



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN ESQUEMA DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL
PARA UNA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN CON RELÉ SEL 787L**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Christofer Nelson López Villamar

Francisco Javier González Sierra

TUTOR: Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc.

Guayaquil – Ecuador

2025

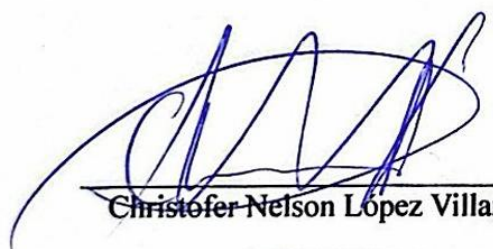
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Christofer Nelson López Villamar con documento de identificación N° 0950611004 y Francisco Javier González Sierra con documento de identificación N° 0954212338; 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.

Guayaquil, 28 de enero del año 2025

Atentamente,



Christofer Nelson López Villamar
0956011004

Francisco Javier González Sierra
0954212338

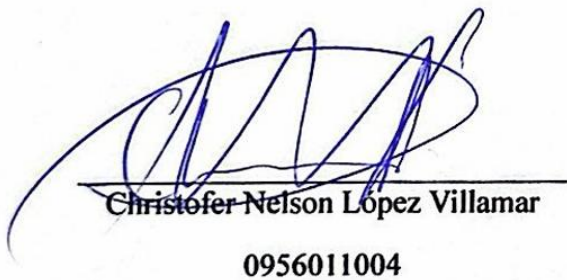
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Christofer Nelson López Villamar con documento de identificación No. 0950611004 y Francisco Javier González Sierra con documento de identificación No. 0954212338, 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: “Análisis y simulación de un esquema de protección diferencial para una línea de distribución con relé SEL 787L”, 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.

Guayaquil, 28 de enero del año 2025

Atentamente,



Christofer Nelson López Villamar
0956011004



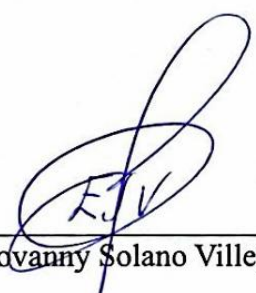
Francisco Javier González Sierra
0954212338

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ervin Geovanny Solano Villegas con documento de identificación N° 0923481915, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN ESQUEMA DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL PARA UNA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN CON RELÉ SEL 787L, realizado por Christofer Nelson López Villamar con documento de identificación N° 0950611004 y por Francisco Javier González Sierra con documento de identificación N° 0954212338, 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.

Guayaquil, 28 de enero del año 2025

Atentamente,



Ing. Ervin Geovanny Solano Villegas, MSc.
0923481915

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino, por darme salud, sabiduría y perseverancia para alcanzar esta meta. Sin su infinita gracia nada habría sido posible.

A mi familia, mi mayor pilar quienes han sido el motor de mi vida. En especial a mi padre por su ejemplo, amor y constante apoyo incondicional, enseñándome a no rendirme jamás, a mis seres queridos por sus palabras de aliento y paciencia.

A mi tutor de tesis, por su guía y compromiso durante el desarrollo de este trabajo, su conocimiento y orientación fueron claves para alcanzar este logro.

Finalmente, a mis compañeros y con quienes compartí largas jornadas de esfuerzo y aprendizaje, sus ideas, risas y apoyo mutuo hicieron de este proceso más llevadero y significativo.

Christofer Nelson López Villamar

A mis padres, quienes han sido el motor principal que impulsa mi vida, siempre brindándome su amor y apoyo incondicional para superar cada desafío. Gracias por siempre confiar en mí.

Dedicado también a mis hermanos, mis eternos generadores de motivación, quienes con su ejemplo me han inspirado a crecer y a mantenerme firme en este proceso.

Mi más profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, quien actuó como un transformador de conocimiento, guiándome con paciencia y sabiduría para alcanzar los objetivos propuestos.

Valoro inmensamente a mis amigos, mis fieles resistencias al desánimo, quienes con su compañía y palabras de aliento ayudaron a disipar las tensiones y me recordaron que el esfuerzo siempre vale la pena.

Mi Doky, mi constante fuente de energía renovable, cuyo cariño y alegría han iluminado incluso los días más oscuros de este trayecto.

Fue un camino lleno de retos, pero también de aprendizajes inolvidables, gracias a todos.

Francisco Javier González Sierra

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y sabiduría necesaria para alcanzar esta meta.

A mi familia, en especial a mi padre Carlos Patricio López Salazar por su apoyo incondicional, ser mi motivación constante, ejemplo de perseverancia, dedicación que me enseñó a no rendirme jamás y por sus palabras de aliento que siempre fortalecieron mi espíritu, este logro también es tuyo porque sin tu ayuda no habría sido posible.

Christofer Nelson López Villamar

En primer lugar, agradezco a Dios, quien con su infinita sabiduría y fortaleza me guió durante todo este proceso. Su presencia fue mi mayor fuente de inspiración y confianza en los momentos más desafiantes.

A mis padres, Ramón y Jenny, quienes con su amor incondicional y apoyo constante me han enseñado el verdadero valor del esfuerzo y la perseverancia. Este logro no habría sido posible sin su sacrificio y motivación diaria.

A mis hermanos, Darío, Allison y Alan, por ser mi soporte emocional y mis compañeros de vida. Gracias por su confianza en mí y por ser una fuente constante de superación y motivación.

A mi tutor de tesis, el Ing. Ervin Solano cuyo conocimiento y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Gracias por su guía y compromiso, que marcaron una diferencia significativa en cada etapa de esta investigación.

A mis amigos, por ser un refugio en los momentos difíciles y por recordarme siempre la importancia de disfrutar el camino. Su compañía y aliento fueron esenciales para mantenerme enfocado y motivado.

Francisco Javier González Sierra

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Título	1
1.2. Introducción	1
1.3. Planteamiento del problema	1
1.4. Justificación.....	2
1.5. Delimitación del problema	2
1.6. Beneficiarios del análisis de estudio	3
1.6.1. Operadores del sistema eléctrico.....	3
1.6.2. Comunidad científica	3
1.6.3. Universidad Politécnica Salesiana (UPS)	3
1.7. Objetivos	3
1.7.1. Objetivo general	3
1.7.2. Objetivos específicos.....	3
1.8. Metodología y equipos.....	4
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	5
2.1. Fundamentación Teórica	5
2.2. Clasificación de líneas eléctricas según operación	6
2.2.1. Líneas de transmisión.....	6

2.2.2.	Líneas de subtransmisión	6
2.3.	Clasificación de fallas y cortocircuitos	6
2.3.1.	Fallas simétricas	6
2.3.2.	Fallas asimétricas	7
2.4.	Equipos de maniobra	9
2.4.1.	Cortacircuitos o interruptores de maniobra	9
2.4.2.	Seccionadores	10
2.5.	Equipos de medición	12
2.5.1.	Transformadores de tensión o de potencia	12
2.5.2.	Transformadores de corriente	13
2.6.	Relevadores de protección	15
2.7.	Características de funcionamiento	15
2.7.1.	Fiabilidad	15
2.7.2.	Seguridad	16
2.7.3.	Selectividad	16
2.7.4.	Velocidad de reacción	16
2.7.5.	Tipos de protección de relevadores	16
2.8.	Relé SEL 787L	28
2.9.	IEEE C37.94	28
2.10.	IEC 61850	29
2.11.	IEC 60870-5-103	29
2.12.	IEEE 1588	29
2.13.	IEEE C37.118	30
2.14.	IEC 60255-149	30
2.15.	Software DIgSilent	30
2.16.	Software Matlab	30
3.	CAPÍTULO III: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA	32
3.1.	Coordinación de protección de diferencial de línea	32
3.1.1.	Condiciones generales	32
3.2.	Caso de estudio	32
3.2.1.	Línea 1	33
3.2.2.	Convertimos las unidades de millas a kilómetros	34

3.2.3.	Línea 2.....	34
3.3.	Configuración global.....	35
3.4.	Configuración de líneas.....	37
3.4.1.	Configuración del sistema en DIgsilent	37
3.4.2.	Configuración de barras	38
3.5.	Configuración de relé SEL-787L en DIgSilent.....	47
3.5.1.	Configuración de los transformadores de corriente y potencia.....	47
3.6.	Pruebas y simulación de casos planteados	48
3.6.1.	Caso 1: Condiciones normales de operación.....	48
3.6.2.	Caso 2: Energización del transformador	50
3.6.3.	Caso 3: Fallas externas	54
3.6.4.	Caso 4: Fallas internas.....	58
3.7.	Datos obtenidos	70
3.8.	Presupuesto.....	78
4.	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
4.1.	Conclusiones	78
4.2.	Recomendaciones.....	79
4.3.	Anexo	79
4.4.	Bibliografía.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1. Diagrama unifilar	5
Imagen 2. Diagrama unifilar falla trifásica	7
Imagen 3. Diagrama unifilar falla bifásica a tierra.....	7
Imagen 4. Diagrama unifilar falla bifásica.....	8
Imagen 5. Diagrama unifilar falla monofásica a tierra.....	8
Imagen 6. Diagrama unifilar falla circuito abierto	9
Imagen 7. Fusible de potencia.....	10
Imagen 8. Limitadores de corriente.....	10
Imagen 9. Seccionador de cuchillas giratorias	11
Imagen 10. Seccionador de cuchillas deslizantes.....	11
Imagen 11. Seccionador de columnas giratorias	12
Imagen 12. Seccionador pantógrafo.....	12
Imagen 13. Transformador de potencia.....	13
Imagen 14. Transformador de corriente de devanado primario	13
Imagen 15. Transformador de corriente tipo barra.....	14
Imagen 16. Transformador de corriente tipo ventana	14
Imagen 17. Transformador de corriente tipo Dona.	14
Imagen 18. U.S. Moderately Inverse Curve: U1	19
Imagen 19. U.S. Inverse Curve: U2	20
Imagen 20. U.S. Very Inverse Curve: U3	20
Imagen 21. U.S. Extremely Inverse Curve: U4.....	21
Imagen 22. U.S. Short-Time Inverse Curve: U5	21
Imagen 23. IEC Class A Curve (Standard Inverse): C1	22
Imagen 24. IEC Class B Curve (Very Inverse): C2.....	22
Imagen 25. IEC Class C Curve (Extremely Inverse): C3	23
Imagen 26. IEC Long-Time Inverse Curve: C4	23
Imagen 27. IEC Short-Time Inverse Curve: C5.....	24
Imagen 28. IEEE Moderately Inverse Curve: E1	24
Imagen 29. IEEE Very Inverse Curve: E2.....	25
Imagen 30. IEEE Extremely Inverse Curve: E3	25
Imagen 31. Diagrama unifilar de protección de distancia por zonas	26
Imagen 32. Diagrama de zonas de protección de un relé direccional electromecánico	28
Imagen 33. Relé SEL-787L.....	28
Imagen 34. Caso de estudio.....	32
Imagen 35. Diagrama unifilar del sistema	37
Imagen 36. Ventana de parámetros red externa.....	38
Imagen 37. Parámetros barra R.....	38
Imagen 38. Parámetros flujo de carga	39
Imagen 39. Parámetros barra S	39
Imagen 40. Parámetros flujo de carga	40

Imagen 41. Parámetros barra S	40
Imagen 42. Flujo de carga barra T	41
Imagen 43. Parámetros barra 4.....	41
Imagen 44. Flujo de carga barra 4.....	42
Imagen 45. Parámetros de línea	42
Imagen 46. Parametrización tipo de línea	43
Imagen 47. Parametrización flujo de carga de línea	43
Imagen 48. Parámetros de derivación de línea.....	44
Imagen 49. Parámetros de derivación de línea.....	44
Imagen 50. Flujo de carga línea derivada.....	45
Imagen 51. Parametrización de transformador 1	45
Imagen 52. Parametrización carga 1	46
Imagen 53. Parametrización de carga 2.....	46
Imagen 54. Selección del relé SEL-787L.....	47
Imagen 55. Valores configurados de los CT(R-S).....	47
Imagen 56. Valores configurados del PT.....	48
Imagen 57. Diagrama unifilar sistema en condiciones normales de operación	49
Imagen 58. Gráfica de señal de relé en condiciones normales de operación	50
Imagen 59. Diagrama unifilar de transformador con carga conectada.....	51
Imagen 60. Gráfica de relé arranque de transformador con carga	52
Imagen 61. Diagrama unifilar de energización de transformador con carga desconectada.	53
Imagen 62. Gráfica de energización del transformador con carga desconectada.....	54
Imagen 63. Diagrama de simulación, falla en barra R	55
Imagen 64. Gráfica de accionamiento del relé barra R	56
Imagen 65. Diagrama de unifilar, falla en barra S	57
Imagen 66. Gráfica de simulación, falla en barra S	58
Imagen 67. Diagrama unifilar de fallo al 25% de la línea.....	59
Imagen 68. Gráfica de simulación del sistema con falla al 25% de la línea	60
Imagen 69. Diagrama unifilar de fallo al 50% de la línea.....	61
Imagen 70. Gráfica de simulación del sistema de falla al 50% de la línea	62
Imagen 71. Diagrama unifilar de falla en línea al 75% de la línea	63
Imagen 72. Gráfica de simulación del sistema al 75% de la línea	64
Imagen 73. Diagrama unifilar falla al 50% de la línea derivada.....	65
Imagen 74. Gráfica de simulación del sistema al 50% de la línea derivada	66
Imagen 75. Diagrama unifilar barra T	67
Imagen 76. Gráfica de simulación barra T	68
Imagen 77. Diagrama unifilar falla en barra 4	69
Imagen 78. Gráfica de simulación falla en barra T	70
Imagen 79. Gráfica de Característica Diferencial	71
Imagen 80. Sistema de operación en condiciones normales	72
Imagen 81. Energización del transformador con carga conectada	73
Imagen 82. Energización del transformador con carga desconectada.....	73

Imagen 83. Falla externa en barra R	74
Imagen 84. Falla externa en barra S	74
Imagen 85. Falla al 25% de línea	75
Imagen 86. Falla al 50% de línea	75
Imagen 87. Falla al 75% de línea	76
Imagen 88. Falla en línea derivada.....	76
Imagen 89. Falla en barra T.....	77
Imagen 90. Falla en barra T.....	77
Imagen 91. Codificación de la característica diferencial del Relé SEL 787L en Matlab.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones asociadas con curvas U.S	18
Tabla 2. Ecuaciones asociadas con curvas IEC	18
Tabla 3. Ecuaciones asociadas con curvas IEEE.....	19
Tabla 4. Datos del sistema: Línea aérea de 13.8kV y relación de CT/PT	33
Tabla 5. Impedancias de línea	34
Tabla 6. Configuración de aplicaciones para relé.....	37
Tabla 7. Datos de simulación.	70
Tabla 8. Valores de pendiente.....	71
Tabla 9. Valores pares ordenados	71
Tabla 10. Tabla de presupuesto	78

RESUMEN

El trabajo presentado con el título "Análisis y simulación de un sistema de protección diferencial para una línea de distribución utilizando el relé SEL 787L" es simular un sistema de protección diferencial para una línea de distribución utilizando Matlab y DIgSilent Power Factory. El objetivo de este sistema es mejorar la velocidad y precisión en la detección y eliminación de fallas eléctricas, reduciendo el riesgo de daños en la línea y garantizando una energía confiable.

