



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**VALIDACIÓN DE LOS AJUSTES DE PROTECCIÓN DEL ALIMENTADOR DEL
CIRCUITO 2 DE 22 kV DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MINAS SAN
FRANCISCO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

**AUTORES: VICTOR MIGUEL CRESPO CASTANIER
MATEO ANDRÉS ÁVILA FAICAN**

TUTOR: ING. FLAVIO ALFREDO QUIZHPI PALOMEQUE, Mgtr.

Cuenca – Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Victor Miguel Crespo Castanier con documento de identificación N° 0302194907 y Mateo Andrés Ávila Faican con documento de identificación N° 0106652712; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 13 de agosto de 2025

Atentamente,



Victor Miguel Crespo Castanier

0302194907



Mateo Andrés Ávila Faican

0106652712

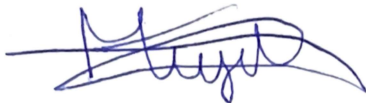
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Victor Miguel Crespo Castanier con documento de identificación N° 0302194907 y Mateo Andrés Ávila Faican con documento de identificación N° 0106652712, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Validación de los ajustes de protección del alimentador del circuito 2 de 22 kV de la central hidroeléctrica Minas San Francisco” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de agosto de 2025

Atentamente,



Victor Miguel Crespo Castanier

0302194907



Mateo Andrés Ávila Faican

0106652712

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque con documento de identificación N° 0102257482, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: VALIDACIÓN DE LOS AJUSTES DE PROTECCIÓN DEL ALIMENTADOR DEL CIRCUITO 2 DE 22 kV DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA MINAS SAN FRANCISCO, realizado por Victor Miguel Crespo Castanier con documento de identificación N° 030219490 y por Mateo Andrés Ávila Faican con documento de identificación N° 0106652712, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 13 de agosto de 2025

Atentamente,

Ing. Flavio Alfredo Quizhpi Palomeque, Mgtr.

0102257482

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a Dios por darme la perseverancia y la fortaleza que me han permitido alcanzar este importante logro en mi vida.

A mis padres, Miguel y Jenny, por brindarme siempre su amor incondicional, apoyo, consejos y conocimientos, guiándome y ayudándome a superar cada desafío que se presentó en el camino.

A mi abuelo, Víctor Miguel, quien, sin importar las circunstancias, siempre me ha apoyado, inculcándome valores sólidos para crecer como persona, siendo ahora y siempre un ejemplo de lo que significa ser un buen hombre.

A mi abuela, María Eugenia, por darme su amor y acompañarme en cada etapa de mi vida, enseñándome el valor del esfuerzo y la disciplina en mi desarrollo personal y académico.

A mis hermanos, que han estado presentes en todo momento, inspirándome a superarme cada día.

A mi tío Felipe, quien siempre ha estado presente para aconsejarme, tenerme siempre en cuenta y darme su apoyo en cada situación que se ha presentado.

A mis docentes, Mateo y Flavio, por transmitirme sus conocimientos y enseñanzas, que han sido fundamentales para alcanzar este objetivo.

Y, finalmente, a mi gran amigo y compañero de tesis, Mateo, por estar siempre ahí, brindarme su ayuda cuando la he necesitado, aconsejarme en todo momento y demostrarme que es, sin duda, un verdadero amigo.

Para todos ustedes este logro es tan mio como suyo.

Victor Miguel Crespo Castanier

Quiero expresar, en primer lugar, mi profundo agradecimiento a Dios, por brindarme la sabiduría, fortaleza y perseverancia necesarias para superar cada etapa de mi vida y permitirme llegar a este importante logro académico. A mis padres, Lauro y Fernanda, por ser mis más grandes pilares y ejemplos de vida. Gracias por su amor incondicional, por inculcarme valores sólidos y enseñarme a enfrentar cada desafío con valentía y perseverancia. Este logro es, en gran medida, fruto de su apoyo constante, y me siento profundamente orgulloso de ser su hijo.

A mis hermanos, Fabricio y Abigail, por ser un apoyo constante e inspirarme a mejorar cada día. Su ejemplo de esfuerzo, sus palabras de aliento y su compañía han fortalecido mis valores y mi determinación para alcanzar mis metas. Con ustedes he aprendido que la familia es la mayor fortaleza en cualquier camino. A mi pareja, Ari, por haber llegado a mi vida como un regalo de Dios. Gracias por acompañarme, por tu apoyo incondicional y por motivarme a crecer como persona. Tu presencia ha sido una luz que me ha guiado y animado en este camino.

A mis abuelos, Ezequiel y Laura, quienes con su amor, dedicación y ejemplo han dejado huellas imborrables en mi vida. Su cariño incondicional y sus consejos sabios han sido un refugio y una guía en los momentos más importantes. A mi tío René, por enseñarme con su vida que la constancia y el trabajo firme son la base para cumplir los sueños. A mi tío Rómulo, por sus valiosos consejos, por estar presente en cada etapa y por brindarme siempre su apoyo y afecto. A mis docentes, Flavio y Mateo, por sus enseñanzas y valores ejemplares, que me han proporcionado las herramientas necesarias para mi desarrollo académico y profesional.

Finalmente, a mi mejor amigo y compañero de tesis, Miguel, por su lealtad, apoyo constante y por compartir conmigo cada desafío de esta etapa, enseñándome el verdadero significado de la amistad.

A todos ustedes, mi gratitud será eterna.

Mateo Andrés Ávila Faican

DEDICATORIAS

Dedicatoria de Victor Miguel Crespo Castanier

Este trabajo está dedicado, en primer lugar, a mis padres y abuelos, quienes han estado siempre a mi lado brindándome su cariño y apoyo incondicional. Ustedes han sido pilares fundamentales en mi vida, inspirándome constantemente a luchar por mis objetivos y recordándome que con esfuerzo y perseverancia todo es posible. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A mis hermanos, a quienes siempre busco dar lo mejor de mí, con la esperanza de ser un ejemplo de dedicación y constancia. Ustedes me motivan a seguir creciendo como persona y como profesional. A toda mi familia, por estar presente en cada etapa de mi vida, brindándome palabras de aliento, ayuda y apoyo en cada paso de este camino. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, que han compartido mis alegrías, mis retos y mis esfuerzos. A todos ustedes, les dedico este trabajo como muestra de mi gratitud y cariño.

Dedicatoria de Mateo Andrés Ávila Faican

A Dios, por ser mi guía y mi refugio constante, por iluminar mis pasos con su infinita sabiduría y darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo. A Él, que ha sido mi sostén en los momentos de dificultad y mi alegría en cada logro alcanzado.

A mis padres, por su amor incansable, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos, por su apoyo, compañía y por recordarme siempre que la unión familiar es un pilar irremplazable. A mis abuelos, cuya sabiduría, cariño y ejemplo de vida han dejado huellas profundas en mi corazón y han sido una fuente de inspiración constante. A mi pareja, por caminar a mi lado con paciencia, comprensión y aliento en cada etapa de este recorrido. Y a toda mi familia, por cada palabra de ánimo, por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba, y por darme motivos para seguir adelante.

Este logro es tan suyo como mío.

Índice general

Agradecimientos	I
Dedicatorias	III
Índice General	v
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xI
Resumen	xII
Abstract	xIII
Introducción	1
Justificación	3
Objetivos	4
Marco Teórico	5
1. Recolección y Análisis de Datos Técnicos	11
1.1. Fuentes de Información Técnica	11
1.1.1. Conductores	12
1.1.2. Datos de Transformadores	12
1.1.3. Ajustes de protecciones	13
1.1.4. Niveles de cortocircuito	13

1.2.	Selección de estructuras	13
1.2.1.	Estructura ESV-3CA	14
1.2.2.	Estructura ESV-3CD	14
1.2.3.	Estructura ESV-3CP	15
1.2.4.	Estructura ESV-3SD	15
1.2.5.	Estructura ESV-3VA	16
1.3.	Selección de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs)	16
1.3.1.	SEL-787	17
1.3.2.	SEL-351	17
1.3.3.	Sifang-CSC-211	18
2.	Diseño y Simulación del Sistema del Alimentador 2	19
2.1.	Modelado de la Red	19
2.2.	Creación de las librerías para elementos del sistema	20
2.2.1.	Configuración de líneas y estructuras	20
2.2.2.	Configuración de Transformadores	24
2.2.3.	Configuración de Fusibles	27
2.2.4.	Configuración de IEDs	27
2.2.5.	Niveles de máxima y mínima generación	29
2.2.6.	Carga del sistema	29
2.3.	Flujo de potencia	30
3.	Validación de Ajustes de Protección en IEDs	32
3.1.	Método para simulación de cortocircuitos	32
3.2.	Validación de los ajustes	33
3.2.1.	Curvas del flujo de Potencia	33
3.2.2.	Curvas de Cortocircuito trifásico	34
3.2.3.	Curvas de Cortocircuito monofásico	37
3.3.	Propuesta 1: Nuevos ajustes para los IEDs	39
3.3.1.	Cálculos para IED SEL-351 del circuito 2	39
3.3.2.	Cálculos para IED SEL-351 del circuito 1	41

3.3.3.	Cálculos para IED Sifang-CSC-211 de la entrada y salida de la barra de Gramalote	42
3.3.4.	Cálculos para IED SEL-787 del transformador	43
3.3.5.	Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 1)	46
3.3.6.	Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 1)	47
3.3.7.	Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 1)	49
3.4.	Propuesta 2: Nuevos ajustes y nuevos TCs para los IEDs	52
3.4.1.	Cálculos para IED SEL-351 del circuito 2	52
3.4.2.	Cálculos para IED SEL-351 del circuito 1	54
3.4.3.	Cálculos para IED Sifang-CSC-211 de la entrada y salida de la barra de Gramalote	55
3.4.4.	Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 2)	56
3.4.5.	Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 2)	57
3.4.6.	Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 2)	59
3.5.	Propuesta 3: Nuevos ajustes sin variar las curvas del SEL-787	62
3.5.1.	Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 3)	63
3.5.2.	Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 3)	64
3.5.3.	Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 3)	66
4.	Conclusiones	69
5.	Recomendaciones y Trabajos Futuros	71
	Glosario	72
	Referencias	74
	Anexos	75
.1.	Anexo: Carta por parte de la Empresa CELEC EP	75
.2.	Anexo ABET SO2	78

Índice de figuras

1.	IED SEL-787	5
2.	IED SEL-351	6
3.	IED SIFANG-CSC-211	6
1.1.	Tabla de conductores CABEL. [14]	12
1.2.	ESTRUCTURA ESV 3CA-22kV. [15]	14
1.3.	ESTRUCTURA ESV 3CD-22KV. [15]	14
1.4.	ESTRUCTURA ESV 3CP-22KV. [15]	15
1.5.	ESTRUCTURA ESV 3SD-22KV. [15]	15
1.6.	ESTRUCTURA ESV 3VA-22KV. [15]	16
1.7.	Relé SEL-787	17
1.8.	Relé SEL-351	18
1.9.	Relé Sifang-CSC-211	18
2.1.	Diagrama unifilar del sistema	20
2.2.	Datos conductor 1/0 ACSR	21
2.3.	Datos conductor 2/0 ACSR	21
2.4.	Datos conductor 3/0 ACSR	22
2.5.	Datos estructura ESV-3CA	22
2.6.	Datos estructura ESV-3CD	23
2.7.	Datos estructura ESV-3CP	23
2.8.	Datos estructura ESV-3SD	23
2.9.	Datos estructura ESV-3VA	24
2.10.	Datos Transformador 12.5 MVA	24
2.11.	Datos Transformador 500 KW	25

2.12. Datos Transformador 200 KW	25
2.13. Datos TP 22kv	26
2.14. Datos TC 300/5	26
2.15. Datos TC 150/5	26
2.16. Configuraciones iniciales SEL 787 y 351	28
2.17. Función 51 IEDs Sifang-CSC-211	28
2.18. Función 51N IEDs Sifang-CSC-211	29
2.19. Niveles de máxima y mínima generación	29
2.20. Carga del sistema	29
2.21. Flujo de potencia del Circuito 1	30
2.22. Flujo de potencia del Circuito 2	31
3.1. Curvas del flujo de Potencia circuito 1	34
3.2. Curvas del flujo de Potencia circuito 2	34
3.3. Curvas de CC3F en la barra del Transformador	35
3.4. Curvas de CC3F en la barra de Gramalote	35
3.5. Curvas de CC3F en la barra de Cementerio C1	36
3.6. Curvas de CC3F en la barra de Cementerio C2	36
3.7. Curvas de CC1F en la barra del transformador	37
3.8. Curvas de CC1F en la barra de Gramalote	37
3.9. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1	38
3.10. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2	38
3.11. Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 1)	46
3.12. Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 1)	46
3.13. Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 1)	47
3.14. Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 1)	47
3.15. Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 1)	48
3.16. Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 1)	48
3.17. Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta 1)	49
3.18. Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 1)	49
3.19. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 1)	50
3.20. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 1)	50

3.21. Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 2)	56
3.22. Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 2)	57
3.23. Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 2)	57
3.24. Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 2)	58
3.25. Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 2)	58
3.26. Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 2)	59
3.27. Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta2)	59
3.28. Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 2)	60
3.29. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 2)	60
3.30. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 2)	61
3.31. Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 3)	63
3.32. Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 3)	64
3.33. Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 3)	64
3.34. Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 3)	65
3.35. Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 3)	65
3.36. Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 3)	66
3.37. Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta 3)	66
3.38. Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 3)	67
3.39. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 3)	67
3.40. Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 3)	68

Índice de tablas

2.1. Fusibles utilizados en la simulación del sistema.	27
3.1. Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 1)	51
3.2. Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 2)	61
3.3. Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 3)	68

Resumen

El presente trabajo de titulación se enfocó en la validación de los ajustes de protecciones eléctricas en los IEDs del circuito 2 del alimentador de la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco. Este proceso tuvo como objetivo principal garantizar que las protecciones respondan de manera precisa ante fallas, evitando falsas actuaciones o que no actúen en eventos de falla reales. La metodología aplicada incluyó el modelado del sistema eléctrico en programas especializados, la simulación de escenarios de falla y la comparación de los resultados con los ajustes existentes en campo.

Durante el desarrollo del trabajo, se detectó que los ajustes de protección existentes eran incorrectos, ya que estos presentaban tiempos de actuación fuera de los márgenes aceptables, así como una mala coordinación entre dispositivos. Estas configuraciones erróneas ponían en riesgo la seguridad del sistema, incrementando la probabilidad de fallas extendidas y daños a los equipos.

Como respuesta a este problema, se propusieron tres alternativas de nuevos ajustes de protección, cada una diseñada considerando criterios de selectividad, sensibilidad y tiempos de actuación. Estas propuestas fueron evaluadas bajo diferentes escenarios de cortocircuito, incluyendo fallas monofásicas y trifásicas, tanto a tierra como entre fases. Los resultados de las simulaciones demostraron que las propuestas corregirían los problemas detectados, mejoraban la coordinación entre los IEDs y garantizaban una actuación eficaz y dentro de un tiempo aceptable.

Palabras clave: IED; Cortocircuito; Respuesta ante fallas; Coordinación de protecciones; Análisis de fallas; ANSI; IEC; IEEE

Abstract

This thesis focused on validating the electrical protection settings in the IEDs of circuit 2 of the Minas San Francisco Hydroelectric Power Plant feeder. The main objective of this process was to ensure that the protections respond accurately to faults, avoiding false trips or failure to act in real fault events. The methodology applied included modeling the electrical system in specialized programs, simulating fault scenarios, and comparing the results with the existing settings in the field.

During the course of the work, it was detected that the existing protection settings were incorrect, as they had response times outside acceptable margins, as well as poor coordination between devices. These erroneous configurations jeopardized the safety of the system, increasing the probability of extended failures and damage to equipment.

In response to this problem, three alternatives for new protection settings were proposed, each designed considering criteria of selectivity, sensitivity, and response times. These proposals were evaluated under different short-circuit scenarios, including single-phase and three-phase faults, both to ground and between phases. The results of the simulations showed that the proposals would correct the problems detected, improve coordination between the IEDs, and ensure effective response within an acceptable time frame.

Keywords: IED; Short circuit; Fault response; Protection coordination; Fault analysis; ANSI; IEC; IEEE

Introducción

Para asegurar la continuidad y la seguridad del suministro eléctrico, es esencial proteger y automatizar los sistemas eléctricos de potencia (SEP). Es aquí donde los Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED) han pasado a ser instrumentos esenciales para la supervisión, el control y la respuesta ante sucesos imprevistos en las redes de transmisión y distribución. Su capacidad para realizar múltiples funciones de protección, registro de eventos y comunicación bajo estándares como IEC61850 [1] ha transformado la forma en que se gestionan las subestaciones eléctricas modernas.

En las últimas décadas, la automatización de las subestaciones ha crecido gracias a los avances tecnológicos, lo que ha permitido una respuesta más eficiente ante los errores y un monitoreo más preciso. Blair et al. [2] sugieren plataformas que simplifican la simulación y validación de funciones de IEDs, mientras que McDonald et al. [3] subrayan la relevancia de los modelos para verificar la integridad con el fin de garantizar su rendimiento. Procedimientos para optimizar la coordinación y los ajustes de protecciones en diversas configuraciones de red han sido desarrollados por estudios a escala nacional, tales como los realizados por Chapi [4] y Córdova [5]. La incorporación de funciones de comunicación como GOOSE ha mejorado la velocidad, la respuesta y la automatización, según otros autores, entre los que se encuentran Gu et al. [6] y Aftab et al. [7].

A pesar de estos progresos, todavía hay retos en la adecuada configuración y coordinación de los esquemas de protección. Se han detectado inconvenientes en el circuito 2 de la central hidroeléctrica Minas San Francisco, causados por una actuación incorrecta de los IEDs. Algunos equipos operan con tiempos excesivamente reducidos, lo que provoca disparos no deseados; otros no responden o tienen demoras que perjudican la selectividad y coordinación del sistema. Esta cuestión supone un peligro

tanto para la estabilidad del sistema eléctrico como para la integridad de los equipos.

El propósito de este trabajo es examinar el comportamiento actual de las protecciones del sistema, ya que durante las conversaciones mantenidas con el encargado del proyecto, se mencionó que existe un problema con las protecciones asociadas al circuito 2 de la central hidroeléctrica Minas San Francisco. Sobre todo, se observó que, ante la ocurrencia de fallas, no actúan los IEDs correspondientes, sino otros equipos que no están destinados a proteger ese segmento específico del sistema. En caso de no ser correctas las configuraciones, se va a sugerir modificaciones y tácticas de coordinación que optimicen los tiempos de respuesta, incrementen la selectividad y aseguren el adecuado desempeño del sistema de protección. Para este propósito, se utilizarán pruebas y simulaciones que posibilitarán la validación de las propuestas y garantizarán su viabilidad técnica.

Justificación

La operación segura y confiable de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) depende en gran medida de la correcta configuración y verificación de los ajustes de protección en los Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED). En este marco, la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, ha participado en la validación de los ajustes de protecciones de una subestación perteneciente a la central hidroeléctrica Minas de San Francisco, administrada por CELEC SUR. Esta actividad no solo atiende una necesidad práctica del sector eléctrico, sino que también constituye una oportunidad para que los estudiantes adquieran experiencia directa en aplicaciones reales.

