA

estimados en el tren de celdas debido a la configuración de la línea en doble terna. Asimismo, esta curva permite un escalonamiento cronométrico suave y coordinado con el recloser de cabecera y el relé de la barra principal, resguardando de forma óptima la infraestructura y asegurando la continuidad del servicio del proyecto.

La regla técnica general es: se utiliza la curva Muy Inversa (VI) para la línea y la celda de llegada para coordinar con fusibles y proteger cables, mientras que se aplica la curva Extremadamente Inversa (EI) en el tren de celdas (transformadores y cargas)

4.5.3.1. Tren de Celdas (Protección de Transformadores y Grandes Motores)

- **Curva Seleccionada:** Extremadamente Inversa (EI).
- **Sustento Técnico:** Los transformadores de potencia experimentan elevadas corrientes transitorias de magnetización (inrush) durante su energización, alcanzando valores de entre 8 y 12 veces su corriente nominal en los ciclos iniciales. Se selecciona la curva Extremadamente Inversa (EI) debido a que su pendiente logarítmica pronunciada se aproxima con gran precisión a la característica de soportabilidad térmica y mecánica del transformador, definida por la curva de daño del equipo I^2t. Esto permite parametrizar el relé con un ajuste óptimo que se sitúe de forma segura por encima del punto de inrush estimado y, simultáneamente, por debajo de la curva límite de daño del transformador. Garantizando una protección térmica eficiente ante sobrecargas sostenidas y cortocircuitos externos (through-faults), eliminando la ocurrencia de disparos intempestivos durante las maniobras de energización mediante la adecuada coordinación del dial de tiempo y el bloqueo por segundo armónico integrado en los relés microprocesados.

4.5.3.2. Línea de Distribución (Alimentador Principal)

- **Curva Seleccionada: Muy Inversa (VI).**
- **Sustento Técnico:** Las líneas de distribución aéreas están expuestas a fallas de impedancia variable y a corrientes de cortocircuito que decrecen proporcionalmente a la distancia desde la subestación. La curva VI posee una pendiente intermedia idónea para este escenario, permitiendo una adecuada coordinación temporal (cronométrica) con los dispositivos de protección ubicados aguas abajo (como reconectadores automáticos de ramales o relés secundarios). Ante una falla en el alimentador, la característica de la curva VI garantiza un despeje despejado y rápido de la energía de falla, salvaguardando la integridad térmica y el aislamiento del cable conductor. Asimismo, conserva el Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI) requerido para que la protección local del tramo afectado actúe en primera instancia, asegurando la selectividad del sistema minero.

4.5.3.3. Celda de Llegada (Cabecera del Sistema)

- **Curva Seleccionada:** Muy Inversa (VI).
- **Sustento Técnico**: Al ser el punto de acoplamiento y el respaldo principal del sistema de distribución interno, la celda de llegada debe garantizar una estricta coordinación cronométrica y amperimétrica con la protección de la empresa suministradora (aguas arriba) y las celdas de distribución (aguas abajo). Se selecciona la curva Muy Inversa (VI) debido a que su pendiente logarítmica emula la respuesta térmica de los conductores de la doble terna aérea y se alinea con los requerimientos normativos del operador de red. Al mantener la homologación de curvas VI entre la llegada y los alimentadores principales, se mitiga el riesgo de cruce de curvas a corrientes de falla

elevadas, manteniendo un Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI) controlado de entre 0.30 y 0.40 segundos ante la corriente de cortocircuito máxima calculada. Esto asegura la selectividad cronométrica y evita la salida intempestiva de la cabecera principal ante fallas en los circuitos derivados.

4.5.4. Criterios de Protección de Sobrecorriente (Funciones 50/51 y 50N/51N)

La selectividad cronométrica y amperimétrica de las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N exige una parametrización coherente con la corriente nominal o de carga, la capacidad nominal de los transformadores, los niveles de corriente de cortocircuito y la coordinación selectiva con los dispositivos de protección instalados aguas arriba y aguas abajo. Las funciones de fase deben permanecer estables ante la máxima demanda y operar frente a corrientes de falla, mientras que las funciones de tierra deben detectar corrientes residuales compatibles con el sistema de aterramiento adoptado.

El punto de arranque o pickup debe seleccionarse por encima de la corriente máxima de operación esperada, incorporando un margen que evite disparos indebidos durante transitorios admisibles, energización de transformadores o arranque de cargas motrices. En transformadores y alimentadores de media tensión, el ajuste temporizado permite coordinar las protecciones principales con la protección de respaldo del sistema; por su parte, el elemento instantáneo se reserva para fallas de alta magnitud, siempre que no comprometa la selectividad del sistema.

$$t = \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1} \right) TMS$$

La selección de los parámetros de curva define la pendiente y el tiempo de actuación del relé ante diferentes múltiplos de pickup. Por ello, la curva seleccionada debe permitir que el tiempo

de despeje sea menor que el límite de daño térmico o mecánico del equipo protegido, manteniendo al mismo tiempo un margen suficiente respecto de los dispositivos coordinados aguas arriba.

Tabla 14. *Análisis del tiempo actuado*

Característica	Sigla	α (IEC)	K (IEC)	C (IEC)	α (ANSI)	K (ANSI)	C (ANSI)
Tiempo definido	-	-	-	0	1	-	-
Normal Inverso	NI	0.02	0.14	0	2.10	8.94	0.18
Muy Inverso	**VI**	**1.00**	**13.5**	**0**	**2.01**	**3.93**	**0.10**
Extremadamente Inverso	**EI**	**2.00**	**80.0**	**0**	**2.01**	**5.68**	**0.02**
Inverso de Largo Tiempo	LI	1.00	120.50	0	2.01	5.62	2.18

Nota. Elaboración propia.

La modelación matemática de las curvas de disparo requiere que los coeficientes IEC y ANSI se utilicen de manera consistente con la característica seleccionada. Las curvas Normal Inversa (NI), Muy Inversa (VI), Extremadamente Inversa (EI) e Inversa de Largo Tiempo (LI) permiten adaptar la respuesta del relé al comportamiento de la carga y al nivel de falla. En el presente esquema, la selección de curvas se orienta a mantener la selectividad entre relés principales y de respaldo, evitando disparos no coordinados ante fallas aguas abajo.

La optimización de las funciones de sobrecorriente aplicadas en el tren de celdas de 35.5 kV se divide metodológicamente en dos ramas de protección: el análisis de fases (ANSI 50/51) y el análisis de fallas a tierra (ANSI 50N/51N). Ambas funciones operan en base a los datos nominales de carga de los cinco transformadores independientes y las corrientes de cortocircuito atenuadas por la línea aérea de 12 km $I_{cc} \approx 5.419\ kA$

4.5.4.1. Memoria de Cálculo del Recloser

- **Transformador de** $(\boldsymbol{TC}) = \frac{800}{5} \rightarrow RTC = \mathbf{160}$

- **Corriente de Carga I_{carga}:**

$$I_{carga} = 460\ \boldsymbol{A}$$

- **Corriente de Falla en bornes de la barra del Recloser $I_{cc_recloser} = \mathbf{19385\ A}$**
- **Corriente de Falla al final de la doble terna de 12 km I_{cc_celdas}:** 5408 A (calculada por el efecto de la doble terna)
- **Curva Base: IEC Muy Inversa (50/51) (MI)** $[k = 13.5;\ \alpha = 1.0]$
- **Curva Base: IEC Normal Inversa (50N/51N) (MI)** $[k = 0.14;\ \alpha = 0.02]$

a) ANSI 51 (Fase Temporizado)

- ***Pick-up primaria.*** Estandarizado con la cabecera para mantener la consistencia térmica de las barras principales*:*

$$I_{s51} = 1.5\ (460)\ A = 690\ A \text{ primarios}$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s_sec} = \frac{690}{160\ (RTC)} = \mathbf{4.31\ A, en\ el\ Rele}.$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 5408 A, t_{int} = 0.77.***

$$t_{int} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{13.5}{\left(\frac{5408}{764.1}\right)^{1} - 1}\right) = TMS\left(\frac{13.5}{7.08 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.77}{1.97} = \mathbf{0.390\ s\ (390\ ms)}$$

b) ANSI 50 (Fase Instantáneo)

Debe ajustarse de forma amperimétrica para proteger la línea de 12 km contra cortocircuitos severos, pero bloqueado o lo suficientemente alto para no dispararse de manera errática por la corriente de inserción (Inrush) combinada de los 5 transformadores al energizar la subestación.

- ***Pick-up primario.*** Se ajusta al 150% del cortocircuito máximo (5408 A) para cubrir la línea aérea, o de forma práctica por encima del Inrush total:

$$I_{s50RecloserF} = 1.5(5408)A = \ 8112\ A$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s50sec} = \frac{\mathbf{8112}}{\mathbf{160}\ (\boldsymbol{RTC})} = \mathbf{50.7}\ \boldsymbol{A; en\ el\ rele}$$

- ***Temporización.*** Se le programa un retardo **intencional de 160 ms** para dar margen a que las celdas limpien fallas internas.

c) ANSI 51N (Tierra Temporizado)

Al igual que en las celdas, se busca una alta sensibilidad para fallas homopolares en la línea de 12 km. Se calibra al 30% de la capacidad de diseño del Recloser:

- **Pick-up primario.**

$$\mathrm{I_{s51NRecloser}} = 0.30(460)\ \mathrm{A} = 138\ \mathrm{A\ primarios}$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s51Nsec} = \frac{\mathbf{138}}{\mathbf{160}(\boldsymbol{RTC})} = \mathbf{0.86}\ \boldsymbol{A, en\ el\ rele}$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 2487 A, t_{int} = 0.65.***

$$t_{int} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{\left(\frac{2487}{138}\right)^{0.02} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{1.06 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.65}{2.35} = \mathbf{0.276}\ \boldsymbol{s}\ \approx (\mathbf{0.280}\ \boldsymbol{ms})$$

d) ANSI 50N (Tierra Instantáneo)

Es fundamental para despejar fallas monofásicas directas en los conductores desnudos (corte de conductor, caída de rayos). Para evitar el disparo falso por corrientes capacitivas acumuladas de la doble terna:

- ***Pick-up primario.***

$$I_{s50NRecloser} = 1.5(2487)\ A = 3730.5\ A$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s50Nsec} = \frac{3730.5A}{160(RTC)} = \mathbf{23.32\ A, en\ el\ rele}$$

- **Temporización**. Se programa con un retardo de 160 ms para estabilizar transitorios atmosféricos en los 12 km de trayectoria.

4.5.4.2. Memoria de Cálculo para la Celda Intermedia (Acoplamiento de Barras)

- ***Transformador de*** $(\boldsymbol{TC})$: $\frac{\mathbf{800}}{\mathbf{5}} \rightarrow RTC\ = 160$
- ***Corriente Nominal de Carga Total*** $\boldsymbol{I_{carga}}$**.** Es la suma de las corrientes nominales de los 5 transformadores operando en simultáneo:

$$I_{carga_total} = 509.4\ A$$

- ***Corriente de Falla en barra*** $\boldsymbol{I_{ccceldas} = 5408\ A}$
- ***Curva Base: IEC Muy Inversa (50/51) (MI)*** $[k\ =\ 13.5;\ \alpha\ =\ 1.0]$
- ***Curva Base: IEC Normal Inversa (50N/51N) (NI)*** $[k\ =\ 0.14;\ \alpha\ =\ 0.02]$

a) ANSI 51 (Fase Temporizado)

- ***Pick-up primaria.*** Estandarizado con la cabecera para mantener la consistencia térmica de las barras principales*:*

$$I_{s5} = 1.25(509.4)\ A = 636.75\ A \text{ primarios}$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s_sec} = \frac{636.75}{160\ (RTC)} = 3.98\ A, en\ el\ Rele.$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 5408 A, t_{int} = 0.47.***

$$t_{int} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{13.5}{\left(\frac{5408}{636.75}\right)^{1} - 1}\right) = TMS\left(\frac{13.5}{8.49 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.47}{1.8} = \mathbf{0.261\ s} \approx\ (\mathbf{260\ ms})$$

b) ANSI 50 (Fase Instantáneo)

- ***Pick-up primario (I_{s50}).***

$$I_{s50} = 1.4(5408)A = \ 7571.2\ A$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s50sec} = \frac{\mathbf{7571.2\ A}}{\mathbf{160}\ (\boldsymbol{RTC})} = \mathbf{47.32\ A, en\ rele}$$

- ***Temporización.*** Se le programa un retardo **intencional de 80 ms** para dar margen a que las celdas limpien fallas internas.

c) ANSI 51N (Tierra Temporizado)

- ***Pick-up primario (I_{s51N}).***

$$I_{s51N} = 0.25(509.4)\ A = 127.35\ A\ primarios$$

- ***Pick-up secundario ($I_{s51N-sec}$).***

$$I_{s51Nsec} = \frac{\mathbf{127.35}}{\mathbf{160}(\boldsymbol{RTC})} = \mathbf{0.795\ A, en\ rele}$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 2487 A, t_{int} = 0.34.***

$$t_{int} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{\left(\frac{2487}{127.35}\right)^{0.02} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{1.06 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.34}{2.29} = \mathbf{0.149\ s}\ \approx (\mathbf{470ms})$$

d) ANSI 50N (Tierra Instantáneo)

- ***Pick-up primario.***

$$I_{s50NRecloser} = 1.40(2487)\ A = 3481.8\ A$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s50Nsec} = \frac{3481.8}{160(RTC)} = \mathbf{21.76\ A, en\ el\ rele}$$

- ***Temporización.*** Se programa con un **retardo de 80 ms** para discriminación homopolar.

4.5.4.3. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 1 y 2 (TR-01 y TR-02)

- ***Transformador de*** $(\boldsymbol{TC})$: $\frac{300}{5} \rightarrow RTC\ = 60$
- ***Corriente Nominal*** $\boldsymbol{I_n}$: 203.41 A (cargabilidad del 78.4%/75.9%)
- ***Corriente de Falla en barra*** $\boldsymbol{I_{cc_celdas} = 5408\ A}$
- ***Corriente Falla en baja tensión*** $\boldsymbol{I_{cc_{TR01_02}} = 2202\ A}$
- ***Corriente Falla T01-02:*** $\boldsymbol{I_{cc_{T01_02}} = 2485\ A}$
- ***Curva Base: IEC Extremadamente Inversa (50/51) (EI)*** $[k\ =\ 80.0;\ \alpha\ =\ 2.0]$
- ***Curva Base: IEC Normal Inversa (50N/51N) (NI)*** $[k\ =\ 0.14;\ \alpha\ =\ 0.02]$

a) Función ANSI 51 (Fase Temporizado)

La calibración del umbral de arranque o corriente de *Pick-up* I_{s51} tiene como objetivo principal permitir que el transformador opere a su máxima capacidad nominal continua e incluso admita sobrecargas térmicas temporales permitidas por diseño, sin activar disparos falsos. Siguiendo las directrices de la norma **IEEE 242**, el ajuste se calcula empleando un factor de seguridad entre el 125% y el 200% de la corriente nominal de la máquina I_n:

- ***Cálculo del Pick-up Primario.***

$$I_{s51} = 1.25\ (I_n) = 1.25(203.41)\ A = 254.26\ A$$

El ajuste equivalente que se programará en el secundario del relé I_{s_sec} se determina dividiendo el valor primario entre la relación de transformación del TC correspondiente (RTC):

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s_sec} = \frac{I_{s51}}{60(RTC)} = \frac{254.26}{60(RTC)} = \mathbf{4.24\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Cálculo del Dial de Tiempo (TMS) y Tiempo de Operación***. Se parametriza un $t_{TR\text{-}01/02}$ = **0.25** bajo el perfil de alta pendiente.

Para TR-01 y TR-02 (12.5 MVA | TC 300/5), Con una I_n de 203.41 A, el *Pick-up* primario se fija en **254.26 A**, lo que equivale a un ajuste en el relé de **4.24 A**.

$$t_{TR-01/02} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{80}{\left(\frac{2202}{254.26}\right)^{2} - 1}\right) = TMS\left(\frac{80}{75.00 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.25}{1.08} = \mathbf{0.231\ s}\ \approx\ (\mathbf{230\ ms})$$

b) Función ANSI 50 (Fase Instantáneo)

La unidad instantánea está diseñada para despejar fallas severas de forma inmediata (t = 0 s o retardos intencionales mínimos de 20 a 30 ms para amortiguar transitorios). El criterio crítico de ajuste exige que el *Pick-up* instantáneo I_{s50} se configure obligatoriamente **por encima de la**

corriente de inserción magnética o *Inrush* del transformador, la cual ocurre al energizar el núcleo en frío.