La idea de este proyecto surgió de la necesidad de disponer de sistemas de protección más seguros y fiables en las redes de distribución eléctrica. Pueden ocurrir fallas externas e internas en las líneas de distribución, lo que provoca interrupciones, daños en los equipos e incluso tiempos de inactividad innecesarios. El relé SEL 787L es indispensable aquí porque permite una detección y eliminación de errores rápida y eficiente.

Durante su desarrollo, el proyecto incluye el diseño de un modelo de simulación para analizar el funcionamiento del sistema de protección bajo diversos escenarios de falla. También se ofrecen protocolos de prueba para verificar su efectividad y comparar configuraciones para elegir la mejor opción. Además, estudiamos cómo las perturbaciones externas pueden afectar a la coordinación del sistema y proponemos ajustes para evitar falsas alarmas y mejorar su estabilidad.

La metodología combina simulaciones realizadas en Matlab y DIgSilent, lo que facilita el modelado y ensayo del sistema de protección en un entorno controlado. Los resultados de estas simulaciones ayudarán a desarrollar sistemas de protección más sólidos y eficaces que beneficiarán a los profesionales eléctricos y proporcionarán información útil a la comunidad académica y profesional.

Este proyecto representa un aporte importante al campo de la ingeniería eléctrica porque se enfoca en el diseño y validación de soluciones prácticas e innovadoras que mejoren la operación y confiabilidad de las redes de distribución eléctrica.

ABSTRACT

The work presented with the title "Analysis and simulation of a differential protection system for a distribution line using the SEL 787L relay" is to simulate a differential protection system for a distribution line using Matlab and DIgSilent Power Factory. The objective of this system is to improve speed and accuracy in detecting and eliminating electrical faults, reducing the risk of damage to the line and ensuring reliable power.

The idea of this project arose from the need for safer and more reliable protection systems in electrical distribution networks. External and internal faults can occur on distribution lines, causing interruptions, damage to equipment and even unnecessary downtime. The SEL 787L relay is indispensable here because it allows for fast and efficient error detection and elimination.

During its development, the project includes the design of a simulation model to analyze the operation of the protection system under various fault scenarios. Test protocols are also offered to verify its effectiveness and compare configurations to choose the best option. In addition, we study how external disturbances can affect system coordination and propose adjustments to avoid false alarms and improve their stability.

The methodology combines simulations performed in Matlab and DIgSilent, which facilitates the modeling and testing of the protection system in a controlled environment. The results of these simulations will help develop more robust and effective protection systems that will benefit electrical professionals and provide useful information to the academic and professional community.

This project represents an important contribution to the field of electrical engineering because it focuses on the design and validation of practical and innovative solutions that improve the operation and reliability of electrical distribution networks.

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Título

Análisis y simulación de un esquema de protección diferencial para una línea de distribución con relé SEL 787L.

1.2. Introducción

El desarrollo de los sistemas eléctricos confiables y seguro es de mucha importancia para así poder garantizar la continuidad del suministro de energía en redes de distribución, las fallas eléctricas ya sean de origen internas o externas siempre representan un desafío relevante y esto se debe a los daños que pueden llegar a generar a los equipos, las interrupciones del servicio y los costos asociados a su reparación. En este contexto, la implementación de sistemas de protección diferencial con dispositivos avanzados como el relé SEL-787L ofrece una solución eficiente y confiable. Estos sistemas permiten detectar y despejar las fallas de manera rápida y precisa minimizando así los riesgos de daños y garantizando una estabilidad y continuidad operativa del sistema.

En este trabajo nos enfocaremos a la simulación de un esquema de protección diferencial para una línea de distribución de 13.8kV utilizando los softwares DIgSilent y Matlab Power Factory. A través de esta simulación analizaremos escenarios de fallas, esto con la finalidad de evaluar impactos de perturbaciones externas y la mejora de los parámetros para su mejor desempeño. Este análisis no solo contribuirá al entendimiento de los principios diferenciales de protección, sino que también ofrece un marco práctico para la implementación de sistemas de protección en redes eléctricas.

Este estudio también busca el aporte para el campo de la ingeniería eléctrica mediante la generación de conocimiento el cual permita el desarrollo de sistemas de protección con mayor seguridad, mejor selectividad y eficiencia teniendo como beneficio para la comunidad educativa y como para las empresas de distribución eléctrica que buscan la mejora continua en sus operaciones y garantizar un suministro de energía confiable.

1.3. Planteamiento del problema

Proveer energía eléctrica a través de las líneas de distribución es un proceso crucial el cual nos asegura que el servicio se mantenga de manera continua en diversas áreas ya sean residenciales o industriales. De tal forma es esencial configurar y mantener de forma correcta los dispositivos de protección como el relé SEL-787L ya que cumple un rol importante en la generación de fallos en la red eléctrica, estos relés están diseñados para detectar cualquier anomalía de forma precisa y rápida con esto permitiendo mantener la estabilidad del sistema.

La problemática en las líneas de distribución puede surgir por factores climáticos adversos, sobrecarga por un aumento inesperado en la demanda, cortocircuitos o desgaste de componentes, lo que ocasiona interrupciones del suministro eléctrico y afecta tanto a los consumidores como a otras áreas del sistema de distribución, generando sobrecargas y posibles

fallos mayores. En este contexto, el problema de estudio se centra en las fallas en las líneas de distribución, tanto externas como internas, que pueden saturar los transformadores de corriente, causando errores en las lecturas y activando protecciones de manera innecesaria. Para evitar estos falsos accionamientos y garantizar un servicio continuo, proponemos la correcta discriminación de fallas mediante la configuración de parámetros en el relé SEL 787L.

Por estas razones, es vital contar con un sistema de protección robusto y bien configurado, como el que proporciona el relé SEL 787L, esto ayuda a reducir las probabilidades de fallos, actuar de forma preventiva y asegurar la continuidad del servicio eléctrico en condiciones óptimas, protegiendo así tanto la infraestructura eléctrica como los intereses de los consumidores.

1.4. Justificación

La investigación propuesta se centra en como implementar un sistema de protección para líneas de distribución utilizando el relé SEL 787L a través de simulaciones en Matlab, tiene un valor significativo en el ámbito de la ingeniería eléctrica. Este proyecto busca mejorar la seguridad, confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico en la red y los resultados serán de gran utilidad tanto para las empresas de servicios eléctricos como para las entidades reguladoras del sector energético.

Además, esta investigación responde a la creciente demanda en la industria por sistemas de protecciones más eficaces, especialmente en nuestra región, donde las fallas eléctricas pueden tener un impacto significativo en la operación de infraestructuras críticas. Al abordar esta problemática, esperamos contribuir al desarrollo de prácticas más seguras y eficientes en el sector eléctrico.

1.5. Delimitación del problema

La limitación directa que presentamos a la hora de realizar las pruebas y simulación va sobre todo a que no contamos con un equipo físico en las instalaciones de los laboratorios, por ende, para poder realizar las simulaciones debemos contar con los softwares como DIgSilent y Matlab para la configuración o adquisición de algún dato que nos servirá con la finalidad de parametrizar los módulos y posterior a eso la simulación del mismo, entre este otro factor clave es que en las simulaciones no se consideran eventos extremos como fallas catastróficas ni escenarios con variabilidad climática significativa. Con estas delimitaciones buscamos proporcionar un marco claro y específico para el desarrollo del trabajo asegurándonos que los objetivos planteados sean alcanzables y los resultados sean relevantes para el campo de la ingeniería eléctrica y el ámbito estudiantil.

En el ámbito técnico el estudio toma un enfoque a las líneas de distribución de 13.8kV con protección en ambos extremos evaluando parámetros claves como pendientes de ajuste en el relé ($m1$ y $m2$), los armónicos de segundo orden para la discriminación de perturbaciones externas y el impacto de corriente de inrush.

Las normativas aplicadas para poder garantizar la validez de este diseño y la simulación, consideraremos las siguientes normativas internacionales:

IEC 61850: Establece estándares de comunicación entre dispositivos de protección y control en sistemas eléctricos.

IEEE C37.94: Define requisitos para la interconexión de equipos tele-protegidos mediante fibra óptica.

IEC 60255: Regula las pruebas y requisitos de desempeño para los relés de protección.

1.6. Beneficiarios del análisis de estudio

Entre los beneficiarios de este análisis de estudio se encuentran:

1.6.1. Operadores del sistema eléctrico

El personal que labora en la parte de ingenierías, operaciones y mantenimiento de los sistemas de media tensión. Este trabajo proporcionará información sobre los problemas en líneas de media tensión, coordinación de protecciones con el relé SEL787L con lo cual garantizaremos la seguridad y eficiencia en el sistema.

1.6.2. Comunidad científica

Este trabajo aportará conocimientos académicos y científicos en el área de la ingeniería eléctrica, enfocado directamente a los sistemas de protección de potencia. Este aporte beneficiará a profesionales, académicos y estudiantes que buscan comprender y mejorar prácticas y conocimientos para los sistemas de media tensión.

1.6.3. Universidad Politécnica Salesiana (UPS)

La institución se beneficiará contribuyendo con una investigación de gran relevancia en el ámbito práctico, con esto se fortalecerá la reputación en la carrera de ingeniería eléctrica y sus compromisos en la innovación y el desarrollo. Se obtendrá experiencia y nuevos conocimientos tanto como los autores y como el tutor guía, nuevas técnicas y el desarrollo de soluciones prácticas, esto apertura muchas oportunidades para futuras colaboraciones públicas y el crecimiento de calidad educativa de la universidad.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Simular un sistema de protección diferencial para línea de distribución con relé SEL 787L, mediante los softwares Matlab y Power Factory - DigSilent para mejorar la rapidez, selectividad en la detección y despeje de fallas eléctricas, minimizando riesgos de fallas y daños en las líneas de distribución.

1.7.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de simulación para la protección diferencial de líneas de distribución creando un entorno de simulación que permita evaluar el desempeño del sistema de protección diferencial bajo diferentes escenarios de operación y tipos

de fallas eléctricas, para asegurar su precisión y fiabilidad.

- Desarrollar un protocolo de pruebas para la protección diferencial de líneas, estableciendo criterios y procedimientos mediante Matlab, para poder evaluar los resultados ante diferentes condiciones de falla.
- Comparar la efectividad de configuraciones de protección diferencial, evaluando el impacto en el desempeño del sistema para determinar la configuración más adecuada en distintos escenarios de operación y falla.
- Evaluar el impacto de perturbaciones externas en la coordinación del sistema de protección, proponiendo ajustes en los tiempos de respuestas y prevenir falsas alarmas.

1.8. Metodología y equipos

La investigación adoptará un enfoque cuali-cuantitativo, se evaluarán parámetros numéricos para medir la eficacia del esquema de protección en líneas de distribución, y también para analizar la implementación y la validación del esquema, justificando la selección de tecnologías y procedimientos utilizados.

El estudio tiene un alcance descriptivo, detallando las variables claves en relación con la implementación del esquema de protección en las líneas de distribución que usa el relé SEL 787L. El desempeño del esquema será validado mediante simulaciones en el software Matlab.

El proceso de implementación del esquema de protección para líneas de distribución de 13.8kV con el relé SEL 787L, en Matlab, consta de los siguientes pasos:

1. Identificar los parámetros del sistema eléctrico en estudio, incluyendo datos de las líneas de distribución, y diseñar un modelo de simulación para la protección diferencial de líneas de distribución.
2. Desarrollar un protocolo de pruebas para la protección diferencial de líneas, realizando simulaciones de flujo de potencia y análisis de cortocircuito en Matlab, comparando la efectividad de configuraciones de protección diferencial.
3. Comparar la efectividad de configuraciones de protección diferencial. En esta fase se incluyen pruebas de respuesta ante fallas como fallas a tierra entre fases.
4. Evaluar el impacto de perturbaciones externas en la coordinación del sistema de protección, proponiendo ajustes en los tiempos de respuestas y prevenir falsas alarmas.
5. Resumir los hallazgos clave del estudio, sugerir posibles mejoras y ofrecer recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentación Teórica

El principio de protección de línea diferencial y las propiedades de comunicación de los canales de comunicación, los dispositivos para conexiones de cables piloto son descritos como tecnología convencional, los dispositivos digitales se implementaron con el objetivo de renovar la protección en las redes urbanas e industriales[1]. La siguiente implementación es un sistema de protección diferencial de líneas de dos terminales de 13.8kV con carga derivada, teniendo como referencia el uso del relé de protección SEL-787L, este dispositivo de protección se implementa para verificar las mediciones que pongan en riesgo la operación del sistema como las fallas a tierra, fallas internas, fallas externas, fallas monofásicas y trifásicas, con esto nos aseguramos que la desconexión se realice de forma automática, segura y tenga un nivel de selección precisa ante los fallos que detecte [2].

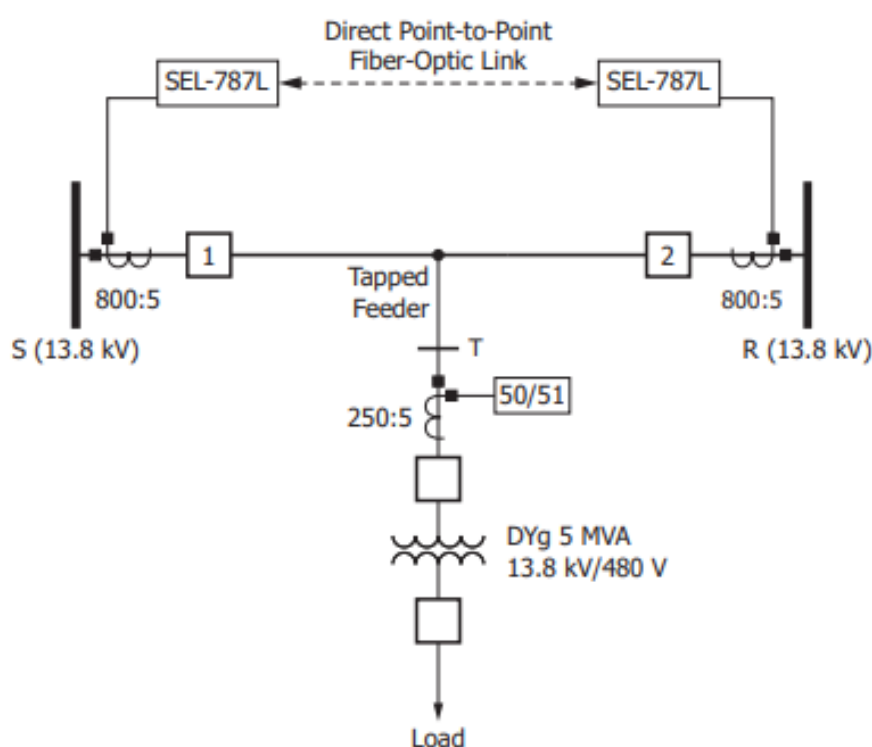


Imagen 1. Diagrama unifilar
Fuente: Manual técnico SEL-787L

2.2. Clasificación de líneas eléctricas según operación

2.2.1. Líneas de transmisión

En los últimos años la ingeniería eléctrica ha tenido cambios notables con respecto a la innovación tecnológica, de manera más simplificada en los campos de la generación y transmisión a altos niveles de voltaje, el transporte de grandes bloques de energía generalmente se transmite por medio de corriente alterna. Los sistemas de transmisión conducen potencias desde las unidades de generación hasta los puntos de recepción que estos casos suelen ser las estaciones, subestaciones o centrales. Las líneas de transmisión son conocidas por ser el eslabón de conexión desde las centrales generadoras y centrales de distribución, estas cumplen la función de conducir energía eléctrica a grandes distancias dentro de los niveles de voltajes conocidos podemos mencionar los voltajes que sobrepasan los 34.5kV, este eslabón se encarga de unir centrales generadores y las redes de distribución [3].