La verificación de los IEDs bajo normas técnicas, como las establecidas por IEEE, permite evaluar la coordinación entre equipos y detectar posibles desajustes que podrían generar fallas críticas o interrupciones del suministro. En la subestación estudiada, se identificaron casos en los que algunos dispositivos actuaban demasiado rápido, mientras que otros respondían con retraso o no operaban ante determinadas contingencias, lo que afectaba la selectividad y la confiabilidad del sistema.

Este proyecto, además, fortalece la interacción académica con la industria eléctrica, promoviendo el desarrollo de competencias prácticas y la adopción de buenas prácticas en la gestión de protecciones. La experiencia obtenida proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones y mejoras en los esquemas de protección, asegurando que las recomendaciones se basen en resultados verificados y en condiciones reales de operación.

Objetivos

Objetivo General

- Validar los ajustes de protección de los IEDs en el alimentador 2 de la central hidroeléctrica Minas de San Francisco, a través de simulación en software especializado y pruebas en sitio. En caso de detectarse inconsistencias o desviaciones, se realizarán los ajustes correctivos correspondientes para garantizar una operación segura y confiable del sistema eléctrico.

Objetivos específicos:

- Recolectar y analizar los datos técnicos relevantes proporcionados por la empresa eléctrica para la caracterización del sistema de protección.
- Diseñar y simular el sistema eléctrico y sus esquemas de protección en el software PowerFactory, considerando la configuración actual de los IEDs.
- Validar los ajustes de protección en los IEDs y, en caso de que estos resulten incorrectos o inadecuados, realizar las correcciones necesarias y verificar su correcto funcionamiento mediante simulaciones y comparación con los criterios técnicos establecidos.

Marco Teórico

Protecciones en Sistemas Eléctricos

En los sistemas eléctricos de potencia, los IED juntan en un solo equipo funciones de medición, protección, control y comunicación. Estos equipos son fundamentales para la automatización de subestaciones y son la base para las redes eléctricas inteligentes. Según Hyginus et al. [8].

Los IED con estándar IEC 61850 permiten la compatibilidad y mejoran la fiabilidad del sistema eléctrico. Este comportamiento se apoya en protocolos como GOOSE para el intercambio acelerado de señales de protección, como explican Brunner [9] y Aftab et al. [7].

SEL-787

El relé SEL-787 (Figura 1), del fabricante SEL, es un relé de protección para transformadores de potencia.

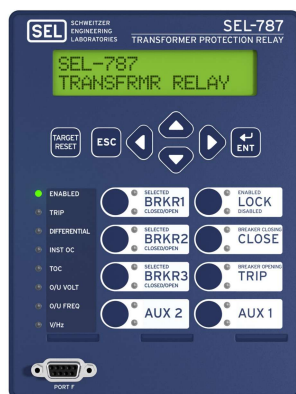


Figura 1: IED SEL-787

SEL-351

El *SEL-351* que se muestra en la figura 2, es un relé multifuncional para protección de líneas y alimentadores en sistemas eléctricos de potencia. Por su alta resistencia y flexibilidad es ideal para aplicaciones de media y alta tensión.



Figura 2: IED SEL-351

CSC-211

El IED *CSC-211* (Figura 3), un IED multifunción producido por SIFANG Electric para sistemas de potencia de hasta 110 kV. Reúne en un solo equipo funciones de protección, control, medición y supervisión, para aplicaciones en subestaciones, industrias y redes de distribución.



Figura 3: IED SIFANG-CSC-211

Protección Contra Sobrecorrientes

La protección contra sobrecorrientes es una de las funciones más importantes de los IED. Este tipo de protección se pone en funcionamiento cuando la magnitud de la corriente excede un valor previamente definido durante un periodo específico, lo cual puede suceder debido a cortocircuitos o sobrecargas. Una adecuada configuración de este sistema de protección, según Córdova Pazmiño [5], garantiza la sensibilidad, la selectividad y la rapidez en las respuestas. Chapi Lucero [4], en cambio, enfatiza que es crucial calcular de manera precisa las corrientes de cortocircuito a partir de mediciones locales para establecer ajustes más precisos y apropiados con respecto a las condiciones reales de operación.

Función ANSI 50

La función 50 es para sobrecorriente instantánea, esta se activa de manera inmediata si la corriente en el sistema excede el valor establecido previamente. En esta función el circuito se abre de inmediato debido a la falta de temporización. Este tipo de protección se utiliza, sobre todo, en generadores y transformadores para protegerlos de fallos por cortocircuito.

Función ANSI 51

La función 51 es una protección con retardo que funciona después de un tiempo determinado o siguiendo una curva de tiempo inverso. Su objetivo es permitir que el sistema recupere estabilidad frente a aumentos temporales de corriente, como los que pueden ocurrir durante condiciones normales de operación. Esta protección se implementa en líneas de transmisión o distribución y se organiza con otros mecanismos de seguridad.

Función ANSI 50N

La función 50N proporciona protección instantánea contra sobrecorrientes en el neutro del sistema. Cuando esta detecta una corriente de falla en el neutro (falla a tierra, por ejemplo), se dispara.

Función ANSI 51N

La función 51N de sobrecorriente de tiempo inverso para falla a tierra (similar a la 51). Este tipo de protección se aplica en los casos en que las corrientes de falla son intermitentes o el sistema necesita un tiempo de espera antes de desconectar para evitar falsas actuaciones.

Coordinación de protecciones

Cuando se coordinan protecciones o **IED**, los criterios que se deben tener en cuenta son principalmente de tiempo y curva de operación. Para coordinar de manera correcta dos o más **IEDs** se deben coordinar sus tiempos de operación de tal manera que, ante una falla, el sistema la despeje sin causar daños a los equipos ni afectar a los usuarios conectados. Además, el tipo de curva, **ANSI** o **IEC**, determina el tiempo en que la protección debe actuar.

Condiciones básicas

En un sistema con dos o más protecciones, siempre existe un relé principal o de cabecera, del cual dependen los tiempos de actuación de los demás, que se representa de la siguiente manera:

$$t_{\text{primario}} < t_{\text{respaldo}} \quad (1)$$

Otro parámetro fundamental es el tiempo de paso (t_p), el cual garantiza que las protecciones dispongan de un margen que evite que actúen simultáneamente. Por esta razón, dicho tiempo se establece generalmente entre 200 ms y 600 ms. Dentro de este intervalo, las protecciones deben ajustarse cuidadosamente para asegurar su correcta actuación.

$$t_{\text{respaldo}} = t_{\text{primario}} + t_p \quad (2)$$

Tipo de curvas

También un punto importante es la curva de operación con la que se configuren en los relés, ya que de esto depende cómo temporizarán las actuaciones de cada Relé. Sin embargo para una buena coordinación, las curvas no deben cruzarse en la zona de corriente esperada, dejando un margen de tiempo seguro para evitar operaciones simultáneas no deseadas.

Estándar IEC 61850

El estándar IEC 61850 revolucionó la forma en que se comunican los sistemas de automatización de subestaciones. Este estándar define varios modelos que ofrecen estructuras de datos comunes y servicios de comunicación para permitir la interoperabilidad entre IED de diferentes fabricantes. Según Brunner [9], la IEC 61850 puede configurar muchas funciones de protección y control, lo que disminuye el cableado y mejora la comunicación a través de redes Ethernet.

Estándar IEEE C37.90

Esta norma establece los requisitos generales para los relés y sistemas de relés utilizados en la supervisión y protección de equipos eléctricos de potencia. Se describen las clasificaciones eléctricas y térmicas, los criterios de rendimiento y los métodos de prueba requeridos para garantizar el funcionamiento adecuado de estos aparatos, además de las condiciones estándar de operación. La finalidad primordial del estándar es asegurar la confiabilidad, la robustez y la interoperabilidad de los relés ante una variedad de situaciones ambientales y eléctricas, como descargas electrostáticas, interferencias electromagnéticas o sobretensiones transitorias [10].

Estándar IEEE C37.90.1

Se establecen dos tipos de pruebas de diseño para relés y sistemas de relés con el objetivo de analizar la robustez que estos dispositivos tienen ante transitorios eléctricos recurrentes. El estándar describe las propiedades del generador de pruebas, los tipos de onda utilizados, la elección de los terminales en los que se efectuarán las

pruebas, la metodología a seguir, los criterios para su aprobación y la documentación necesaria sobre los resultados alcanzados. Esta norma ha sido alineada con los estándares IEC y ha logrado un consenso a nivel internacional, además [11].

Estándar IEEE C37.233

El estándar describe diferentes metodologías y procedimientos de prueba aplicables a los componentes y funciones generales de los sistemas de protección y control. Se incluyen evaluaciones de los equipos que conforman el esquema de protección, los dispositivos de comunicación asociados, las fuentes de alimentación auxiliares y el control de los aparatos de potencia. La mayoría de las pruebas sigue un enfoque progresivo, verificando primero el desempeño individual de cada componente y posteriormente evaluando la interacción de los elementos integrados dentro del sistema según su función [12].

DIgSILENT PowerFactory®

DIgSILENT PowerFactory se ha establecido como uno de los instrumentos más utilizados para modelar, analizar y simular sistemas eléctricos de potencia. Esta aplicación ofrece la posibilidad de reproducir elementos reales del sistema, simular cortocircuitos y fallas, y también evaluar cómo se coordinan las protecciones. De acuerdo con Zamani, Sidhu y Yazdani [13], PowerFactory es un instrumento útil para verificar los ajustes de protección antes de aplicarlos en el campo, lo que permite optimizar la configuración de los IED y reducir posibles fallos operativos a futuro.

Capítulo 1

Recolección y Análisis de Datos

Técnicos

Para comenzar el desarrollo de este trabajo se obtuvieron y analizaron los datos ya sean brindados por la empresa o manuales de los dispositivos y programas.

Se realizó el análisis del diagrama unifilar del circuito en el que se desea trabajar, se observaron la cantidad de líneas, transformadores, fusibles, IEDs, entre otros.

1.1. Fuentes de Información Técnica

Como punto de partida, se recopiló información sobre los tipos de estructuras y la configuración de las líneas a partir del plano de alimentadores en AutoCAD, con el fin de identificar las estructuras utilizadas y sus respectivas distancias.

A partir de los tipos de estructuras identificadas, se consultó el Catálogo Digital de Unidades de Propiedad para analizar la configuración de cada una.

Por último se obtuvo por parte de la empresa CELEC SUR un archivo Word con parámetros de la subestación como:

- Conductores.
- Datos de los transformadores.
- Ajustes de protecciones.

- Niveles de cortocircuito.

1.1.1. Conductores

Se utilizó el catálogo de conductores de la empresa CABEL para el uso de conductores 1/0, 2/0 y 3/0 ya que estos son los que se utilizan en el sistema que se va a simular, a continuación se presenta la tabla en la figura 1.1 con las características de estos.

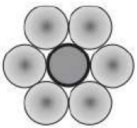
Cableado Aluminio/Acero	Código	Calibre AWG/ Kcmil	Diámetros (mm)					Peso(Kg/Km)			Carga de Rotura Kg	Resistencia (Ohm/Km)		Capacidad de Corriente	
			Hilos Individuales		Núcleo	Total	RMG	Al	Acero	Total		DC a 20°C(1)	AC a 75°C	A	kA
			Acero	Al							(2)				
 ME: 7757 CDL: 20,0	Swan/AW	4	2,12	2,12	2,12	6,36	2,05	58,1	23,2	81,3	809	1,280	1,563	145	3,2
	Sparrow/AW	2	2,67	2,67	2,67	8,01	2,58	92,3	36,9	129,3	1252	0,805	0,983	194	5,1
	Robin/AW	1	3,00	3,00	3,00	9,00	2,90	116,4	46,6	163,0	1565	0,638	0,779	225	6,4
	Raven/AW	1/0	3,37	3,37	3,37	10,11	3,25	146,8	58,7	205,6	1925	0,506	0,618	260	8,0
	Quail/AW	2/0	3,78	3,78	3,78	11,35	3,65	185,1	74,1	259,2	2329	0,401	0,490	301	10,1
	Pigeon/AW	3/0	4,25	4,25	4,25	12,74	4,10	233,5	93,4	326,8	2860	0,318	0,389	348	12,8
	Penguin/AW	4/0	4,77	4,77	4,77	14,31	4,61	294,4	117,8	412,1	3486	0,253	0,308	402	16,1

Figura 1.1: Tabla de conductores CABEL. [14]

1.1.2. Datos de Transformadores

Por parte de la empresa CELEC SUR se recibió un documento con todas las características de los transformadores que comprende el sistema del alimentador del circuito 2, donde el Transformador 1 será el transformador principal que parte de la subestación Porotillos administrada por CNEL, el Transformador 1 y 2 están ubicados en la Presa de Minas de San Francisco.

Los cuales tienen las siguientes propiedades:

- Transformador 1: 12.5 MVA; 69/22 kV.
- Transformador 2: 500kW; 22/0.48 kV.
- Transformador 3: 200kW; 22/0.48 kV.
- Transformador de voltaje: 22 kV

- Transformador de corriente: 300/5
- Transformador de corriente: 150/5

1.1.3. Ajustes de protecciones

La empresa CELEC SUR brindó los ajustes de protección actualmente implementados en el sistema que se estudia. Estos ajustes incluyen parámetros detallados relacionados con las funciones de sobrecorriente, sobrecarga, entre otros, configurados en los relés de protección de las distintas unidades del sistema. Sin embargo, debido a que esta información es considerada confidencial por la empresa al estar relacionada con la seguridad operativa de la red eléctrica, no es posible colocar los valores exactos de dichos parámetros en este documento.

1.1.4. Niveles de cortocircuito

En el caso de los niveles de cortocircuito del sistema, la empresa proporcionó los valores reales como parte del proceso de análisis. Sin embargo, al ser información confidencial al igual que los ajustes de protecciones está relacionada con la seguridad operativa y la configuración interna de la red, no es posible incluir los datos exactos en este documento. Aun así, estos datos fueron muy importantes para poder validar los ajustes de protección y verificar que la coordinación entre equipos sea adecuada ante diferentes escenarios de falla.

1.2. Selección de estructuras

Para la selección de las estructuras eléctricas necesarias en el proyecto, se tomó como referencia el plano proporcionado por la empresa CELEC SUR del sistema. Este plano contiene la ubicación física y funcional de los elementos del sistema eléctrico, lo cual permitió identificar con claridad los tipos de estructuras requeridas, dónde están ubicadas y la cantidad. Esta información fue fundamental para garantizar que la elección de las estructuras tenga sentido, se parezca a la realidad del sistema y cumpla con las especificaciones técnicas, cumpliendo las normativas vigentes.

Estas se eligieron en el catálogo del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ex MEER), de unidades de propiedad.

1.2.1. Estructura ESV-3CA

La estructura de la figura 1.2, ESV-3CA es una Trifásica-Centrada-Angular

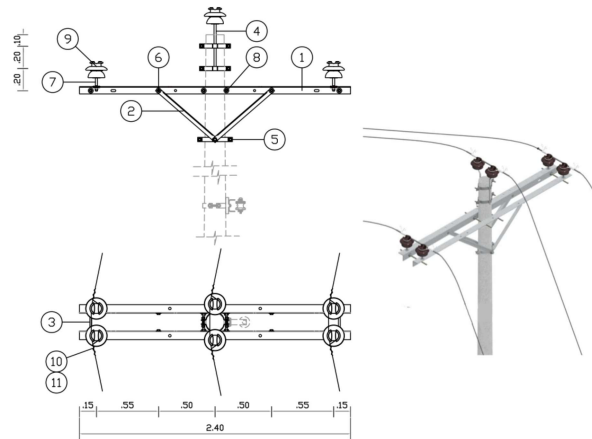


Figura 1.2: ESTRUCTURA ESV 3CA-22kV. [15]

1.2.2. Estructura ESV-3CD

La estructura de la figura 1.3, ESV-3CD es una Trifásica-Centrada-Doble Retención.

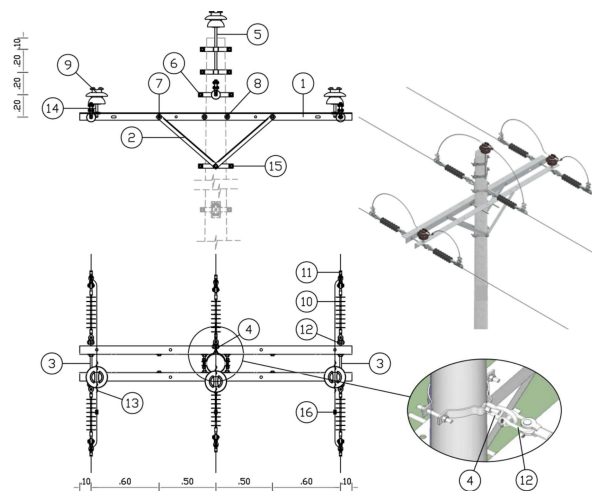


Figura 1.3: ESTRUCTURA ESV 3CD-22KV. [15]

1.2.5. Estructura ESV-3VA

La estructura de la figura 1.6, ESV-3VA es una Trifasica-En Volado-Angular.

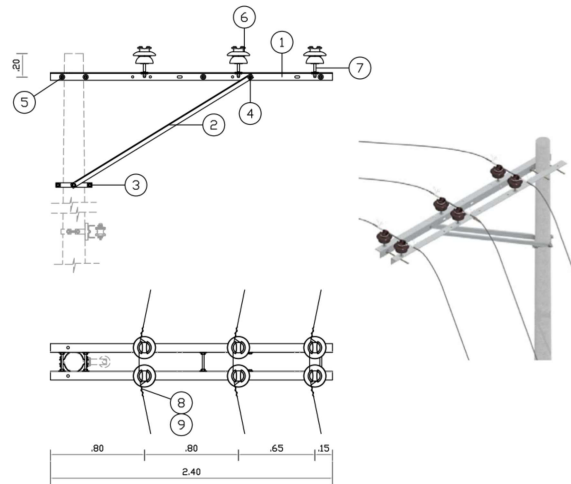


Figura 1.6: ESTRUCTURA ESV 3VA-22KV. [15]

1.3. Selección de Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs)

En esta parte se presentarán los Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IEDs) que la empresa CELEC SUR emplea en el sistema eléctrico del proyecto. Estos dispositivos son la base principal de la seguridad, el control y la monitorización de la red para una operación más segura y confiable. A continuación, se describen los IEDs que la empresa emplea, junto con su función y especificaciones técnicas.

1.3.1. SEL-787

El relé presentado en la figura 1.7, es el SEL-787, el cual es un dispositivo multifunción diseñado principalmente para proteger transformadores de potencia. Este ofrece funciones de monitoreo térmico del transformador, detección de desequilibrio y funciones de sobrecorriente (50/51). En este estudio, el empleo de estos brinda una protección eficaz y confiable a los transformadores.



Figura 1.7: Relé SEL-787

1.3.2. SEL-351

El relé presentado en la figura 1.8, el SEL-351, este es un IED comúnmente utilizado en redes de distribución para la protección de alimentadores, el cual incluye funciones de sobrecorriente direccional (67), fallas a tierra, entre otras. Este relé combina protección, control y monitoreo en un solo equipo, esto simplifica y mejora la capacidad de respuesta del sistema ante fallas.