Para evitar que el 50 opere instantáneamente por una falla ubicada después del transformador, el pickup debe ser mayor que la máxima corriente pasante por una falla en BT:

$$2202 < I_{s50} < 5488$$

Adoptando un margen preliminar del 125 % sobre la falla pasante:

$$I_{50Prim} = 1.25(2202) = 2752.5\ A$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s50_sec} = \frac{2752.5}{60(RTC)} = \mathbf{45.88\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Temporización.*** **Operación a 0** s (Instantáneo local).

c) Función ANSI 51N (Tierra Temporizado)

- ***Cálculo del Pick-up Primario.***

$$I_{s51N} = 0.20(I_n) = 0.20(203.4) = 40.68\ \text{A}$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s51_sec} = \frac{I_{s51N}}{60(RTC)} = \frac{40.68}{60(RTC)} = \mathbf{0.68\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Dial de Tiempo.*** Fijado en **t = 0.2** con curva IEC Extremadamente Inversa.

$$t_{TR-01/02} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{\left(\frac{2485}{40.68}\right)^{0.02} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{1.09 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.2}{1.63} = 0.122\ s \ \approx\ (120\ ms)$$

d) Función ANSI 50N (Tierra Instantáneo)

- ***Cálculo del Pick-up Primario I_{s50N}.***

$$I_{s50N} = 2485 * 0.5 = 1242.5\ A$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s50N_sec} = \frac{I_{s50N}}{60(RTC)} = \mathbf{20.71\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Temporizado.*** Retardo de seguridad de 0 ms.

4.5.4.4. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 3 (TR-03)

- ***Transformador de Corriente (TC):*** 300/5 A - RTC = 60
- ***Corriente Nominal*** $\boldsymbol{I_n}$: 162.7 A
- ***Corriente de Falla en barra*** $\boldsymbol{I_{ccceldas} = 5408\ A}$
- ***Corriente de Falla en baja tensión*** $\boldsymbol{I_{cc_T03} = 1915\ A}$
- ***Corriente de Falla monofásico:*** $\boldsymbol{I_{cc_{T03}} = 2482\ A}$
- ***Curva Base: IEC Extremadamente Inversa (50/51) (EI)*** $[k = 80.0;\ \alpha = 2.0]$
- ***Curva Base: IEC Normal Inversa (50N/51N) (NI)*** $[k = 0.14;\ \alpha = 0.02]$

a) Función ANSI 51 (Fase Temporizado)

La calibración del umbral de arranque o corriente de *Pick-up* I_{s51} tiene como objetivo principal permitir que el transformador opere a su máxima capacidad nominal continua e incluso admita sobrecargas térmicas temporales permitidas por diseño, sin activar disparos falsos. Siguiendo las directrices de la norma **IEEE 242**, el ajuste se calcula empleando un factor de seguridad entre el 125% y el 200% de la corriente nominal de la máquina I_n:

- ***Pick-up primario.***

$$I_{s51} = 1.25(162.7)\ A = 203.38\ A \text{ primarios}$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s_sec} = \frac{203.38}{60\ (RTC)} = 3.39\ A, en\ el\ Rele.$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 1915 A, t_{TR_03} = 0.21.***

$$t_{TR-03} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{80}{\left(\frac{1915}{203.38}\right)^{2} - 1}\right) = TMS\left(\frac{80}{88.66 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.21}{0.913} = 0.230\ s\ \approx\ (230\ ms)$$

b) Hookup ANSI 50 (Fase Instantánea)

La unidad instantánea está diseñada para despejar fallas severas de forma inmediata (t = 0 s o retardos intencionales mínimos de 20 a 30 ms para amortiguar transitorios). El criterio crítico de ajuste exige que el *Pick-up* instantáneo I_{s50} se configure obligatoriamente **por encima de la corriente de inserción magnética o *Inrush*** del transformador, la cual ocurre al energizar el núcleo en frío.

Para evitar que el 50 opere instantáneamente por una falla ubicada después del transformador, el pickup debe ser mayor que la máxima corriente pasante por una falla en BT:

$$1915 < I_{s50} < 5402$$

- ***Pick Adoptando un margen preliminar del 125 % sobre la falla pasante.***

$$I_{50Prim} = 1.25(1915) = 2393.75\ A$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s50_sec} = \frac{2393.75}{60(RTC)} = \mathbf{39.90\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Temporización.*** Se le programa un retardo **intencional de 0 ms**.

c) Función ANSI 51N (Tierra Temporizado)

- ***Pick-up primario (I_{s51N}).***

$$I_{s51N} = 0.25(62.7)\ A = 40.68\ A\ primarios$$

- ***Pick-up secundario ($I_{s51N-sec}$).***

$$I_{s51Nsec} = \frac{\mathbf{40.68}}{\mathbf{60}(\boldsymbol{RTC})} = \mathbf{0.68}\ \boldsymbol{A, en\ rele}$$

- **Cálculo *del Tiempo de Actuación ante la Falla de 2482 A*, $\mathbf{t_{TR_03}}$ = *0.19*.**

$$t_{TR-03} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{\left(\frac{2482}{32.54}\right)^{0.02} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{1.09 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.19}{1.634} = 0.116\ s\ \approx (120\ ms)$$

d) Función ANSI 50N (Tierra Instantáneo)

- ***Cálculo del Pick-up Primario I_{s50N}.***

$$I_{s50N} = 0.5(2482) = 1241\ A$$

- ***Pick-up secundario (Relé)***

$$I_{s50Nsec} = \frac{1241\ A}{60(RTC)} = 20.68\ A, en\ rele$$

- ***Temporización***. Se programa con un retardo de **0 ms**.

4.5.4.5. Memoria de Cálculo para la Celda de Salida 4 y 5 (TR-04 y TR-05)

- ***Transformador de Corriente (TC):*** 100/1 A - RTC = 100
- ***Corriente Nominal I_n***: 51.26 *A* (Cargabilidad del 77.9% / 73.0% para auxiliares y servicios generales)
- ***Corriente de Falla en barra $I_{ccceldas} = \mathbf{5419}\ \boldsymbol{A}$***
- ***Corriente de Falla monofásico $I_{cc_{T04-05}} = \mathbf{2482}\ \boldsymbol{A}$***
- ***Corriente de Falla en baja tensión $I_{cc_{T04-05}} = \mathbf{915}\ \boldsymbol{A}$***
- ***Curva Base: IEC Extremadamente Inversa (50/51) (EI)*** $[k = 80.0;\ \alpha = 2.0]$

- ***Curva Base: IEC Normal Inversa (50N/51N) (NI)*** $[k = 0.14;\ \alpha = 0.02]$

a) Función ANSI 51 (Fase Temporizado)

- ***Pick-up primario.***

$$I_{s51} = 1.25(51.26)\ A = 64.08\ A \text{ primarios}$$

- ***Pick-up secundario (Relé).***

$$I_{s_sec} = \frac{64.08}{100\ (RTC)} = 0.64\ A, en\ el\ Rele.$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 915 A, $T_{TR\text{-}04/05}$ = 0.09.***

$$t_{TR-04/05} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS \times \left(\frac{80}{\left(\frac{915}{64.08}\right)^{2} - 1}\right) = TMS\left(\frac{80}{203.92 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.09}{0.39} = 0.228\ s \approx\ (230\ ms)$$

b) ANSI 50 (Fase Instantánea)

- ***Pick Adoptando un margen preliminar del 125 % sobre la falla pasante.***

$$I_{50Prim} = 1.25(915) = 1143.75\ A$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s50_sec} = \frac{1143.75}{100(RTC)} = \mathbf{11.44\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Temporización.*** Se le programa un retardo **intencional de 0 ms**.

c) Función ANSI 51N (Tierra Temporizado)

- ***Pick-up primario*** $(\boldsymbol{I_{s51N}})$

$$I_{s51N} = 0.30(51.26)A = 15.38\ A\ primarios$$

- ***Pick-up secundario ($\boldsymbol{I_{s51N_sec}}$)***

$$I_{s51N_sec} = \frac{15.38}{100(RTC)} = \mathbf{0.15\ A, en\ rele}$$

- ***Cálculo del Tiempo de Actuación ante la Falla de 2482 A, $T_{TR-04/05}$ = 0.15.***

$$t_{TR-04/05} = TMS\left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{\alpha} - 1}\right) = TMS \times \left(\frac{0.14}{\left(\frac{2482}{15.38}\right)^{2} - 1}\right) = TMS\left(\frac{0.14}{1.107 - 1}\right)$$

$$TMS = \frac{0.15}{1.308}\ 0.115\ s\ \approx\ (120\ ms)$$

d) Función ANSI 50N (Tierra Instantáneo)

- ***Pick Adoptando un margen preliminar del 50 % sobre la falla monofásica.***

$$I_{50Prim} = 0.50(4482) = 1241\ A$$

- ***Cálculo del Pick-up Secundario.***

$$I_{s50_sec} = \frac{1241}{100(RTC)} = \mathbf{12.41\ A\ en\ el\ rele}.$$

- ***Temporización***. Se programa con un retardo de **0 ms**.

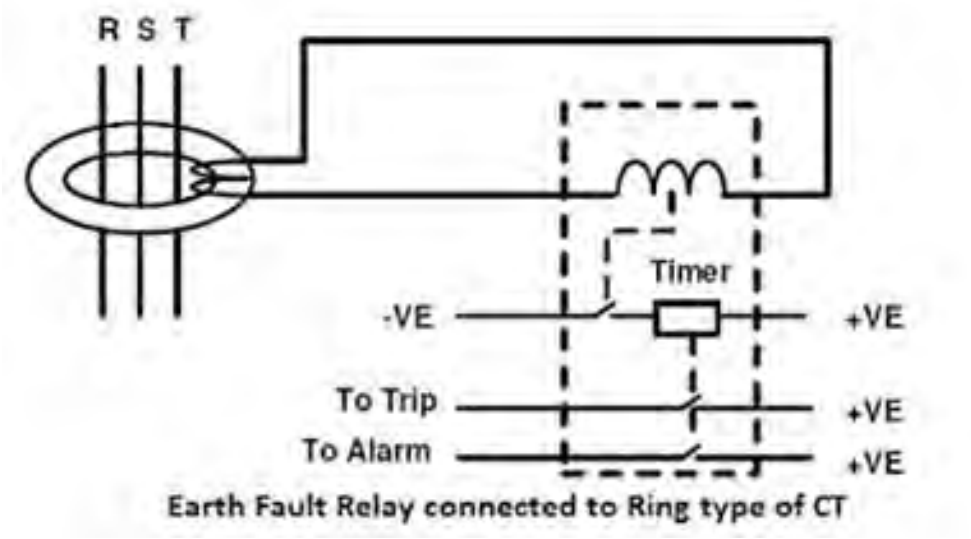
4.5.5. Protección de Falla a Tierra

La falla a tierra se produce cuando se degrada el aislamiento de una fase y aparece una trayectoria de corriente hacia tierra. En sistemas con el neutro puesto a tierra mediante impedancia, la corriente de falla puede limitarse para reducir daños térmicos y esfuerzos mecánicos. La medición mediante transformador de corriente de secuencia cero permite detectar la corriente residual con mayor sensibilidad, debido a que en condiciones normales la suma vectorial de las corrientes de fase es aproximadamente nula.

Cuando la instalación no permite emplear un TC de secuencia cero, puede utilizarse una conexión residual mediante los transformadores de corriente de fase. Sin embargo, esta alternativa es más sensible a errores de relación, saturación y desbalances durante el arranque de motores. Por ello, el pickup de la protección 50N/51N debe seleccionarse de forma que mantenga sensibilidad

ante fallas reales a tierra y, al mismo tiempo, evite disparos indebidos por corrientes residuales no asociadas a una falla

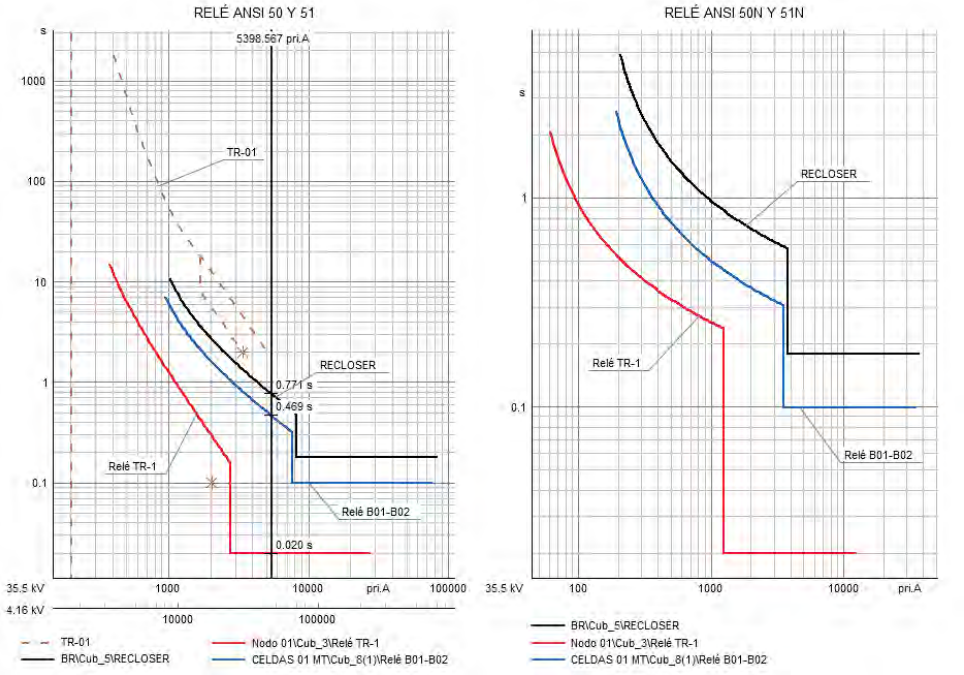
Figura 19. *Relé de falla a tierra conectado a un transformador de corriente (CT)*



Nota. Extraído de COMPRACO Indústria e Construção.

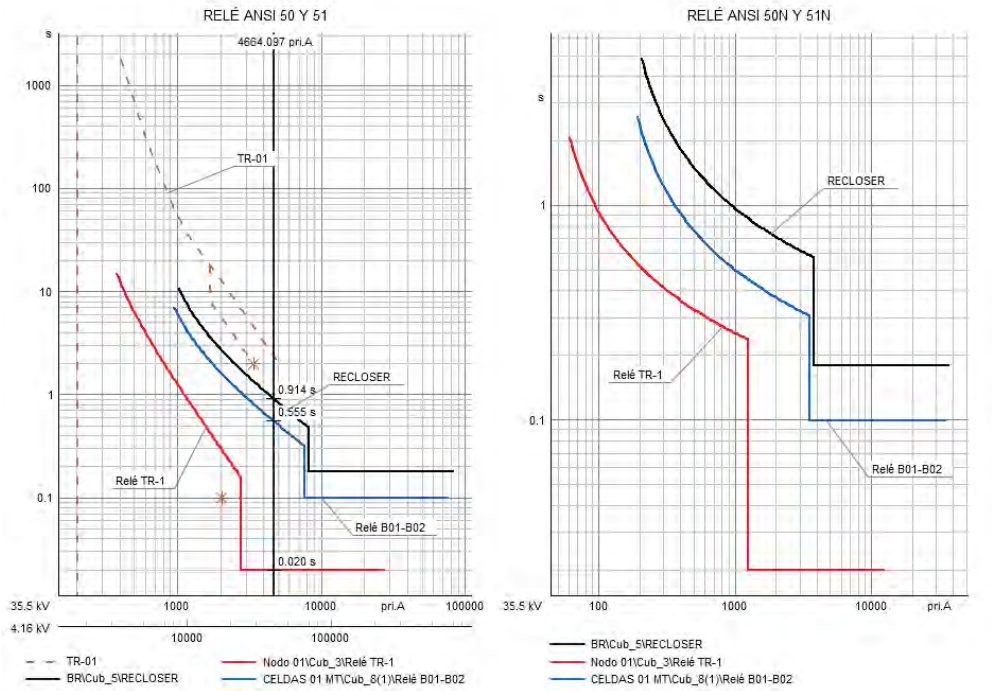
4.5.6. Verificación de Selectividad del Transformador TR-01

Figura 20. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.*



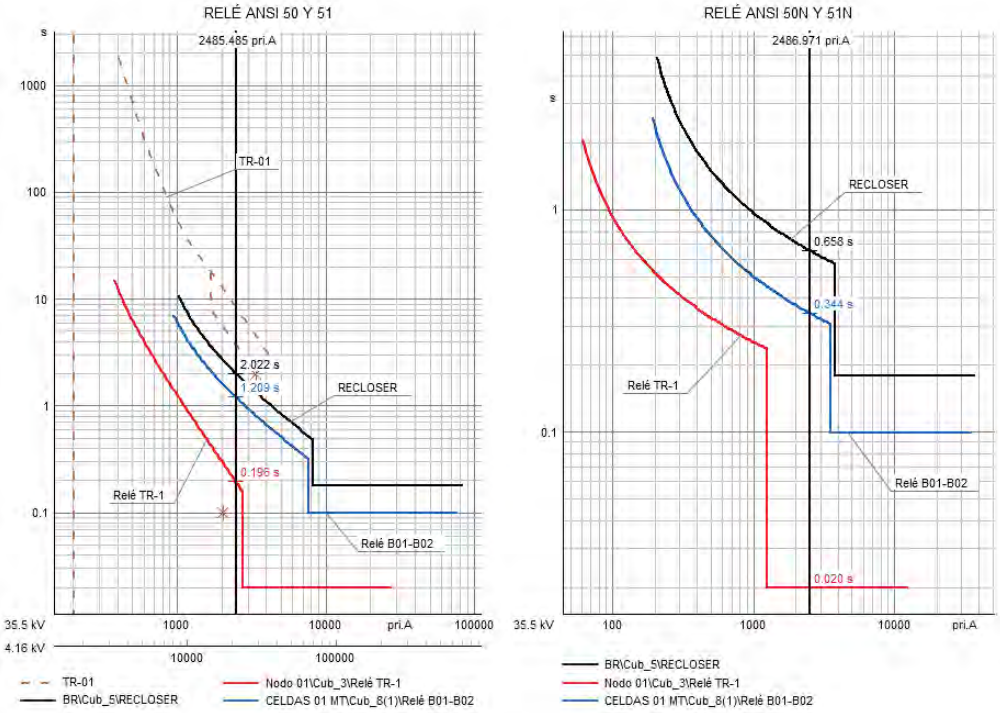
Nota. Elaboración propia.