2.2.2. Líneas de subtransmisión

Las líneas de subtransmisión son aquellas encargadas de conducir la energía desde las subestaciones hasta los puntos de consumos, en estos casos los puntos de consumos son las industrias, zonas residenciales y el sistema de alumbrado público, los niveles de voltaje que conducen estas líneas están por debajo de los 34.5kV, en este punto los conductores siguen siendo desnudos, pero en baja tensión ya se implementan conductores con protecciones o con aislamientos para mayor seguridad [3].

2.3. Clasificación de fallas y cortocircuitos

En el sistema eléctrico, las líneas de protección son propensas a todo tipo de fallas entre las más comunes tenemos, fallas producidas por descargas atmosféricas, dilatación de conductores, pérdidas de aislamiento, fallas por causas naturales estas se originan ya sea por caída de árboles, animales que generan cortocircuitos por contactos entre fases. Entre los tipos de fallas o cortocircuitos tenemos las fallas simétricas y asimétricas [4]:

2.3.1. Fallas simétricas

Esta falla se da en las tres fases del sistema eléctrico, esta falla también se denomina falla trifásica.

2.3.1.1. Falla trifásica

Las fallas simétricas se clasifican de esta forma cuando la magnitud de la corriente es igual para todas sus fases y se encuentran desfasadas de 120° , expresándolo en una ecuación tenemos la siguiente expresión:

$$|IR| = |IS| = |IT|$$

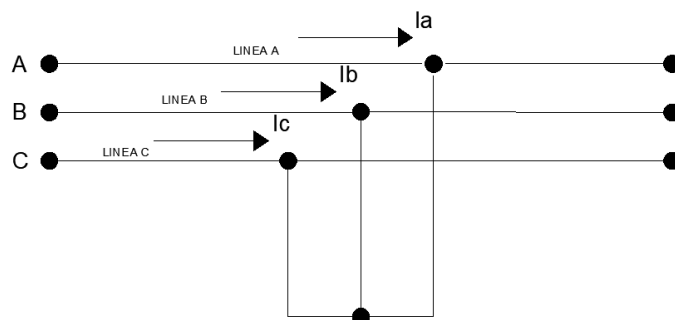


Imagen 2. Diagrama unifilar falla trifásica
Fuente: Adaptación propia por autores

2.3.2. Fallas asimétricas

Las fallas asimétricas se clasifican en: fallas bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas a tierra, se les da esta clasificación porque generan desbalance entre fases de una línea.

2.3.2.1. Falla bifásica a tierra

Este tipo de falla es considerada una de las más críticas que se presentan en las líneas, en esta la magnitud de la corriente que atraviesa por dos fases son muy similares teniendo un desfase generalmente de 120° menos el ángulo de impedancia de falla y la fase que no se vio afectada presenta corrientes muy bajas. La ecuación se expresa de la siguiente manera [5]:

$$|IR| \approx |IS|$$

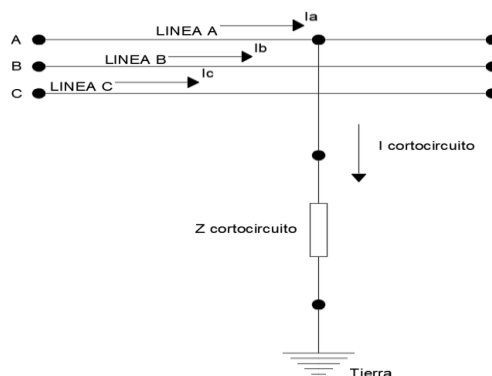


Imagen 3. Diagrama unifilar falla bifásica a tierra
Fuente: Adaptación propia por autores

2.3.2.2. Falla bifásica

En este tipo de falla la magnitud en dos de sus fases normalmente es igual, la falla tiende a ser de menor magnitud con diferencia de la falla bifásica a tierra y sus ángulos tienden a desfasarse a 180° entre sí, sin embargo, la fase que no se vio afectada presenta corrientes de falla bajas, su ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$|IR| = |IS|$$

Dentro de las fallas bifásicas no se aprecian corrientes de falla en el neutro que se conectan los equipos en estrella [5].

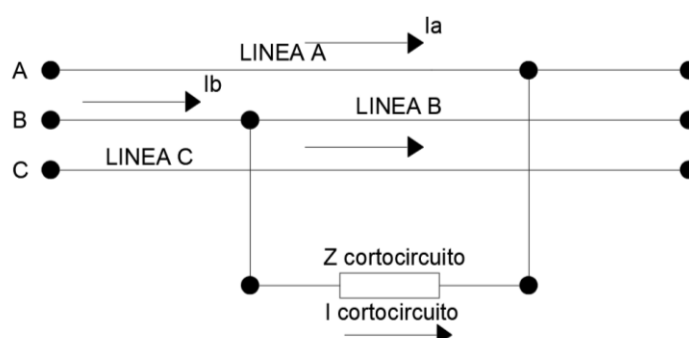


Imagen 4. Diagrama unifilar falla bifásica
Fuente: Adaptación propia por autores

2.3.2.3. Falla monofásica a tierra

Estas fallas representan entre un 70% y 80% del total de las fallas en un sistema eléctrico, se ven originada por factores tales como, descargas atmosféricas, contactos entre conductores con estructuras, árboles entre otros. Este tipo de fallas pueden generar corrientes cuya magnitud llega a superar a una de las fases a tierra en una falla trifásica, esto quiere decir que toda la corriente será conducida por una sola fase y no por las tres. Generalmente es común encontrar estas fallas en sistemas de media tensión y sobre todo cuando la falla se encuentra ubicada cerca de una subestación [5].

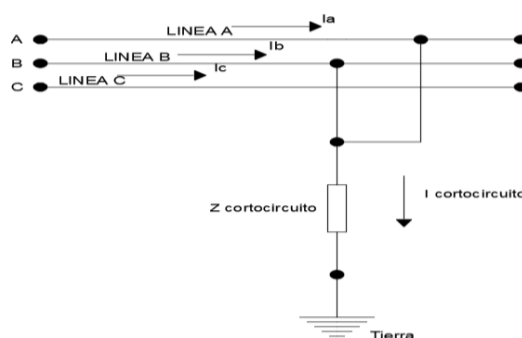


Imagen 5. Diagrama unifilar falla monofásica a tierra
Fuente: Adaptación propia por autores

2.3.2.4. Falla de circuito abierto

Este tipo de fallas son también conocidas como fallas en serie, esto se debe a que la falla está en serie con la línea y debido a esta falla uno o más conductores afectan la confiabilidad del sistema. Las causas de un circuito abierto en un sistema trifásico balanceado pueden deberse a el daño del fusible de protección por una conmutación deliberada en un terminal, las mismas condiciones se dan cuando físicamente se evidencia una ruptura en uno de los tres conductores de las líneas, otras veces se puede presentar que al cortarse el conductor y quedar suspendido sin estar haciendo un contacto, esta condición genera un desequilibrio y por lo tanto se generan las corrientes asimétricas mencionadas anteriormente [6].

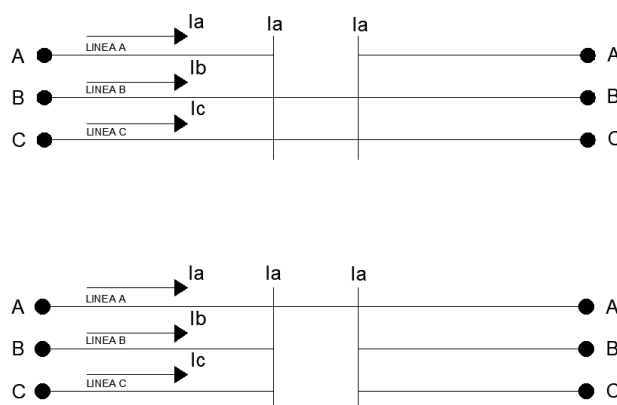


Imagen 6. Diagrama unifilar falla circuito abierto
Fuente: Adaptación propia por autores

2.4. Equipos de maniobra

Los equipos de maniobra son utilizados para seccionar, aislar, proteger las instalaciones o equipos averiados para dar soporte o atender alguna emergencia sin que se vean afectados demás elementos del sistema, estos los podemos clasificar en dos grupos [7]:

- Cortacircuitos o interruptores automáticos
- Fusibles
- Seccionadores

2.4.1. Cortacircuitos o interruptores de maniobra

Son dispositivos mecánicos que cumplen con la función de aperturar y cerrar circuitos con el objetivo de conducir o interrumpir flujos de corrientes en condiciones normales de operación o interrumpir el paso del flujo en condiciones anormales, según su estructura mecánica que los controla se clasifican en: disyuntores, reconectores e interruptores [7].

2.4.1.1. Fusibles

Se define como fusible o dispositivo fusible (por encima de los 600V), los fusibles son dispositivos de protección utilizados para aislar los circuitos eléctricos de un cortocircuito en un sistema de distribución de alto voltaje. Los fusibles se clasifican en [7]:

- Fusibles de potencia
- Limitadores de corriente
- Dispositivos de corte en aceite para distribución



Imagen 7. Fusible de potencia
Fuente: S&C ELECTRIC COMPANY



Imagen 8. Limitadores de corriente
Fuente: Dielco

2.4.2. Seccionadores

Conocidos también como separadores y desconectores, son usados para conectar o desconectar de manera visual diferentes elementos y componentes de una instalación de tal manera que no se vea interrumpida la operación del resto del sistema. De esta forma también se pueden ejecutar trabajos de mantenimiento y reparaciones de los dispositivos mecánicos desenergizando previamente el elemento a intervenir [7].

Los seccionadores se clasifican por la forma de accionamiento y por los contactos, a continuación, se mencionarán los siguientes:

2.4.2.1. Seccionadores de cuchillas giratorias

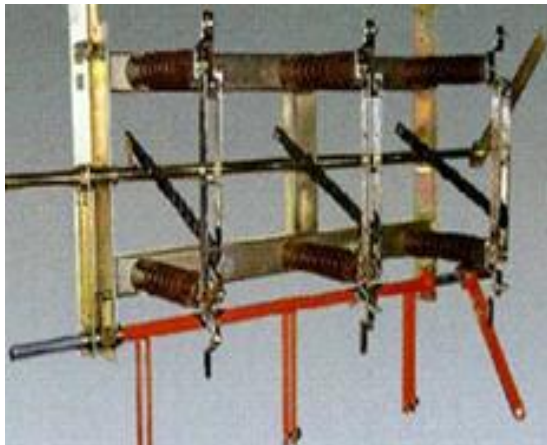


Imagen 9. Seccionador de cuchillas giratorias
Fuente: SectorElectricidad.com

2.4.2.2. Seccionadores de cuchillas deslizantes



Imagen 10. Seccionador de cuchillas deslizantes
Fuente: SectorElectricidad.com

2.4.2.3. Seccionadores de columnas giratorias



Imagen 11. Seccionador de columnas giratorias
Fuente: SectorElectricidad.com

2.4.2.4. Seccionadores de pantógrafo



Imagen 12. Seccionador pantógrafo
Fuente: SectorElectricidad.com

2.5. Equipos de medición

2.5.1. Transformadores de tensión o de potencia

Los transformadores de potencia son equipos esenciales que forman parte de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), y son fundamentales para poder transmitir valores de energía grandes a través de largas distancias de las que se encuentran las estaciones ya sea de generación, transmisión, hasta llegar a los consumidores. La fabricación de estos transformadores es similar a la de los transformadores convencionales, sin embargo, estos requieren un aislamiento más robusto entre los devanados primario y secundario esto con la finalidad de resistir la tensión total de la línea de alto voltaje. Por lo general la capacidad

nominal de estos transformadores es inferior a 500VA, esto significa que el aislamiento es mayor que el del cobre o acero utilizados. Los transformadores instalados en las líneas de alta tensión se encuentran constantemente censando la tensión de línea a neutro con esto eliminamos así la necesidad de dos boquillas de alta tensión ya que el primario se conecta directamente a tierra [8].



Imagen 13. Transformador de potencia
Fuente: Prolec

2.5.2. Transformadores de corriente

También conocidos como TC, los transformadores de corriente son dispositivos que fueron diseñados para suministrar corriente adecuada a los equipos de medición y protección, en estos la corriente secundaria es proporcional a la corriente primaria y su desfase es relacionado a ella un ángulo cercano a cero, como función principal un TC se encarga de reducir a valores que no perjudique y que permitan el uso de equipos de medición normalizados que puedan manejarse sin peligro [9].

Los TC son usados es implementados para mediciones que requieran una mejor exactitud en condiciones normales de operación por ende estos que son usados para protección requieren tener un grado alto de exactitud cuando detecte fallas en el flujo de corriente, entre los tipos de transformadores de corrientes encontramos los siguientes [8]:

- **Devanado primario:** Se utiliza en todo tipo de instalaciones, nivel de voltaje máximo 765kV.



Imagen 14. Transformador de corriente de devanado primario
Fuente: IME

- **Tipo barra:** Misma función y características que el tipo primario devanado.



Imagen 15. Transformador de corriente tipo barra
Fuente: RS pro

- **Tipo ventana:** Son usados a las salidas de líneas o circuitos, por ejemplo, en barras de tableros y subestaciones con voltajes no mayores a 13.8kV.



Imagen 16. Transformador de corriente tipo ventana
Fuente: BLOX

- **Tipo boquilla o dona:** Son complementos de transformadores o interruptores de potencia, los cuales alimentan a los dispositivos de protección.