Figura 1.8: Relé SEL-351

1.3.3. Sifang-CSC-211

El CSC-211 de Sifang mostrado en la figura 1.9, es un relé digital de protección multifunción diseñado para aplicarse en media tensión. Entre sus funciones más comunes se encuentran la sobrecorriente de fase y neutro (50/51, 50N/51N). Es compatible con protocolos de comunicación como IEC 60870-5-103 y Modbus. [16]



Figura 1.9: Relé Sifang-CSC-211

Capítulo 2

Diseño y Simulación del Sistema del Alimentador 2

En este capítulo se realizará la simulación del sistema propuesto utilizando los programas especializados DIgSILENT PowerFactory y AutoCAD. El objetivo principal de esta parte es realizar la representación real y detallada del sistema con sus condiciones operativas normales y de contingencia. Utilizando estas herramientas, se podrán modelar de manera precisa los componentes, observar el comportamiento del sistema y validar los ajustes establecidos en el diseño.

2.1. Modelado de la Red

A partir del plano brindado por la empresa en el programa AutoCAD, se procedió a modelar la red eléctrica en el programa PowerFactory como se puede observar de la figura 2.1, teniendo en cuenta la disposición de los elementos, las características topológicas del sistema. Este plano sirvió como base para saber con precisión la ubicación de transformadores, líneas, barras, interruptores, entre otros componentes del sistema, de esta forma permitiendo una representación realista del entorno real. Asimismo, se consideraron las distancias entre tramos de línea y longitudes reales, lo que permitió ajustar los parámetros de cada segmento. Esta metodología asegura que el modelo simulado evidencie de manera realista la configuración del sistema, lo cual es fundamental para realizar análisis precisos de

flujo de carga, cortocircuito y coordinación de protecciones.

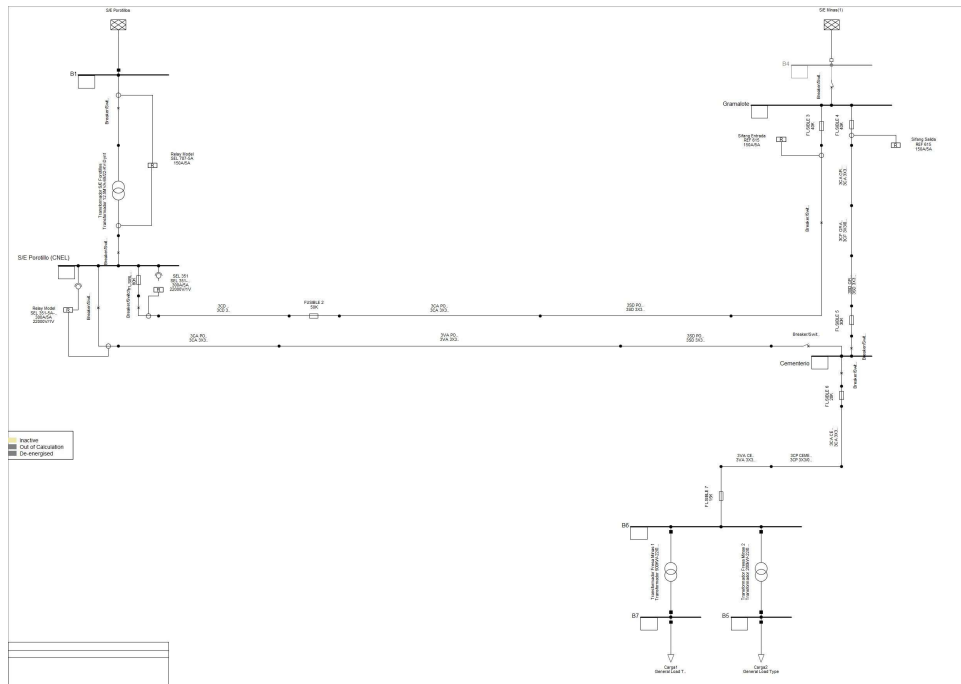


Figura 2.1: Diagrama unifilar del sistema

2.2. Creación de las librerías para elementos del sistema

Para el desarrollo del diseño en PowerFactory, fue necesario crear librerías propias que incluyeran los diferentes elementos eléctricos que tiene el sistema, tales como conductores, transformadores, estructuras y dispositivos de protección. Estas librerías fueron creadas a partir de los datos técnicos proporcionados por la empresa, manuales y catálogos, permitiendo determinar con precisión parámetros como impedancia, capacidad de corriente, tipo de conexión y características físicas. Esta parametrización garantiza que los elementos de la red simulada reflejen las condiciones reales del sistema, facilitando un análisis preciso y confiable.

2.2.1. Configuración de líneas y estructuras

Debido a que en el plano proporcionado por la empresa están ya especificados los tipos de conductores, así como las estructuras utilizadas en el sistema, fue posible utilizar esta información para crear librerías dentro del entorno de simulación. Se

incluyeron los distintos tipos de conductores indicados previamente, incluyendo sus características eléctricas como sección transversal, material, resistencia, reactancia y niveles de corriente, lo que permitió representar de manera precisa el comportamiento del sistema ante distintas condiciones operativas.

Conductor 1/0 ACSR Se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación de la figura 2.2.

Field	Value	Unit
Name	1/0 ACSR	
Rated Voltage	24	kV
Rated Current	0,241	kA
Number of Subconductors	1	
Conductor Model	Solid Conductor	
DC-Resistance (20°C)	0,522	Ohm/km
GMR (Equivalent Radius)	3,25	mm
Outer Diameter	10,11	mm

Figura 2.2: Datos conductor 1/0 ACSR

Conductor 2/0 ACSR En la figura 2.3 incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Field	Value	Unit
Name	2/0 ACSR	
Rated Voltage	24	kV
Rated Current	0,275	kA
Number of Subconductors	1	
Conductor Model	Solid Conductor	
DC-Resistance (20°C)	0,414	Ohm/km
GMR (Equivalent Radius)	3,65	mm
Outer Diameter	11,35	mm

Figura 2.3: Datos conductor 2/0 ACSR

Conductor 3/0 ACSR En la figura 2.4 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Field	Value	Unit
Name	3/0 ACSR	
Rated Voltage	24	kV
Rated Current	0,313	kA
Number of Subconductors	1	
Conductor Model	Solid Conductor	
(Sub-)Conductor		
DC-Resistance (20°C)	0,328	Ohm/km
GMR (Equivalent Radius)	4,1	mm
Outer Diameter	12,74	mm
Skin effect	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 2.4: Datos conductor 3/0 ACSR

De esta misma forma, se generaron en la librería las estructuras mencionadas anteriormente, con configuraciones específicas utilizadas en el montaje físico de la red. Esto permitió una mayor exactitud en la representación de la red, lo que resulta clave al momento de realizar análisis técnicos.

Estructura ESV-3CA En la figura 2.5 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Coordinate of Line Circuits [m]						
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Circuit 1	-1,05	0,	1,05	10,6	11,1	10,6

Coordinate of Earth Conductors [m]		
	X	Y
Earth Conductor 1	0,	9,1

Figura 2.5: Datos estructura ESV-3CA

Estructura ESV-3CD Se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación en la figura 2.6.

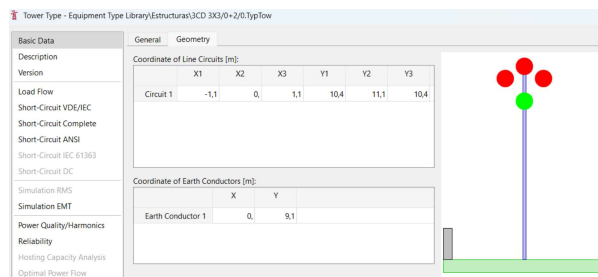


Figura 2.6: Datos estructura ESV-3CD

Estructura ESV-3CP En la figura 2.7 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

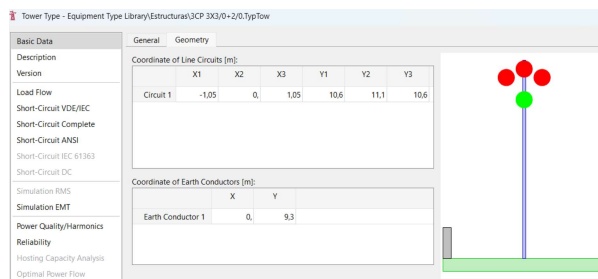


Figura 2.7: Datos estructura ESV-3CP

Estructura ESV-3SD En la figura 2.8 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

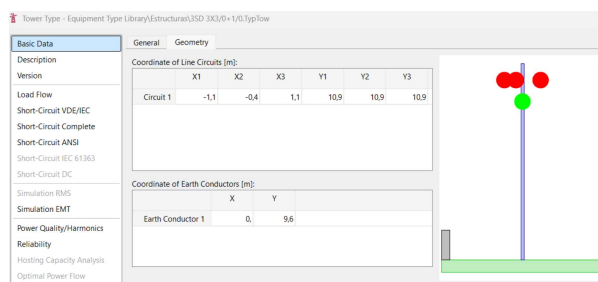


Figura 2.8: Datos estructura ESV-3SD

Estructura ESV-3VA En la figura 2.9 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

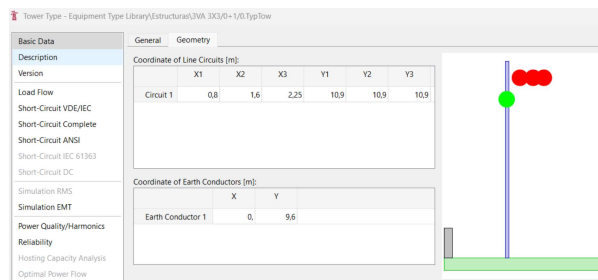


Figura 2.9: Datos estructura ESV-3VA

2.2.2. Configuración de Transformadores

En esta sección se describe el proceso de configuración de los transformadores dentro del entorno de simulación, utilizando los datos técnicos reales proporcionados por la empresa. Entre los parámetros ingresados se incluyen los voltajes de transformación, la potencia nominal y otras características eléctricas importantes, esto permite modelar con precisión el comportamiento de cada transformador dentro del sistema.

Transformador 12.5 MVA En la figura 2.10 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

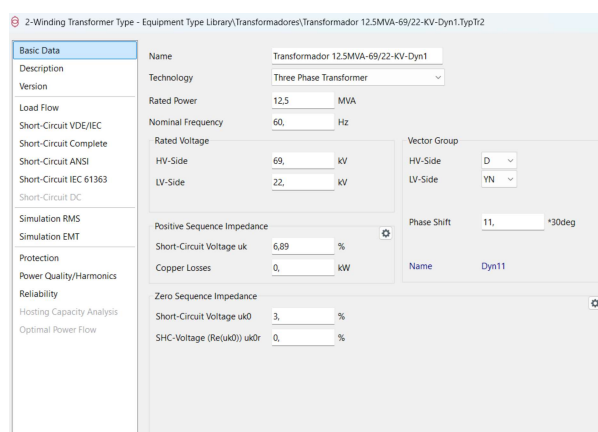


Figura 2.10: Datos Transformador 12.5 MVA

Transformador 500 kW En la figura 2.11 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library/Transformadores/Transformador 500kW-22/0.48KV-Dyn1.TypeTr2

Field	Value
Name	Transformador 500kW-22/0.48KV-Dyn1
Technology	Three Phase Transformer
Rated Power	0.5 MVA
Nominal Frequency	60 Hz
Rated Voltage HV-Side	22 kV
Rated Voltage LV-Side	0.48 kV
Vector Group HV-Side	D
Vector Group LV-Side	YN
Phase Shift	1 *30deg
Positive Sequence Impedance Short-Circuit Voltage uk	5.91 %
Copper Losses	0 kW
Zero Sequence Impedance Short-Circuit Voltage uk0	3 %
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0 %

Figura 2.11: Datos Transformador 500 KW

Transformador 200 kW En la figura 2.12 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library/Transformadores/Transformador 200kW-22/0.48KV-Dyn1.TypeTr2

Field	Value
Name	Transformador 200kW-22/0.48KV-Dyn1
Technology	Three Phase Transformer
Rated Power	0.2 MVA
Nominal Frequency	60 Hz
Rated Voltage HV-Side	22 kV
Rated Voltage LV-Side	0.48 kV
Vector Group HV-Side	D
Vector Group LV-Side	YN
Phase Shift	1 *30deg
Positive Sequence Impedance Short-Circuit Voltage uk	5.81 %
Copper Losses	0 kW
Zero Sequence Impedance Short-Circuit Voltage uk0	3 %
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r	0 %

Figura 2.12: Datos Transformador 200 KW

Transformador de potencia 22kV En la figura 2.13 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Primary Taps (L-L)	
V	
1	22000,

Figura 2.13: Datos TP 22kv

Transformador de corriente 300/5 En la figura 2.14 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Primary Taps A	
1	300,

Secondary Taps A	
1	5,

Figura 2.14: Datos TC 300/5

Transformador de corriente 150/5 En la figura 2.15 se incluye una imagen de la introducción de los datos en la simulación.

Primary Taps A	
1	150,

Secondary Taps A	
▶ 1	5,

Figura 2.15: Datos TC 150/5

2.2.3. Configuración de Fusibles

En esta sección se presentan los fusibles utilizados en el sistema como se puede observar en la tabla 2.1, con base en la información técnica proporcionada por la empresa. Se definieron las características eléctricas principales, como la corriente nominal y la clase, la cual es una clasificación que indica sus características de operación en cuanto a su tiempo de respuesta frente a sobrecorrientes, capacidad de interrupción y uso dentro del sistema eléctrico.

Tabla 2.1: Fusibles utilizados en la simulación del sistema.

Ubicación	Tipo	Corriente[A]
1	K	80
2	K	50
3	K	40
4	K	40
5	K	30
6	K	20
7	K	15

2.2.4. Configuración de IEDs

En esta sección se explica el uso y configuración de los IEDs utilizados en la red modelada, basándose en los equipos reales ocupados por la empresa. Los cuales incluyen los parámetros esenciales como funciones de protección (50, 51, 50N, 51N), tiempos de disparo, curvas de operación y coordinación con otros dispositivos. En este caso se emplearon cinco IEDs en la simulación. 3 de ellos, correspondientes a la marca SEL, se encuentran disponibles en las bibliotecas de PowerFactory, por lo que su integración al modelo fue directa. En cambio, para representar los 2 IEDs de la marca SIFANG, se optó por utilizar un equipo ABB-REF615 que presenta características similares, brindando así una aproximación adecuada en la simulación del sistema.

Para poder crear las librerías de los IEDs se revisaron los manuales existentes para verificar las ecuaciones y curvas existentes. [16]

SEL-787

SEL-351

- Se incluye la figura 2.16 de la parametrización inicial de los IEDs brindada por la empresa.

ITEM	NOMBRE	MODELO RELÉ	NIVEL DE TENSIÓN	RTC	AJUSTES DE SOBRECORRIENTE				
					FUNCIÓN	ESTADO	TAP [A]	TD [SEG]	CURVA
1	ONEL UN EOR SUBESTACIÓN LA PEÑA	ARCTEQ AQ-F215	69	300/5	51	HABILITADO	159	0,2	IECVI
					50	HABILITADO	2601	0	INSTANTÁNEO
					51N	HABILITADO	120	0,3	IECVI
					50N	HABILITADO	1719	0	T. DEFINIDO
					51	HABILITADO	105	0,26	SEL C2
2	ENTRADA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	69	150/5	51	HABILITADO	1800	0	INSTANTÁNEO
					51N	HABILITADO	60	0,1	SEL C2
					50N	HABILITADO	1100	0	INSTANTÁNEO
					51	HABILITADO	325	0,22	SEL C2
					50	DES-HABILITADO	-	-	-
3	SALIDA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	22	300/5	51N	HABILITADO	265	0,28	SEL C2
					50N	DES-HABILITADO	-	-	-
					51	HABILITADO	215	0,14	SEL C2
					50	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
					51N	HABILITADO	155	0,17	SEL C2
4	ALIMENTADOR ENERUBONES 1	SEL-351	22	300/5	50N	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
					51	HABILITADO	215	0,16	SEL C2
					50	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
					51N	HABILITADO	155	0,23	SEL C2
					50N	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
5	ALIMENTADOR ENERUBONES 2	SEL-351	22	300/5	51	HABILITADO	215	0,16	SEL C2
					50	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
					51N	HABILITADO	155	0,23	SEL C2
					50N	HABILITADO	2500	0	INSTANTÁNEO
					51	HABILITADO	215	0,16	SEL C2

Figura 2.16: Configuraciones iniciales SEL 787 y 351

Sifang-CSC-211 En estos dispositivos se tienen 2 con las mismas configuraciones, como se puede ver en las Figuras 2.17 y 2.18, uno a la entrada de la barra y otro a la salida.

Nombre del elemento de configuración	Rango de ajuste	Valor de ajuste
Protección de sobre corriente 50/51		
Valor constante de segmento 1 de sobre corriente	0.05~100 A	N/A
Tiempo de segmento 1 de sobre corriente	0.00~100.00 s	N/A
Valor constante de segmento 2 de sobre corriente	0.05~100 A	N/A
Tiempo de segmento 2 de sobre corriente	0.00~100.00 s	N/A
Curva de tiempo inverso de segmento 2 de sobre corriente	1~11	N/A
Constante K de tiempo inverso de segmento 2 de sobre corriente	0.025~1.5	N/A
Valor constante de segmento 3 de sobre corriente	0.05~100 A	4.255A
Tiempo de segmento 3 de sobre corriente	0.00~100.00 s	2.0s
Curva de tiempo inverso de segmento 3 de sobre corriente	1~11	1
Constante K de tiempo inverso de segmento 3 de sobre corriente	0.025~1.5	0.025

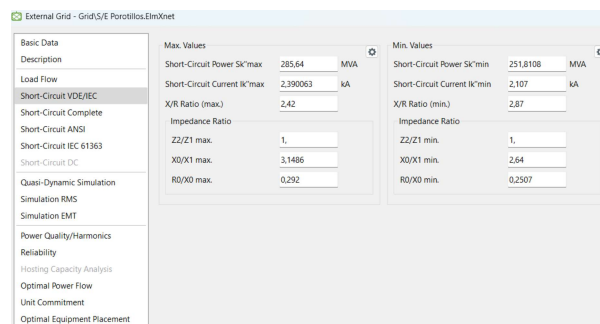
Figura 2.17: Función 51 IEDs Sifang-CSC-211

Sobre corriente de secuencia cero 50N/51N		
Valor constante de segmento 1 de sobre corriente de secuencia cero	0.05~100 A	N/A
Tiempo de segmento 1 de sobre corriente de secuencia cero	0.00~100.00 s	N/A
Valor constante de segmento 2 de sobre corriente de secuencia cero	0.05~100 A	4.95A
Tiempo de segmento 2 de sobre corriente de secuencia cero	0.00~100.00 s	1.5s
Curva de tiempo inverso de segmento 2 de sobre corriente de secuencia cero	1~11	1
Constante K de tiempo inverso de segmento 2 de sobre corriente de secuencia cero	0.025~1.5	0.025

Figura 2.18: Función 51N IEDs Sifang-CSC-211

2.2.5. Niveles de máxima y mínima generación

Se incluye la figura 2.19 con los datos de máxima y mínima generación utilizados para la simulación del sistema, los cuales fueron proporcionados por la empresa.

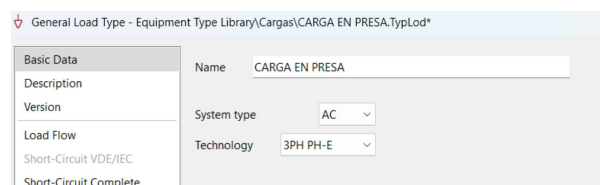


Parameter	Max. Value	Min. Value
Short-Circuit Power SK*max	285.64 MVA	251.8108 MVA
Short-Circuit Current Ik*max	2.390063 kA	2.107 kA
X/R Ratio (max.)	2.42	2.87
Impedance Ratio		
Z2/Z1 max.	1	1
X0/X1 max.	3.1486	2.64
R0/X0 max.	0.292	0.2507

Figura 2.19: Niveles de máxima y mínima generación

2.2.6. Carga del sistema

En la figura 2.20 incluyen los datos de la carga que se tiene.