Figura 21. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.*



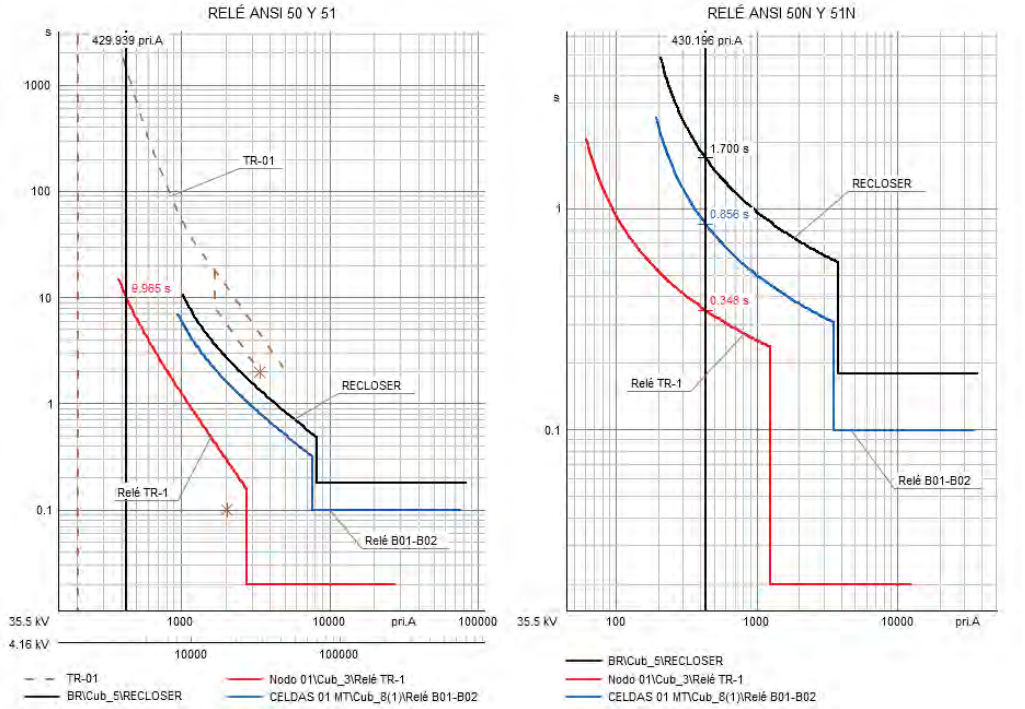
Nota. Elaboración propia.

Figura 22. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-1.*



Nota. Elaboración propia.

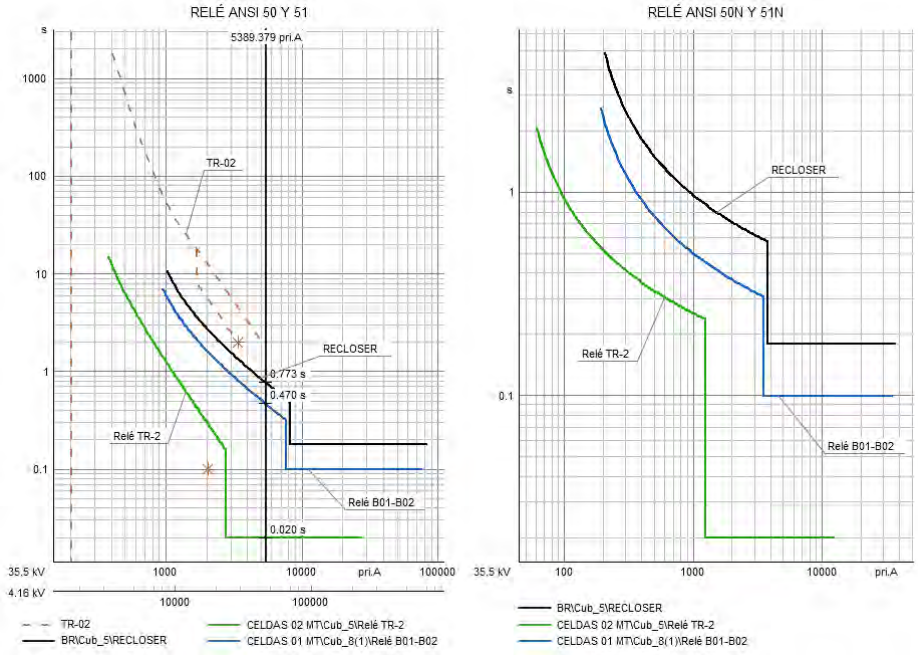
Figura 23. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-1.*



Nota. Elaboración propia.

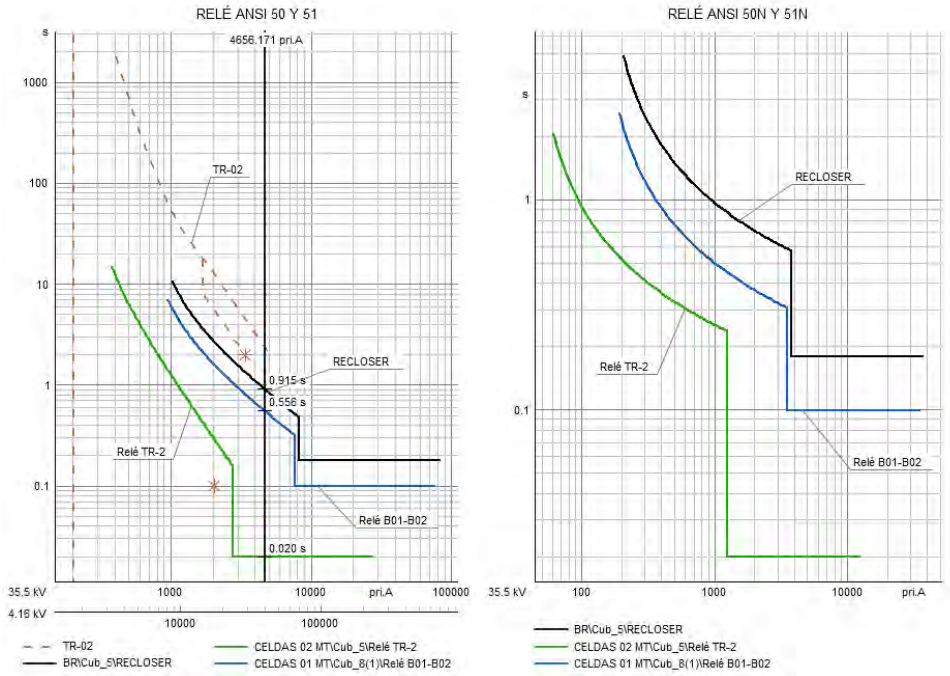
4.5.7. Verificación de Selectividad del Transformador TR-02

Figura 24. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.*



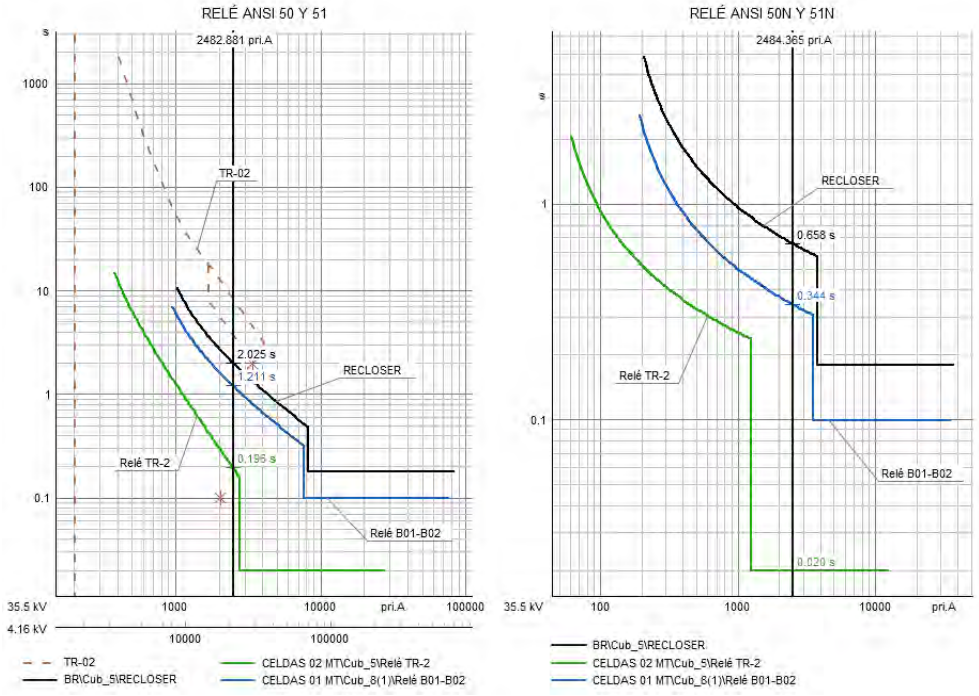
Nota. Elaboración propia.

Figura 25. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.*



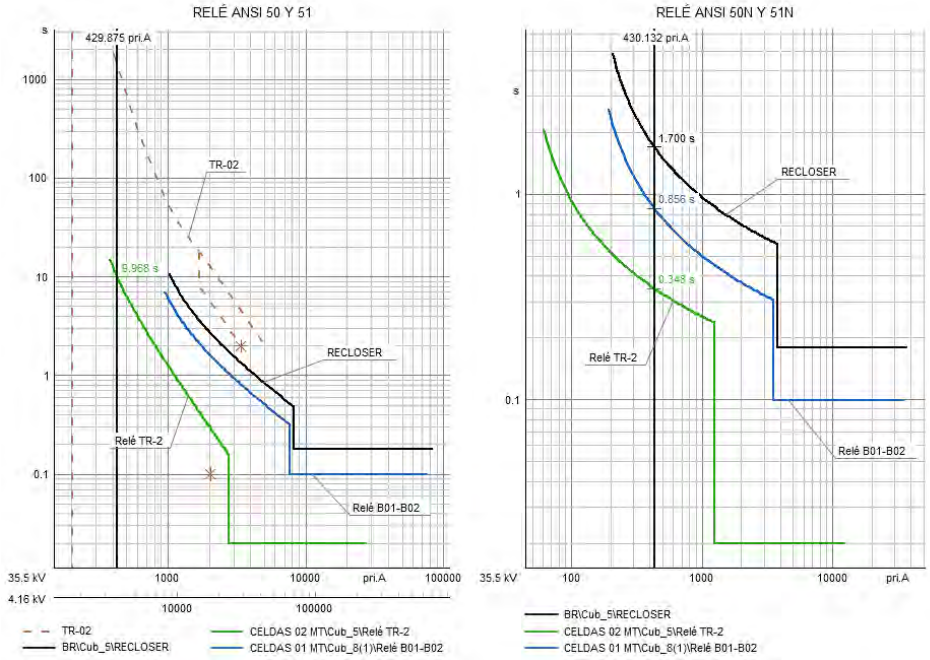
Nota. Elaboración propia.

Figura 26. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-2.*



Nota. Elaboración propia.

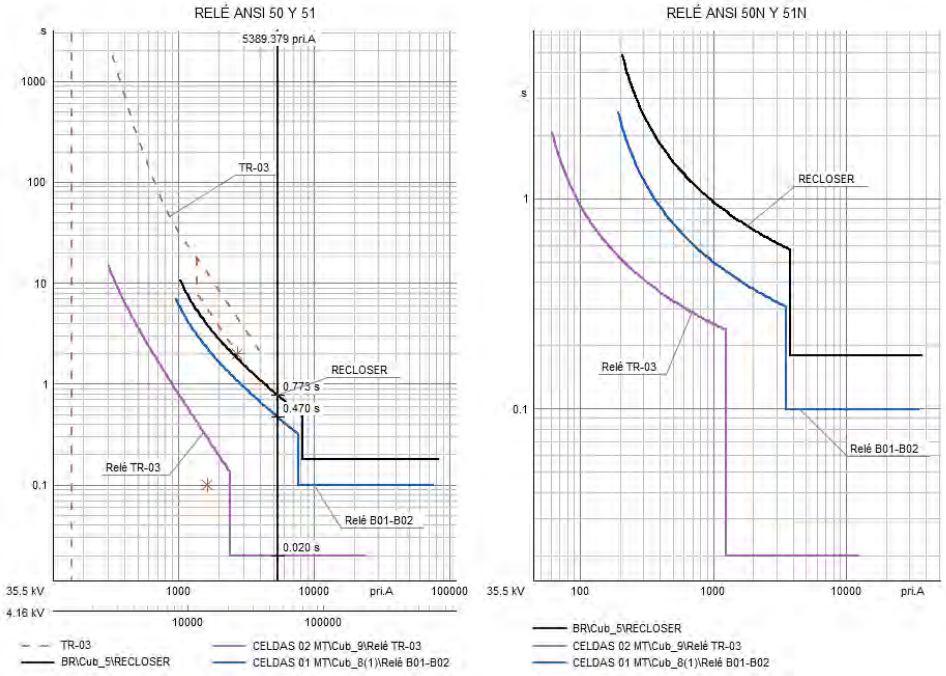
Figura 27. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-2.*



Nota. Elaboración propia.

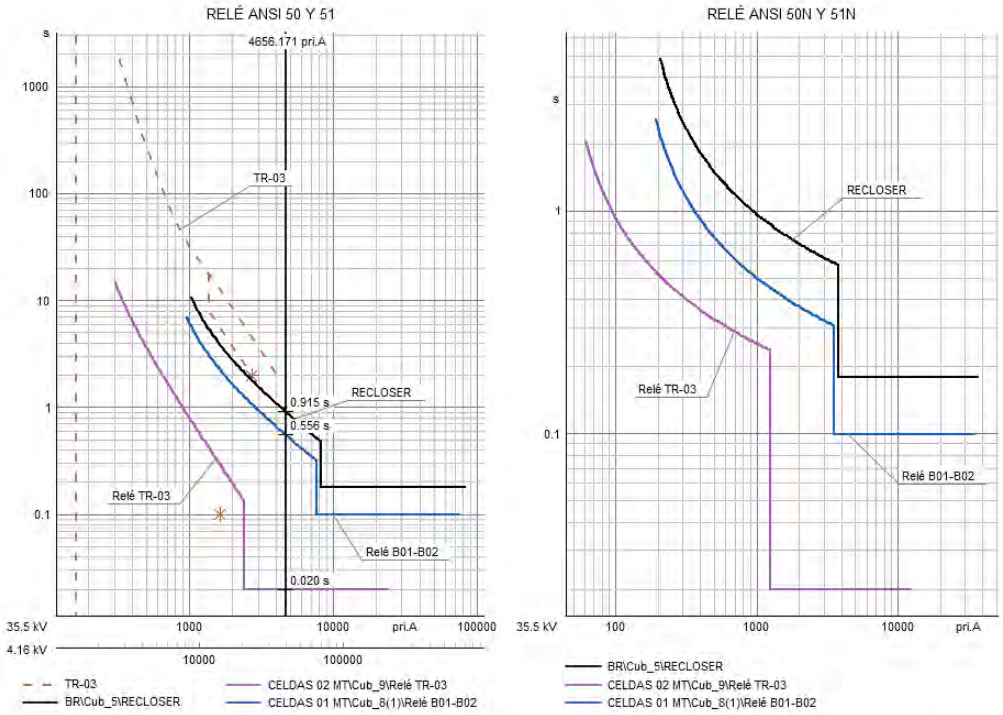
4.5.8. Verificación de Selectividad del Transformador TR-03

Figura 28. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.*



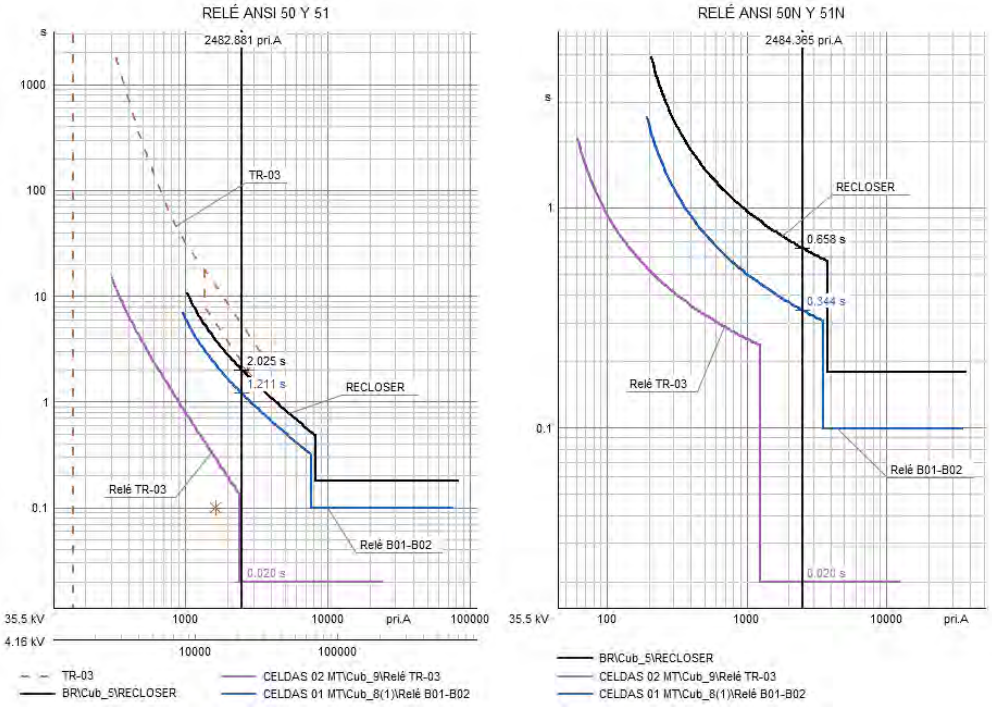
Nota. Elaboración propia.