Imagen 17. Transformador de corriente tipo Dona.
Fuente: Laymon Transformadores

2.6. Relevadores de protección

Dado que los dispositivos eléctricos son fundamentales para transportar grandes cantidades de energía, desde dispositivos y consumidores que se encuentran lejos en distancias cortas o largas. Si estas líneas se interrumpen, puede causar una interrupción significativa en el suministro de energía en una región, especialmente si las líneas operan a alto voltaje y largas longitudes, lo que no causará que ningún sistema eléctrico se vuelva inestable, cuando ocurrió una falla en una parte del sistema eléctrico, se produjo un aumento del flujo de corriente para el punto afectado, acompañado de desviaciones que no fueron energizadas. Para detectar fallas, utilice transformadores de corriente y transformadores de potencial. Los transformadores de potencia se convierten en electricidad en un segundo y preciso momento, mientras que los transformadores explotan su potencial en muy poco tiempo. Las siguientes secciones son esenciales para que funcionen las funciones de protección.

En este contexto, existen diferentes tipos de relés, su principio de funcionamiento, su circuito de protección y su circuito de control, así como cada una de sus partes principales. El relé de protección es operado por una señal secundaria la cual es enviada desde el transformador de corriente o por un transformador de potencial sea el caso en el que se vaya a implementar. El relé por medio de sus contactos hace posible que el interruptor opere disparándose, desconectando el circuito antes de que se detecte una anomalía. Los relés pueden clasificarse dependiendo su diseño y funcionalidad de las cuales pueden ser [10]:

- Inducción electromagnética.
- Atracción electromagnética.

2.7. Características de funcionamiento

Las características funcionales de los relevadores se encuentran en el tiempo de operación y aún más la facilidad para realizar los ajustes:

2.7.1. Fiabilidad

La fiabilidad en los equipos de protección es aquella en responder siempre correctamente, esto quiere decir que la protección debe responder con seguridad y efectividad ante cualquier situación que se produzca, no hay que confundir la forma de respuesta de la protección con la forma en que actúa u opera. En esta función, la protección monitorea de manera continua el sistema, lo que le permite responder en todo momento según las condiciones que se presenten. En resumen, la respuesta del sistema de protección puede manifestarse ya sea actuando o permaneciendo inactiva. Teniendo claro el concepto, una protección solamente actúa en condiciones de falla y puede ser que estas condiciones sean escasas y con excepciones en los sistemas eléctricos modernos [11].

2.7.2. Seguridad

Esta función se refiere al grado de veracidad en el que el relé no deberá actuar. La protección debe saber distinguir las situaciones de falla y aquellas que no lo son, para esto se debe cumplir con las siguientes características [11]:

- Definir cada protección de las magnitudes mínimas necesarias que permitan distinguir las situaciones de fallas con las de un sistema de operación en condiciones normales.
- Definir cada protección de las magnitudes necesarias para las condiciones límites que permitan distinguir las situaciones de falla de aquellas situaciones normales de operación.

2.7.3. Selectividad

Esta propiedad permite reconocer las fallas que afecten la operación de manera continua del sistema, significa que pueden aparecer varias señales que en el relevador y este solamente responderá a la que sea adecuada para el sistema [10].

2.7.4. Velocidad de reacción

Una vez detectada una falla, esta debe ser despejada lo más antes posible, cuanto menor sea el tiempo en aislar una falla, menos se extenderá los efectos de esta con esto se minimizan los daños y alteraciones al reducirse el tiempo de permanencia bajo condiciones anómalas en los diferentes elementos. La rapidez de una protección depende directamente de la tecnología implementada en la fabricación de velocidad de respuesta del sistema de control de los interruptores implementados en la misma. Sin embargo, para que el despeje se realice de manera adecuada depende de que las protecciones actúen de forma inmediata en función de las siguientes características [11]:

- **Protecciones instantáneas:** Estas actuarán de forma rápida debido a la falla producida dentro del área que está siendo protegida.
- **Protecciones con retraso en tiempo:** Este tipo de protección es aquella que va a retrasar la operación, esto quiere decir que, retrasará el inicio de una maniobra de apertura entre los interruptores una vez que se haya tomado la decisión de volver a operar con normalidad.
- **Interoperabilidad:** Tiene la capacidad de poder usar e intercambiar información de manera segura y efectiva entre redes, sistemas, dispositivos y aplicaciones con el objetivo de poder usar la información de forma segura sin ningún inconveniente.

2.7.5. Tipos de protección de relevadores

Los relevadores son dispositivos electromagnéticos o electrónicos, estos se destacan por brindar protección a un área, instalación o equipo, estos van desde sistemas de generación, estaciones, subestaciones, líneas de transmisión, distribución incluyendo motores de gran potencia. Cada relevador se caracteriza por brindar funciones las cuales fueron diseñadas de

manera específica para poder cumplir con los requerimientos donde será implementado. Entre las principales funciones aplicadas al sistema tenemos [12]:

- Protección de sobrecorriente
- Protección de distancia
- Protección diferencial
- Protección direccional.

2.7.5.1. Protección de sobrecorriente

La protección contra sobrecorriente es una de las técnicas más simples y utilizadas en sistemas eléctricos. Su función es monitorear la corriente que fluye por el sistema y compararla con un valor de referencia predeterminado, ajustado según las características del lugar de instalación. Si la corriente supera este umbral, se activa la protección. Sin embargo, para un funcionamiento adecuado, en condiciones normales, es necesario que la corriente de carga sea inferior a la corriente mínima asociada a una falla, dependiendo del tiempo de respuesta, estas medidas de protección se dividen en medidas de protección de sobrecorriente instantáneas y protección de sobrecorriente de tiempo diferido [13]:

Los dispositivos de protección instantánea, responden inmediatamente a las sobrecorrientes sin provocar retrasos en su funcionamiento, quiere decir que no habrá ningún tiempo de retaso en la operación del sistema desde el instante que el valor exceda el valor de referencia [13].

Las protecciones de sobrecorriente en tiempo diferido, estas van a introducir un tiempo de retardo de manera intensional con la finalidad de retrasar la operación, cuando ocurre esto el valor de la intensidad de entrada toma el nombre de sobrecorriente de tiempo fijo [13].

Para el caso presentado mostraremos los ajustes de temporización de curva y dial de tiempo los cuales se ha obtenido directamente del manual. Para las curvas de relé de sobrecorriente temporizada de EE. UU., IEC e IEEE se muestran en la Figura 4.70 a la Figura 4.82. Los elementos de sobrecorriente temporizada consulte la Figura 4.65 a la Figura 4.69 [14].

Tipo de curva	Tiempo de operación	Tiempo de reinicio	Imagen
U1 (Moderadamente inversa)	$t_p = TD \left(0.026 + \frac{0.0104}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{1.8}{1 - M^2} \right)$	Imagen 19
U2 (Inverso)	$t_p = TD \left(0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{5.95}{1 - M^2} \right)$	Imagen 20
U3 (Muy Inverso)	$t_p = TD \left(0.0963 + \frac{3.88}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{3.88}{1 - M^2} \right)$	Imagen 21
U4 (extremadamente inverso)	$t_p = TD \left(0.0352 + \frac{0.00342}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{5.67}{1 - M^2} \right)$	Imagen 22
U5 (Tiempo corto inverso)	$t_p = TD \left(0.00262 + \frac{0.00342}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{0.323}{1 - M^2} \right)$	Imagen 23

Donde:

t_p = Tiempo de operación en segundos.

t_r = Inducción electromecánica – tiempo de reinicio de la emulación de disco en segundos.
(si selecciona la configuración de reinicio electromecánico)

TD = Ajuste del dial del tiempo.

M = Múltiplos aplicados de la corriente de arranque {para el tiempo de funcionamiento (t_p), $M > 1$; para el tiempo de reinicio (t_r), $M \leq 1$ }

Tabla 1. Ecuaciones asociadas con curvas U.S
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

Tipo de curva	Tiempo de funcionamiento	Tiempo de reinicio	Imagen
C1 (Estándar Inverso)	$t_p = TD \left(\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{13.5}{1 - M^2} \right)$	Imagen 24
C2 (Muy Inverso)	$t_p = TD \left(\frac{13.5}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{47.3}{1 - M^2} \right)$	Imagen 25
C3 (Extremadamente Inverso)	$t_p = TD \left(\frac{80}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{80}{1 - M^2} \right)$	Imagen 26
C4 (Inverso de tiempo largo)	$t_p = TD \left(\frac{120}{M - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{120}{1 - M} \right)$	Imagen 27
C5 (Inverso de tiempo corto)	$t_p = TD \left(\frac{0.14}{M^{0.04} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{4.85}{1 - M^2} \right)$	Imagen 28

Tabla 2. Ecuaciones asociadas con curvas IEC
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

Tipo de curva	Tiempo de funcionamiento	Tiempo de reinicio	Imagen
E1 moderadamente inverso	$t_p = TD \left(0.1140 + \frac{0.0515}{M^{0.02} - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{4.85}{1 - M^2} \right)$	Imagen 29
E2 (Muy Inverso)	$t_p = TD \left(0.491 + \frac{19.61}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{21.6}{1 - M^2} \right)$	Imagen 30
E3 (Extremadamente inverso)	$t_p = TD \left(0.1217 + \frac{28.2}{M^2 - 1} \right)$	$t_r = TD \left(\frac{29.1}{1 - M^2} \right)$	Imagen 31

Donde:

t_p = Tiempo de operación en segundos

t_r = Inducción electromecánica – tiempo de reinicio de la emulación de disco en segundos.
(si selecciona la configuración de reinicio electromecánico)

TD = Ajuste del dial del tiempo.

M = Múltiplos aplicados de la corriente de arranque {para el tiempo de funcionamiento (t_p), $M > 1$; para el tiempo de reinicio (t_r), $M \leq 1$ }

Tabla 3. Ecuaciones asociadas con curvas IEEE

Fuente: Manual Técnico SEL-787L

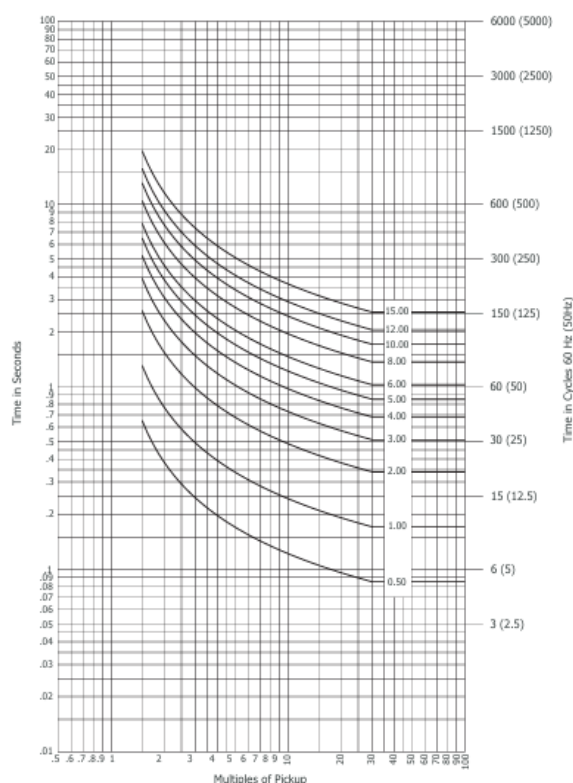


Imagen 18. U.S. Moderately Inverse Curve: U1

Fuente: Manual Técnico SEL-787L

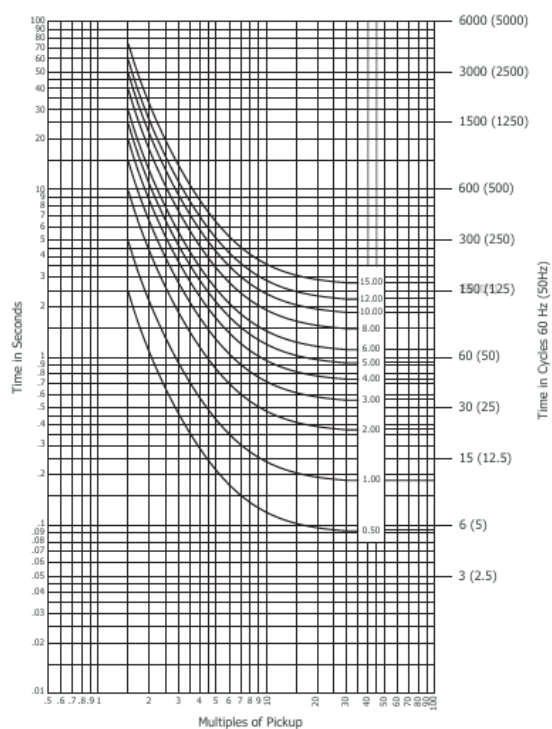


Imagen 19. U.S. Inverse Curve: U2
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

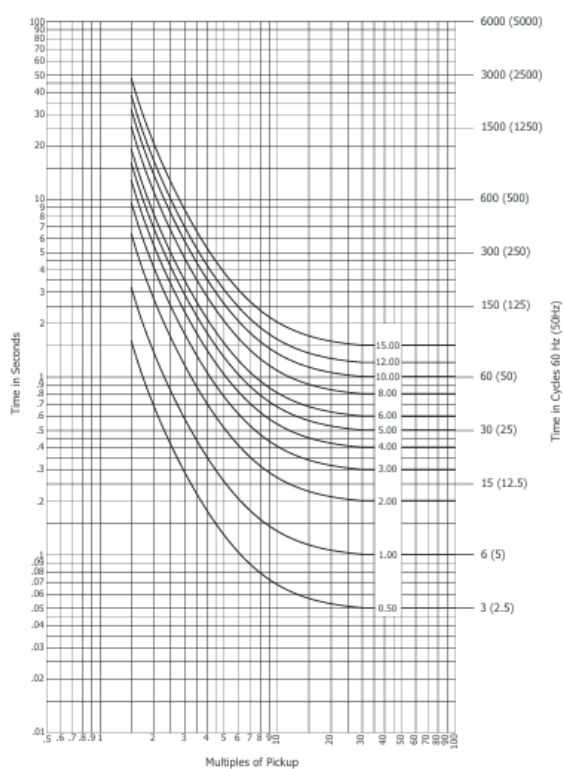


Imagen 20. U.S. Very Inverse Curve: U3
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