Field	Value
Name	CARGA EN PRESA
System type	AC
Technology	3PH PH-E

Figura 2.20: Carga del sistema

2.3. Flujo de potencia

Después de haber creado las librerías y asignado correctamente estos datos a los elementos del sistema modelado, se procedió a realizar el flujo de potencia en el entorno de PowerFactory. Este estudio permite evaluar el comportamiento operativo del sistema en condiciones normales, entregando información como tensiones y corrientes en líneas. Estos resultados son esenciales para confirmar la operación y el dimensionamiento adecuado de la red simulada en las figuras. 2.21 y 2.22.

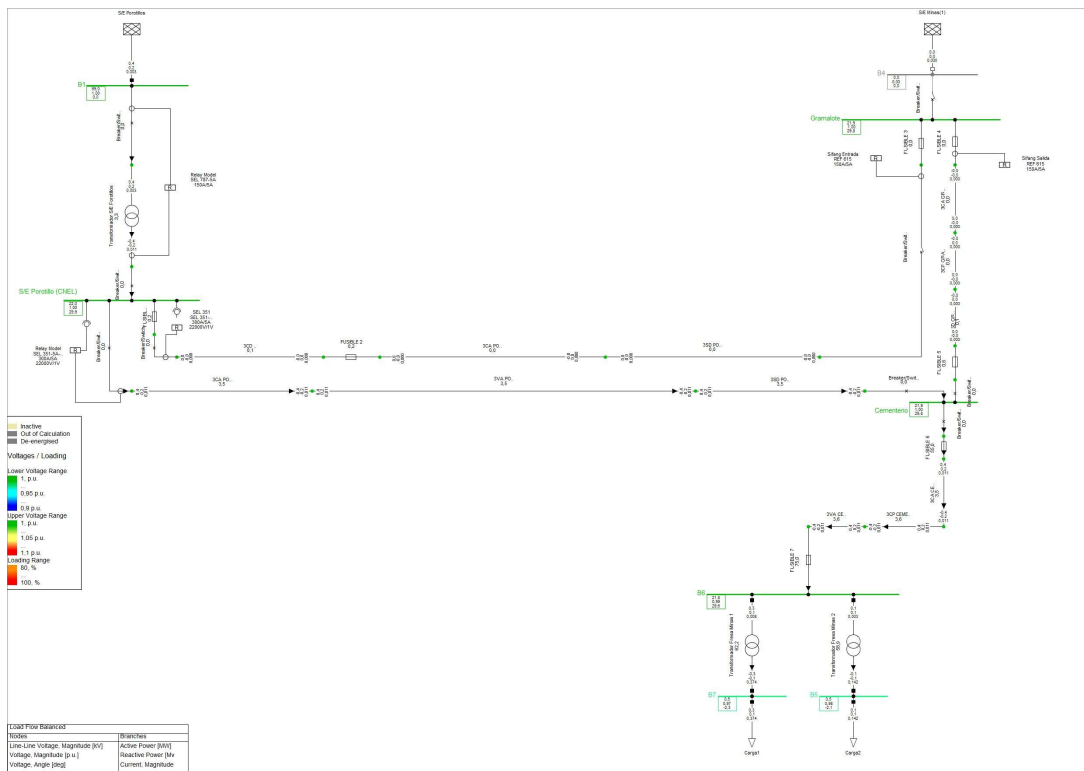


Figura 2.21: Flujo de potencia del Circuito 1

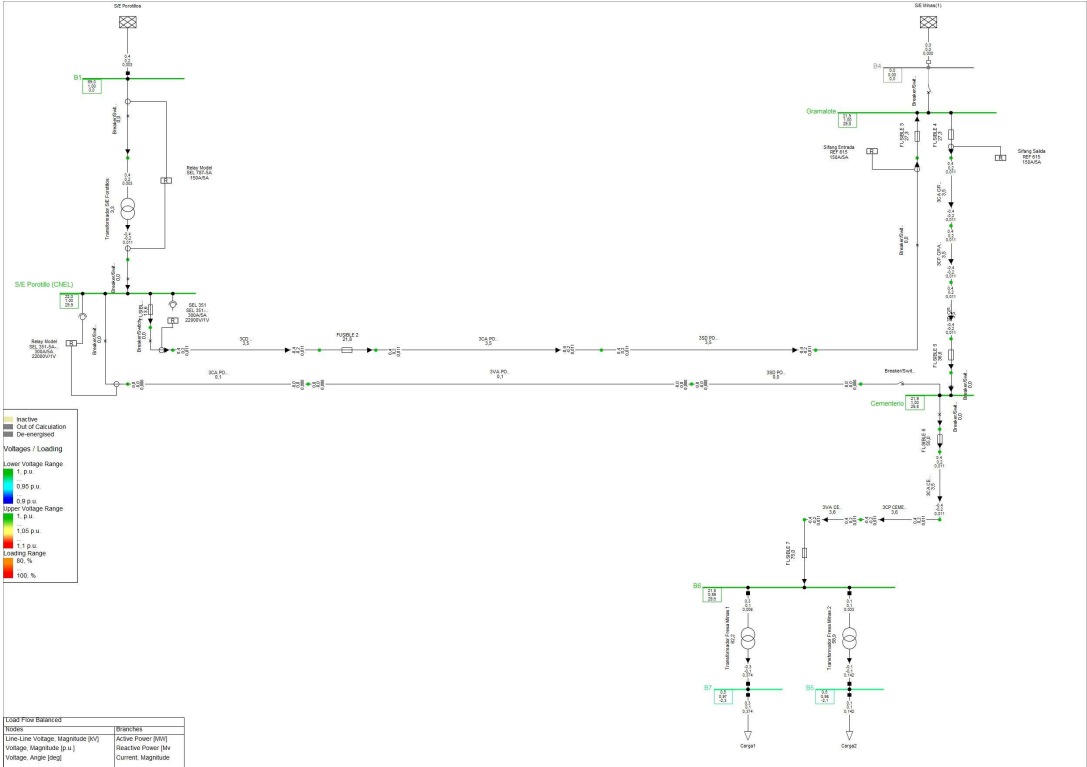


Figura 2.22: Flujo de potencia del Circuito 2

Capítulo 3

Validación de Ajustes de Protección en IEDs

En esta última etapa se validan los ajustes de protección configurados en los IEDs del sistema. Para ello, se volverá a correr la simulación anterior, pero esta vez con los parámetros reales de funcionamiento. "Verificar que las protecciones actúen ante fallas como cortocircuitos, de acuerdo a los criterios técnicos de diseño de acuerdo a la normativa y buena práctica de ingeniería". Si se encuentran configuraciones incorrectas y anomalías en los tiempos de operación o falta de coordinación entre dispositivos, se sugerirán nuevos ajustes para asegurar la operación segura y confiable del sistema eléctrico.

3.1. Método para simulación de cortocircuitos

El proyecto utilizó el método "completo" para simular cortocircuitos, un método de cálculo utilizado en DIGSILENT PowerFactory para evaluar corrientes de cortocircuito en sistemas de potencia eléctrica. El cálculo se realiza en dos pasos:

- **Establecimiento de las condiciones iniciales:** Se realiza un flujo de carga que proporciona la condición de antes de la falla, obteniendo los valores de tensión, corriente y potencia en cada nodo y elemento de la red. Esto asegura que el análisis se base en las condiciones reales de operación del sistema antes del cortocircuito.
- **Cálculo de falla:** Después de definir las condiciones iniciales, el método aplica el modelo de cortocircuito requerido para simular la falla (trifásica, monofásica, bifásica, etc.) y determinar las corrientes de falla, considerando la contribución de todas las fuentes presentes en el sistema.

Debido a esto, el método completo ofrece resultados más precisos en circunstancias en las cuales no se pueda anticipar el estado del sistema en condiciones ideales o de tensión nominal, esto permite un análisis más realista con fines de diseño, operación y protección.

3.2. Validación de los ajustes

Después de realizar el flujo de potencia utilizando los ajustes de protección proporcionados por la empresa, se procederá a simular distintos escenarios de cortocircuito en el sistema modelado. El propósito de estas simulaciones es evaluar el comportamiento de las protecciones ante fallas y determinar si los ajustes actuales son adecuados o si existen inconsistencias que puedan estar asociadas a otros factores del circuito, como configuraciones incorrectas en los dispositivos o deficiencias en la coordinación entre protecciones.

3.2.1. Curvas del flujo de Potencia

Curvas del flujo de Potencia circuito 1 Se corrió un flujo de potencia utilizando el circuito 1 donde se pueden observar las curvas de los IEDs y su corriente, que son 10.785 amperios primarios, como se puede ver en la figura 3.1.

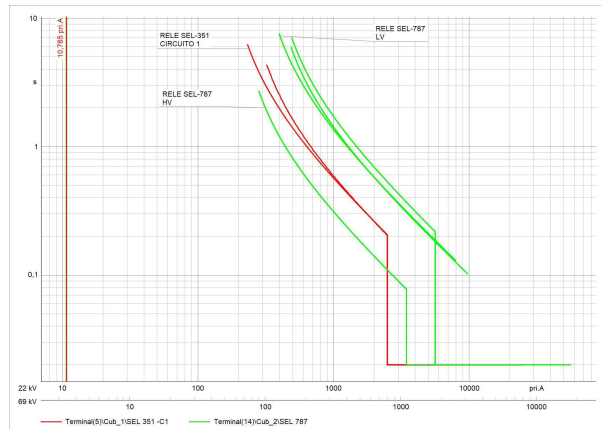


Figura 3.1: Curvas del flujo de Potencia circuito 1

Curvas del flujo de Potencia circuito 2 En la figura 3.2 corrió un flujo de potencia cerrando el circuito 2 donde se pueden observar las curvas de los IEDs y su corriente que son 10.910 amperios primarios.

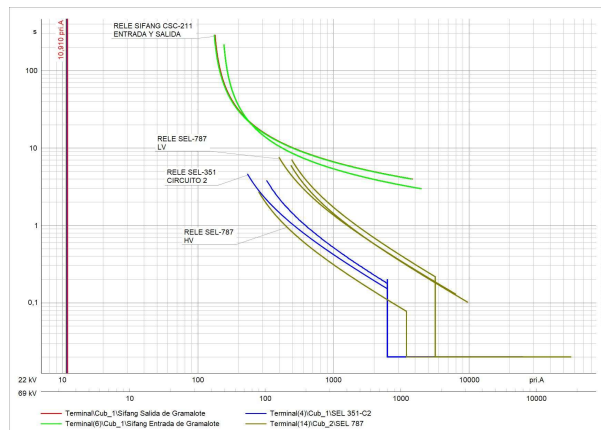


Figura 3.2: Curvas del flujo de Potencia circuito 2

3.2.2. Curvas de Cortocircuito trifásico

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra del Transformador Se realizó un cortocircuito trifásico en el lado de baja tensión del transformador, el cual tiene una corriente de CC de 2858.990 amperios primarios, también se observan en la figura 3.3. Los tiempos de actuación de los relés en **AT**: 0.457 segundos y en **BT**: 0.381 segundos.

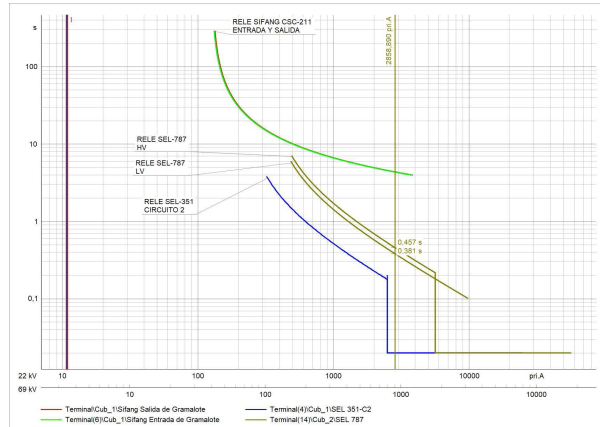


Figura 3.3: Curvas de CC3F en la barra del Transformador

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de de Gramalote En la barra de Gramalote se simuló un CC3F como se puede ver en la figura 3.4, se obtuvo una corriente de CC de 1263.893 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:1.234 s, BT:1.027 s y Sifang-CSC-211 de entrada y salida en 5.964 s.

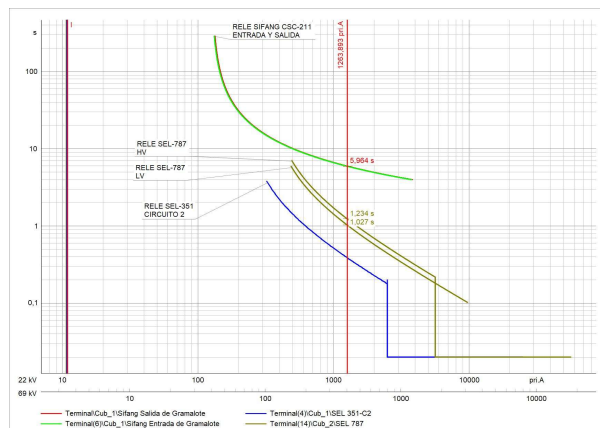


Figura 3.4: Curvas de CC3F en la barra de Gramalote

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 1 En la barra de Cementerio se simuló un CC3F cerrando el circuito 1, como se observa en la figura 3.5, se obtuvo una corriente de CC de 1581.970 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:0.923 s, BT:0.769 s.

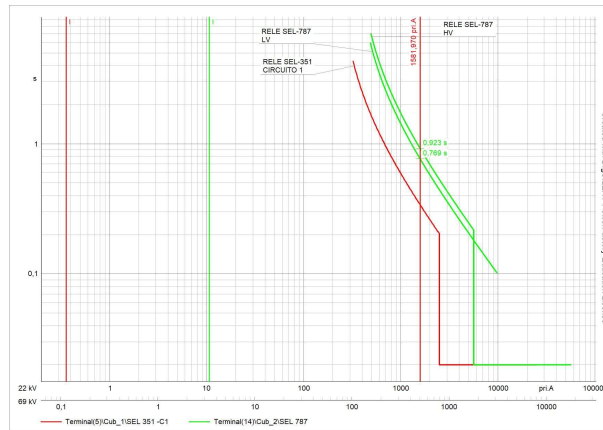


Figura 3.5: Curvas de CC3F en la barra de Cementerio C1

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 2 Ahora se realizó el mismo CC en la barra de Cementerio pero en el circuito 2, figura 3.6, con una corriente de 1337.310 amperios primarios, donde actuaron los dispositivos SEL-787 en 0.935 s, SEL-351 del circuito 2 en 0.302 s y Sifang-CSC-211 de entrada y salida en 4.673 s.

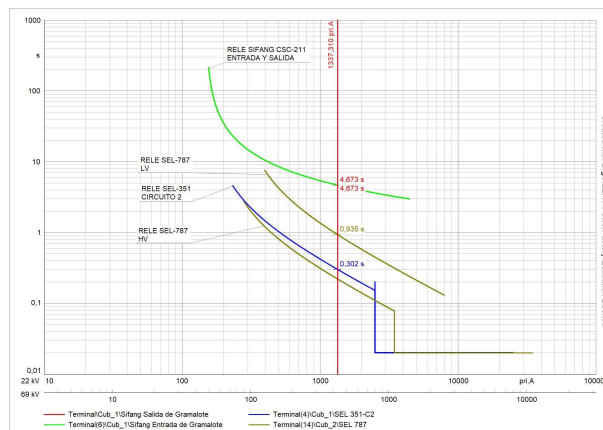


Figura 3.6: Curvas de CC3F en la barra de Cementerio C2

3.2.3. Curvas de Cortocircuito monofásico

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra del Transformador En este caso se corrió un CC1F en el lado de baja del transformador con una corriente de 3797.586 amperios primarios donde actúa el dispositivo SEL-787 con un tiempo de 0.284 s, lo cual se puede observar en la figura 3.7.

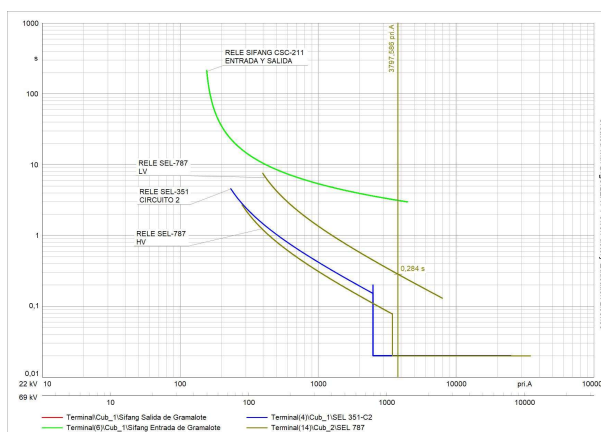


Figura 3.7: Curvas de CC1F en la barra del transformador

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de Gramalote Se realizó un CC1F en la barra de Gramalote con una corriente de 1026.061 amperios primarios los cuales se presentan en la figura 3.8, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 1.317 s y Sifang-CSC-211 de entrada y salida en 5.328 s.

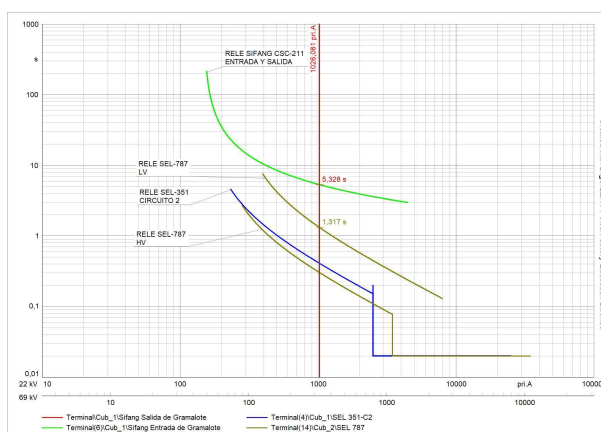


Figura 3.8: Curvas de CC1F en la barra de Gramalote

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 1 Al realizar CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 1 se obtienen corrientes de 799.810 y 1377.504 amperios primarios, se pueden ver en la figura 3.9 aquí actúan los dispositivos SEL-787 en AT: 2.457 s, BT: 0.918 s y SEL-351 (C1) a 0.400 s.

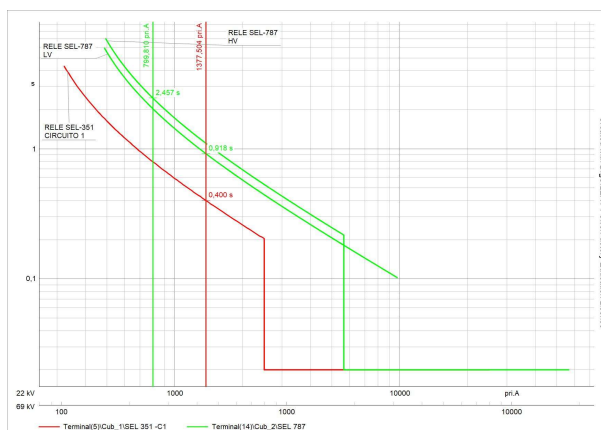


Figura 3.9: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 2 Por último, se presenta la figura 3.10 donde se simuló un CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 2. Se observa una corriente de 1337.310 amperios primarios de tierra y fase, respectivamente, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 0.935 s, SEL-351 (C2) en 0.302 s, también los 2 SIFANG-CSC-211 de entrada y salida con un tiempo de 4.763 s.