Figura 29. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.*



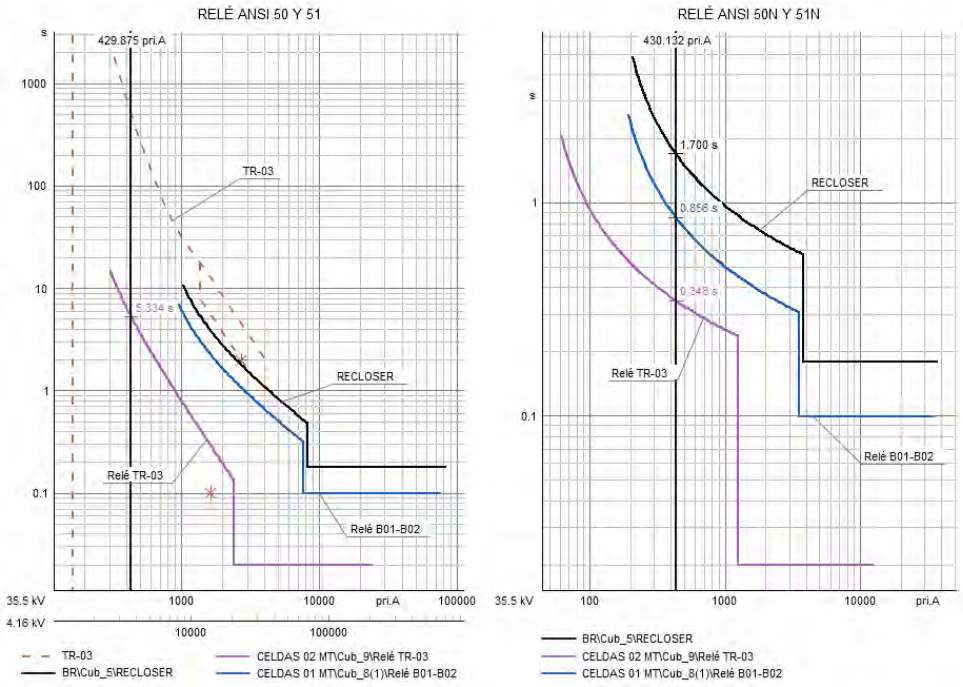
Nota. Elaboración propia.

Figura 30. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-3.*



Nota. Elaboración propia.

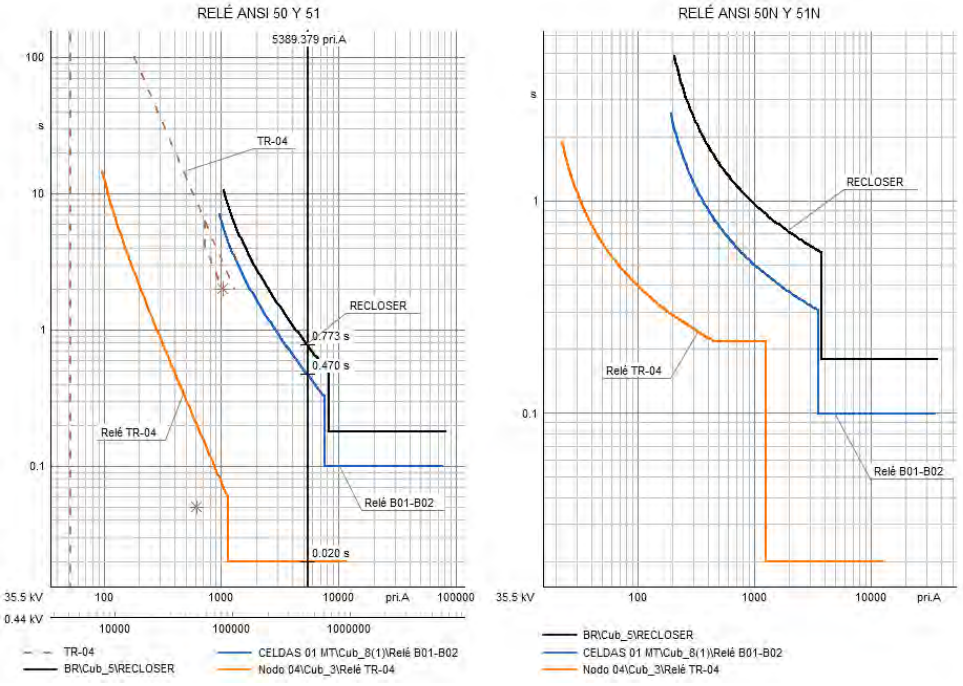
Figura 31. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-3.*



Nota. Elaboración propia.

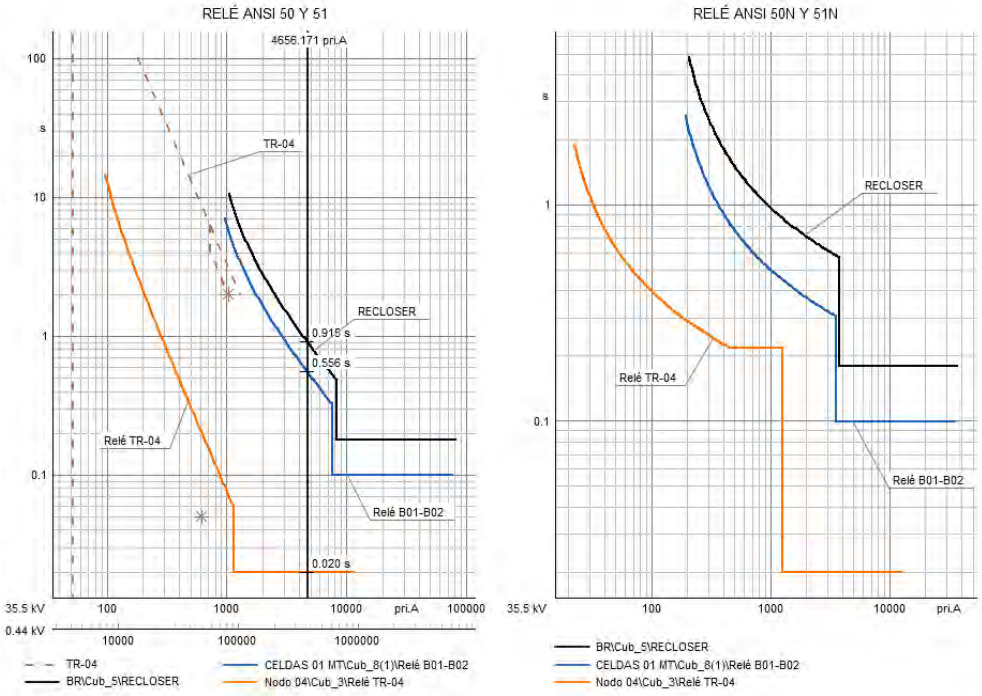
4.5.9. Verificación de Selectividad del Transformador TR-04

Figura 32. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.*



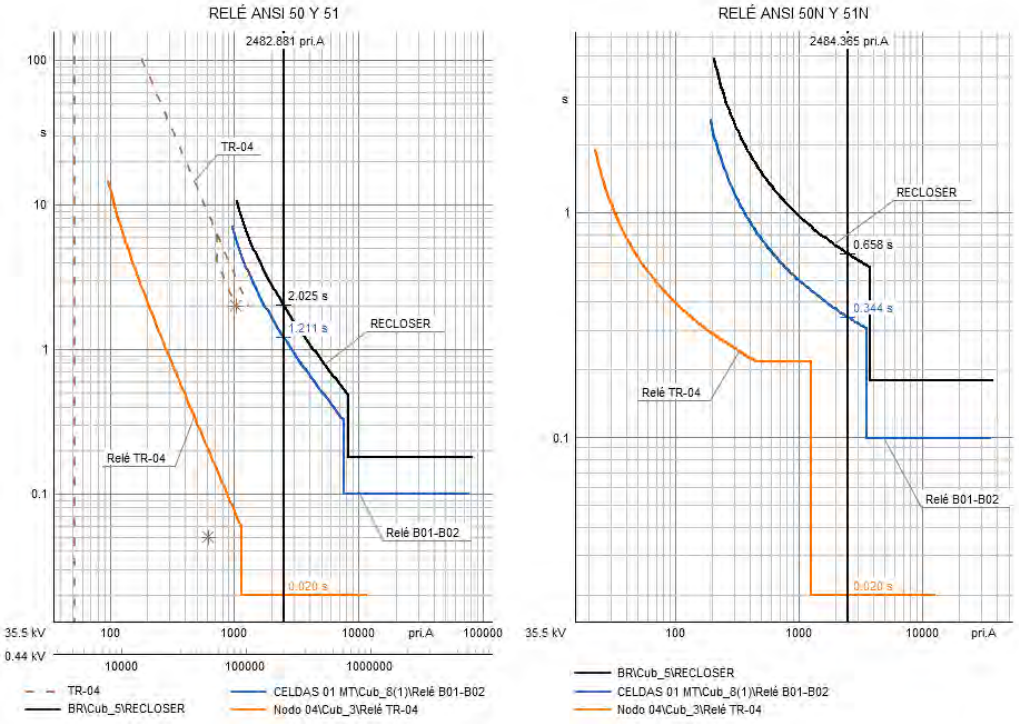
Nota. Elaboración propia.

Figura 33. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.*



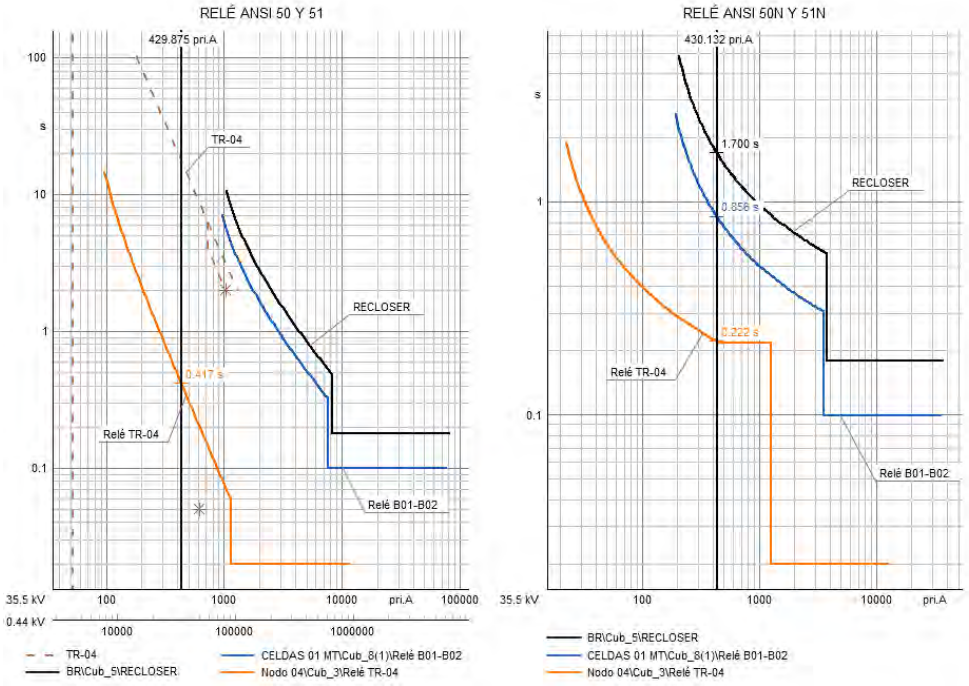
Nota. Elaboración propia.

Figura 34. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-4.*



Nota. Elaboración propia.

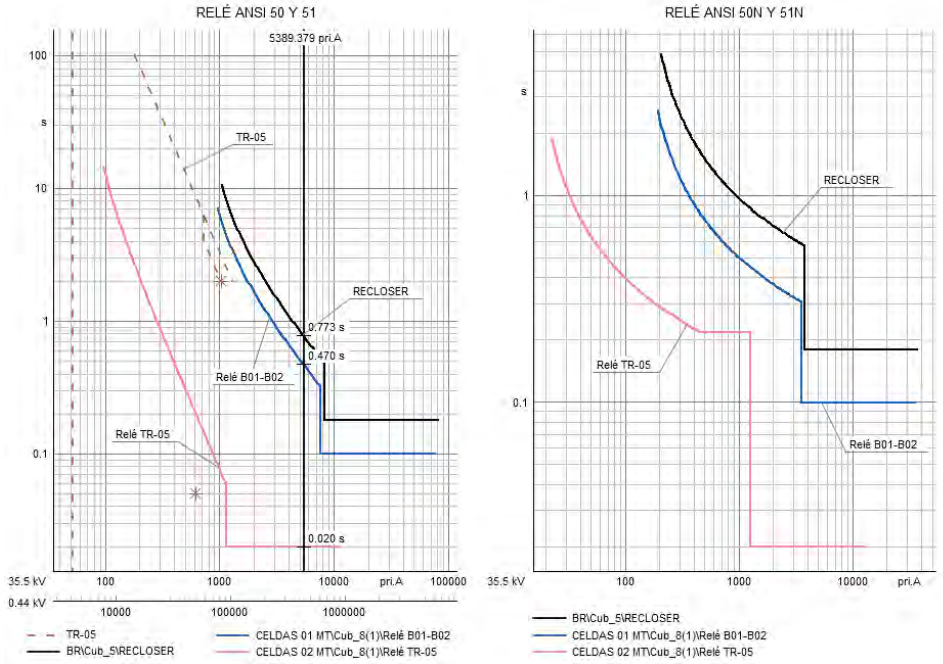
Figura 35. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-4.*



Nota. Elaboración propia.