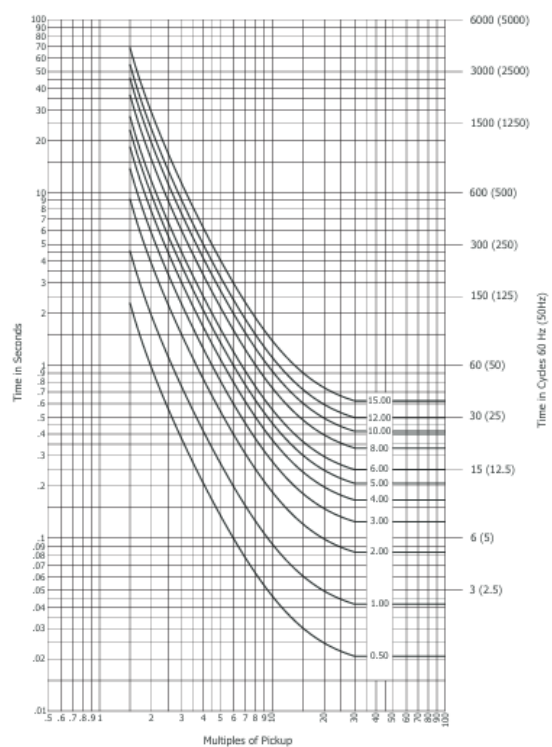


Imagen 21. U.S. Extremely Inverse Curve: U4
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

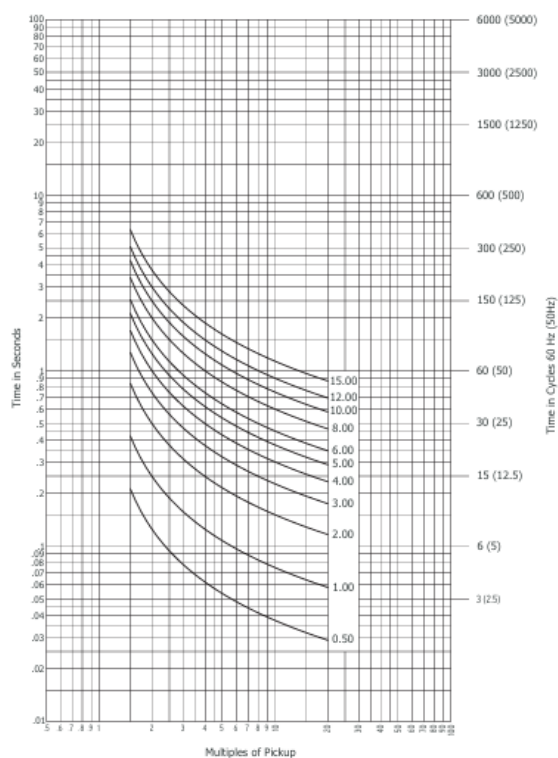


Imagen 22. U.S. Short-Time Inverse Curve: U5
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

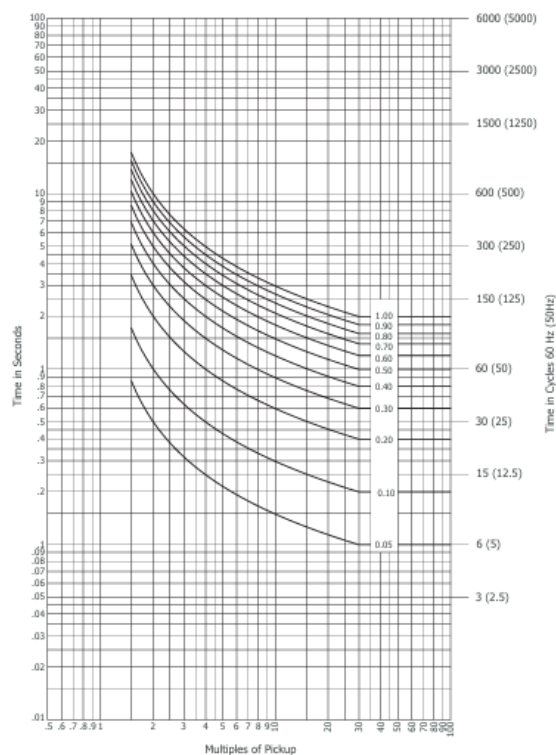


Imagen 23. IEC Class A Curve (Standard Inverse): C1
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

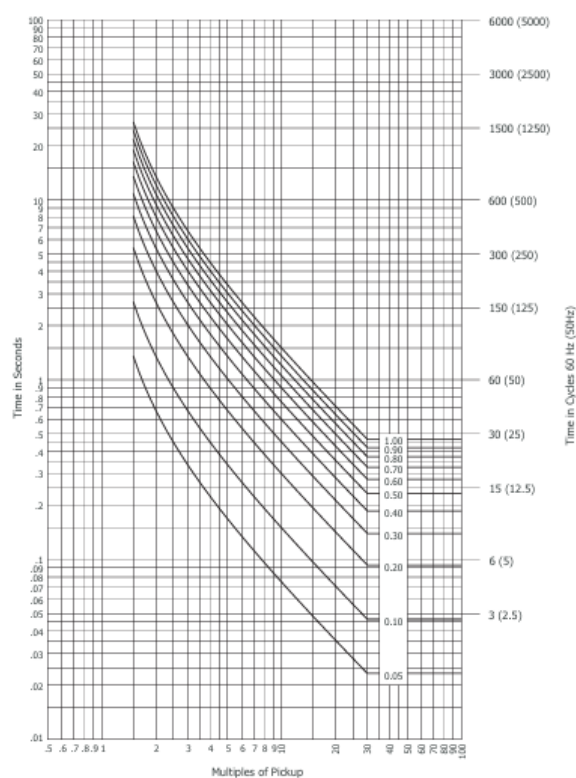


Imagen 24. IEC Class B Curve (Very Inverse): C2
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

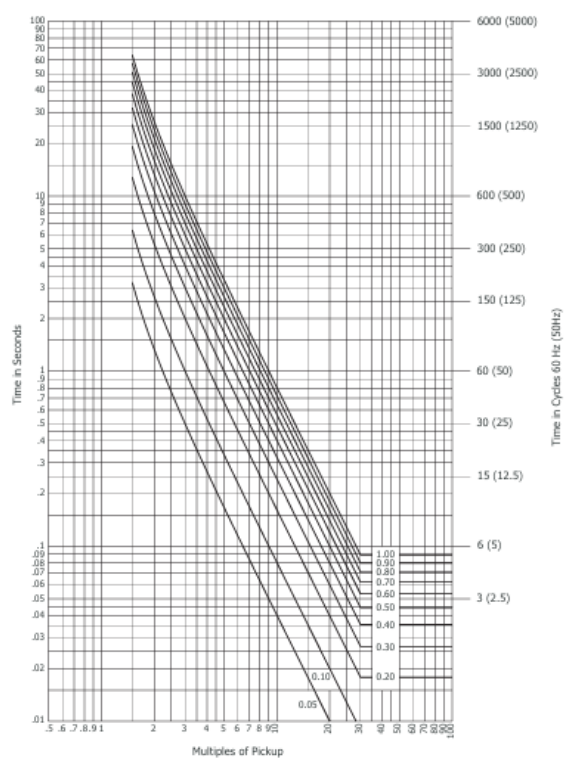


Imagen 25. IEC Class C Curve (Extremely Inverse): C3
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

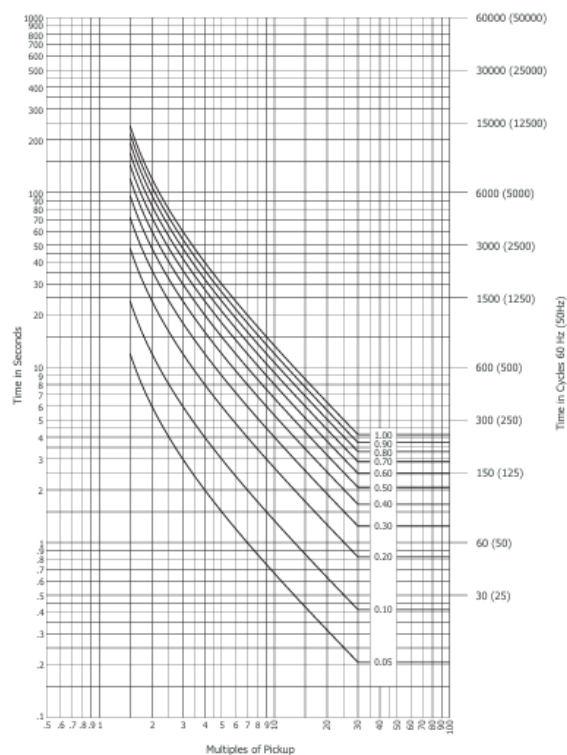


Imagen 26. IEC Long-Time Inverse Curve: C4
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

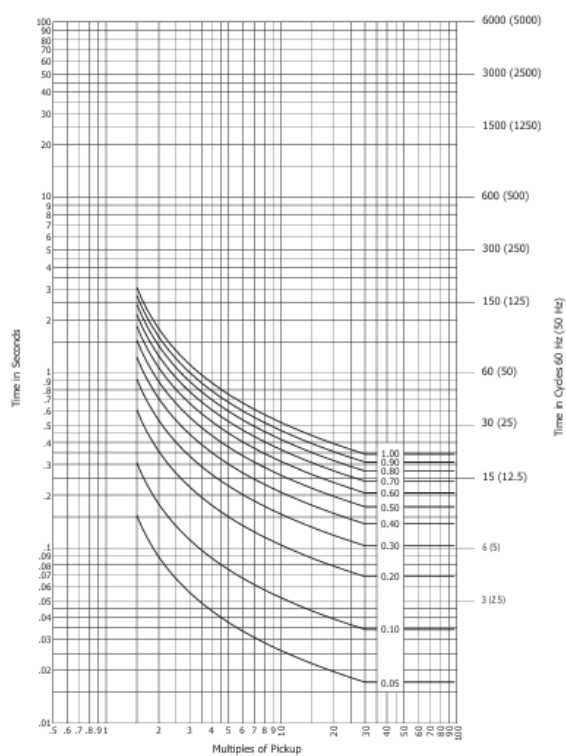


Imagen 27. IEC Short-Time Inverse Curve: C5
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

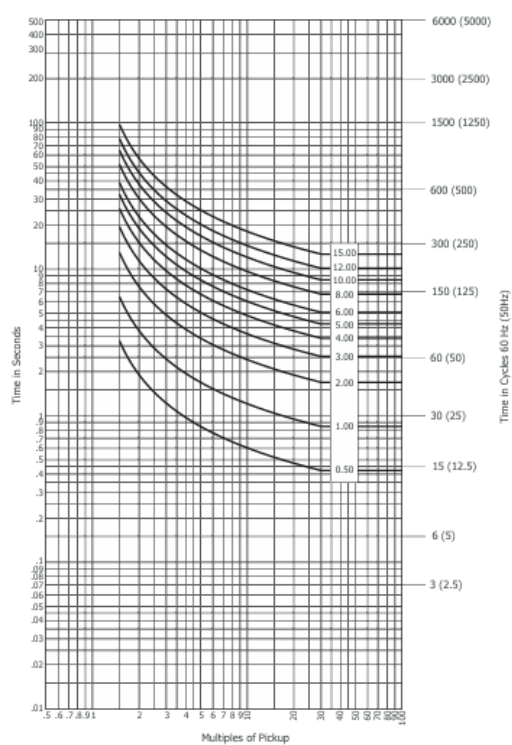


Imagen 28. IEEE Moderately Inverse Curve: E1
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

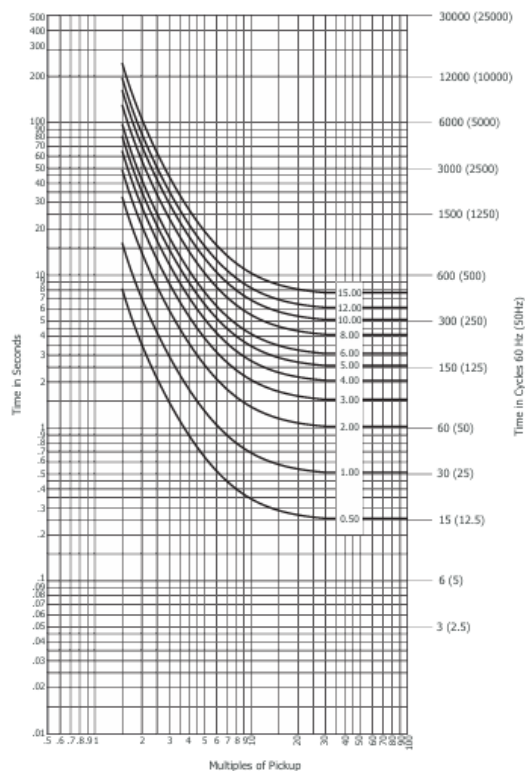


Imagen 29. IEEE Very Inverse Curve: E2
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

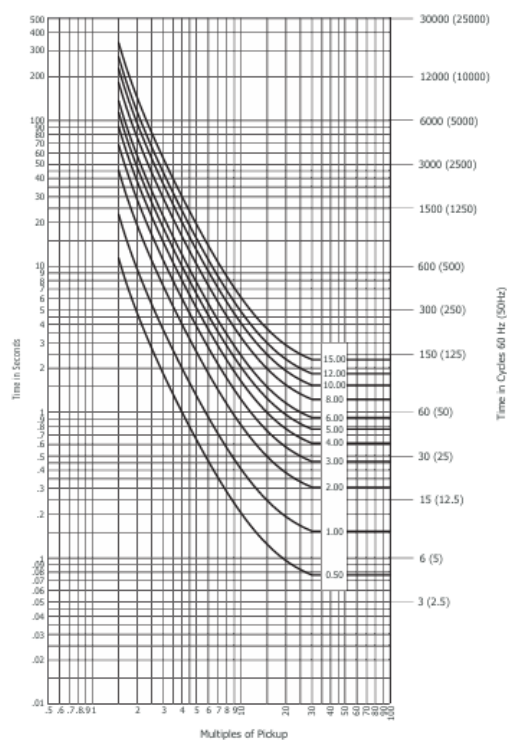


Imagen 30. IEEE Extremely Inverse Curve: E3
Fuente: Manual Técnico SEL-787L

2.7.5.2. Protección de distancia

Este tipo de protección posee un funcionamiento bastante sencillo de comprender, consiste en el cálculo de la impedancia de la zona que se va a proteger y el cociente de la tensión entre la corriente. En operación normal los márgenes necesarios ya ajustados, cualquier valor de impedancia fuera del rango mencionado anteriormente nos enviará una alerta de una falta en la zona del relé de protección o fuera de lo cual nos afectará de todos modos.