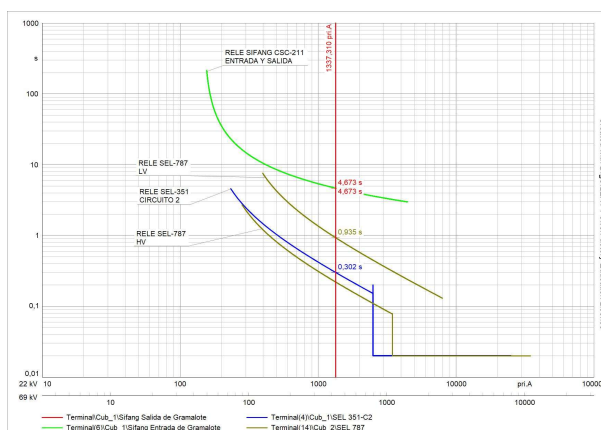


Figura 3.10: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2

Después de analizar los diferentes escenarios de cortocircuito, se identificó una configuración incorrecta en los ajustes de protección, situación que también fue mencionada por el representante de la empresa. Especialmente, en las barras de Gramalote y Cementerio, como se pueden observar en las curvas de los gráficos 3.4 y 3.6, ante la ocurrencia de una falla, el IED de cabecera (SEL-351) actúa inmediatamente, mientras que los CSC-211 asociados actúan con un retardo aproximado de cinco segundos. Al contar con configuraciones similares, se evidencia también una falta de coordinación entre los dispositivos, lo cual compromete la selectividad y eficiencia del ajuste de protecciones implementado.

3.3. Propuesta 1: Nuevos ajustes para los IEDs

Luego de observar el comportamiento de los dispositivos ante distintos escenarios de falla, se procedió a realizar nuevos ajustes de protección. Para ello, se realizaron los respectivos cálculos utilizando las corrientes de cortocircuito obtenidas y las corrientes a las que trabaja el sistema, con el objetivo de establecer mejores tiempos de actuación y una adecuada coordinación entre los IEDs. A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar los nuevos parámetros de ajuste propuestos donde también se cambiarán las curvas y corrientes.

3.3.1. Cálculos para IED SEL-351 del circuito 2

Datos:

- I_{max} : 313 A (Ampacidad del conductor 3/0)
- I_{fmax} : 0.011 kA = 11 A (Corriente nominal del sistema)
- RTC: 60
- Dial (51): 6.8 seg
- Dial (50): 0.58 seg
- Dial (51N): 5.8 seg

- Dial (50N): 0.46 seg
- Curva (51): U3-U.S. VERY INVERSE
- Curva (51N): U3-U.S. VERY INVERSE

Calculo Función 51:

$$I_{pickup} : TD(1,1 - 1,4) * I_{fmax} \quad (3.1)$$

$$I_{pickup} : 1,3 * 11 = 14,3 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{A_{primarios}}{RTC} \quad (3.2)$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{14,3}{60} = 0,24 \text{ A Secundarios}$$

Al observar que el TC está sobredimensionado, no se pueden utilizar estos valores por lo tanto se considera una corriente máxima del flujo que son 36A y una curva moderadamente inversa. por lo tanto tenemos I_{pickup} : 36A

Calculo Función 51N:

$$I_{pickup} : TD(0,1 - 0,4) * I_{fmax} \quad (3.3)$$

$$I_{pickup} : 0,3 * 14,3 = 4,3 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{4,3}{60} = 0,0071 \text{ A Secundarios}$$

De igual manera para la función 51N como la corriente mínima en Asec que nos deja introducir el IED son 0.5 Asec o 30 Apri esta se la dejo al mínimo, dejando así la corriente 51>51N.

Calculo Función 50 (CC3F):**Datos:**

- Ikss: 1.945 kA

$$I_{pickup} : TD(1,1 - 1,4) * Ikss \quad (3.4)$$

$$I_{pickup} : 1,3 * 1,945 \text{ kA} = 2,5285 \text{ kA primarios}$$

$$\text{kA Secundarios} = \frac{2,5285 \text{ kA}}{60} = 42,14 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50N (CC1F):**Datos:**

- Ikss: 1.934 kA

$$I_{pickup} : 1,3 * 1,934 \text{ kA} = 2,5142 \text{ kA primarios}$$

$$\text{A Secundarios} = \frac{2,5142 \text{ kA}}{60} = 41,9 \text{ A Secundarios}$$

3.3.2. Cálculos para IED SEL-351 del circuito 1

Para este relé solo se cambiaron las funciones 50 y 50N ya que tiene la misma corriente y parámetros del IED del circuito 2

Datos:

- Ikss: 1.52 kA
- Dial (51): 4 seg
- Dial (50): 0.33 seg
- Dial (51N): 3 seg
- Dial (50N): 0.25 seg

Calculo Función 50 (CC3F):

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,52 \text{ kA} = 1,812 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{1,812 \text{ kA}}{60} = 30,2 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50N (CC1F):**Datos:**

- Ikss: 1.326 kA

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,326 \text{ kA} = 1,591 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{1,591 \text{ kA}}{60} = 26,52 \text{ A Secundarios}$$

3.3.3. Cálculos para IED Sifang-CSC-211 de la entrada y salida de la barra de Gramalote

Datos:

- I_{max}: 313 A (Ampacidad del conductor 3/0)
- I_{fmax}: 0.011 kA = 11 A (Corriente nominal del sistema)
- RTC: 30
- Dial Entrada (51): 0.15 seg
- Dial Salida (51): 0.05 seg
- Dial Entrada (51N): 0.15 seg
- Dial Salida (51N): 0.05 seg
- Curva Entrada : IEC NORM. INV.
- Curva Salida : IEC NORM. INV.

Calculo Función 51:

$$I_{pickup} : 1,4 * 11 = 15,4 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{15,4}{30} = 0,51 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 51N :

$$I_{pickup} : 0,3 * 15,4 = 4,62 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{4,62}{30} = 0,154 \text{ A Secundarios}$$

3.3.4. Cálculos para IED SEL-787 del transformador**Lado de alta (HV)****Datos:**

- Potencia: 12.5 MVA
- Voltaje: 69 kV
- RTC: 30
- Dial (51): 7 seg
- Dial (50): 1.82 seg
- Dial (51N): 9 seg
- Dial (50N): 1.52 seg
- Curva: IEC NORM. INV.

Calculo de In:

$$I_n = \frac{12,5 \text{ MVA}}{69 \text{ kV} * \sqrt{3}} = 104,59 \text{ A}$$

Calculo Función 51:

$$\text{Factor de sobrecarga (Fs)} * I_n \quad (3.5)$$

$$I_{pickup} : 1,1 * 104,59 = 115,05 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{115,05}{30} = 3,83 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 51N :

$$I_{pickup} : 0,3 * 115,05 = 34,515 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{34,115}{30} = 1,15 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50 (CC3F):**Datos:**

- Ikss: 353 A

$$I_{pickup} : 1,2 * 353 \text{ A} = 423,6 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{423,6 \text{ A}}{30} = 14,12 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50N (CC1F):**Datos:**

- Ikss: 216 A

$$I_{pickup} : 1,2 * 216 \text{ A} = 259,2 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{259,2 \text{ kA}}{30} = 8,64 \text{ A Secundarios}$$

Lado de baja (LV)**Datos:**

- Potencia: 12.5 MVA
- Voltaje: 22 kV
- RTC: 30
- Dial (51): 3.5 seg
- Dial (51N): 4.5 seg
- Curva: U1-U.S. MODERATELY INVERSE

Calculo de In:

$$I_n = \frac{12,5 \text{ MVA}}{22 \text{ kV} * \sqrt{3}} = 328,03 \text{ A}$$

Calculo Función 51:

$$I_{pickup} : 1,1 * 328,03 = 360,84 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{360,84}{30} = 6,02 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 51N :

$$I_{pickup} : 0,3 * 360,84 = 108,252 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{108,252}{30} = 1,8 \text{ A Secundarios}$$

En el lado de baja tensión no se utilizan las funciones 50 y 50N.

Después de realizar los cálculos respectivos, se procederá a mostrar las curvas obtenidas.

3.3.5. Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 1)

Curvas del flujo de Potencia circuito 1 (Propuesta 1) Se corrió un flujo de potencia utilizando el circuito 1 donde se pueden observar las curvas de los IEDs en la figura 3.11 y su corriente que son 10.774 amperios primarios.

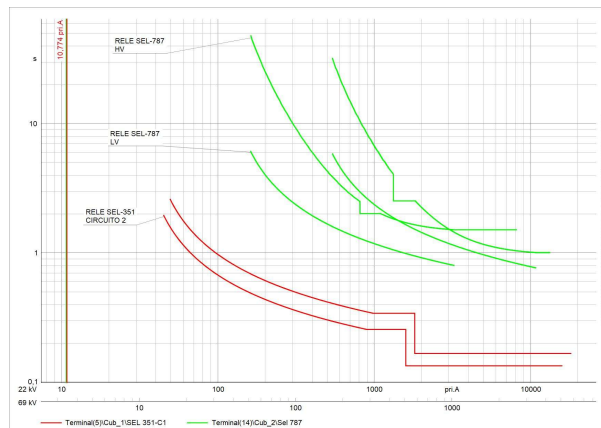


Figura 3.11: Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 1)

Curvas del flujo de Potencia circuito 2 (Propuesta 1) Se corrió un flujo de potencia cambiando el circuito 2 donde se pueden observar las curvas de los IEDs en la figura 3.12 y su corriente que son 10.842 Amperios primarios.

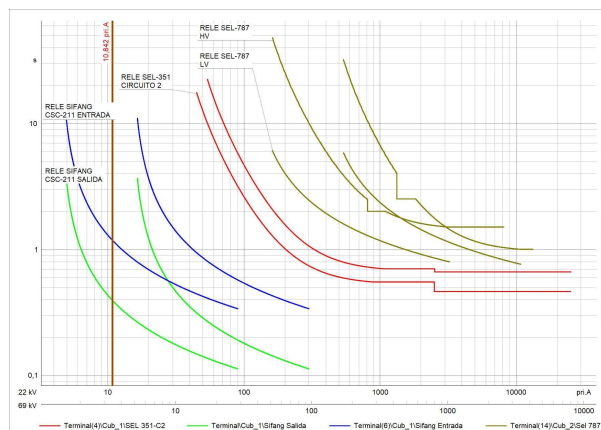


Figura 3.12: Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 1)

3.3.6. Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra del Transformador (Propuesta 1) Se realizó un cortocircuito trifásico en el lado de baja tensión del transformador, el cual tiene una corriente de CC de 2808.600 Amperios primarios, en la figura 3.13 también se observan los tiempos de actuación de los relés en AT: 1.612 segundos y en BT: 1.218 s.

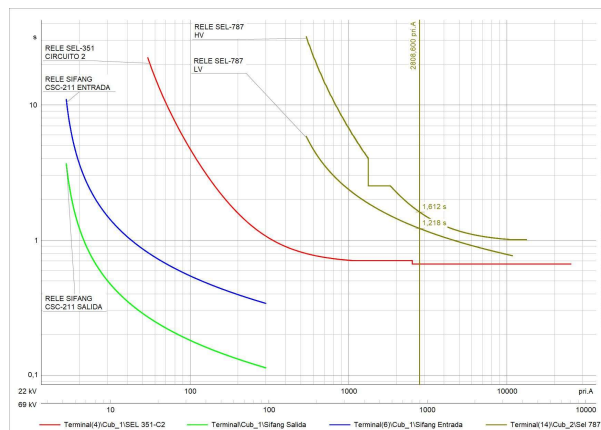


Figura 3.13: Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Gramalote (Propuesta 1) En la barra Gramalote se simuló un CC3F, como se observa en la figura 3.14 se obtuvo una corriente de CC de 1944.692 amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:2.343 s, BT:1.467 s, SEL-351 C2 en 0.704 y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

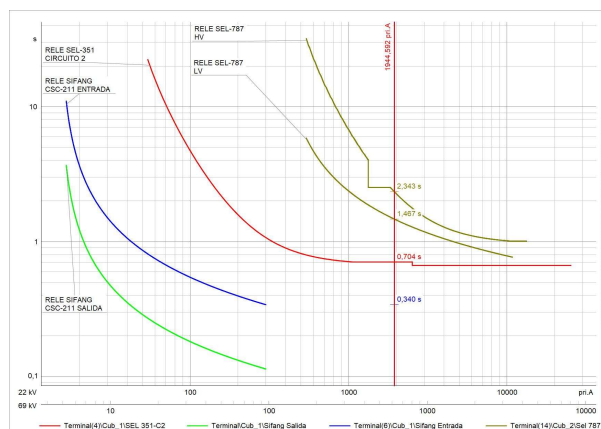


Figura 3.14: Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 1 (Propuesta 1)

En la barra de Cementerio se simuló un CC3F cerrando el circuito 1, como se ve en la figura 3.15 se obtuvo una corriente de CC de 1525.681 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:2.520 s, BT:1.701 s y SEL-351 C1 en 0.341 s.

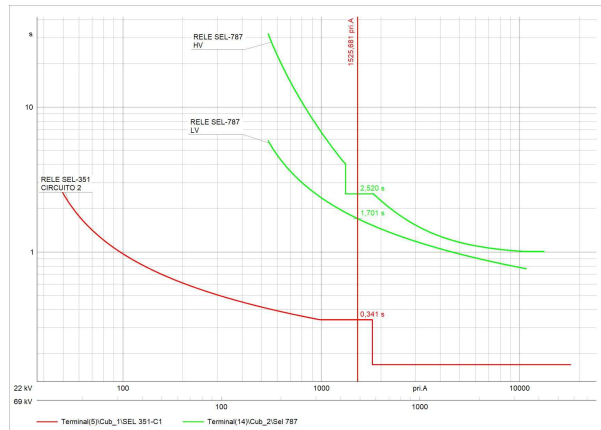


Figura 3.15: Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 2 (Propuesta 1)

Ahora se realizó el mismo CC en la barra de Cementerio pero en el circuito 2, tal como se ve en la figura 3.16 con una corriente de 1466.238 amperios primarios, donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:2.520 s, BT:1.747 s, SEL-351 del circuito 2 en 0.704 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s y salida en 0.113 s.

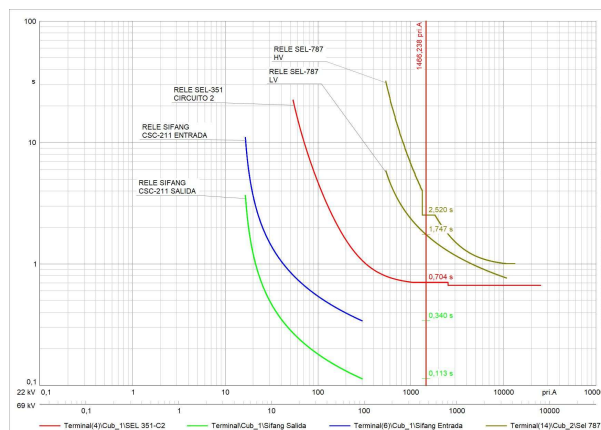


Figura 3.16: Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 1)

3.3.7. Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra del Transformador (Propuesta 1)

En este caso se corrió un CC1F en el lado de baja del transformador con una corriente de 3737.135 amperios primarios donde actúa el dispositivo SEL-787 con un tiempo 0.801 s, como se observa en la figura 3.17.

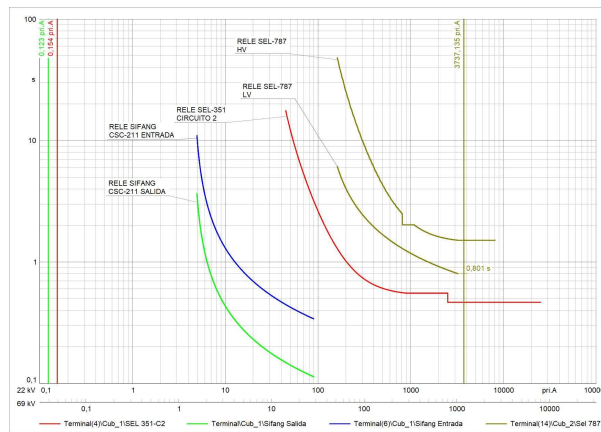


Figura 3.17: Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de Gramalote (Propuesta 1) Se realizó un CC1F en la barra de Gramalote con una corriente de 1930.958 amperios primarios, se observa en la figura 3.18 como actúan los dispositivos SEL-787 en 0.930 s, SEL-351 en 0.553 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

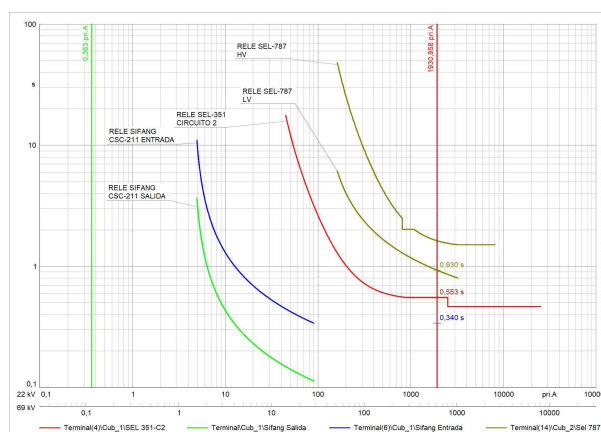


Figura 3.18: Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 1 (Propuesta 1) Al realizar CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 1, en la figura 3.19 se observa una corriente de 1322.777 amperios primarios, aquí actúan los dispositivos SEL-787 en 1.057 s y SEL-351 (C1) a 0.256 s.

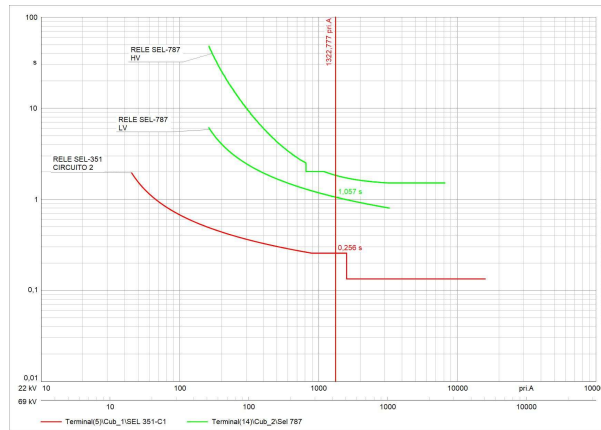


Figura 3.19: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 1)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 2 (Propuesta 1) Por último, se simuló un CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 2, en la figura 3.20 se observa una corriente de 1286.167 amperios primarios de tierra y fase, respectivamente, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 1.069 s, SEL-351 (C2) en 0.553 s, también los 2 SIFANG-CSC-211 de entrada en 0.340 s y el de salida con un tiempo de 0.113 s.