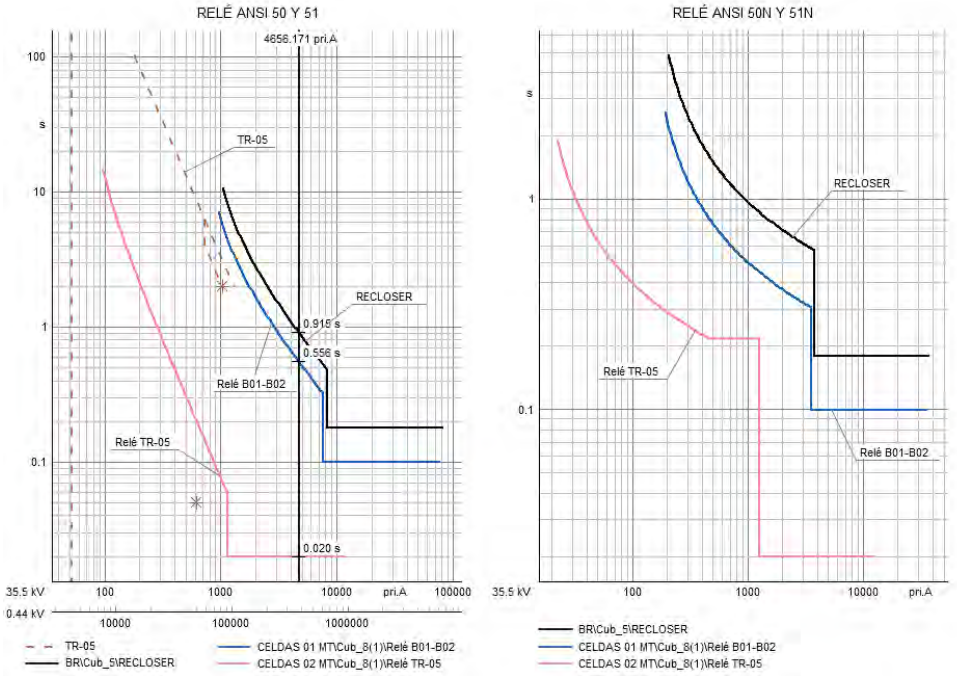
4.5.10. Verificación de Selectividad del Transformador TR-05

Figura 36. *Cortocircuito trifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.*



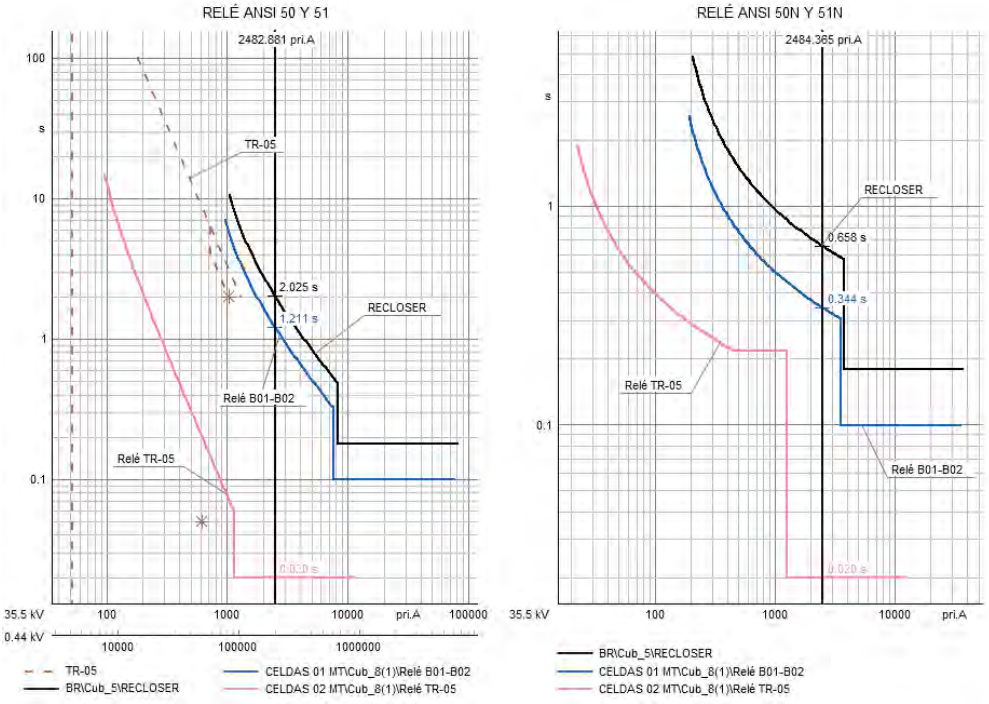
Nota. Elaboración propia.

Figura 37. *Cortocircuito bifásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.*



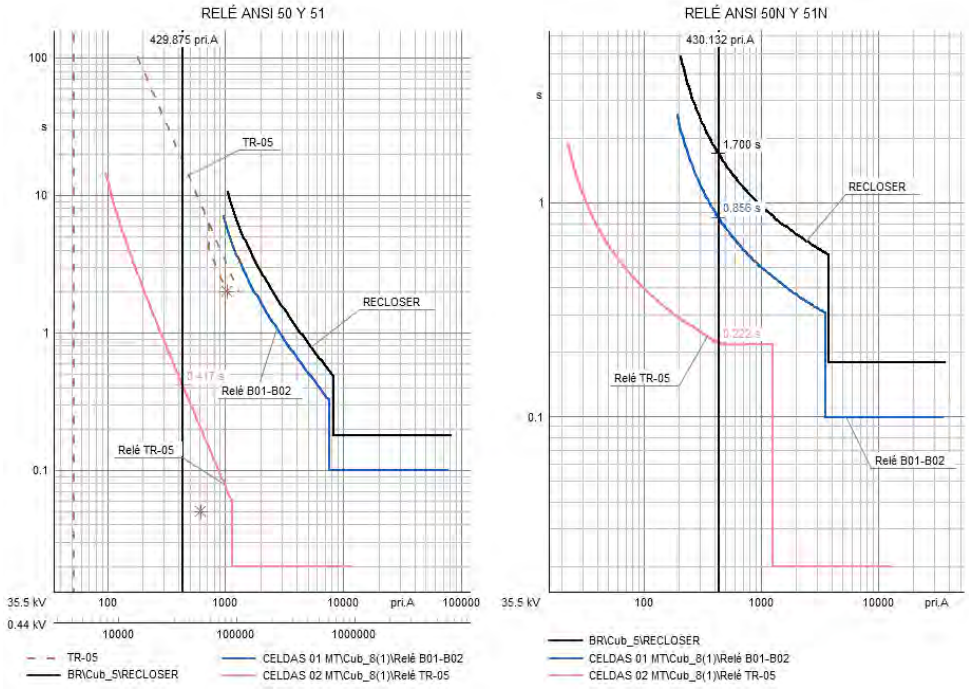
Nota. Elaboración propia.

Figura 38. *Cortocircuito monofásico en el lado de 35.5 kV en el TR-5.*



Nota. Elaboración propia.

Figura 39. *Cortocircuito monofásico con Rf = 50 ohm en el lado de 35.5 kV en el TR-5.*



Nota. Elaboración propia.

4.5.11. Software Utilizado

Para el desarrollo del estudio se considera el uso de herramientas de simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia, orientadas a representar el flujo de carga, los niveles de cortocircuito y la coordinación de protecciones. Asimismo, los ajustes propuestos se organizan en tablas técnicas y en formato compatible con SIGMA, lo que permite ordenar los parámetros de relés e interruptores para su posterior validación, revisión o implementación controlada.

4.6. Ajustes Propuestos de los Equipos de Protección

Tabla 15. *Lista de Ajustes Propuestos de Relés en la Unidad Minera*

ID / TAG	Subestación	Función ANSI	Modelo Relé	Tap (A sec)	TMS / TD	Curva	Ipickup (A prim)
REC-35-01	Derivación 35.5 kV	50/51	SEL-751	50.70	0.160	--	8112
				4.31	0.39	IEC Very Inverse	690

ID / TAG	Subestación	Función ANSI	Modelo Relé	Tap (A sec)	TMS / TD	Curva	Ipickup (A prim)
		50N/51N		23.32	0.160	--	3730.5
				0.86	0.28	IEC Standard Inverse	138
R-INT-35-01-P	Celda Intermedia 35.5 kV	50/51	SEL-751	47.32	0.08	--	7571
				3.98	0.26	IEC Very InverseMI	636.75
		50N/51N		21.76	0.08	--	3481.8
				0.80	0.15	IEC Standard Inverse	127.35
T1-P-P	SE Principal 35.5 kV	50/51	SEL-751	45.88	0	--	2752.5
				4.24	0.23	IEC Extremely Inverse	254.26
		50N/51N		20.71	0	--	1242.5
				0.68	0.12	IEC Standard Inverse	40.682
T2-P-P	SE Principal 35.5 kV	50/51	SEL-751	45.88	0	--	2752.5
				4.24	0.23	IEC Extremely Inverse	254.26
		50N/51N		20.71	0	--	1242.5
				0.68	0.12	IEC Standard Inverse	40.682

ID / TAG	Subestación	Función ANSI	Modelo Relé	Tap (A sec)	TMS / TD	Curva	Ipickup (A prim)
T3-P-P	SE Principal 35.5 kV	50/51	SEL-751	39.90	0	--	2393.75
				3.39	0.23	IEC Extremely Inverse	203.38
		50N/51N		20.68	0	--	1241
				0.68	0.12	IEC Standard Inverse	40.675
T4-P-P	SE Principal 35.5 kV	50/51	SEL-751	11.44	0	--	1143.75
				0.64	0.23	IEC Extremely Inverse	64.08
		50N/51N		12.41	0	--	1241
				0.15	0.11	IEC Standard Inverse	15.38
T5-P-P	SE Principal 35.5 kV	50/51	SEL-751	11.44	0	--	1143.75
				0.64	0.23	IEC Extremely Inverse	64.08
		50N/51N		12.41	0	--	1241
				0.15	0.11	IEC Standard Inverse	15.38

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 15 consolida los ajustes propuestos para los relés de la unidad minera, diferenciando las funciones de fase 51 y 50, así como la función de tierra 51N y 50N. Los ajustes

se organizan por ubicación, modelo de relé, curva, TMS/TD, tap e Ipickup, de manera que cada dispositivo mantenga correspondencia con su interruptor asociado, su transformador o alimentador protegido y el nivel de tensión correspondiente.

La distribución de curvas y tiempos evidencia una coordinación jerárquica entre la derivación, la llegada principal, los primarios de transformadores y las barras secundarias de 4.16 kV. Las curvas NI se emplean en la derivación y llegada, mientras que las curvas VI se aplican en los primarios de transformadores para obtener una respuesta más adecuada frente a fallas de mayor severidad. Esta diferenciación permite mantener selectividad y sensibilidad sin comprometer la estabilidad ante condiciones normales de carga.

Tabla 16. *Lista de Ajustes Propuestos de Relés*

Ítem	ID / TAG	SED	Función ANSI	Modelo	Pick-up Fase Tempor. (51)	Pick-up Fase Instantáneo (50)	Pick-up Tierra Tempor (51N)	Pick-up Tierra Instantáneo (50N)	Tiempo de Disparo (Ante falla 7.70 kA)
1	**RP-B-01**	Barra Principal	50/51 + 50N/51N	Relé de Barra	400.0 A	Desactivado (Block)	--	Desactivado (Block)	(Respaldo general del sistema)
2	**REC-35-01**	Cabecera Línea	50/51 + 50N/51N	--	**690 A**	**8112.0 A** *(Retardo 160 ms)*	**138 A**	**3730 A** *(Retardo 160 ms)*	**0.770 s** *(CTI: 300 ms con Celda 1)*
3	**N-A**	Llegada Terna A	50/51 + 50N/51N	Tren de Celdas	—	—	—	—	Monitorea llegada (Enclavamiento)
4	**N-B**	Llegada Terna B	50/51 + 50N/51N	Tren de Celdas	—	—	—	—	Monitorea llegada (Enclavamiento)

Ítem	ID / TAG	SED	Función ANSI	Modelo	Pick-up Fase Tempor. (51)	Pick-up Fase Instantáneo (50)	Pick-up Tierra Tempor (51N)	Pick-up Tierra Instantáneo (50N)	Tiempo de Disparo (Ante falla 7.70 kA)
5	**CEL-INT-01**	Intermedia Enlace	50/51 + 50N/51N	Tren de Celdas	**636.75 A**	**7571.2 A** *(Retardo 80 ms)*	**127.35 A**	**3481.8 A** *(Retardo 80 ms)*	**0.470 s** *(CTI: 220 ms con Trafo 1/2)*
6	**CB-T1**	Salida Trafo 1	50/51 + 50N/51N	SEL-751	**254.26 A**	**2752.5 A** *(Instantáneo)*	**40.68 A**	**1242.6 A** *(Instantáneo)*	**0.250 s** *(Despeje local selectivo)*
7	**CB-T2**	Salida Trafo 2	50/51 + 50N/51N	SEL-751	**254.26 A**	**2752.5 A** *(Instantáneo)*	**40.68 A**	**1241 A** *(Instantáneo)*	**0.250 s** *(Despeje local selectivo)*
8	**CB-T3**	Salida Trafo 3	50/51 + 50N/51N	SEL-751	**203.38 A**	**2393.75 A** *(Instantáneo)*	**40.8 A**	**1240.8 A** *(Instantáneo)*	**0.210 s** *(Despeje local selectivo)*
9	**CB-T4**	Salida Trafo 4	50/51 + 50N/51N	SEL-751	**64.08 A**	**1143.75 A** *(Instantáneo)*	**15.0 A**	**1241.0 A** *(Instantáneo)*	**0.090 s** *(Disparo seguro de baja potencia)*
10	**CB-T5**	Salida Trafo 5	50/51 + 50N/51N	SEL-751	**64.0 A**	**1144.0 A** *(Instantáneo)*	**15.0 A**	**1241.0 A** *(Instantáneo)*	**0.090 s** *(Disparo seguro de baja potencia)*

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 16 presenta la consolidación de los parámetros de ajuste de sobrecorriente de fase y tierra, tanto temporizados como instantáneos, para los relés de protección SEL-751 del sistema. A diferencia del modelo teórico inicial, el dimensionamiento de los umbrales de arranque se estandarizó en magnitudes primarias reales referidas al nivel de tensión de 35.5 kV. Con respecto al comportamiento dinámico ante la corriente de falla de diseño de 7.70 kA, la escala cronométrica establecida en la columna de tiempos (0.090 s - 0.210 s - 0.250 s - 0.470 s - 0.770 s) ratifica el

cumplimiento estricto del criterio de selectividad total en cascada. De esta forma, ante un cortocircuito severo, la celda intermedia de enlace (CEL-INT-01) aislará la falla de forma local en 470 ms, respetando un Intervalo de Tiempo de Coordinación (CTI) de 300 ms frente al recloser de cabecera (REC-35-01). Esto evita la desconexión intempestiva de la línea de transmisión de 12 km y resguarda la continuidad operativa del resto de los procesos de la mina.

4.7. Discusión de Resultados

La investigación tuvo como finalidad de proponer una optimizacion la selectividad y coordinación de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco. Para ello, se modeló el sistema en DIgSILENT PowerFactory, se evaluaron las condiciones de flujo de potencia, se determinaron las corrientes de cortocircuito y se establecieron ajustes para las funciones ANSI 50/51 y 50N/51N. Los resultados permitieron plantear una secuencia jerarquizada de actuación entre las protecciones de salida de los transformadores, la celda intermedia y el recloser de cabecera. Debido a que la mina se encuentra en etapa de proyecto, estos resultados representan una validación técnica simulada y no una medición del desempeño operativo real.

Respecto del primer objetivo específico, el estudio de flujo de potencia del sistema propuesto permitió determinar las condiciones eléctricas del sistema antes de efectuar la coordinación de protecciones. En el escenario original, las barras internas registraron tensiones comprendidas entre 0.903 y 0.909 p.u., lo que representa una caída aproximada de 9.1 % a 9.7 % respecto de la tensión nominal. Después de incorporar la compensación reactiva considerada en el modelo, las tensiones se ubicaron entre 1.000 y 1.004 p.u., mientras que cada una de las dos líneas aéreas de 12 km presentó una cargabilidad aproximada de 40.9 %. Estos resultados muestran que la compensación permitió establecer un escenario de operación con tensiones próximas a sus valores nominales, adecuado para desarrollar los estudios de cortocircuito y coordinación.

La mejora del perfil de tensión resulta técnicamente favorable porque los ajustes de protección deben calcularse sobre una condición de operación representativa del sistema. No obstante, para garantizar la reproducibilidad del estudio, debe precisarse la capacidad, ubicación,

número de pasos y estrategia de control del banco de condensadores empleado, así como la potencia reactiva antes y después de la compensación.

El análisis de cortocircuito determinó, en las celdas de 35.5 kV, corrientes de 5.408 kA para falla trifásica, 4.672 kA para falla bifásica, 2.487 kA para falla monofásica directa y 0.430 kA para falla monofásica con una resistencia de falla de 50 ohm. Las corrientes máximas permitieron verificar la capacidad de interrupción de los equipos y establecer los umbrales de las funciones instantáneas, mientras que la falla monofásica resistiva permitió evaluar la sensibilidad de las funciones temporizadas de tierra.

La capacidad interruptiva de 50 kA considerada para los interruptores de 35.5 kV es aproximadamente 9.24 veces la corriente trifásica de 5.408 kA calculada en las celdas. Por tanto, bajo el escenario simulado, los interruptores poseen capacidad suficiente para despejar la falla. Sin embargo, esta verificación debe completarse para los niveles de 4.16 kV y 0.44 kV, donde se obtuvieron corrientes de cortocircuito superiores debido a la menor tensión y a la impedancia de los transformadores.

Estos resultados coinciden metodológicamente con los estudios de Chirhuana Aybar (2020), Huaynate Sánchez y Nova Díaz (2025) y Montesinos Cáceres (2025), citados en los antecedentes de la tesis, debido a que dichos trabajos emplean el flujo de potencia del sistema y el análisis de cortocircuito como información de entrada para establecer los ajustes de protección en sistemas eléctricos mineros.

Respecto del segundo objetivo específico, los ajustes de fase ANSI 50/51 fueron determinados considerando la corriente nominal de los transformadores, las corrientes de carga, las corrientes de falla y la ubicación jerárquica de los relés. Para los transformadores T1 y T2, la función 51 fue ajustada en 254.26 A; para T3, en 203.38 A; y para T4 y T5, en aproximadamente

64.08 A. Estos valores representan cerca del 125 % de la corriente nominal primaria de cada transformador, permitiendo que los relés permanezcan estables durante la máxima operación normal y actúen frente a una condición de sobrecorriente sostenida.