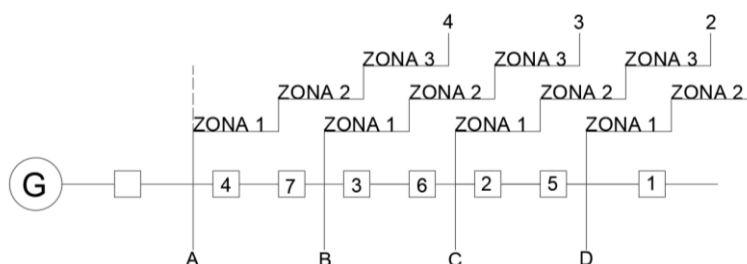


Imagen 31. Diagrama unifilar de protección de distancia por zonas

Fuente: Adaptación propia por los autores

Para interpretar el esquema mencionado, es necesario comprender que el eje X de los escalones (4, 3, 2) representa un eje de impedancia, el cual está relacionado con los nodos específicos (A, B, C, D). En este contexto, la zona 1 se ajusta aproximadamente al 80% de la impedancia de la línea A-B, lo que permite prevenir disparos no deseados. Este valor siempre debe ser inferior al 100% de la impedancia de la línea, ya que un ajuste superior provocaría que la protección se active ante cualquier pequeña variación en la impedancia, por otro lado, las demás zonas consideran tanto la impedancia de la línea que protegen como un porcentaje adicional de la línea siguiente, aumentando progresivamente dicho margen conforme se expanden las zonas de protección. El nombre de esta protección está relacionado con las líneas de transmisión de energía, donde la impedancia es proporcional a la distancia. Dado que esta protección se basa en el control de esa magnitud, se le asignó dicha denominación.

De acuerdo a la normativa IEEE, ANSI estándar C37.2 el relé de distancia es aquel que va a funcionar cuando la admitancia, impedancia o reactancia del circuito disminuyan con respecto a los límites anteriormente fijados [15].

2.7.5.2.1. Relé de distancia tipo reactancia

El relé de distancia de tipo reactancia no dependerá del componente resistivo, en este de aquí solamente tendrá en cuenta la parte reactiva de la impedancia de la línea que protege. Las líneas cortas suelen tener este tipo de modelo debido a que la parte resistiva de la impedancia en el lugar donde se vea la falta será la del arco en serie con la resistencia puesta a tierra, de esta manera se dará una protección a la línea con una alta velocidad de detección [15].

2.7.5.2.2. Relé de distancia tipo admitancia

Este tipo se utiliza frecuentemente en las líneas largas y donde se puedan generar grandes oscilaciones de potencia. Según sus características este reacciona de buena forma frente a la resistencia del arco en el lugar de la falla, es por esta razón que son usados para grandes

distancias debido a que tiene una mayor sensibilidad para poder detectar fallas de una manera más rápida [15].

2.7.5.3. Protección diferencial

La protección diferencial se distingue por su alta selectividad, respondiendo únicamente a fallas dentro de su zona de protección, limitada por los transformadores de corriente. Su principio de funcionamiento, basado en la comparación de corrientes, es sencillo, pero requiere un diseño adecuado de los transformadores para garantizar estabilidad frente a fallas externas y tolerancia a la saturación, es muy utilizado en generadores, motores y transformadores debido a su velocidad y sensibilidad, lo que ayuda a minimizar los daños. También es útil en cables de corta distancia donde no es posible la protección remota. En líneas más largas, de hasta 25 km, puede ser necesaria una protección adicional contra interferencias y, para distancias superiores a 100km, la fibra óptica ofrece una solución fiable y eficiente. Debido a la incorporación de redes digitales en las subestaciones, la protección diferencial ha evolucionado, integrando la transmisión de datos en serie mediante protocolos estándar, mejorando su confiabilidad y compatibilidad. Esta tecnología también permite la protección selectiva de fases, incluso en fallas complejas, como líneas de doble circuito o tres terminales. Finalmente, la protección diferencial puede ser de baja o alta impedancia. En este último, el relé de alta impedancia garantiza la estabilidad frente a corrientes de fallo, desviando la corriente hacia el transformador de saturación sin afectar al relé de medida [1].

2.7.5.4. Protección direccional

La protección de sobrecorriente direccional se caracteriza por el hecho de que sólo puede responder si, además de exceder un valor de corriente predefinido, la potencia asociada a la corriente de falla fluye en una dirección específica. Este tipo de protección es común en líneas eléctricas que reciben energía por ambos extremos, como es el caso de las redes eléctricas duales, actualmente los sistemas electrónicos son los encargados de procesar la información en el área protegida. Estos dispositivos reciben datos en forma modular y angular y, por lo tanto, pueden detectar la dirección del flujo de corriente. El relé utiliza esta información para decidir si se activa o no. Estos relés están configurados para responder a anomalías en el sistema, particularmente cuando la dirección de la corriente es opuesta a la dirección especificada, que es el caso cuando la corriente de falla es contraria al flujo normal hacia la carga.

En el pasado, antes de la introducción de las tecnologías electrónicas, esta protección se lograba mediante dispositivos electromecánicos. Estos registraron los campos electromagnéticos generados por las interferencias para garantizar una protección adecuada, la protección de sobrecorriente direccional consta de dos componentes principales: una unidad direccional y una unidad de sobrecorriente. En la unidad de dirección se generan dos flujos, ϕU y ϕI , a partir de los cuales se determina la dirección de la potencia en la zona de protección, permitiendo al relé tomar la decisión de actuar o no [15].

L.P.M (+): Línea de par máximo; L.P.M. (-): Línea de par mínimo; ϕV : Flujo debido a U ϕI : Flujo debido a I; α : Ángulo de desfase entre U e I

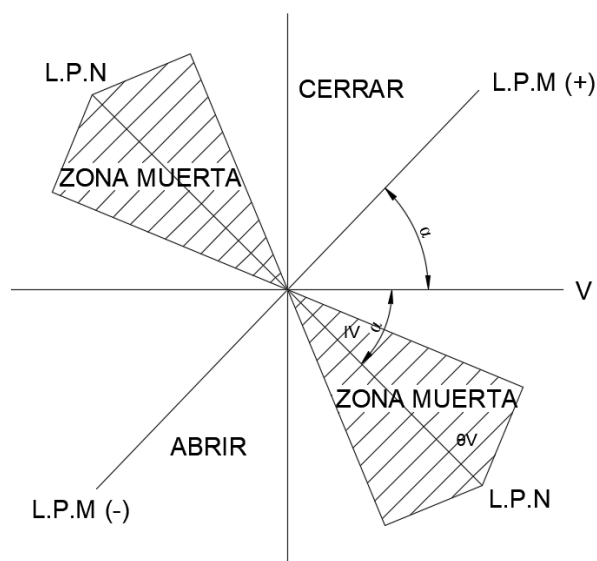


Imagen 32. Diagrama de zonas de protección de un relé direccional electromecánico
Fuente: UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA

2.8. Relé SEL 787L

El Relé SEL-787L es un dispositivo de protección que ofrece una alta gama de funciones, entre estas la incluida protección diferencial de líneas del cual es el tema a tratar, en otras funciones de protección tenemos alimentadores críticos, líneas de unión de generación distribuida, función diferencial de corriente de líneas, combina algoritmos de protección verificados por hardware de última generación y prácticas de diseño para poder brindar protecciones económicas, rápidas, seguras y confiables con una interfaz muy fácil de interpretar. Este dispositivo cuenta con normativas de soporte que brindan una mayor confiabilidad en la parte de comunicación entre estas podemos mencionar las normativas IEEE C37.94, IEC61850 segunda edición, IEC60870-5-103, IEEE1588-2008, IEEE-C37.118-2005, IEC-60255-149 [14].



Imagen 33. Relé SEL-787L
Fuente: SEL-787L LINE CURRENT DATASHEET

2.9. IEEE C37.94

La IEEE C37.94 nos detalla sobre la interconexión para conexión de tele-protecciones y multiplexores digitales con el uso de la fibra óptica. El propósito es facilitar la interconexión

de equipos tele-protegidos de diferentes proveedores sin restricción alguna, su estructura está definida por un formato de trama de 256 bits que se repiten en una tasa de 8000Hz, resultando en una tasa de falla de 2048 kbps. Entre los escenarios de fallos tenemos la pérdida de señal (LOS), detección de fallos remotos y respuesta ante fallos de enlace, para la conexión es por medio de conectores BFOC/2.5 para fibras multimodo y para fibras monomodo no se especifican un tipo concreto de conector, permitiendo el uso de cualquier tipo [16].

2.10. IEC 61850

La norma IEC-61850 en su segunda edición es fundamental para la automatización de sistemas eléctricos en subestaciones. Esta especificación técnica establece los estándares de comunicación entre dispositivos electrónicos inteligentes (IEDs) utilizados en los servicios de energía pública, la norma está compuesta de diversas partes que cubren aspectos claves del sistema de automatización, como el lenguaje de descripción de configuración para la comunicación en subestaciones, los principios y modelos básicos, mapeo de servicios específicos de comunicación para MMS (Manufacturing Message specification), virtualización, entre otros. Estos elementos han sido incorporados para reflejar los avances tecnológicos en la automatización de sistemas eléctricos y el desarrollo continuo en la normativa [17].

2.11. IEC 60870-5-103

El propósito de esta normativa es facilitar la interoperabilidad entre el equipo de protección y otros dispositivos en una subestación, esta utiliza una arquitectura EPA (Event-driven-Process-Automation) está basada en la serie de normas IEC-60870-1 hasta la IEC 60870-5-5. Pueden emplearse estándares tales como el RS-232, RS-485 o inclusive con interfaces de fibra óptica. Utiliza un formato de tramas FT1.2 con tramas de longitud variable y fijas similar a la norma IEC-101. En la capa, esta especifica si se usa un nodo de transmisión equilibrado o no equilibrado y cada enlace tiene una dirección específica. La comunicación maestro esclavo en un entorno netamente de subestaciones se da mediante la IEC-60870-5-103 facilitando así la comunicación entre un maestro (sistema SCADA) y un esclavo (relé de protección) el maestro envía comando de solicitud y el esclavo se encarga de responder con datos que incluyen eventos, registro de fallos y mediciones de cantidades eléctricas. Esta norma es crucial para garantizar una comunicación eficiente y estandarizada entre los dispositivos [18].

2.12. IEEE 1588

El protocolo IEEE-1588 permite una sincronización precisa de los relojes de las redes de comunicación de paquetes y se utiliza en industrias, sistemas de comunicación y redes de energía que requieren altos niveles de precisión en la sincronización. Este protocolo establece criterios de rendimiento basados en la calidad de sincronización que se mide en función de errores de intervalos de tiempo y de tiempo absoluto, estos requisitos de precisión varían según la aplicación, por ejemplo, en la industria de energía y telecomunicaciones es necesario mantener un error absoluto inferior a 1 microsegundo. entre los factores que afecten el rendimiento tenemos que este dependerá del diseño de la red, variación de retardos de paquetes

(PDV) y el rendimiento de los nodos participantes. Sin embargo estas redes son vulnerables a fallos de sincronización, como desajustes en los nodos o errores en la temporización, debido a problemas en los relojes maestros o esclavos [19].

2.13. IEEE C37.118

Esta normativa es clave para garantizar la interoperabilidad entre diferentes sistemas de medición fasorial con el cual nos proporciona una referencia común para el monitoreo, protección y control en tiempo real de los sistemas eléctricos de potencia, define formatos de datos y los requisitos de sincronización para asegurar que las mediciones de diferentes dispositivos puedan correlacionarse de manera precisa. Esta normativa se origina debido a la adquisición de datos en sistemas de potencia, los usuarios pueden calcular cantidades fasoriales en tiempo real, esto nos permite garantizar que la medición de diferentes fabricantes genere resultados comparables con esto se permite el intercambio de datos entre diferentes sistemas [20].

2.14. IEC 60255-149

Esta normativa establece los requisitos mínimos para los relés de protección térmica que protegen a los equipos eléctricos midiendo la corriente alterna que fluye a través de ellos, su objetivo principal es evitar los daños térmicos en el equipo protegido, como funciones principales tenemos las protecciones contra sobrecarga térmicas, monitorización de niveles térmicos y emitir señales de alarmas o disparo, tomar en cuenta las fuentes de calor adicionales como corrientes desequilibradas o armónicas. En cuanto a gráficas tenemos las curvas de protección en esta se definen dos tipos:

- La curva fría, esta se representa entre el tiempo de operación cuando no hay carga previa
- Curva caliente mide la misma relación, pero considerando que el equipo ya está sometido a una carga [21].

2.15. Software DIgSilent

En la ingeniería eléctrica, los procesos y estudios conllevan un alto grado de complejidad y a su vez un riesgo mayor, para esto se ha desarrollado una serie de aplicaciones, la formación técnica en el presente siglo se relaciona estrechamente con el uso de diferentes tipos de softwares, modelados informáticos, equipos, tecnologías y los accesos desde diferentes puntos. El alto riesgo de peligrosidad, los altos costos de ciertos equipos, las pruebas y experimentaciones realizadas en campo ha generado que los profesionales en el campo desarrollen y apliquen programas, es importante la preparación de especialistas usando una amplia gama de tecnologías modernas, en conjunto a las mejoras en la tecnológicas, DIgSILENT Power Factory es un software enfocado al proceso educativo en un formato de remoto con la finalidad de realizar trabajos remotos en las áreas de sistemas y redes de energía eléctrica, demostrando también simulaciones físicas de sistemas de redes en bancos de laboratorios, como ejemplo común se puede mencionar un estudio de laboratorio de los parámetros de una red de tipo anillo [22].

2.16. Software Matlab

En el campo de la ingeniería y la investigación científica, Matlab es ampliamente usado para analizar y diseñar sistemas innovadores que ofrecen soluciones a nivel mundial, se utiliza para aprendizaje automático, procesamiento de señales, imágenes, visión artificial, comunicaciones, finanzas computacionales, diseño de control, robótica y muchos otros campos, mediante esta plataforma se optimiza para resolver problemas científicos de ingeniería, este lenguaje está basado en matrices una de las formas más naturales con las que se pueden las matemáticas computacionales [23], además cuenta con una extensa biblioteca de herramientas y algoritmos que permiten trabajar de manera eficiente en diversos dominios, entre las principales características tenemos las siguientes:

- Alto nivel de lenguaje para cálculos científicos y de ingeniería.
- Entorno optimizado para el diseño y solución de problemas.
- Visualización de gráficas, datos y herramientas para la creación de diagramas personalizados.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.
- Interfaces para C/C++, Java, Net, Python, SQL, Hadoop, Microsoft y Excel.

3. CAPÍTULO III: MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

3.1. Coordinación de protección de diferencial de línea

3.1.1. Condiciones generales

En este capítulo realizaremos la coordinación, parametrización de elementos, pruebas y el análisis de las gráficas obtenidas de la protección diferencial de líneas con el relé SEL-787L mediante el uso de los softwares Power Factory DIgSilent y Matlab ambos de la versión 2021.

3.2. Caso de estudio

A continuación, se presenta el caso de estudio de la línea de distribución con derivación en la figura 3, la cual corresponde a un sistema de distribución 13.8kV, con protección en ambos extremos del circuito mediante el uso de relé SEL-787L; tomado del libro del manual técnico SEL-787L [24]. En el siguiente caso de estudio explicaremos como realizar la configuración y parametrización de datos para el relé SEL-787L en los puntos S1 que se encuentra en CT1, el S2 con el CT2 de tal forma que se vea protegido el sistema sin que alguna perturbación afecte en T que es la derivación.