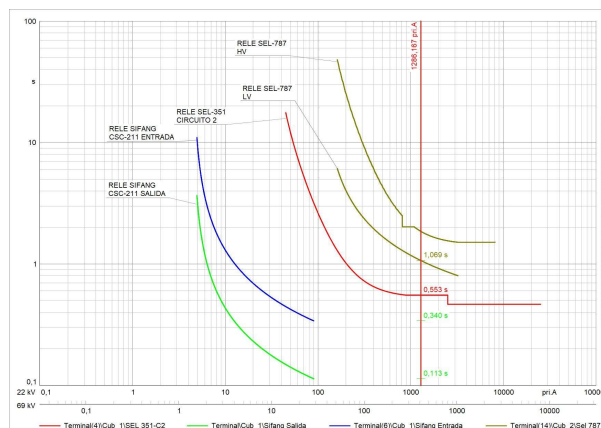


Figura 3.20: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 1)

Tabla con los ajustes de la Propuesta 1 En la tabla 3.1 se observan todos los datos para la parametrización de los dispositivos.

ITEM	NOMBRE	MODELO RELÉ	NIVEL DE TENSIÓN	RTC	AJUSTES DE SOBRECORRIENTE				
					FUNCIÓN	ESTADO	TAP [A]	TD [SEGI]	CURVA
1	ENTRADA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	69 kV	150/5	51	HABILITADO	114,9	7	U1- U.S. MODERATELY INVERSE T. DEFINIDO U1- U.S. MODERATELY INVERSE T. DEFINIDO
					50	HABILITADO	423,6	1,82	
					51N	HABILITADO	1,15	9	
					50N	HABILITADO	259,2	1,52	
2	SALIDA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	22 kV	300/5	51	HABILITADO	360,6	3,50	U1- U.S. MODERATELY INVERSE - U1- U.S. MODERATELY INVERSE -
					50	DESHABILITADO	-	-	
					51N	HABILITADO	108	4,5	
					50N	DESHABILITADO	-	-	
3	ALIMENTADOR ENJUBONES 1	SEL-351	22 kV	300/5	51	HABILITADO	16,5	4	U3-U.S. VERY INVERSE T. DEFINIDO U3-U.S. VERY INVERSE T. DEFINIDO
					50	HABILITADO	1831,2	0,33	
					51N	HABILITADO	15	3	
					50N	HABILITADO	1591,2	0,25	
4	ALIMENTADOR ENJUBONES 2	SEL-351	22 kV	300/5	51	HABILITADO	18	6,80	U3-U.S. VERY INVERSE T. DEFINIDO U3-U.S. VERY INVERSE T. DEFINIDO
					50	HABILITADO	2334	0,58	
					51N	HABILITADO	15	5,80	
					50N	HABILITADO	2320,8	0,46	
5	ENTRADA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	150/5	51	HABILITADO	14,4	0,15	IEC NORM. INV. - IEC NORM. INV. -
					50	DESHABILITADO	-	-	
					51N	HABILITADO	4,2	0,15	
					50N	DESHABILITADO	-	-	
6	SALIDA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	150/5	51	HABILITADO	14,4	0,05	IEC NORM. INV. - IEC NORM. INV. -
					50	DESHABILITADO	-	-	
					51N	HABILITADO	4,2	0,05	
					50N	DESHABILITADO	-	-	

Tabla 3.1: Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 1)

3.4. Propuesta 2: Nuevos ajustes y nuevos TCs para los IEDs

Después de proponer nuevos ajustes, se concluyó que algunos de los transformadores de corriente (TCs) instalados en el sistema estaban sobre dimensionados, lo que afecta directamente a la precisión y coordinación de las protecciones. Por lo tanto, en esta sección se presentan propuestas de nuevos TCs con relaciones más adecuadas para el sistema, así como los ajustes de protección correspondientes a estos.

3.4.1. Cálculos para IED SEL-351 del circuito 2

Para el dispositivo SEL-351 se considerará un nuevo TC con una relación de 150/5, no se puede disminuir mucho ya que al momento de parametrizar un TC más pequeño no permite la configuración de este.

Datos:

- I_{max}: 313 A
- I_{fmax}: 0.011 kA = 11 A
- RTC: 30
- Dial (51): 7 seg
- Dial (50): 0.66 seg
- Dial (51N): 5.5 seg
- Dial (50N): 0.45 seg
- Curva: U3-U.S. VERY INVERSE

Calculo Función 51:

$$I_{pickup} : 1,3 * 11 = 14,3 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{14,3}{30} = 0,47 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 51N:

$$I_{pickup} : 0,3 * 14,3 = 4,29 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{4,29}{30} = 0,14 \text{ A Secundarios} \quad (3.6)$$

Calculo Función 50 (CC3F):**Datos:**

- Ikss: 1.945 kA

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,945 \text{ kA} = 2,334 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{2,334 \text{ kA}}{30} = 77,8 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50N (CC1F):**Datos:**

- Ikss: 1.934 kA

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,934 \text{ kA} = 2,3208 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{2,3208 \text{ kA}}{30} = 77,36 \text{ A Secundarios}$$

3.4.2. Cálculos para IED SEL-351 del circuito 1

Para este relé únicamente se calculan funciones 50 y 50N ya que tiene la misma corriente y parámetros del IED del circuito 2

Datos:

- Ikss: 1.526 kA
- Dial (51): 2 seg
- Dial (50): 0.16 seg
- Dial (51N): 1.5 seg
- Dial (50N): 0.13 seg
- Curva: U1-U.S. MODERATELY INVERSE

Calculo Función 50 (CC3F):

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,526 \text{ kA} = 1,831 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{1,831 \text{ kA}}{30} = 61,04 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 50N (CC1F):

Datos:

- Ikss: 1.326 kA

$$I_{pickup} : 1,2 * 1,326 \text{ kA} = 1,5912 \text{ kA primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{1,5912 \text{ kA}}{30} = 53,04 \text{ A Secundarios}$$

3.4.3. Cálculos para IED Sifang-CSC-211 de la entrada y salida de la barra de Gramalote

Para este dispositivo se consideró un TC con relación 60/5 en ambos.

CSC-211 salida de Gramalote

Datos:

- I_{max}: 313 A
- I_{fmax}: 0.011 kA = 11 A
- RTC: 12
- Dial Salida(51): 0.05 seg
- Dial Salida (51N): 0.05 seg
- Curva: IEC NORM. INV.

Calculo Función 51:

$$I_{pickup} : 1,3 * 11 = 14,3 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{14,3}{12} = 1,19 \text{ A Secundarios}$$

Calculo Función 51N :

$$I_{pickup} : 0,3 * 14,3 = 4,29 \text{ A primarios}$$

$$A \text{ Secundarios} = \frac{4,29}{12} = 0,35 \text{ A Secundarios}$$

CSC-211 entrada de Gramalote Para este dispositivo se parametriza igual que el de salida pero se aumenta su [Time Dial](#)

Datos:

- RTC: 12
- Dial Entrada (51): 0.15 seg
- Dial Entrada (51N): 0.15 seg
- Curva: IEC NORM. INV.

Después de hacer los diferentes cálculos con los nuevos TCS se presentarán las curvas de estos.

3.4.4. Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 2)

Curvas del flujo de Potencia circuito 1 (Propuesta 2) En la figura 3.21 se corrió un flujo de potencia utilizando el circuito 1 donde se pueden observar las curvas de los IEDs y su corriente que son 10.774 Amperios primarios.

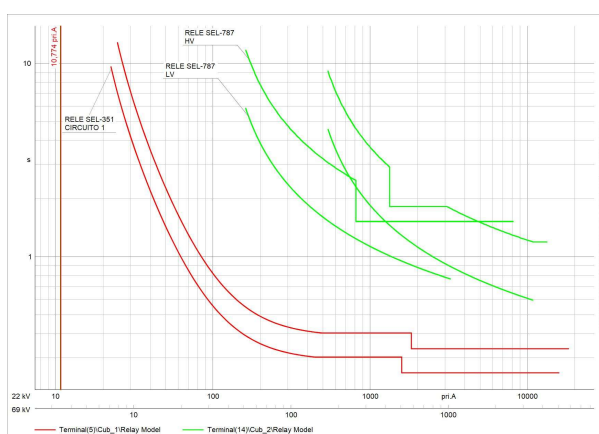


Figura 3.21: Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 2)

Curvas del flujo de Potencia circuito 2 (Propuesta 2) Se corrió un flujo de potencia cambiando al circuito 2, donde se pueden observar en la figura 3.22 las curvas de los IEDs y su corriente, que son 10.842 Amperios primarios.

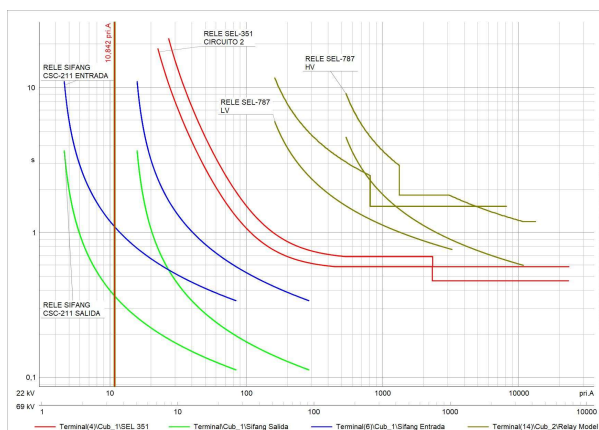


Figura 3.22: Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 2)

3.4.5. Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra del Transformador (Propuesta 2) Se realizó un cortocircuito trifásico en el lado de baja tensión del transformador, el cual tiene una corriente de CC de 2808.600 amperios primarios. También se observan en la figura 3.23 los tiempos de actuación de los relés en AT: 1.820 segundos y en BT: 0.948 s.

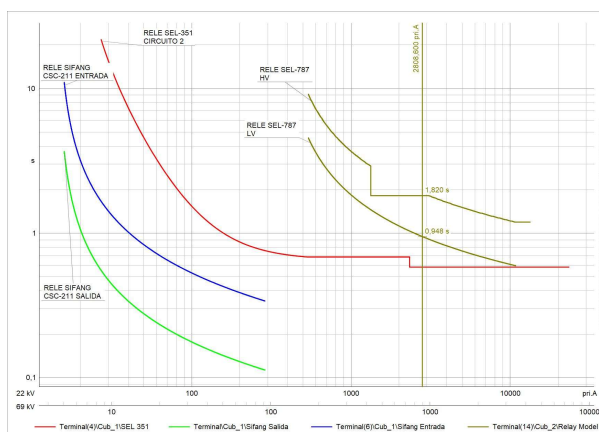


Figura 3.23: Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Gramalote (Propuesta 2) En Gramalote se simuló un CC3F, en la figura 3.24 se obtuvo una corriente de CC de 1944.592 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT: 1.820 s, BT: 1.141 s, SEL-351 C2 en 0.684 y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

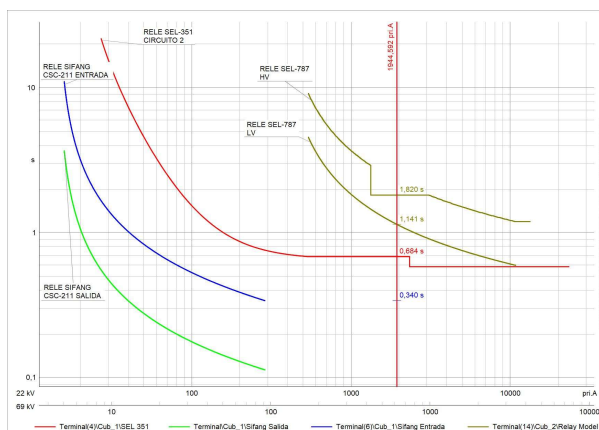


Figura 3.24: Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 1 (Propuesta 2)

En la barra de Cementerio se simuló un CC3F cerrando el circuito 1, como se ve en la figura 3.25 se obtuvo una corriente de CC de 1525.681 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:1.820 s, BT: 1.323 s y SEL-351 C1 en 0.402 s.

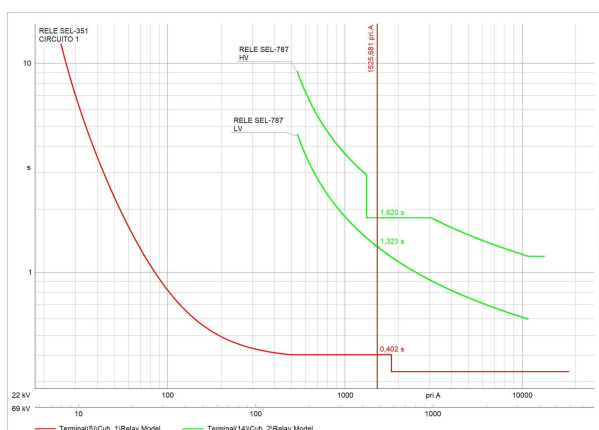


Figura 3.25: Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 2 (Propuesta 2)

Ahora se realizó el mismo CC en la barra de Cementerio pero en el circuito 2, en la figura 3.26 se observa una corriente de 1286.187 amperios primarios, donde actuaron los dispositivos SEL-787 en 1.023 s, SEL-351 del circuito 2 en 0.584 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s y salida en 0.113 s.

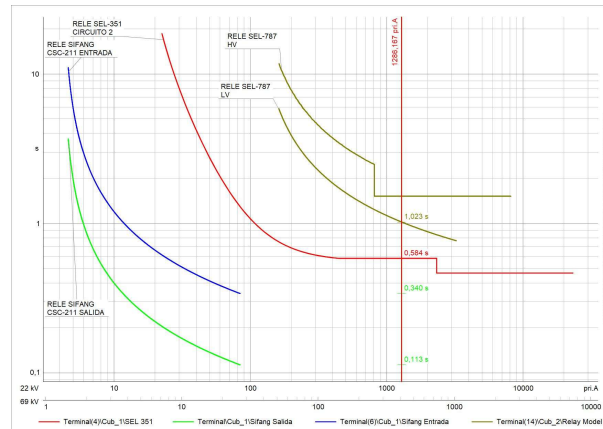


Figura 3.26: Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 2)

3.4.6. Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra del Transformador (Propuesta 2)

En este caso se corrió un CC1F en el lado de baja del transformador, en la figura 3.27 una corriente de 3737.135 amperios primarios donde actúa el dispositivo SEL-787 con un tiempo de 0.767 s.

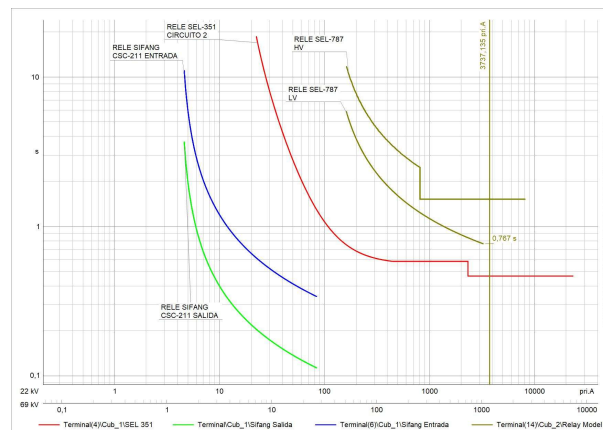


Figura 3.27: Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de Gramalote (Propuesta 2) Se realizó un CC1F en la barra de Gramalote, en la figura 3.28 una corriente de 1930.958 amperios primarios, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 0.890 s, SEL-351 en 0.584 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

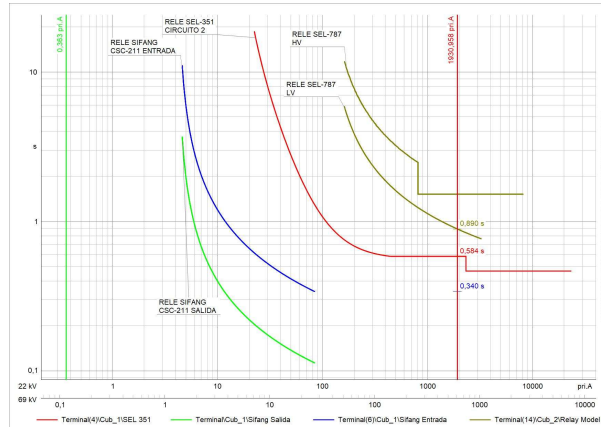


Figura 3.28: Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 1 (Propuesta 2) Al realizar CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 1 se observa en la figura 3.29 una corriente de 1322.777 amperios primarios, aquí actúan los dispositivos SEL-787 en 1.012 s y SEL-351 (C1) a 0.302 s.

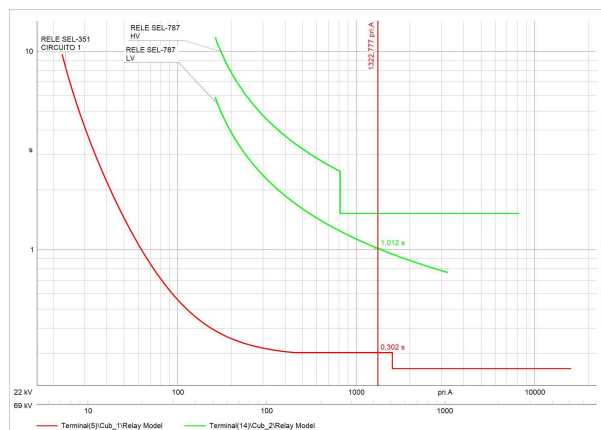


Figura 3.29: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 2)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 2 (Propuesta 2) Por último, en la figura 3.30 se simuló un CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 2, se observa una corriente de 1286.167 amperios primarios de tierra y fase, respectivamente, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 1.023 s, SEL-351 (C2) en 0.584 s, también los 2 SIFANG-CSC-211 de entrada en 0.340 s y el de salida con un tiempo de 0.113 s.

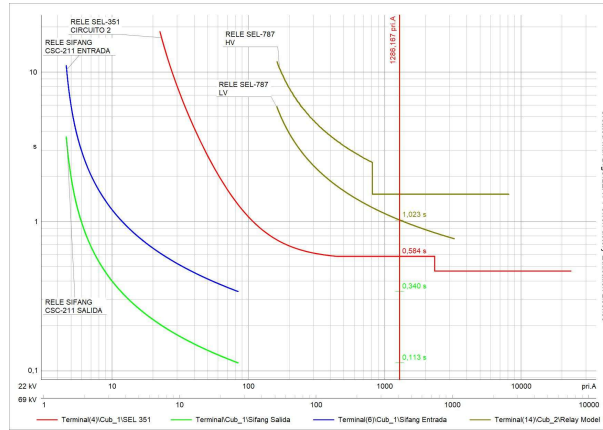


Figura 3.30: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 2)

Tabla con los ajustes de la Propuesta 2 En la tabla 3.2 se observan todos los datos para la parametrización de los dispositivos para la segunda propuesta.