Los elementos instantáneos ANSI 50 fueron establecidos en 2.7525 kA para T1 y T2, 2.39375 kA para T3 y 1.14375 kA para T4 y T5. Estos umbrales se ubicaron por encima de la máxima corriente de falla secundaria reflejada al primario, con la finalidad de evitar que la protección primaria opere instantáneamente ante una falla ubicada en el lado secundario del transformador. De esta forma, la protección secundaria conserva la prioridad de actuación y la protección primaria permanece como respaldo temporizado.

En cuanto a las funciones de tierra, los pickups ANSI 51N fueron establecidos en 138 A para el recloser, 127.35 A para la celda intermedia, aproximadamente 40.68 A para los transformadores T1, T2 y T3, y 15.38 A para T4 y T5. Frente a la corriente monofásica resistiva de 0.430 kA obtenida en 35.5 kV, estos valores presentan relaciones de sensibilidad superiores a la unidad, por lo que los relés podrían detectar la condición de falla considerada.

Respecto del tercer objetivo específico, los tiempos propuestos muestran una actuación jerarquizada entre las protecciones principales y sus respaldos. Los relés de salida de T1 y T2 presentan un tiempo de 0.250 s, mientras que la celda intermedia actúa en 0.470 s, generando un margen de coordinación de 0.220 s. Para T3, el tiempo de actuación es de 0.210 s, con un margen de 0.260 s respecto de la celda intermedia. Para T4 y T5, el tiempo es de 0.090 s, obteniéndose un margen de 0.380 s. Finalmente, entre la celda intermedia y el recloser, cuyos tiempos son 0.470 s y 0.770 s, respectivamente, se obtiene un margen de 0.300 s.

Los transformadores T1 a T5 corresponden a ramales conectados en paralelo a la barra; por ello, no deben interpretarse como una sola cascada de actuación entre transformadores. La

verificación correcta consiste en comparar individualmente cada relé de salida con la celda intermedia y, posteriormente, comparar la celda intermedia con el recloser. Bajo esta interpretación, los márgenes obtenidos muestran que la protección más próxima a la falla actúa primero y que las protecciones aguas arriba permanecen como respaldo.

Los márgenes de 0.220 s, 0.260 s y 0.300 s se encuentran dentro del intervalo de coordinación de 0.20 a 0.35 s adoptado en el estudio. El margen de 0.380 s correspondiente a T4 y T5 mantiene la selectividad, aunque debe evaluarse si ese retardo adicional resulta necesario o si puede reducirse sin comprometer la coordinación. La separación observada entre las curvas es consistente con los principios de selectividad señalados por Pérez San Martín (2021) y con el empleo de curvas tiempo-corriente desarrollado por Tinoco Espinoza y González Avilés (2025).

En relación con la hipótesis general, los resultados sustentan técnicamente que la optimización de los ajustes permite establecer una actuación jerarquizada y reducir el riesgo de que una protección aguas arriba desconecte zonas sanas del sistema. La propuesta favorece que una falla sea aislada por el dispositivo más próximo, manteniendo en servicio las áreas no afectadas y contribuyendo a la disponibilidad operativa futura.

CONCLUSIONES

Se estableció una propuesta óptima de selectividad y coordinación para las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco, mediante la definición jerarquizada de los ajustes ANSI 50/51 y 50N/51N correspondientes a los relés ubicados en las celdas de los transformadores (tren de celdas 02), en el tren de celdas 01 y en el recloser. La secuencia propuesta permite que la protección más próxima a la falla actúe primero y que los dispositivos aguas arriba funcionen como respaldo, reduciendo el riesgo de desconexiones no selectivas y contribuyendo a la disponibilidad operativa futura esperada. Debido al carácter proyectado del sistema, esta contribución se encuentra sustentada mediante simulación y no representa una disponibilidad real medida en campo.

El análisis de flujo de potencia permitió determinar que, en el escenario original, las barras internas presentaban tensiones entre 0.903 y 0.909 p.u., mientras que, bajo la condición compensada considerada, alcanzaron valores entre 1.000 y 1.004 p.u. Asimismo, en las celdas de 35.5 kV se obtuvieron corrientes de cortocircuito de 5.408 kA para falla trifásica, 4.672 kA para falla bifásica, 2.487 kA para falla monofásica directa y 0.430 kA para falla monofásica con resistencia de falla de 50 ohm. Estos resultados proporcionaron la base técnica para verificar la capacidad interruptiva, determinar los pickups y evaluar la sensibilidad de las protecciones.

Se alcanzó la optimización de las funciones de protección contra sobrecorriente de fase y falla a tierra mediante la definición analítica de sus perfiles de operación. Para la función ANSI 51 se establecieron pickups de 254.26 A para T1/T2, 203.38 A para T3 y 64.08 A para T4/T5 (basados al 125 % de la corriente nominal), y para la función ANSI 50 se fijaron umbrales de 2752.5 A, 2393.75 A y 1143.75 A para mitigar las corrientes de falla secundarias reflejadas al primario. La concordancia de estos valores con un ajuste sensible de las funciones 50N/51N frente a fallas

monofásicas confirma que la propuesta técnica optimiza la sensibilidad del sistema proyectado sin comprometer la estabilidad ante la máxima transferencia de carga.

La evaluación de los tiempos de actuación mostró márgenes de coordinación de 0.220 s entre las protecciones de T1/T2 y el tren de celdas 01, 0.260 s para T3, 0.380 s para T4/T5 y 0.300 s entre el relé del tren de celdas 02 y el recloser. Estos resultados evidencian una secuencia selectiva por cada ramal, en la cual los relés de salida actúan antes que el relé del tren de celdas y esta antes que el recloser.

RECOMENDACIONES

Se recomienda incorporar un esquema que muestre la ubicación de los transformadores de corriente de fase, los TC toroidales o las conexiones residuales empleadas para medir las corrientes de tierra en cada lado de los transformadores Dyn5.

Incorporar la memoria de cálculo del banco de condensadores, indicando potencia reactiva, número de pasos, ubicación, nivel de tensión y estrategia de control utilizada para mejorar el perfil de tensiones.

Se recomienda implementar un programa periódico de mantenimiento, calibración y pruebas funcionales de los relés e interruptores, con el fin de asegurar que los tiempos de actuación reales sean consistentes con los valores definidos en la ingeniería de protección.

Durante el comisionamiento y la futura operación, implementar el registro de eventos y oscilografías de los relés de proteccion, con la finalidad de comparar los tiempos (s) reales de actuación con los valores simulados.

Desarrollar, como trabajo posterior, una evaluación cuantitativa de disponibilidad mediante escenarios de contingencia, energía no suministrada, duración esperada de interrupciones y porcentaje de cargas sanas mantenidas en servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alata Huisa et al., J. (2018). *PROYECTO MINERO ¨Coroccohuayco¨*. Cusco: (Informe de proyectos mineros, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco). Obtenido de https://es.scribd.com/document/669112579/PROYECTO-COROCCOHUAYCO-2018-II

Amador Orozco, M. J. (2023). Diagnóstico de sistema eléctrico de Cooper Standard, Cartago, mediante análisis de corrientes de cortocircuito y arco eléctrico. *(Informe de proyecto de graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica)*. Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/items/8b99a002-2c64-4204-b290-5ddeb422e306

Boaski et al., M. A. (21 de 12 de 2017). *Methodology for coordination and selectivity of protection devices with reliability assessment*. Obtenido de 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC): https://ieeexplore.ieee.org/document/8232007

Cáceres Jiménez, D. B. (2025). Análisis de coordinación de protecciones del sistema eléctrico del anillo mina Toquepala. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos)*. Obtenido de https://gestionrepo.unmsm.edu.pe/items/39d054bb-8e00-465d-9c48-3eedddeba4df

Capa Carrillo, J. G., & Parrales Paladines, R. F. (2018). Estudio de coordinación de protecciones del sistema de generador-transformador y línea de evacuación en la Unidad Nº3 de la Central Hidroeléctrica Minas-San Francisco. *(Tesis de pregrado, Universidad Católica de Cuenca. Carrera de Ingeniería Eléctrica)*. Obtenido de https://dspace.ucacue.edu.ec/items/bcf92180-3bde-4efa-8611-ded47b45c7d0

Castillo Rivera, Y., & Pérez Yauli, F. (2018). Estudio de Coordinación de Protecciones en el Sistema de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito considerando la conexión de la Línea Vicentina – Santa Rosa 138 kV. *(Articulo de investigación, Escuela Politécnica*

Nacional, Ecuador). Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7362408

Chancasanampa Pacheco, J. K. (2019). Determinación de la confiabilidad en base a la conectividad de carga para la continuidad del suministro de energía eléctrica en la mina Andaychagua – Unidad Yauli. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú)*. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/items/88f60fd1-742e-4ab6-9f58-3b96804a0aad

Chirhuana Aybar, R. R. (2020). Estudio de cortocircuito y coordinación de proteccion del sistema electrico en 33kv y 10kv del proyecto planta PTAE de minera Antapaccay. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería)*. Obtenido de https://es.scribd.com/document/601344205/2-Trabajo-Suficiencia-Profesional-Chirhuana

Empresas Públicas de Medellín ESP. (2019). *Guía Técnica: Coordinación de protecciones redes.* Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización y Laboratorios. Obtenido de https://www.cens.com.co/Portals/cens/institucional/Especificaciones/Documentos-en-revision/norma-tecnica/Guias-complementarias-de-dise%C3%B1o-grupo-EPM/GM-14-guia.pdf

Encala Pihuave, K. N., & Tonato Guerrero, M. N. (2023). Coordinación de protecciones en sistemas eléctricos de distribución, mediante el uso de reles SEL-751. *(Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana)*. Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24673/1/UPS-GT004267.pdf

ENGIE. (21 de 02 de 2025). *Hablemos de Energía*. Obtenido de Minería y Energía: desafíos y oportunidades para el crecimiento económico del Perú: https://engie-energia.pe/hablemos-de-energia/mineria-y-energia-desafios-y-oportunidades-para-el-crecimiento-economico-del-peru/

Frias Serruto, F. (2022). Estudio de coordinación de protección eléctrica para equipos de palas y perforadoras mina Cuajone SPCC, 2019. *(Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui)*. Obtenido de https://repositorio.ujcm.edu.pe/items/e8b5ee92-a607-404f-9a88-52d7156fafd9

Funmilayo et al., H. B. (2012). Overcurrent Protection for the IEEE 34-Node Radial Test Feeder. *(research article, IEEE Transactions on Power Delivery)*. Obtenido de https://ieeexplore.ieee.org/document/6165400

Gestión. (07 de 10 de 2023). *Industria minera ahorraría hasta 50% en costos de electricidad utilizando energía renovable*. Obtenido de https://gestion.pe/peru/industria-minera-ahorraria-hasta-50-en-costos-de-electricidad-utilizando-energia-renovable-energia-electrica-noticia/

Guizado Damiano, A. (s.f.). Impactos en los costos y liquidez de las empresas mineras, por los suministros de bienes y servicios hacia sus contratistas. *Regulación y Economía Minera*. Obtenido de https://perumin.com/perumin37/public/uploads/shares/programas-doc/foro-tis/salas/Regul_y_Econ_Minera/TT-403%20Regulaci%C3%B3n%20EM.pdf

Huaynate Sanchez, A. J., & Nova Diaz, A. A. (2025). Estudio de coordinación de protecciones para evaluar la operatividad de un nuevo sistema de bombeo en una minera, San Marcos - 2021. *(Tesis de pregrado, Universidad Continental)*. Obtenido de https://repositorio.continental.edu.pe/gestion/items/821de3eb-1960-41be-9b54-d9038c594a97

IEEE Power and Energy Society. (2015). IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines. *IEEE-SA Standards Board*. Obtenido de https://ieeexplore.ieee.org/document/7502047

Instituto Peruano de Economía. (19 de 04 de 2018). *Aporte de la minería al PBI*. Obtenido de https://ipe.org.pe/aporte-de-la-mineria-al-pbi/

Kim et al., J. S. (16 de 05 de 2019). *A Study on the Protection Coordination of Korean Distribution System using IEC Curve*. Obtenido de 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia): https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8715866

Klyuev et al., R. V. (2021). Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant. *(Article text, Journal of Mining institute)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/353065337_Improving_the_efficiency_of_relay_protection_at_a_mining_and_processing_plantPovysenie_effektivnosti_relejnoj_zasity_na_gorno-obogatitelnom_kombinate

Kojovic, L. A., & Witte, J. F. (06 de 08 de 2002). *A new method in reducing the overcurrent protection response times at high fault currents to protect equipment from extended stress*. Obtenido de 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294): https://ieeexplore.ieee.org/document/971210

Kostin, V. N., & Minakova, T. E. (2017). Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem. *(Research article, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320514444_Protective_and_control_relays_as_coal-mine_power-supply_ACS_subsystem

Laksono et al., H. D. (2022). Design of Protection Relay Coordination Settings and Connecting to PLC Siemens S7-1500 For Load Shedding and HMI Display at PT. Semen Padang.

(Research article, Universitas Andalas). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/365765038_Design_of_Protection_Relay_Coordination_Settings_and_Connecting_to_PLC_Siemens_S7-1500_For_Load_Shadding_and_HMI_Display_at_PT_Semen_Padang

Ministerio de Energía y Minas. (26 de 08 de 2025). *La minería se consolida como la principal fuente de generación de divisas: exportaciones totales sumaron US$ 21 684 millones*. Obtenido de https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/1233857-la-mineria-se-consolida-como-la-principal-fuente-de-generacion-de-divisas-exportaciones-totales-sumaron-us-21-684-millones

Montesinos Cáceres, J. M. (2025). Diseño de la coordinación de la protección de sobrecorriente en cargas móviles de mina. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos)*. Obtenido de https://gestionrepo.unmsm.edu.pe/items/d5836c11-4a87-4ba9-ad5d-9992d25f3b28/full

Moreno Maldonado, J. (2016). Metodología de coordinación de protecciones de distancia en la plataforma DIgSILENT para un sistema de transmisión. *(Tesis de pregrado, Universidad de los Andes)*. Obtenido de https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/20280289-6b67-4cd0-a831-ea11340fa527

Pérez San Martín, F. J. (2021). Coordinación de protecciones de sistemas eléctricos de potencia mediante formulación de problema de optimización. *(Tesis de pregrado, Universidad de Chile)*. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/181246/Coordinacion-de-protecciones-

de-sistemas-electricos-de-potencia-mediante-formulacion-de-problema-de-optimizacion.pdf?sequence=1

Pouresmaieli, M. (2023). Integration of renewable energy and sustainable development with strategic planning in the mining industry. *(Results in Engineering, ScienceDirect)*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302300539X

Pumaquispe Ortega, R. (2024). Propuesta de coordinación de protección de los Reclosers del alimentador 0251 Totorani – Juncal en 22.9kv de la empresa Electro Puno S.A.A. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano)*. Obtenido de https://repositorio.unap.edu.pe/items/a59e9d1e-8d16-4e59-a00f-644cdc4c2100

Tinoco Espinoza, D. L., & González Avilés, J. J. (2025). Elaboración De Estudio De Coordinación De Protecciones Eléctricas En Subestación De Riego En Ingenio Monte Rosa. *(Trabajo monográfico, Universidad Nacional de Ingeniería)*. Obtenido de https://ribuni.uni.edu.ni/7003/1/105202.pdf

Vilcahuamán De La Cruz, H. E. (2021). Estudio de coordinación de protecciones del sistema eléctrico de media tensión de la Unidad Minera Kolpa, Huancavelica. *(Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú)*. Obtenido de https://repositorio.uncp.edu.pe/items/db7835d9-ea26-490c-907a-03a53f29500b

Zheng et al., L. (2011). Study on the Intelligent Current Protection for Mining Power System. *(Research article, Advanced Materials Research)*. Obtenido de https://www.scientific.net/AMR.317-319.1368