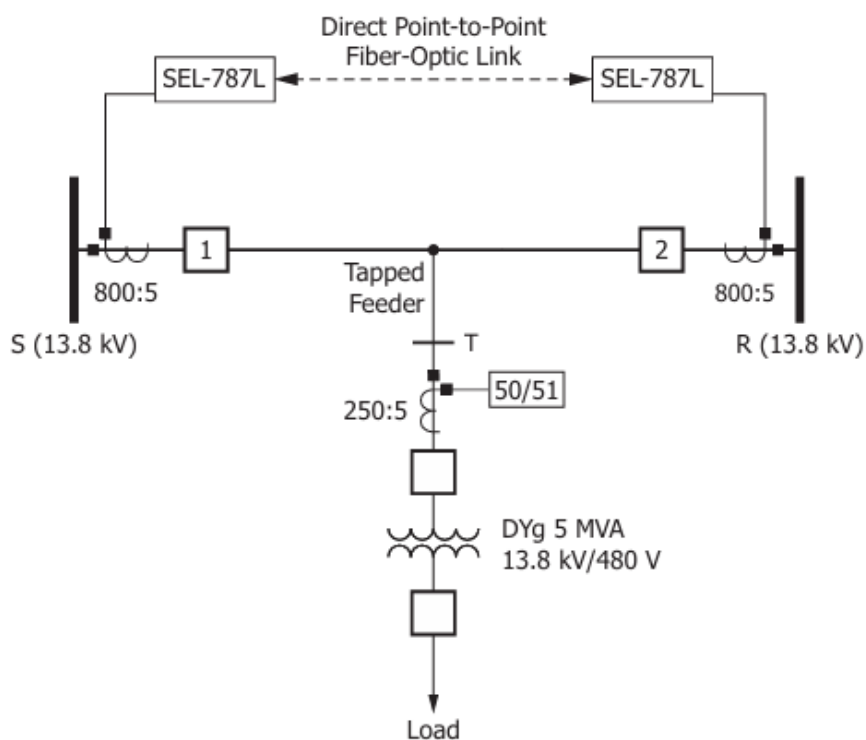


Imagen 34. Caso de estudio
Fuente: Manual SEL-787L

Para el siguiente análisis de este sistema contamos con los siguientes parámetros los cuales usaremos para la configuración del relé, esto los presentaremos en la tabla 4.

Parámetros	Valores
Voltaje de sistema nominal línea a línea	13.8kV
Frecuencia nominal	60Hz
Rotación de fase	ABC
Línea	
Longitud	2 millas
Z_{1L}	$0.505\Omega/\text{milla} \angle 65^\circ$ primario
Z_{0L}	$1.929\Omega/\text{milla} \angle 67^\circ$ primario
Corriente de carga máxima en la línea	800 ^a primario
CTR (Corriente de Relación de Transformación)	800:5 = 120 (relé S) 800:5 = 120 (relé R)
Corriente nominal del relé	5A secundario
Derivación de la línea	
Ubicación de la derivación	50% longitud de línea
MVA de Transformador	5
Reactancia de fuga del transformador	5%
Relación del transformador	13.8kV/480V
CTR (Corriente de Relación de Transformación)	250:5 = 50 (relé T)
Corriente de carga Máxima en la terminal T	209A

Tabla 4. Datos del sistema: Línea aérea de 13.8kV y relación de CT/PT
Fuente: Manual de usuario SEL-787L

Con los datos mostrados en la tabla 4 procedemos a convertir las impedancias del sistema de energía primario a secundarios con el uso de las siguientes fórmulas:

Convertimos las impedancias del sistema de energía para calcular la configuración de protección en la tabla 4, se muestran las impedancias de línea. Convertimos de polar a rectangular para posterior a eso convertir de millas a kilómetros.

3.2.1. Línea 1

$$Z_{1L} = 0.505\Omega/\angle 65^\circ$$

3.2.1.1. Conversión de Polar a Rectangular

$$(0.505, 65^\circ)$$

$$\text{Sen } 65^\circ = Y/0.505$$

$$(0.505)(\text{Sen } 65^\circ) = Y$$

$$Y = 0.45769$$

$$\text{Cos } 65^\circ = X/0.505$$

$$(0.505)(\text{Cos } 65^\circ) = X$$

$$X = 0.2134$$

$$0.2134 + j0.4577 \Omega/\text{milla}$$

3.2.2. Convertimos las unidades de millas a kilómetros

$$0.2134m \left(\frac{1.60934km}{1m} \right) = 0.3434km$$

$$0.4577m \left(\frac{1.60934km}{1m} \right) = 0.7365km$$

$$Z1L = 0.3434 + j0.7365 \Omega/km$$

3.2.3. Línea 2

$$Z0L = 1.929\Omega/\text{milla} \angle 67^\circ$$

3.2.3.1. Conversión de Polar a Rectangular

$$(1.929, 67^\circ)$$

$$\text{Sen } 67^\circ = Y/1.929$$

$$(1.929)(\text{Sen } 67^\circ) = Y$$

$$Y = 1.7756$$

$$\text{Cos } 67^\circ = X/1.929$$

$$(1.929)(\text{Cos } 67^\circ) = X$$

$$X = 0.7537$$

$$1.7756 + j0.7537 \Omega/\text{milla}$$

3.2.3.2. Convertimos las unidades de millas a kilómetros

$$0.7537m \left(\frac{1.60934km}{1m} \right) = 1.2129km$$

$$1.7756m \left(\frac{1.60934km}{1m} \right) = 2.8574km$$

$$Z2L = 1.2129 + j2.8574 \Omega/km$$

Impedancias de líneas

Parámetros	Valores
$Z1L1=Z1L2$	$0.3434 + j0.7365 \Omega/km$
$Z0L1=Z0L2$	$1.2129 + j2.8574 \Omega/km$

Tabla 5. Impedancias de línea

Fuente: Cálculos realizados por los autores

3.3. Configuración global

El relé SEL-787L posee características de protección las cuales por medio de la configuración permitirán identificar lo descrito en la siguiente tabla:

Descripción de configuración	Nombre de configuración	Relé S	Relé R
Frecuencia nominal	FNOM	60HZ	60HZ
Rotación de fase	PHROT	ABC	ABC
Configuración de grupo			
Identificador de relé	RID	Relé S	Relé R
Identificador de terminal	TID	Estación S	Estación R
Relación de CT	CTR	160	160
Habilitar canal 87L	E87CH	Y	Y
Dirección de transmisión	87TADR	1	2
Dirección de recibir	87R1ADR	2	1
Fuente del temporizador de canal	87TIMC1	1	E
Compensación de asimetría del canal	87ASYCMP	N	N
Asimetría de la posición del canal	87ASM	0.00	0.00
Habilitación del elemento 867L	E87L	Y	Y
Calificación primaria de TC remota	87CTPT1	800	800
Calcular TAP	87LTAP	5	5
Elemento diferencial sin restricciones	87LPU	OFF	OFF
Captación de elemento de fase 87L	87LPP	0.3	0.3
Captación segura del elemento de fase 87L	87LPPS	AUTO	AUTO
Pendiente 1 del elemento de fase 87L	87LPSLP1	40	40
Pendiente 2 del elemento de fase 87L	87LPSLP2	70	70
Recolección de elementos de tierra 87L	87LGP	0.5	0.5
Elemento de tierra de recogida segura 87L	87LGPS	1.2	1.2
Pendiente 1 elemento de tierra 87L	87LGPS	40	40
Pendiente 2 elemento de tierra 87L	87LGSLP2	70	70
Compensación de corriente de carga	E87LCC	N	N

87 arranque de sobrecorriente de fase de carga con toma	T50P1P	6	6
87 retardo de sobrecorriente de fase de carga con toma	T50P1D	0	0
87 control de par de sobrecorriente de fase de carga con toma	T50P1TC	87LP	87LP
87 toma de corriente de tierra con carga conectada	T50G1P	4.7	4.7
87 retardo de sobrecorriente de tierra de carga con toma	T50G1D	0	0
87 control de par de sobrecorriente de tierra con carga roscada	T50G1TC	87LG	87LG
87 arranque por sobrecorriente temporizada de fase de carga con toma	T51P1P	5.2	5.2
87 curva de sobrecorriente temporal de fase de carga con toma	T51P1C	U3	U3
87 dial de tiempo de sobrecorriente de tiempo de fase de carga con toma	T51P1TD	0.5	0.5
87 retardo de reinicio por sobrecorriente de tiempo de fase de carga con toma	T51P1RS	N	N
87 retardo de reinicio por sobrecorriente de tiempo de fase de carga con toma	T51P1TC	87LP	87LP
87 tiempo de activación por sobrecorriente de tierra con carga	T51G1P	2	2
87 curva de sobrecorriente temporal de tierra con carga derivada	T51G1C	U3	U3
87 dial de tiempo de sobrecorriente de tiempo de tierra de carga con toma	T51G1TD	1.0	1.0
87 retardo de reinicio por sobrecorriente de tiempo de conexión a tierra con carga	T51G1RS	N	N

87 retardo de reinicio por sobrecorriente de tiempo de conexión a tierra con carga conectada	T51G1TC	87LG	87LG
Ecuación de tripeo	TR	T50P1T o T51P1T o T50G1T o T51G1T o 87DTT	T50P1T o T51P1T o T50G1T o T51G1T o 87DTT
Ecuación de desenganche	ULTRIP	NOT52A	NOT52A
Transferencia directa de tripeo	87DTT	T50P1T o T51P1T o T50G1T o T51G1T	T50P1T o T51P1T o T50G1T o T51G1T
Estado del disyunto o breaker	52 ^a	IN101	IN101

Configuraciones Lógicas

Salida 103	OUT103	TRIP	TRIP
-------------------	--------	------	------

Tabla 6. Configuración de aplicaciones para relé

3.4. Configuración de líneas

Para la configuración de las líneas de distribución de nuestro sistema, en la tabla 4 tenemos los parámetros y valores correspondientes a cada elemento a configurar, estos parámetros serán ingresados a las opciones que nos presenta el software DIgSilent para poder ejecutar la simulación con el relé SEL-787L y posterior a las pruebas poder realizar y visualizar las gráficas.

3.4.1. Configuración del sistema en DIgSilent

Paso 1: Procedemos a realizar el diagrama correspondiente al ejemplo del caso de estudio en la figura 35, configurando cada elemento e ingresando los valores a la fuente, las barras y las cargas:

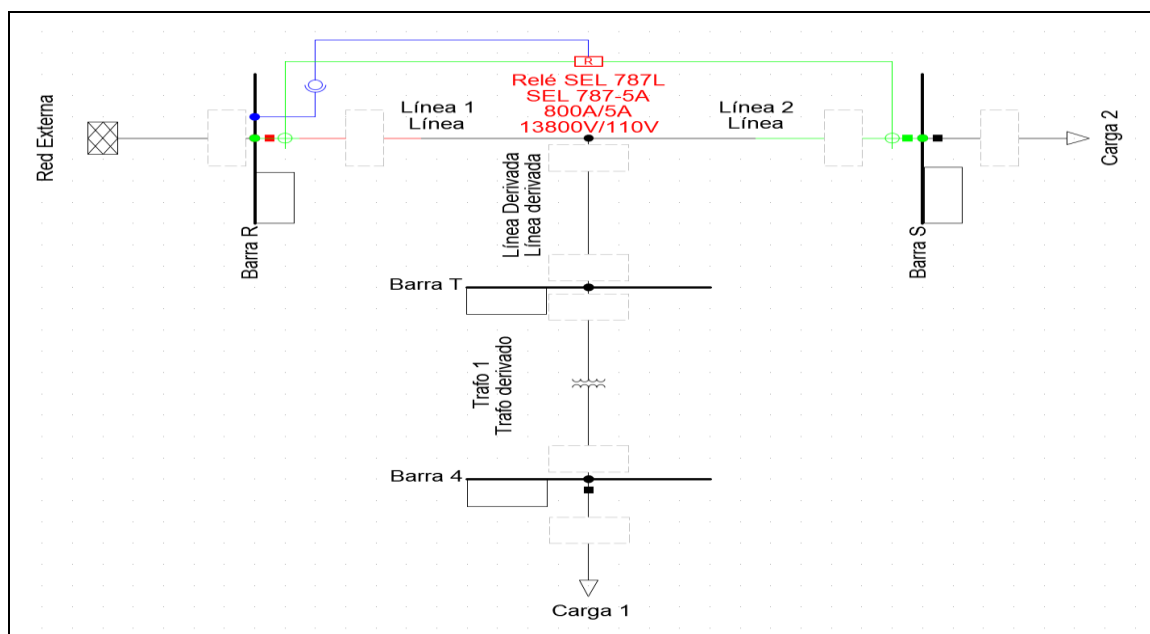


Imagen 35. Diagrama unifilar del sistema
Fuente: Adaptación propia por autores

Continuamos con la configuración de parámetros de nuestra red externa, en los puntos de operación colocamos el valor de 5MW de potencia activa y 5MVar de potencia reactiva.

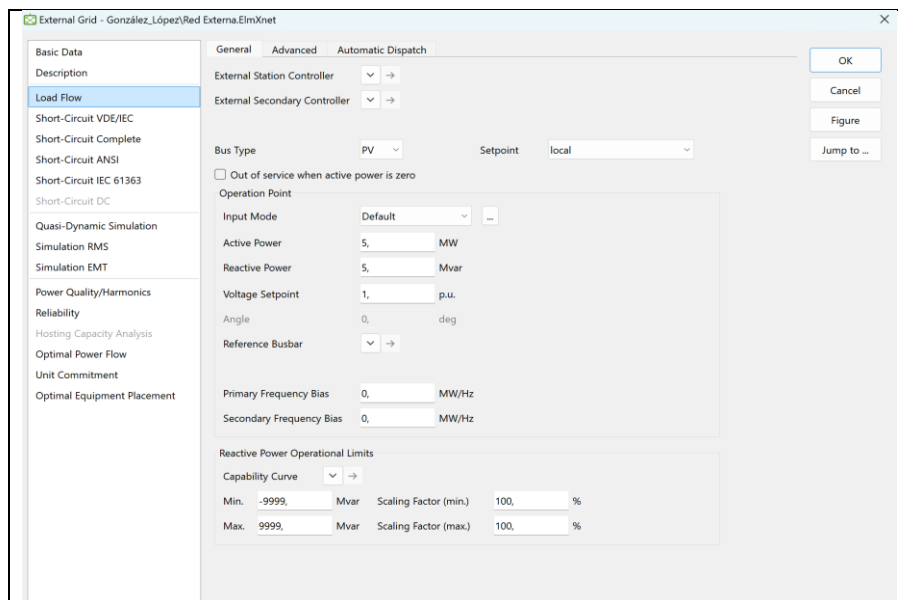


Imagen 36. Ventana de parámetros red externa
Fuente: Simulación interfaz DigSilent

3.4.2. Configuración de barras

3.4.2.1. Barra R

- Interfaz de DigSilent, opción de datos básicos y voltaje línea a línea 13.8kV, tipo de sistema y tecnología de fases.