ITEM	NOMBRE	MODELO RELÉ	NIVEL DE TENSIÓN	RTC	AJUSTES DE SOBRECORRIENTE				
					FUNCIÓN	ESTADO	TAP [A]	TD [SEG]	CURVA
1	ENTRADA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	69 kV	150/5	51	HABILITADO	114,9	10	U3-U.S. VERY INVERSE
					50	HABILITADO	423,6	2.52	T. DEFINIDO
					51N	HABILITADO	34,5	15	U3-U.S. VERY INVERSE
					50N	HABILITADO	259,2	2.02	T. DEFINIDO
2	SALIDA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	22 kV	300/5	51	HABILITADO	360,6	4,5	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	108	4,7	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50N	DESHABILITADO	-	-	-
3	ALIMENTADOR ENJUBONES 1	SEL-351	22 kV	150/5	51	HABILITADO	33	2	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50	HABILITADO	1812	0,16	T. DEFINIDO
					51N	HABILITADO	30	1,5	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50N	HABILITADO	1591,2	0,13	T. DEFINIDO
4	ALIMENTADOR ENJUBONES 2	SEL-351	22 kV	150/5	51	HABILITADO	36	7	U3-U.S. VERY INVERSE
					50	HABILITADO	2528,4	0,66	T. DEFINIDO
					51N	HABILITADO	30	5,5	U3-U.S. VERY INVERSE
					50N	HABILITADO	2514	0,45	T. DEFINIDO
5	ENTRADA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	60/5	51	HABILITADO	15	0,15	IEC NORM. INV.
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	4,5	0,15	IEC NORM. INV.
					50N	DESHABILITADO	-	-	-
6	SALIDA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	60/5	51	HABILITADO	15	0,05	IEC NORM. INV.
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	4,5	0,05	IEC NORM. INV.
					50N	DESHABILITADO	-	-	-

Tabla 3.2: Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 2)

3.5. Propuesta 3: Nuevos ajustes sin variar las curvas del SEL-787

Después de realizar la propuesta con nuevos ajustes y nuevas curvas, se recibió la solicitud de no cambiar las curvas del IED SEL-787, el cual protege al transformador principal de la subestación Porotillos, se considero esta propuesta por la dificultad que le presentaría a la empresa CELEC SUR sugerir un cambio de ajustes a CNEL ya que el transformador alimenta también a la comunidad.

Lado de alta (HV)

Datos:

- Potencia: 12.5 MVA
- Voltaje: 22 kV
- RTC: 30
- Dial (51): 0.26 seg
- Dial (50): 0 seg
- Dial (51N): 0.1 seg
- Dial (51N): 0 seg
- Curva: SEL C2

Lado de baja (LV)

Datos:

- Potencia: 12.5 MVA
- Voltaje: 22 kV
- RTC: 60

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 63

- Dial (51): 0.22 seg
- Dial (51N): 0.28 seg
- Curva: SEL C2

En este caso, se mantuvieron los ajustes iniciales en el IED SEL-787, mientras que para los demás dispositivos se aplicaron los ajustes previamente propuestos en la sección 3.3.

Ahora se presentarán las curvas obtenidas en esta propuesta:

3.5.1. Curvas del flujo de Potencia (Propuesta 3)

Curvas del flujo de Potencia circuito 1 (Propuesta 3) Se corrió un flujo de potencia utilizando el circuito 1, en la figura 3.31 se pueden observar las curvas de los IEDs y su corriente, que son 10.774 amperios primarios.

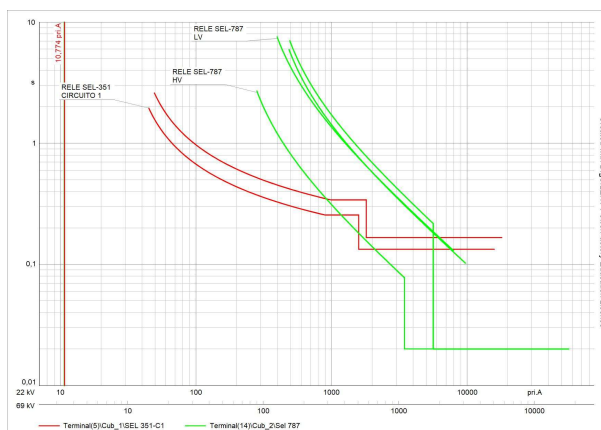


Figura 3.31: Flujo de potencia del Circuito 1 (propuesta 3)

Curvas del flujo de Potencia circuito 2 (Propuesta 3) Se corrió un flujo de potencia cambiando al circuito 2, donde en la figura 3.32 se pueden observar las curvas de los IEDs y su corriente, que son 10.842 amperios primarios.

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 64

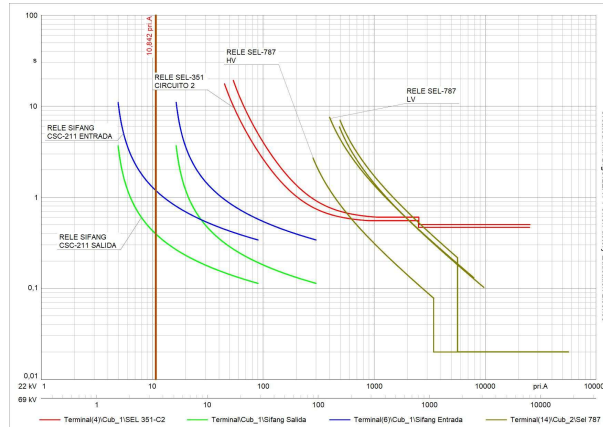


Figura 3.32: Flujo de potencia del Circuito 2 (propuesta 3)

3.5.2. Curvas de Cortocircuito trifásico (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra del Transformador (Propuesta3) Se realizó un cortocircuito trifásico en el lado de baja tensión del transformador, como se observa en la figura 3.33 el cual tiene una corriente de CC de 2808.600 Amperios primarios, también se observan los tiempos de actuación de los relés en AT: 0.466 segundos y en BT: 0.389 s.

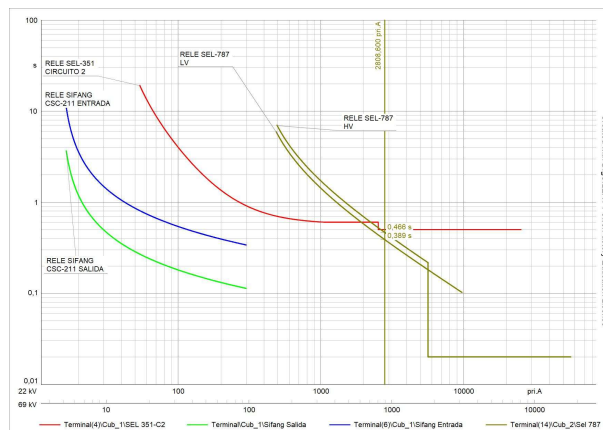


Figura 3.33: Curvas CC3F barra del transformador (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Gramalote (Propuesta 3) Para Gramalote se simuló un CC3F, en la figura 3.34 obtuvo una corriente de CC de 1944.592 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT: 0.716 s, BT: 0.596 s, SEL-351 C2 en 0.604 y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 65

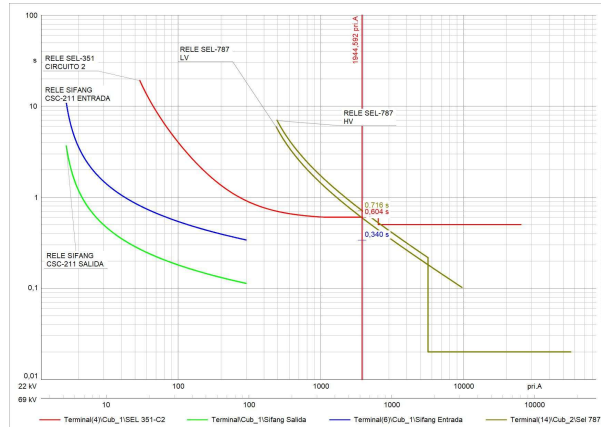


Figura 3.34: Curvas CC3F barra de Gramalote (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 1 (Propuesta 3)

En la barra de Cementerio se simuló un CC3F cerrando el circuito 1, en la figura 3.35 se obtuvo una corriente de CC de 1525.681 Amperios primarios donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT:0.966 s, BT: 0.805 s y SEL-351 C1 en 0.341 s.

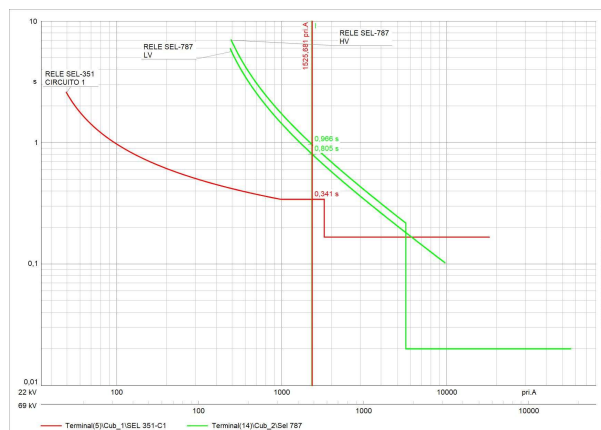


Figura 3.35: Curvas CC3F barra de Cementerio C1 (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito trifásico en la barra de Cementerio circuito 2 (Propuesta 3)

Ahora se realizó el mismo CC en la barra de Cementerio pero en el circuito 2, en la figura 3.36 se ve una corriente de 1466.238 amperios primarios, donde actuaron los dispositivos SEL-787 en AT: 1.017 s, BT: 0.847 s, SEL-351 del circuito 2 en 0.604 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s y salida en 0.113 s.

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 66

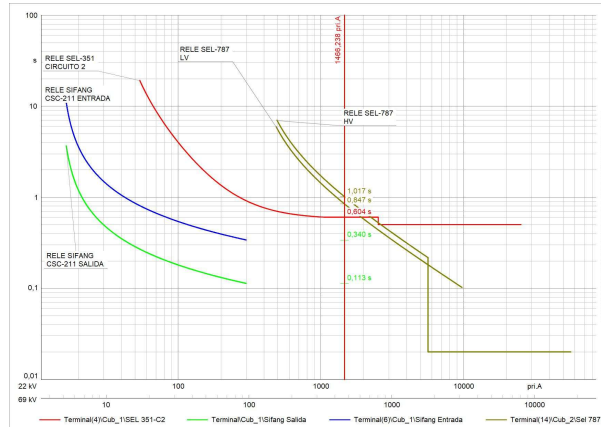


Figura 3.36: Curvas CC3F barra de Cementerio C2 (Propuesta 3)

3.5.3. Curvas de Cortocircuito monofásico (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra del Transformador (Propuesta 3)

En este caso se corrió un CC1F en el lado de baja del transformador, en la figura 3.37 se observa una corriente de 3737.135 amperios primarios donde actúa el dispositivo SEL-787 con un tiempo 0.289 s.

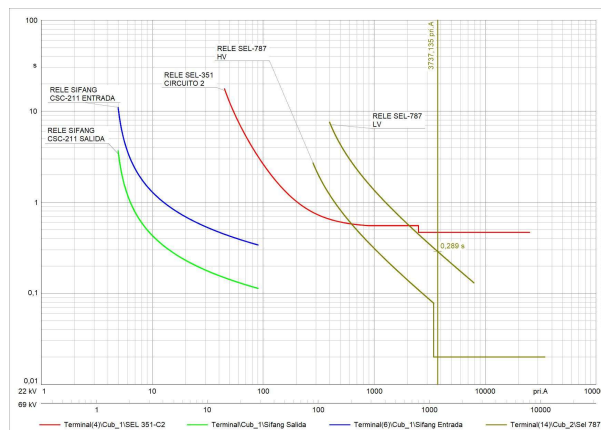


Figura 3.37: Curvas de CC1F en la barra del transformador (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de Gramalote (Propuesta 3)

Se realizó un CC1F en la barra de Gramalote en la figura 3.38 con una corriente de 1930.958 amperios primarios, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 0.602 s, SEL-351 en 0.553 s y Sifang-CSC-211 de entrada en 0.340 s.

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 67

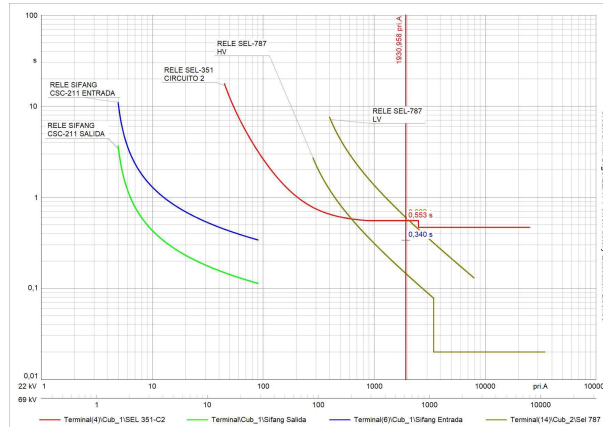


Figura 3.38: Curvas de CC1F en la barra de Gramalote (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 1 (Propuesta 3) Al realizar CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 1, en la figura 3.39 se observa una corriente de 1322.777 amperios primarios, aquí actúan los dispositivos SEL-787 en 0.948 s y SEL-351 (C1) a 0.256 s.

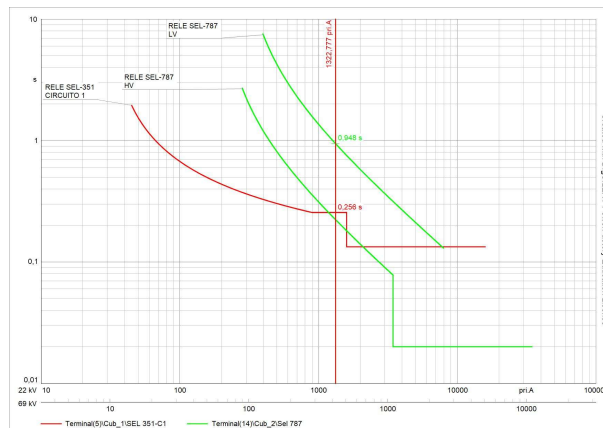


Figura 3.39: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C1 (Propuesta 3)

Curvas de Cortocircuito monofásico en la barra de de Cementerio circuito 2 (Propuesta 3) Por último, se simuló un CC1F en la barra de Cementerio utilizando el circuito 2, en la figura 3.40 se observa una corriente de 1322.777 amperios primarios de tierra y fase, respectivamente, donde actúan los dispositivos SEL-787 en 0.982 s, y SEL-351 (C1) en 0.553 s, también los 2 SIFANG-CSC-211 de entrada en 0.340 s y el de salida con un tiempo de 0.113 s.

3.5. PROPUESTA 3: NUEVOS AJUSTES SIN VARIAR LAS CURVAS DEL SEL-787 68

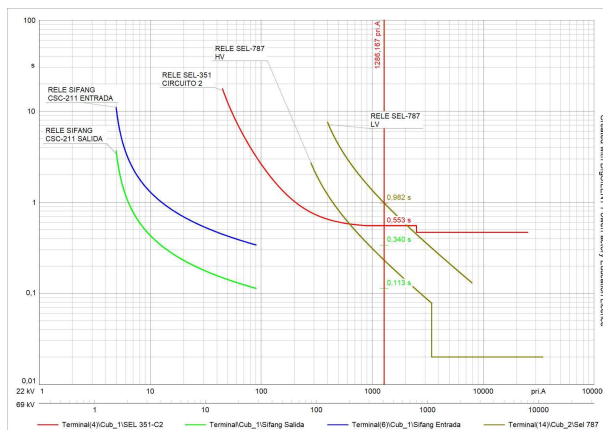


Figura 3.40: Curvas de CC1F en la barra de Cementerio C2 (Propuesta 3)

Tabla con los ajustes de la Propuesta 3 En la tabla 3.3 se observan todos los datos para la parametrización de los dispositivos para la tercera propuesta.

ITEM	NOMBRE	MODELO RELÉ	NIVEL DE TENSIÓN	RTC	AJUSTES DE SOBRECORRIENTE				
					FUNCIÓN	ESTADO	TAP A	TD (SEG)	CURVA
1	ENTRADA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	69 kV	150/5	51	HABILITADO	105	0.26	C2-IEC (VERY INVERSE)
					50	HABILITADO	1800	0	INSTANTANEO
					51N	HABILITADO	80	0.10	C2-IEC (VERY INVERSE)
					50N	HABILITADO	36.66	0	INSTANTANEO
2	SALIDA TRANSFORMADOR DE PODER	SEL-787	22 kV	300/5	51	HABILITADO	325.2	0.22	C2-IEC (VERY INVERSE)
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	252.5	0.28	C2-IEC (VERY INVERSE)
					50N	DESHABILITADO	-	-	-
3	ALIMENTADOR ENJUBONES 1	SEL-351	22 kV	300/5	51	HABILITADO	33	2	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50	HABILITADO	1812	0.16	T. DEFINIDO
					51N	HABILITADO	30	1.5	U1- U.S. MODERATELY INVERSE
					50N	HABILITADO	1591.2	0.13	T. DEFINIDO
4	ALIMENTADOR ENJUBONES 2	SEL-351	22 kV	300/5	51	HABILITADO	36	6	U3-U.S. VERY INVERSE
					50	HABILITADO	2528.4	0.5	T. DEFINIDO
					51N	HABILITADO	30	5.5	U3-U.S. VERY INVERSE
					50N	HABILITADO	2514	0.46	T. DEFINIDO
5	ENTRADA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	150/5	51	HABILITADO	15	0.15	IEC NORM. INV.
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	4.5	0.15	IEC NORM. INV.
					50N	DESHABILITADO	-	-	-
6	SALIDA BARRA DE GRAMALOTE	CSC-211	22 kV	150/5	51	HABILITADO	15	0.05	IEC NORM. INV.
					50	DESHABILITADO	-	-	-
					51N	HABILITADO	4.5	0.05	IEC NORM. INV.
					50N	DESHABILITADO	-	-	-

Tabla 3.3: Nuevos Ajustes para los IEDs (Propuesta 3)

Capítulo 4

Conclusiones

El estudio se llevó a cabo para verificar los ajustes de protección de los IEDs localizados en el circuito 2 del alimentador de la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco, para lo cual se modeló en el programa DigSilent PowerFactory, observando su comportamiento y verificando los parámetros configurados en las protecciones del sistema. Durante el proyecto se lograron cumplir los objetivos específicos que se plantearon al inicio, lo cual permitió caracterizar la operación de los dispositivos ante diferentes escenarios de falla.

Durante la validación, se evidenció que algunos de los ajustes no eran correctos, ya que presentaban problemas de coordinación y tiempos de actuación poco eficientes. Se observó especialmente este comportamiento en la operación del IED SEL-351, que operaba antes con respecto a los CSC-211, lo cual evidenció una falta de selectividad entre los dispositivos. Ante esta situación, se realizaron cálculos técnicos de corrientes de cortocircuito simuladas y se propusieron nuevos ajustes que cambiaron los tiempos de respuesta y curvas de actuación, consiguiendo una respuesta coordinada entre los IEDs. También se descubrió que algunos TCs del sistema estaban sobredimensionados, afectando la sensibilidad de las protecciones ante fallas. Debido a esto, se realizó una segunda propuesta de ajustes en la que se seleccionaron TCs con relaciones más adecuadas a las condiciones reales de operación del sistema, así como nuevos parámetros de configuración para los dispositivos. Todo esto permitió identificar problemas con la configuración que tiene la empresa en los dispositivos de protección, sino también brindar soluciones técnicas que mejoran

la selectividad, coordinación y confiabilidad del sistema eléctrico simulado. Estos resultados representan un aporte significativo para la operación segura y eficiente del circuito.

Capítulo 5

Recomendaciones y Trabajos Futuros

Implementación progresiva de la propuesta seleccionada: Se recomienda implementar inicialmente la segunda propuesta de ajustes, que demostró una buena sensibilidad, selectividad y tiempo de actuación, ya sea en un entorno controlado o en una etapa piloto para evaluar su desempeño real.