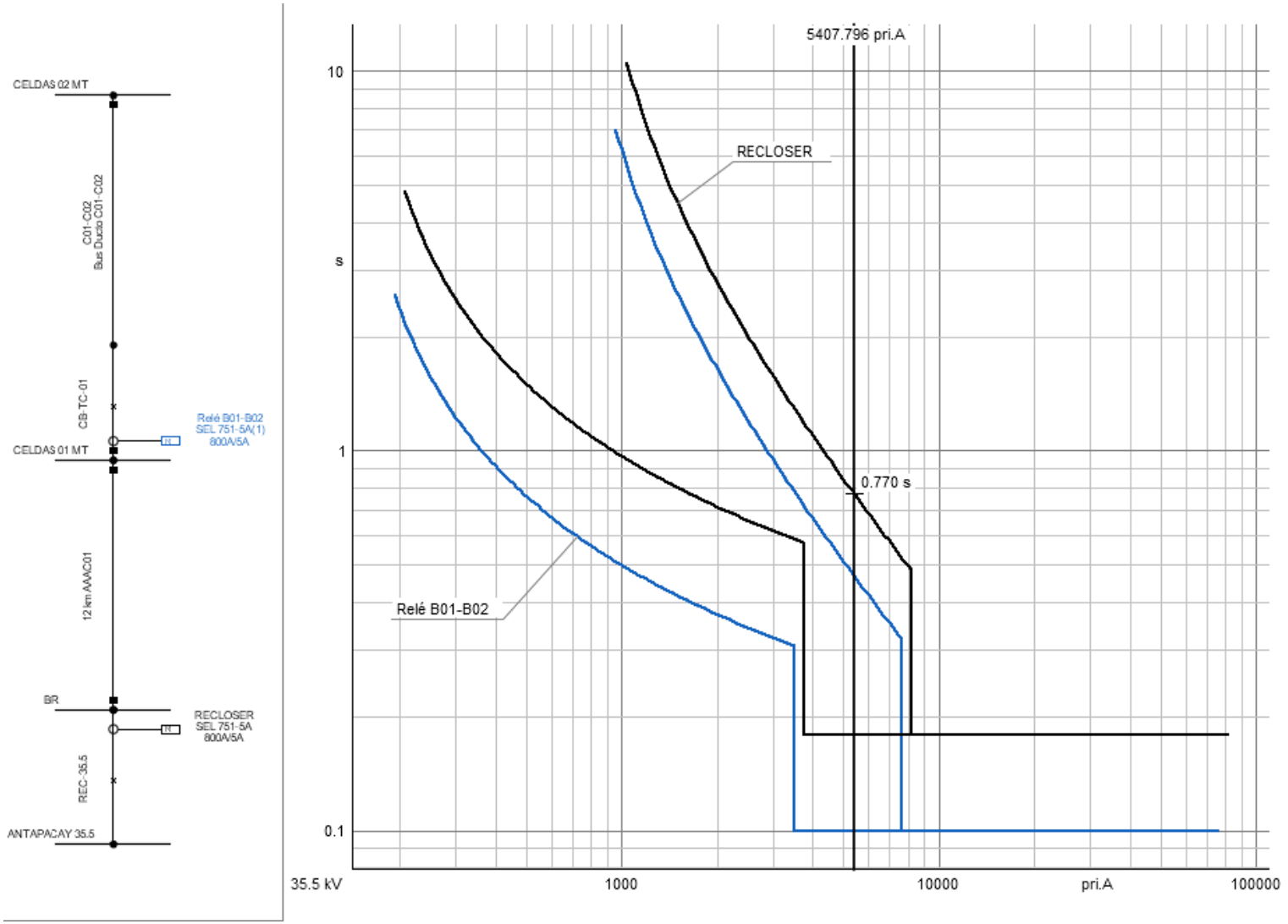
ANEXOS

Tabla 17. *Matriz de Consistencia*

OPTIMIZACIÓN DE LA SELECTIVIDAD Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES POR SOBRECORRIENTE Y FALLA A TIERRA PARA EL INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD OPERATIVA EN LA MINA COROCCOHUAYCO, CUSCO 2025				
Problemas	**Objetivos**	**Hipótesis**	**Variables e Indicadores**	**Metodología**
Problema General:	**Objetivo General:**	**Hipótesis General:**	**V. Independiente: Optimización de la Selectividad y Coordinación de Protecciones**	**Enfoque**: Cuantitativo. **Tipo**: Aplicada y tecnológica. **Diseño**: No experimental, transversal y basado en simulación. **Nivel**: Descriptivo-propositivo, con alcance técnico explicativo. **Población:** La totalidad de los componentes de potencia, maniobra, control y protección del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco. **Muestra:** Las subestaciones, barras, transformadores, alimentadores, relés e interruptores seleccionados para el estudo del sistema eléctrico.
¿De qué manera la optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?	Optimizar la selectividad y coordinación de las protecciones por sobrecorriente y falla a tierra para incrementar la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	La optimización de la selectividad y coordinación de protecciones por sobrecorriente y falla a tierra, bajo criterios normativos y simulación en software, incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	D1: Análisis eléctrico del sistema proyectado. 1. Resultados de flujo de potencia. 2. Corrientes de cortocircuito máximas y mínimas. D2: Coordinacion de protecciones ANSI 50/51 y 50N/51N. 1. Ipickup de fase y tierra. 2. Tap, TMS / TD y curva de actuación. D3: Verificación de coordinación tiempo-corriente. 1. Tiempo de actuación de las funciones 50/51 y 50N/51N. 2. Margen de coordinación entre protección principal y respaldo.	
Problemas Específicos:	**Objetivos Específicos:**	**Hipótesis Específicas:**	**V. Dependiente: Disponibilidad Operativa**	**Técnicas**: Revisión documental técnica, análisis de flujo de potencia, cálculo de cortocircuito, parametrización de relés y verificación de curvas tiempo-corriente. **Instrumentos**: Diagrama unifilar, cuadro de demandas, fichas técnicas de equipos, matriz de datos eléctricos, software DIgSILENT PowerFactory 2024, protocolos de ajuste de relés y normatividad según IEC y IEEE. **Análisis de datos**: Comparación de corrientes de carga y falla, verificación de pickup, evaluación de TMS (tiempo dial), márgenes Δt y selectividad entre dispositivos aguas abajo y aguas arriba.
1. ¿Cómo determinar el análisis de flujo de potencia y cortocircuito mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?	1. Determinar el análisis de flujo de potencia y cortocircuito mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	1. El análisis de flujo de potencia y cortocircuito, considerando corrientes de falla y sistema de aterramiento, se determina mediante las condiciones eléctricas iniciales del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	D1: Selectividad y sensibilidad operativa simulada. 1. Escenarios de falla con actuación selectiva. 2. Relación de sensibilidad de protección. D2: Reducción del riesgo de desconexiones no selectivas. 1. Escenarios sin desconexión no selectiva. 2. Zonas o cargas sanas mantenidas en servicio. D3: Disponibilidad operativa futura esperada. 1. Tiempo total de despeje de falla. 2. Continuidad operativa proyectada del suministro.	
2. ¿Cómo optimizar los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N para mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?	2. Optimizar los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N para mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	2. La optimización de los ajustes de las funciones ANSI 50/51 y ANSI 50N/51N, con una coordinación entre protecciones principales y de respaldo, permite mejorar la selectividad y sensibilidad de las protecciones frente a fallas de fase y fallas a tierra del sistema eléctrico proyectado de la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025		
3. ¿En qué medida el análisis de las curvas tiempo-corriente y los márgenes de coordinación reducen los disparos intempestivos e incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025?	3. Analizar las curvas tiempo-corriente y márgenes de coordinación para reducir disparos intempestivos e incrementar la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.	3. El análisis de las curvas tiempo-corriente y los márgenes de coordinación reduce significativamente los disparos intempestivos e incrementa la disponibilidad operativa del sistema eléctrico proyectado en la Mina Coroccohuayco, Cusco 2025.		

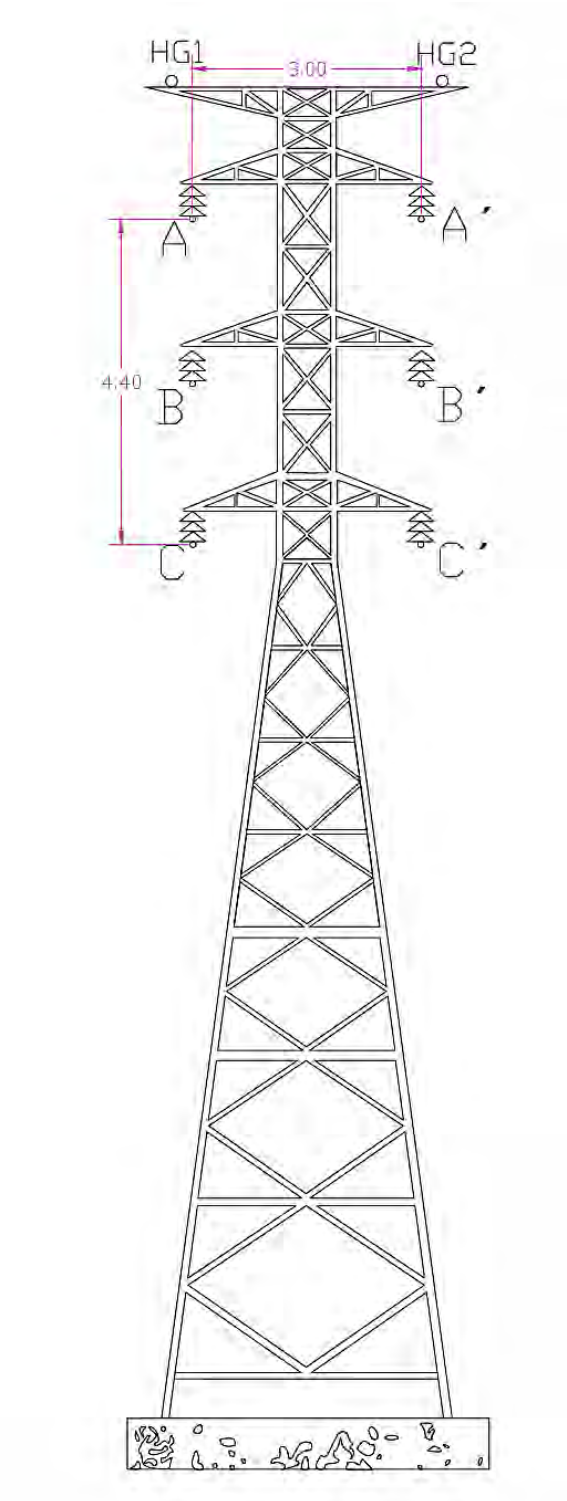
Nota. Elaboración propia.

Figura 40. *Curvas de protección aguas arriba (Recloser y tren de celdas 01)*



Nota. Elaboración propia.

Figura 41. *Armado de metal de doble terna propuesto para las líneas de 12 km*



Nota. Elaboración propia.

Figura 42. *Conductor AAAC para las líneas de 12 km*

GES E.I.R.L. Global Electric & Solar Panels

CEPER CABLES

CUERDA DE ALEACION DE ALUMINIO AAAC

Usado como conductor desnudo en líneas aéreas para distribución primaria y secundaria, instalados sobre aisladores apropiados para el nivel de tensión requerido.



Descripción cable:
1. Conductor de Aleación de Aluminio

Cables Desnudos

1. DESCRIPCIÓN:
Cable formado por hilos de aleación de aluminio 6201-T81, cableados en forma concéntrica alrededor de un núcleo central formado por un hilo.

2. APLICACIONES:
- Usado como conductor desnudo en líneas aéreas para distribución primaria y secundaria, instalados sobre aisladores apropiados para el nivel de tensión requerido.
- Como conductor neutro portante en conjuntos de cables ensamblados en espiral visible.

3. ESPECIFICACIONES:
ASTM B398: Aluminum Alloy 6201-T81 Wire for Electrical Purposes.
ASTM B399: Concentric-Lay-Stranded Aluminum Alloy 6201-T81 Conduct

4. TEMPERATURA DE OPERACIÓN:
Máxima recomendable 75°C

5. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES:
- Debido a su alta resistencia mecánica y bajo peso, permite obtener mejores características de flecha.
- Para zonas con atmósferas de alta contaminación industrial o en lugares próximos al mar se recomienda su empleo con grasa.



Nota. Catálogo de la empresa GES (CEPER CABLES)

Figura 43. *Datos del conductor AAAC*

GES E.I.R.L. Global Electric & Solar Panel's

CEPER CABLES

Sección Nominal	Formación Hilos x Diám.	Diámetro Exterior	Carga de Rotura	Resistencia Máxima		Capacidad de Corriente(*)	Peso Total
				20°C c.c	75ºC c.a		
mm2	Nº x mm	mm	KN	Ohm/Km		Amp	Kg/Km
25				1,370	1,640	134	68
35	7 x 2,52	7,6	11,06	0,979	1,173	166	95
50	7 x 3,02	9,1	15,89	0,681	0,816	208	136
70	7 x 3,57	10,7	21,19	0,488	0,585	257	190
70	19 x 2,17	10,9	21,57	0,486	0,582	259	192
95	19 x 2,52	12,6	29,08	0,361	0,432	312	259
120	19 x 2,84	14,2	36,9	0,284	0,340	363	329
150	19 x 3,17	15,8	46,3	0,226	0,270	417	412
185	19 x 3,52	17,6	57,1	0,184	0,220	477	509
240	19 x 4,01	20,0	71,8	0,142	0,170	563	660

Los datos de la tabla están sujetos a tolerancias normales de manufactura.
(*)
Temperatura en el conductor : 75°C
Temperatura ambiente : 30°C
Velocidad del viento : 0,6 m/seg
Radiación solar : 1000 W/m2
Coeficiente de absorción solar : 0,5
Coeficiente de emisividad : 0,5

Nota. Catálogo de la empresa GES (CEPER CABLES)

Figura 44. *Cable tipo XLPE*



CENTELSA by Nexans

Cable Premium Nexans Potencia Media Tensión Aluminio XLPE-TR/PE 18/30kV N=16mm2 (-2OL)

400 mm2

Cable Premium Nexans Potencia Media Tensión de Aluminio cumple todos los requerimientos de la Norma IEC 60502-2.

NORMAS

Producto IEC 60228 Class 2 ; IEC 60502-2

CABLE PREMIUM SOLAR

El cable Premium Nexans Potencia Media Tensión cumple con todos los requisitos de la Norma IEC 60502-2. Posee un conductor de aluminio 1350 cableado concéntrico con bloqueo de humedad, aislamiento de polietileno reticulado (XLPE-TR), pantalla en alambres de cobre, cintas bloqueadoras de agua antes y después de los hilos del neutro, chaqueta en polietileno, resistente al calor, abrasión y humedad, resistente a los rayos solares. Compuestos libres de sustancias peligrosas (RoHS).

APLICACIONES Y CARACTERÍSTICAS

Alimentación de circuitos de Media Tensión de 18/30(36) kV, principalmente la conexión entre el transformador alimentador y la red de distribución eléctrica. Cables aptos para instalación en exteriores expuestos a la luz solar, ductos subterráneos, directamente enterrados, en lugares secos o húmedos.

Nota: *Cualquier otra aplicación o uso no descrita anteriormente se considera como prohibida.*

Principaes características:

- **Instalación directamente enterrada**, según norma IEC 60502-2.
- **Resistencia a los rayos solares**, según norma S-93-639.
- **Cable diseñado para estar permanentemente sumergido en agua según la condición AD8**, acorde con el procedimiento de prueba de la norma NBR 14039.

CIDET

CERTIFICADO RETIE

CONTACTO

Ventas
ventas.colombia@nexans.com

Nota. Catálogo de la empresa CENTELSA

Figura 45. *Datos de cable tipo XLPE*

CENTELSA by Nexans

Cable Premium Nexans Potencia Media Tensión Aluminio XLPE-TR/PE 18/30kV N=16mm2 (-2OL)

400 mm2

CARACTERÍSTICAS

Características de construcción	
Material del conductor	Cableado en Aluminio
Forma del conductor	Compactado
Flexibilidad del conductor	Class 2
Aislamiento	TR-XLPE (Polietileno Reticulado Retardante a las Arborescencias)
Pantalla	Hilos de Cobre
Material de Cubierta	LDPE
Características dimensionales	
Número total de hilos	61
Sección del conductor	400 mm²
Diámetro del conductor	23,57 mm
Mínimo espesor de aislamiento	7,1 mm
Diámetro exterior nominal	48,39 mm
Peso aproximado	2330,5 kg/km
Mínimo espesor de cubierta	1,8 mm
Características eléctricas	
Nivel de Aislamiento	- %
Voltaje Máximo Operación	18/30(36) kV
Rigidez dieléctrica en CA (conductor-pantalla)	63,0 kV
Tiempo Rigidez Dielectrica entre Núcleo y Pantalla	5 min.
Prueba Descarga Parcial Máxima	10 pC
Max. Resistencia DC del Conductor a 20 ° C	0,077 Ohm/km
Max. Resistencia Electrica AC 60Hz 90°C	0,102 Ohm/km
Amp.Nominal en Aire 30°C	673 A
Ampacidad direc.enterrado/Ducto 20°C - Form.Triangular	470 A
Capacitancia Nominal	273,1 pF/m
Reactancia inductiva a 60 Hz - formación plana	0,144 Ohm/km
Reactancia inductiva a 60 Hz - formación triangular	0,127 Ohm/km
Características mecánicas	
Tensión de Halado Máximo del Conductor	20 kN
Radio mínimo de Curvatura	581 mm
Resistencia a la abrasión	Excelente
Características de uso	
Temperatura máxima operativa	90 °C
Temperatura máxima del conductor en corto-circuito	250 °C
Resistencia a radiaciones ultravioletas	Si (720 horas)
Resistencia a aceites	No
Estanqueidad Longitudinal	ICEA T-31-610
Conforme con RoHS	Si
Presencia de Agua	AD8 según ABNT NBR 14039
No propagación de la llama	IEC 60332-1-2