Revisión periódica de los ajustes de protección: Los ajustes deben ser revisados y validados con regularidad, ya que se pueden producir cambios en la configuración del sistema, como nuevas cargas, generación adicional o modificaciones en el circuito.

Evaluar coordinación con protecciones cercanas: Se debe revisar que las nuevas curvas y tiempos de disparo estén coordinados no solo dentro del circuito 2, sino también con dispositivos de protección que estén aguas arriba y aguas abajo.

Glosario

ABET Accreditation Board for Engineering and Technology.

ANSI American National Standards Institute.

AT Alta Tensión.

BT Baja Tensión.

CC1F Cortocircuito Monofásico.

CC3F Cortocircuito Trifásico.

GOOSE Generic Object - Oriented Substation Event.

IEC International Electrotechnical Commission.

IED Intelligent Electronic Divices.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Relé Dispositivo electromecánico o electrónico que permite abrir o cerrar contactos eléctricos mediante una señal de control, utilizado comúnmente en sistemas de protección y automatización.

SEP Sistema Eléctrico de Potencia.

TC Transformador de Corriente.

Time Dial Ajuste que controla la relación entre la corriente de falla y el tiempo de disparo del relé.

Referencias

- [1] S. K. R. Patibandla y A. Pahwa, «Development and Testing of IEC 61850 Based IEDs for Power System Protection,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, n.º 3, págs. 1234-1241, 2014.
- [2] S. M. Blair, C. D. Booth, G. M. Burt et al., «An open platform for rapid-prototyping protection and control schemes with IEC 61850,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, n.º 2, págs. 1103-1110, 2013.
- [3] J. R. McDonald et al., «Safety Integrity Level Verification Model for IED Protection Schemes,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n.º 3, págs. 2145-2152, 2005.
- [4] J. F. Chapi Lucero, «Determinación de ajustes de la protección de sobrecorriente basados en estimaciones de corrientes de cortocircuito usando mediciones locales,» Tesis doct., Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2020.
- [5] J. L. Córdova Pazmiño, «Estudio de ajuste y coordinación de protecciones con relés digitales (IED) en el sistema eléctrico de Quito,» Tesis doct., Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [6] Y. Gu, Z. Liu y Z. Xu, «A survey of intelligent electronic devices in smart grids,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, n.º 2, págs. 1012-1020, 2018. DOI: 10.1109/TSG.2017.2704079.
- [7] M. A. Aftab, S. Roostaei, S. M. S. Hussain, I. Ali, M. S. Thomas y S. Mehfuz, «Evaluation of IEC 61850 GOOSE Communication for Substation Protection,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, n.º 4, págs. 1690-1697, 2015.
- [8] V. H. U. Eze, L. Ran y J. R. Bumby, «A Comprehensive Review on Intelligent Electronic Devices in Smart Grid,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, n.º 2, págs. 1012-1020, 2018.

- [9] C. Brunner, «IEC 61850 for power system communication,» en *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, págs. 1-6. DOI: 10.1109/TDC.2008.4517287.
- [10] «IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations,» *IEEE Std C37.2-2022 (Revision of IEEE Std C37.2-2008)*, págs. 1-63, 2022. DOI: 10.1109/IEEESTD.2022.9984140.
- [11] «IEEE Standard for Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus,» *IEEE Std C37.90.1-2012 (Revision of IEEE Std C37.90.1-2002)*, págs. 1-53, 2012. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6304897.
- [12] «IEEE Guide for Power System Protection Testing,» *IEEE Std C37.233-2009*, págs. 1-124, 2009. DOI: 10.1109/IEEESTD.2009.5352213.
- [13] M. A. Zamani, T. S. Sidhu y A. Yazdani, «Toward an adaptive protection scheme in active distribution networks,» *Applied Soft Computing*, vol. 37, págs. 517-523, 2015.
- [14] Interacables, *Aluminio Desnudo*, Accedido: 2025-08-14, 2025. dirección: http://www.interacables.com/archivos/productos/4_aluminio_desnudo.pdf.
- [15] *Medio Voltaje Trifásico — Manual UC*, https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_content&view=article&id=142:mvtp&catid=18:pdfs&Itemid=207, Accedido: 14 de agosto de 2025, s.f.
- [16] J. Rui, H. Changsong, L. Lianchang y C. Chenfan, *CSC-211 Multifunction Protection IED Technical Application Manual*, ver. V1.01, Document Code: 0SF.451.085(E), Beijing Sifang Automation Co., Ltd., No.9, Shangdi 4th Street, Haidian District, Beijing, P.R.C.100085, 2012. dirección: <http://www.sf-auto.com>.

Anexos

.1. Anexo: Carta por parte de la Empresa CELEC EP

Oficio Nro. CELEC-EP-CSR-2025-0432-OFI

Cuenca, 25 de julio de 2025

Asunto: Respuesta a oficio OFICIO-C-DCIE-013-2025-A54-10-2-OF. Trabajo de titulación en la empresa sobre temática relacionada a la validación de los ajustes de protección del alimentador del circuito 2 de 22 kV Central Minas San Francisco

Ingeniera Electronica
Natalia Ximena González Alvarez
En su Despacho

De mi consideración:

En respuesta al Documento No. OFICIO-C-DCIE-013-2025-A54-10-2-OF, mediante el cual los estudiantes Víctor Miguel Crespo Castanier y Mateo Andrés Ávila Faicán muestran interés en realizar su trabajo de titulación en la empresa, me permito informar que, una vez revisado el anteproyecto titulado “Validación de los ajustes de protección del alimentador del circuito 2 de 22 kV de la Central Hidroeléctrica Minas San Francisco”, se considera que la propuesta es procedente y factible.

El tema planteado guarda relación directa con las necesidades técnicas actuales de la central y permitirá evaluar y validar los parámetros de protección existentes, contribuyendo tanto al fortalecimiento académico de los estudiantes como a la mejora continua de los sistemas de protección de la unidad.

En tal sentido, se recomienda aprobar la realización del trabajo de titulación conforme al alcance propuesto, bajo las condiciones de coordinación que se establecerán con nuestra área correspondiente, y condicionando además su ejecución a la suscripción previa de un acuerdo de confidencialidad, que regule el uso de la información técnica a la que los estudiantes tendrán acceso durante el desarrollo del proyecto.

Con sentimientos de distinguida consideración.

Atentamente,

Oficio Nro. CELEC-EP-CSR-2025-0432-OFI

Cuenca, 25 de julio de 2025

Documento firmado electrónicamente

Mgs. Miguel Santiago Andrade Lopez
GERENTE CELEC EP - UN CELEC SUR

Referencias:

- CELEC-EP-CSR-2025-0401-EXT

Anexos:

- oficio-c-dcie-013-2025-a54-10-2-of.pdf

Copia:

Señor Magíster
Stalin Andrés Narváez Morales
Subgerente de Producción (E)

Señor Magíster
William Geovanny Bárcenas Guevara
Jefe de Central Hidráulica

Señora Magíster
Mónica Priscila Arias Armijos
Jefe de Talento Humano (E)

fgcg/wgbg/sanm

.2. Anexo ABET SO2

Categoría	Descripción	INSATISFACTORIO	EN DESARROLLO	ALCANZA EXPECTATIVA	EXCEDE EXPECTATIVA
SO2-1: Capacidad de integrar en el diseño aspectos de salud pública	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones sobre salud pública que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera aspectos de salud pública en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran aspectos de salud pública, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran aspectos de salud pública incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera aspectos de salud pública de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-2: Capacidad de integrar en el diseño aspectos de seguridad	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones seguridad que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera aspectos de seguridad en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran aspectos de seguridad, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran aspectos de seguridad incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera aspectos de seguridad de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-3: Capacidad de integrar en el diseño aspectos de bienestar	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones bienestar que ha	No considera aspectos de bienestar en el desarrollo del	Se consideran aspectos de bienestar, sus normativas o regulaciones, pero	Se consideran aspectos de bienestar, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y	El proyecto de titulación considera aspectos de bienestar de forma integral, demostrando dominio técnico,

	desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	proyecto de titulación.	de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	consistencia en el desarrollo.	profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-4: Capacidad de diseño considerando factores globales	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones de factores globales que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera factores globales en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran factores globales, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran factores globales, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera factores globales de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-5: Capacidad de diseño considerando factores culturales	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones de factores culturales que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera factores culturales en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran factores culturales, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran factores culturales, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera factores culturales de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.

SO2-6: Capacidad de diseño considerando factores sociales	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones de factores sociales que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera factores sociales en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran factores sociales, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran factores sociales, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera factores sociales de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-7: Capacidad de diseño considerando factores ambientales	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones de factores ambientales que ha desarrollado el estudiante en el proyecto de titulación.	No considera factores ambientales en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran factores ambientales, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o con debilidades significativas.	Se consideran factores ambientales, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera factores ambientales de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis y desarrollo profesional avanzado.
SO2-8: Capacidad de diseño considerando factores económicos	Este indicador de rendimiento (PI) valora las consideraciones de factores económicos que ha desarrollado el estudiante en el	No considera factores económicos en el desarrollo del proyecto de titulación.	Se consideran factores económicos, sus normativas o regulaciones, pero de forma parcial, inconsistente o	Se consideran factores económicos, incluyendo normativas y regulaciones, demostrando precisión y consistencia en el desarrollo.	El proyecto de titulación considera factores económicos de forma integral, demostrando dominio técnico, profundidad de análisis

	proyecto de titulación.		con debilidades significativas.		y desarrollo profesional avanzado.
SO3-1: Capacidad de comunicarse con una variedad de audiencias	Este PI valora las capacidades del estudiante para comunicarse con diversas audiencias, con sus pares, con sus superiores o en el medio que se desenvuelve.	El estudiante tiene dificultades importantes para comunicarse con diversas audiencias de forma oral y escrita.	El estudiante presenta dificultades parciales para comunicarse con diversas audiencias de forma oral o escrita.	El estudiante se comunica de forma clara, precisa y coherente, tanto oral como escrita, adecuándose a diferentes audiencias.	El estudiante se comunica con gran fluidez, riqueza expresiva y adaptación comunicativa, frente a diversas audiencias, incluso en más de un idioma.
SO6-1: Capacidad de desarrollar y llevar a cabo la experimentación apropiada	Este PI valora la capacidad de realizar, experimentos y comprobaciones reales en la práctica de forma apropiada en su proyecto de titulación.	El estudiante no logra desarrollar correctamente las actividades experimentales requeridas en el proyecto de titulación.	El estudiante presenta dificultades parciales para realizar las actividades experimentales que son requeridas en el proyecto de titulación.	El estudiante realiza adecuadamente las actividades experimentales que son requeridas en el proyecto de titulación, analizando y contrastando resultados.	El estudiante realiza con excelencia las actividades experimentales que son requeridas en proyecto de titulación, con alto nivel de precisión, autonomía y dominio técnico avanzado.

SO6-2: Capacidad de analizar e interpretar datos	Este PI valora la capacidad de analizar e interpretar datos de experimentos y comprobaciones reales en la práctica de forma apropiada en su proyecto de titulación	El estudiante no logra desarrollar correctamente el análisis y la interpretación de datos requeridos en el proyecto de titulación.	El estudiante presenta dificultades parciales para analizar e interpretar datos que son requeridos en el proyecto de titulación.	El estudiante realiza adecuadamente la interpretación de los datos requeridos en su proyecto de titulación, analizando y contrastando resultados.	El estudiante realiza con excelencia el análisis y la interpretación de los datos que son requeridos en su proyecto de titulación, con alto nivel de precisión, autonomía y dominio técnico avanzado.
SO6-3: Capacidad de usar el juicio de ingeniería para sacar conclusiones	Este PI valora la capacidad de usar el juicio de ingeniería para obtener conclusiones de forma apropiada en su proyecto de titulación	El estudiante no logra usar el juicio de ingeniería para obtener conclusiones en el proyecto de titulación.	El estudiante presenta dificultades parciales para utilizar el juicio de ingeniería para obtener conclusiones en el proyecto de titulación.	El estudiante utiliza adecuadamente el juicio de ingeniería para obtener las conclusiones requeridas en su proyecto de titulación.	El estudiante utiliza con excelencia su juicio de ingeniería para sacar las conclusiones que son requeridos en su proyecto de titulación, con alto nivel de precisión, autonomía y dominio técnico avanzado.
SO7-1: Capacidad de adquirir y aplicar nuevos conocimientos	En este PI se valora la capacidad del estudiante para adquirir y aplicar conocimientos nuevos	El estudiante presenta problemas importantes para obtener nuevos conocimientos de forma autónoma,	El estudiante presenta dificultades parciales para obtener nuevos conocimientos de forma autónoma,	El estudiante puede obtener nuevos conocimientos de forma autónoma, aplicando métodos y recursos	El estudiante demuestra gran capacidad y autonomía para identificar, seleccionar, adquirir y aplicar nuevos conocimientos en

	complementarios a los impartidos en las diferentes asignaturas.	cuando estos no han sido parte de su desarrollo en la carrera.	cuando estos no han sido parte de su desarrollo en la carrera.	apropiados de aprendizaje.	diversos contextos de aprendizaje.
SO7-2: Capacidad de utilizar estrategias de aprendizaje apropiadas	En este PI se valora la capacidad del estudiante para utilizar estrategias de aprendizaje apropiadas durante el desarrollo de su proyecto de titulación	El estudiante presenta dificultades importantes para utilizar herramientas apropiadas para su aprendizaje tales como libros, Internet, bases de datos, Tics, etc.	El estudiante presenta algunas dificultades para utilizar herramientas apropiadas para su aprendizaje tales como libros, Internet, bases de datos, Tics, etc.	El estudiante puede utilizar herramientas apropiadas para su aprendizaje tales como libros, Internet, bases de datos, TICs, etc. que lo ayudan a mejorar sus conocimientos mientras desarrolla su proyecto de titulación.	El estudiante utiliza frecuentemente y con gran destreza herramientas apropiadas para su aprendizaje que le facilitan la incorporación rápida y eficiente de nuevos conocimientos.

De acuerdo con los objetivos presentados en el Anexo explicativo del SO2, las múltiples restricciones relevantes para este trabajo abarcan los siguientes aspectos:

- **SO2-1:** Capacidad de integrar en el diseño aspectos de salud pública. Para este proyecto en el proceso de validación de protecciones en IEDs, se abordó la necesidad de asegurar que la configuración de los IEDs reaccione ante fallas que, de no ser interrumpidas de manera precisa y oportuna, podrían generar riesgos físicos a operadores, técnicos o personal de mantenimiento. Se determinó que una mala coordinación de protecciones puede causar largos tiempos de exposición a fallas de arco eléctrico, sobrecorrientes o incendios, impactando directamente la salud y seguridad del personal operativo. Por lo cual, el escalonamiento de protecciones se diseñó para evitar esto con consecuencias para la salud pública, adaptado a buenas prácticas en ambientes energéticos de alto riesgo.
- **SO2-2:** Capacidad de integrar en el diseño aspectos de seguridad. La seguridad fue la base de este proyecto, ya que el objetivo de la tesis fue comprobar que las protecciones funcionen de manera fiable, sin descartar errores o tener falsos disparos, con lo cual se reduce la posibilidad de que ocurran fallas catastróficas en transformadores, líneas o componentes del sistema. Las pruebas ejecutadas a través de simulación se enfocaron en garantizar lo selectivas y sensibles que son las protecciones, lo que contribuye directamente a la seguridad operativa del sistema. Asimismo, se evaluaron escenarios de fallas trifásicas, monofásicas a tierra y internas en transformadores, simulando las condiciones reales y su efecto sobre la estabilidad del sistema. Estas condiciones se eligieron debido a su gran efecto sobre la seguridad del sistema y de los empleados. Los resultados conseguidos evidencian que los IEDs bien ajustados son aptos para distinguir entre fallas internas y externas, asignando tiempos de disparo selectivos y precisos que garantizan la operación eficaz de las protecciones principales y de respaldo.

- **SO2-3:** Capacidad de integrar en el diseño aspectos de bienestar. La disponibilidad de la energía eléctrica es un factor crucial para el bienestar de las comunidades que sirven a la central hidroeléctrica y del país entero. Un sistema de protecciones con los ajustes adecuados permite que se reduzcan las dificultades para los usuarios finales, se mejore la calidad del servicio y se acorten los periodos de interrupción no programada. En consecuencia, la validación no se restringió a un aspecto técnico; también se tomó en cuenta su impacto en el confort, la calma y la seguridad que brinda un sistema eléctrico fiable a los ciudadanos y a las áreas productivas.
- **SO2-4:** Capacidad de diseño considerando factores globales. El estudio se realizó bajo un marco normativo internacional, ya sea IEC o ANSI/IEEE, o la norma IEC 60255, entre otras, lo que asegura que los resultados y recomendaciones puedan ser aplicables o replicables en otros sistemas eléctricos bajo condiciones similares. También se emplearon softwares de simulación reconocidos a nivel mundial, tales como DlgSILENT PowerFactory y AutoCAD, herramientas estándares en la industria energética a nivel global. Esta metodología hizo posible apropiarse de buenas prácticas de diseño para mercados eléctricos interconectados, creando una visión integral de la ingeniería de protecciones.
- **SO2-5:** Capacidad de diseño considerando factores culturales. En la definición de criterios de validación, este estudio consideró el nivel de capacitación del personal, las prácticas operativas y los protocolos de mantenimiento. Los cambios propuestos para los IEDs eran compatibles con las técnicas usadas por los ingenieros de campo, teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y herramientas y la cultura técnica existente en el entorno ecuatoriano. Esto hizo posible una propuesta ajustada a la realidad cultural y operativa, teniendo en cuenta las particularidades de las personas que participan en el funcionamiento del sistema.

- **SO2-6:** Capacidad de diseño considerando factores sociales. El sistema de protecciones evaluado tiene un impacto directo en la sociedad, pues asegura el mantenimiento de un servicio esencial como lo es la electricidad, sobre todo en áreas donde no hay fuentes de respaldo. Los ajustes aprobados previenen paradas extendidas que podrían perjudicar a las comunidades, a la empresa CELEC o al país. Así, se identificó que el ingeniero eléctrico tiene un papel social como asegurador del bienestar común mediante soluciones técnicas fiables.
- **SO2-7:** Capacidad de diseño considerando factores ambientales. En el proyecto, los sistemas de protección bien configurados impiden que se produzcan daños en equipos de alta potencia, como los transformadores de aceite o los fusibles, que normalmente están fabricados con aleación de metales. La rotura de estos componentes podría tener serias consecuencias para el medioambiente. Por ejemplo, una falla no despejada puede generar derrames de aceites dieléctricos, explosiones o fugas de gases contaminantes para el medioambiente. La validación brinda mecanismos de respuesta rápida y precisa, lo cual ayuda a proteger el entorno natural y contribuye a la sostenibilidad del sistema eléctrico.
- **SO2-8:** Capacidad de diseño considerando factores económicos. Una falla no protegida de manera adecuada puede generar daños por cientos de miles de dólares, afectando a transformadores de potencia, interruptores de media y alta tensión, y equipos de control. A través de la validación de ajustes, se demostró que es posible mejorar la coordinación de protecciones, de esta forma minimizando así los costos por reparación, interrupciones y pérdida de energía no suministrada (ENS). El análisis económico se complementó con escenarios simulados que permitieron evidenciar el ahorro potencial al reducir el alcance de fallas a través de protecciones coordinadas y bien configuradas.