Nota. Catálogo de la empresa CENTELSA

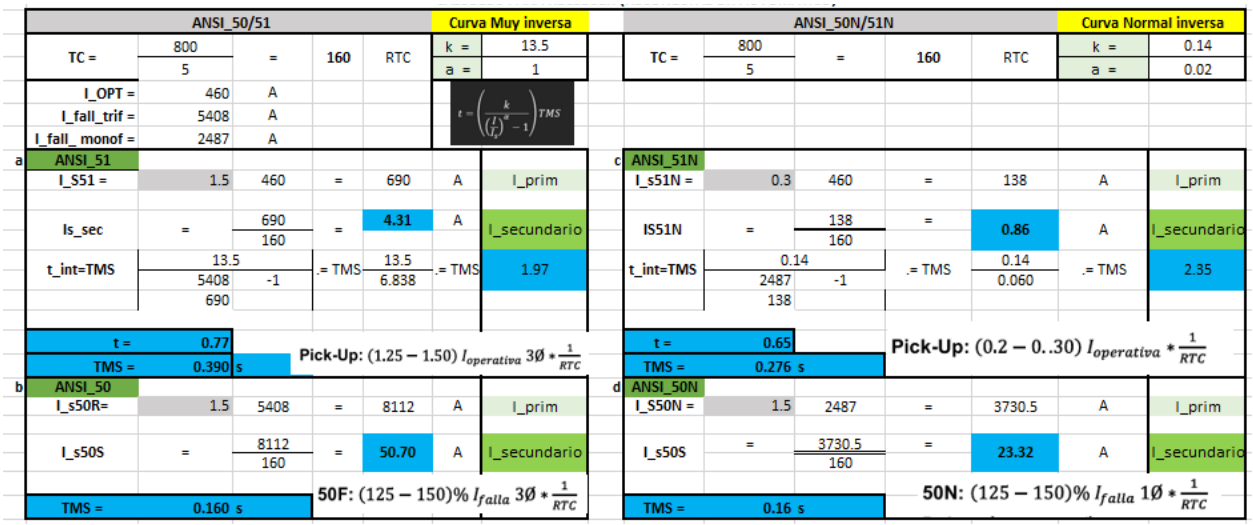
Figura 46. *Resumen de resultados para ajuste de las curvas de relés en TCC*

Resumen de Resultados

	ISEC51	51 (S) (TMS)	t	ISEC50	50 (s)	ISEC51N	51N (S)(TMS)	t	ISEC50N	50N (s)
RECLOSER	4.31	0.39	0.770	50.70	0.16	0.86	0.28	0.650	23.32	0.160
CELDA 1	3.98	0.26	0.470	47.32	0.08	0.80	0.15	0.340	21.76	0.080
TR1/TR2	4.24	0.23	0.250	45.88	0.00	0.68	0.12	0.200	20.71	0.000
TR3	3.39	0.23	0.210	39.90	0.00	0.68	0.12	0.190	20.68	0.000
TR4/TR5	0.64	0.23	0.090	11.44	0.00	0.15	0.11	0.150	12.41	0.000

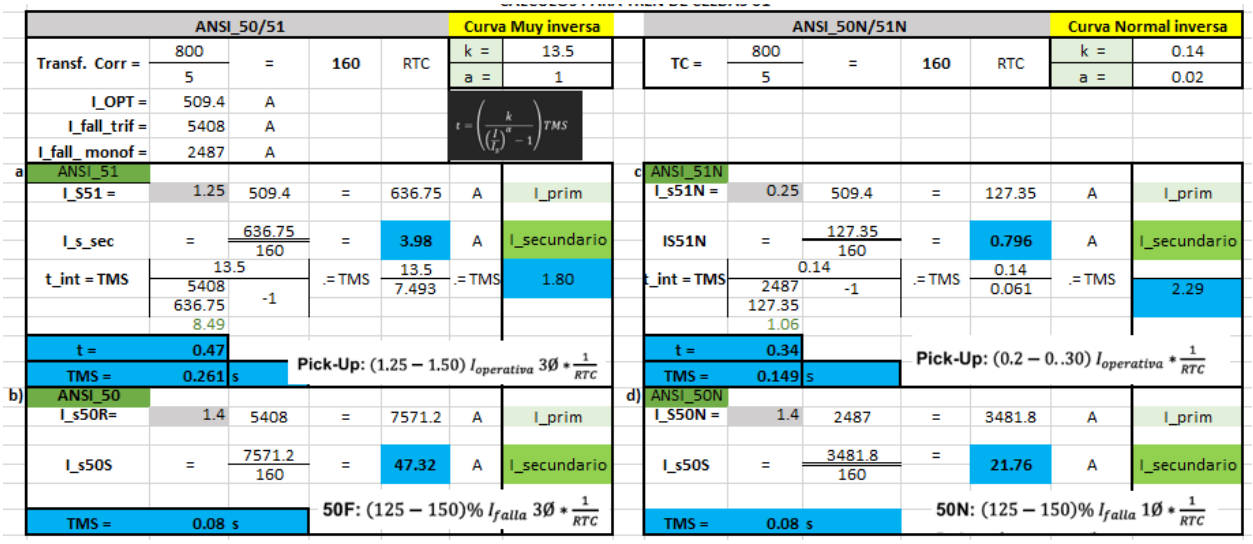
Nota. Elaboración propia.

Figura 47. *Cálculo de resultados 01*



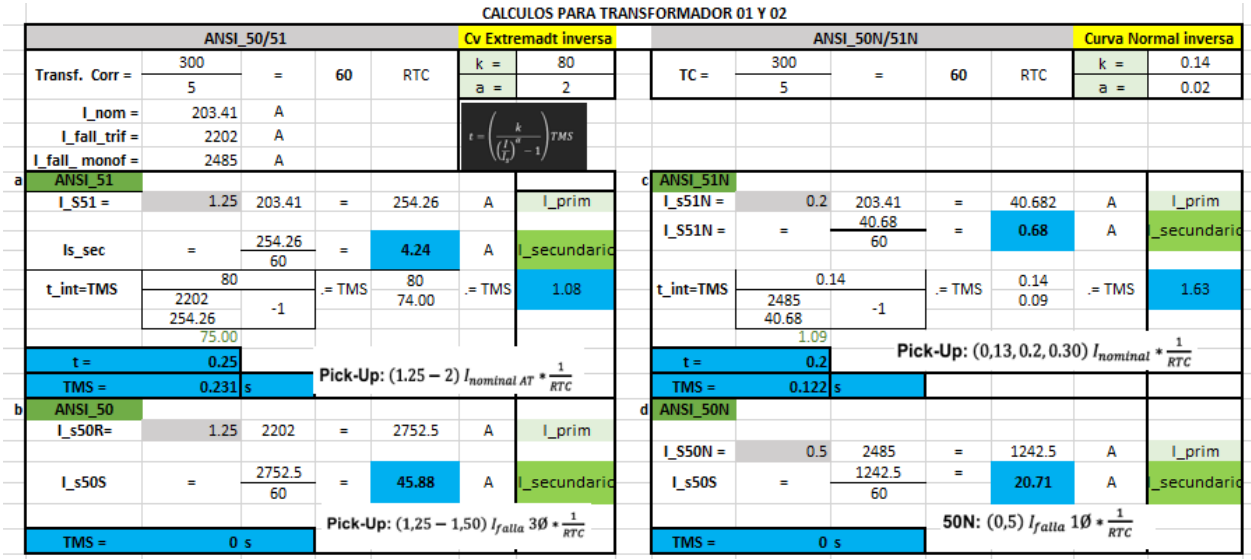
Nota. Elaboración propia.

Figura 48. *Cálculo de resultados 02*



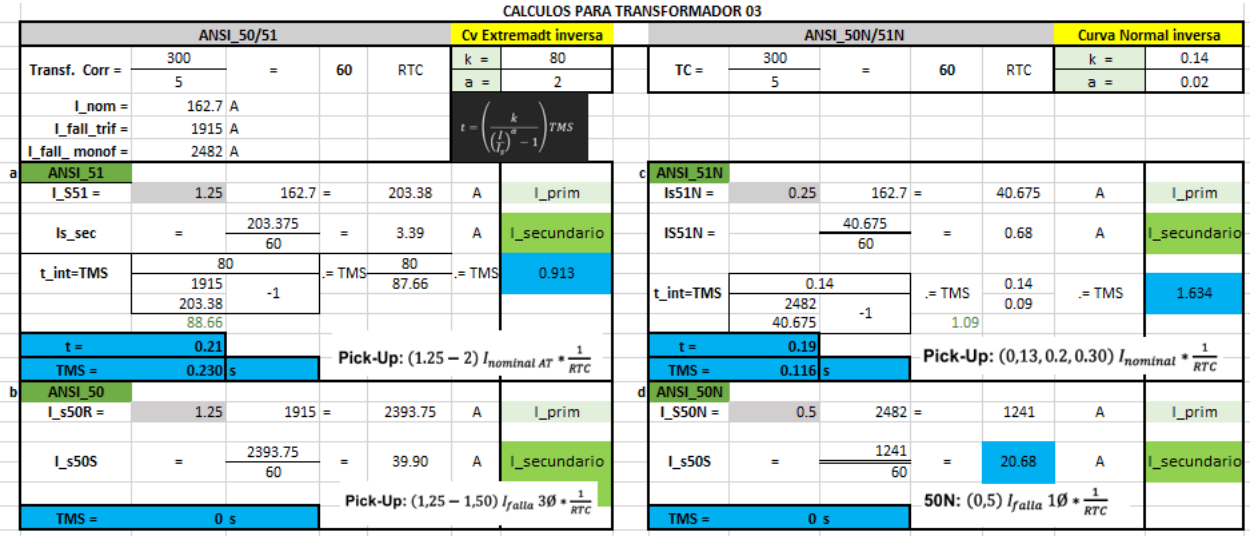
Nota. Elaboración propia.

Figura 49. *Cálculo de resultados 03*



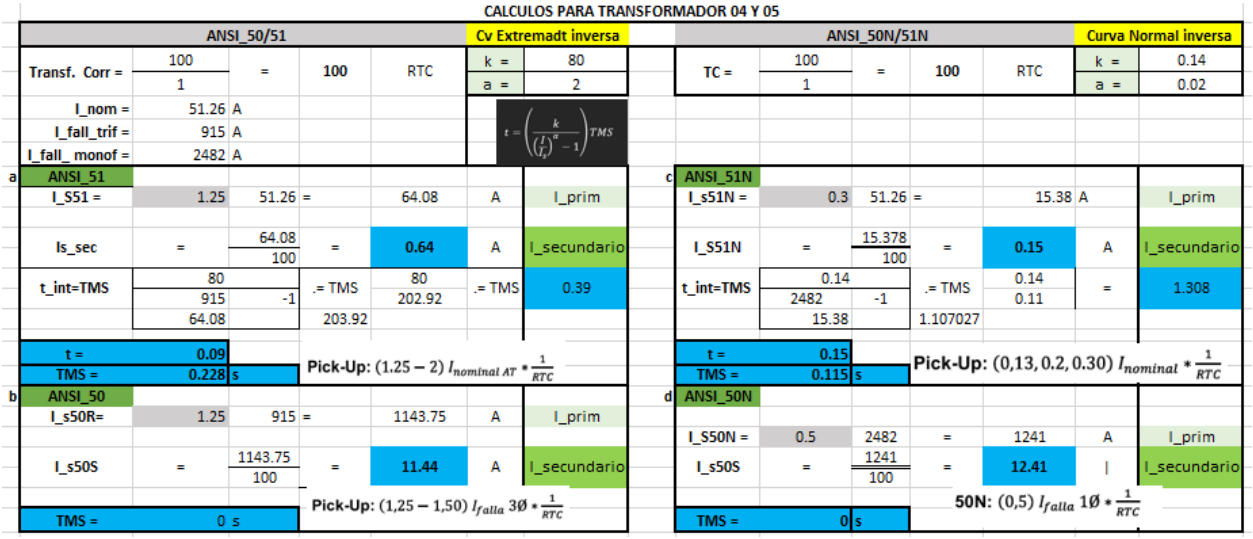
Nota. Elaboración propia.

Figura 50. *Cálculo de resultados 04*



Nota. Elaboración propia.

Figura 51. *Cálculo de resultados 05*



CALCULOS PARA TRANSFORMADOR 04 Y 05

ANSI_50/51					Cv Extremadt inversa	
Transf. Corr =	100 / 1	=	100	RTC	k =	80
					a =	2
I_nom =	51.26	A				
I_fall_trif =	915	A				
I_fall_ monof =	2482	A				

$$t = \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{\alpha} - 1}\right) TMS$$

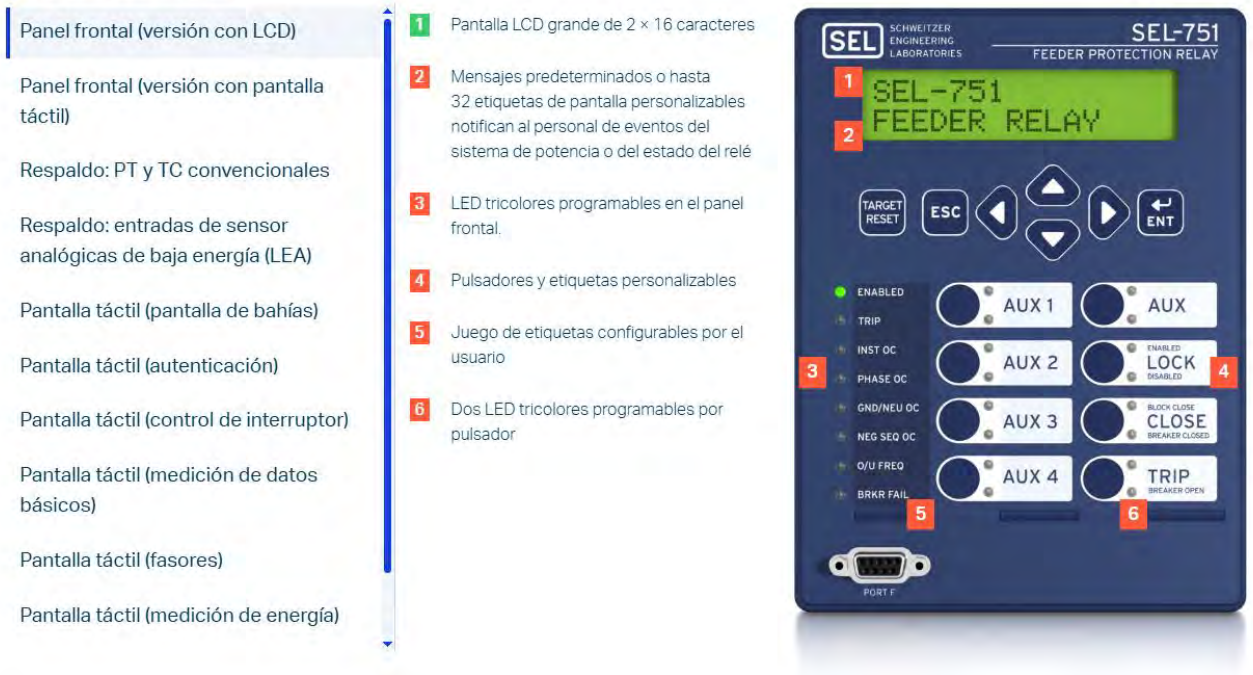
a	ANSI_51						
	I_S51 =	1.25	51.26	=	64.08	A	I_prim
	Is_sec	=	64.08 / 100	=	0.64	A	I_secundario
	t_int=TMS	80 / 915 / 64.08	-1	.= TMS 203.92	80 / 202.92	.= TMS	0.39
	t =	0.09					
	TMS =	0.228	s	Pick-Up: $(1.25-2)\ I_{nominal\ AT} * \frac{1}{RTC}$			
b	ANSI_50						
	I_s50R=	1.25	915	=	1143.75	A	I_prim
	I_s50S	=	1143.75 / 100	=	11.44	A	I_secundario
	TMS =	0	s	Pick-Up: $(1{,}25-1{,}50)\ I_{falla}\ 3Ø * \frac{1}{RTC}$			

ANSI_50N/51N					Curva Normal inversa	
TC =	100 / 1	=	100	RTC	k =	0.14
					a =	0.02

c	ANSI_51N						
	I_s51N =	0.3	51.26	=	15.38	A	I_prim
	I_S51N	=	15.378 / 100	=	0.15	A	I_secundario
	t_int=TMS	0.14 / 2482 / 15.38	-1	.= TMS 1.107027	0.14 / 0.11	=	1.308
	t =	0.15					
	TMS =	0.115	s	Pick-Up: $(0{,}13, 0.2, 0.30)\ I_{nominal} * \frac{1}{RTC}$			
d	ANSI_50N						
	I_S50N =	0.5	2482	=	1241	A	I_prim
	I_s50S	=	1241 / 100	=	12.41	I	I_secundario
	TMS =	0	s	50N: $(0{,}5)\ I_{falla}\ 1Ø * \frac{1}{RTC}$			

Nota. Elaboración propia.

Figura 52. *Características del relé SEL-751*



Nota. SEL-751 (Selinc.com)