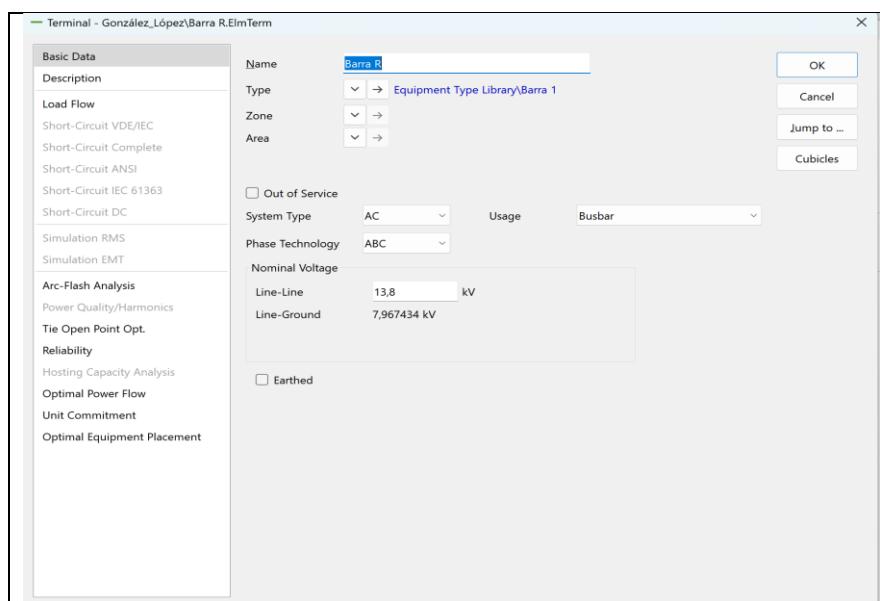


Imagen 37. Parámetros barra R
Fuente: Simulación interfaz DigSilent

- Colocación de parámetros, en la opción de flujo de carga y confirmación de estos.

Imagen 38. Parámetros flujo de carga
Fuente: Simulación interfaz DIgSilent

3.4.2.2. Barra S

- Interfaz de Digsilent, opción de datos básicos colocación de voltaje línea a línea 13.8kV, tipo de sistema y tecnología de fases.

Imagen 39. Parámetros barra S
Fuente: Simulación interfaz DIgSilent

- Colocación de parámetros, en la opción de flujo de carga y confirmación de estos.

Imagen 40. Parámetros flujo de carga
Fuente: Simulación interfaz DIgSilent

3.4.2.3. Barra T

- Interfaz de DigSilent, opción de datos básicos colocación de voltaje línea a línea 13.8kV, tipo de sistema y tecnología de fases.

Imagen 41. Parámetros barra S
Fuente: Simulación interfaz DIgSilent

- Colocación de parámetros, en la opción de flujo de carga y confirmación de estos.

Imagen 42. Flujo de carga barra T
Fuente: Simulación interfaz DigSilent

3.4.2.4. Barra 4

- Interfaz de DigSilent, opción de datos básicos colocación de voltaje línea a línea en este caso el voltaje es de 0.48kV esto se debe a que en esta barra el voltaje que llega pasa por un transformador y posterior a eso esta se conecta una carga.

Imagen 43. Parámetros barra 4
Fuente: Interfaz simulación DigSilent

- Colocación de parámetros, en la opción de flujo de carga el único valor que cambia en este punto es el del voltaje, en este caso trabajaremos con un voltaje de 0.48kV.

Imagen 44. Flujo de carga barra 4
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.4.2.5. Línea

- Para la parametrización de la línea ingresamos a la opción datos básicos y colocamos los valores de la longitud de la línea, la unidad de la longitud de la línea es km y su tramo de longitud total es de 3.21869 km siendo este valor la distancia total entre la suma de la línea 1 y la línea 2.

Imagen 45. Parámetros de línea
Fuente: Simulación interfaz DIgSilent

- A continuación, en la opción tipo(type) podemos observar opciones de parametrización de la cual debemos colocar según los valores de la tabla 4 que nos muestran los datos del sistema y de la tabla 5 que son los valores calculados para colocar en las casillas de resistencia y reactancia de la línea, se debe tener en cuenta que en el software este paso se debe realizar dos veces ya que la línea debe de ir con una derivación por ende se debe generarse línea 1 y línea 2.

Imagen 46. Parametrización tipo de línea
Fuente: Simulación interfaz DIGSilent

- En la opción flujo de carga, en resistencia colocamos el valor de la tabla 5 Z1L y el material del conductor elegimos que el conductor sea de aluminio y confirmamos los datos colocados.

Imagen 47. Parametrización flujo de carga de línea
Fuente: Simulación interfaz DIGSilent

3.4.2.6. Derivación de línea

- Para la parametrización de la línea derivada, los pasos a seguir son los mismos que realizamos para la línea principal con la única diferencia que cambiarían ciertos valores, en este caso sería el de la distancia, ingresamos a la opción datos básicos y colocamos los valores de la longitud de la línea, la longitud de esta línea es de 0.015km.

Imagen 48. Parámetros de derivación de línea

Fuente: Simulación interfaz DigSilent

- En la opción tipo(type) ingresamos los mismos valores que usamos en la línea con los datos de la tabla 4 y los valores de tabla 5 los datos de resistencia y reactancia.

Imagen 49. Parámetros de derivación de línea

Fuente: Simulación interfaz DigSilent

- Para el flujo de carga en la línea derivada se seleccionarán los mismos valores de la tabla 5 para la resistencia y el material conductor será el aluminio.

Line Type - Equipment Type Library/Línea derivada.TypeLine

Basic Data
Description
Version
Load Flow
Short-Circuit VDE/IEC
Short-Circuit Complete
Short-Circuit ANSI
Short-Circuit IEC 61363
Short-Circuit DC
Simulation RMS
Simulation EMT
Protection
Cable Analysis
Power Quality/Harmonics
Reliability
Hosting Capacity Analysis
Optimal Power Flow

Parameters per Length 1,2-Sequence
Max. Operating Temperature 80, degC
AC-Resistance R' (20°C) 0.3434 Ohm/km
Conductor Material Aluminium

Parameters per Length 1,2-Sequence
Susceptance B' 0, uS/km
Ins. Factor 0,

Parameters per Length Zero Sequence
Susceptance B0' 0, uS/km
Ins. Factor 0,

OK
Cancel

Imagen 50. Flujo de carga línea derivada.
Fuente: Simulación Interfaz DIgSilent

3.4.2.7. Trafo 1

- La colocación de datos para el Transformador 1, nos colocamos en valores básicos y seleccionamos tipo (type), este punto es clave al momento de colocar el voltaje de entrada (alta) y el de salida (baja) ya que si no se identifican bien nos generara un error al iniciar la simulación, para el voltaje de alta tendremos 13.8kV y para el de baja 0.48kV, la conexión del trafa es “YN” y la potencia de este es de 5MVA.

2-Winding Transformer Type - Equipment Type Library/Trafo derivado.TypeTr2

Basic Data
Description
Version
Load Flow
Short-Circuit VDE/IEC
Short-Circuit Complete
Short-Circuit ANSI
Short-Circuit IEC 61363
Short-Circuit DC
Simulation RMS
Simulation EMT
Protection
Power Quality/Harmonics
Reliability
Hosting Capacity Analysis
Optimal Power Flow

Name Trafo derivado
Technology Three Phase Transformer
Rated Power 5, MVA
Nominal Frequency 60, Hz
Rated Voltage
HV-Side 13,8 kV
LV-Side 0,48 kV
Vector Group
HV-Side YN
LV-Side YN
☐ Internal Delta Winding
Phase Shift 0, *30deg
Name YNyn0

Positive Sequence Impedance
Short-Circuit Voltage uk 6,75 %
Copper Losses 0, kW

Zero Sequence Impedance
Short-Circuit Voltage uk0 6,75 %
SHC-Voltage (Re(uk0)) uk0r 0, %

OK
Cancel

Imagen 51. Parametrización de transformador 1
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.4.2.8. Carga 1

- Para la parametrización de la carga 1 y 2 verificamos que la conexión del terminal sea con la barra 4 para la carga 1 y para la carga 2 con la S, posterior a eso seleccionamos flujo de carga y colocamos los parámetros de operación: Potencia activa 1MW, factor de potencia 0.92, voltaje 1 p.u, factor de escala: 0.6, confirmamos los datos y se guardaran automáticamente.

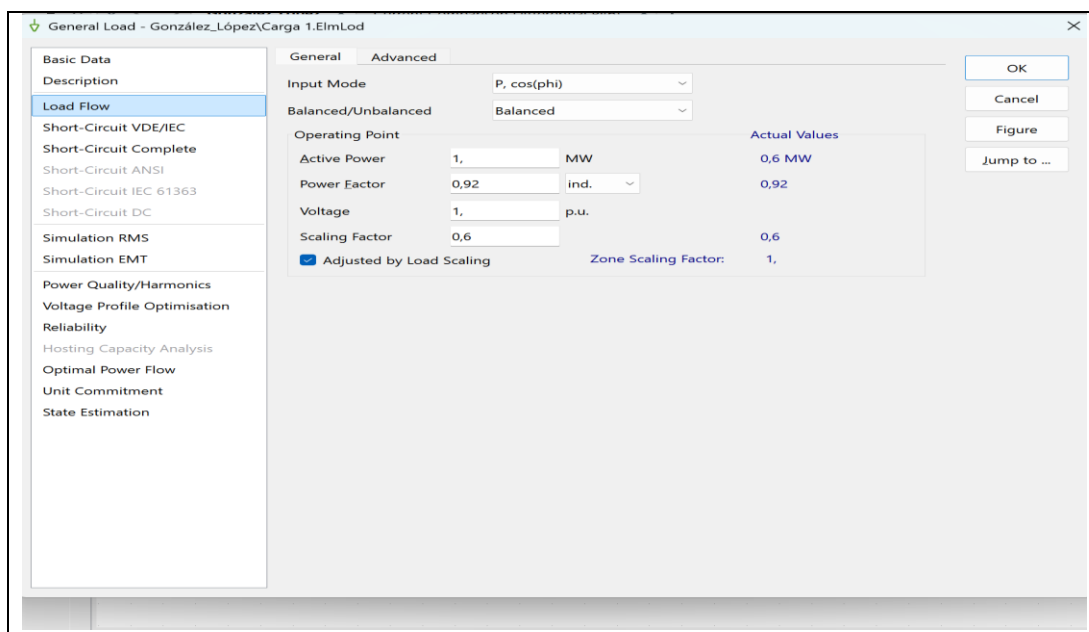


Imagen 52. Parametrización carga 1
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

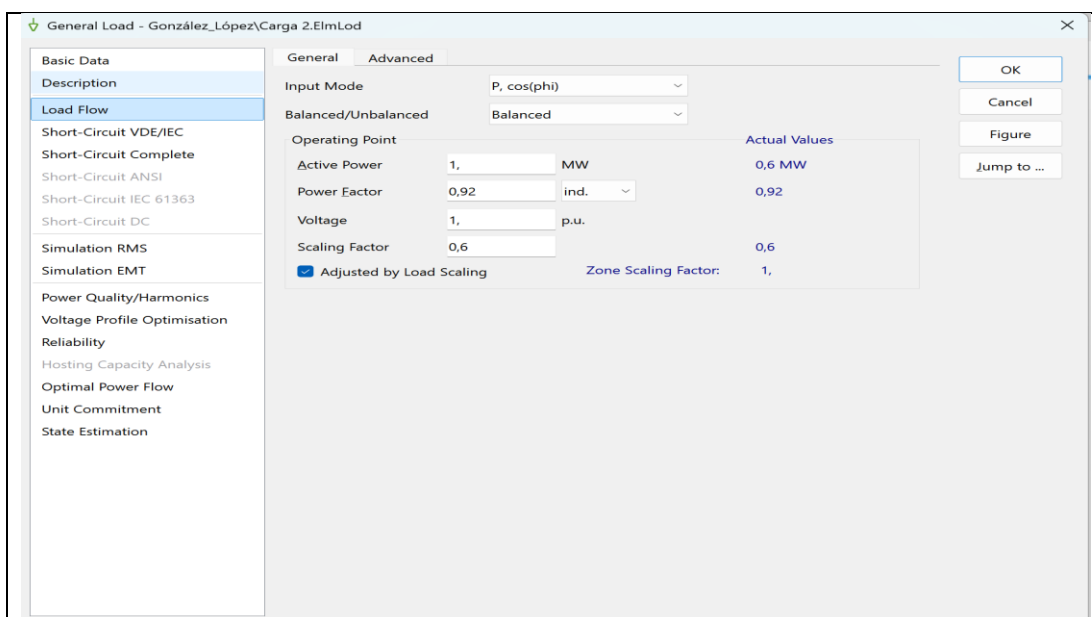


Imagen 53. Parametrización de carga 2
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.5. Configuración de relé SEL-787L en DIgSilent

Los siguientes datos por ingresar para la configuración del relé SEL-787L corresponden a los valores que se ajustan a las líneas de distribución. Estos valores serán ingresados en DIgSILENT para la simulación y las pruebas que se ejecutará en cada caso, la colocación de parámetros e identificación de cada elemento.

3.5.1. Configuración de los transformadores de corriente y potencia.

Teniendo como referencia los datos de tabla 4, como primer paso para la configuración de estos elementos en DIgSILENT procedemos a seleccionar desde librería el relé que vamos a utilizar:

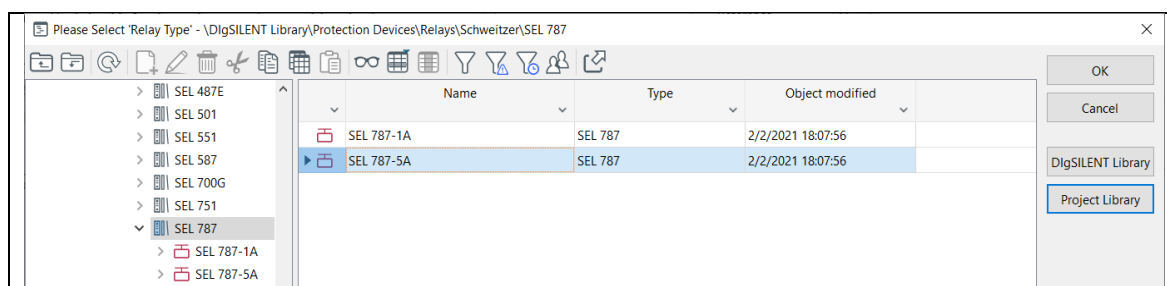


Imagen 54. Selección del relé SEL-787L
Fuente: Interfaz de simulación DIgSilent

- Para la configuración de los CT's tanto para R y S estos cuentan con los mismos parámetros.

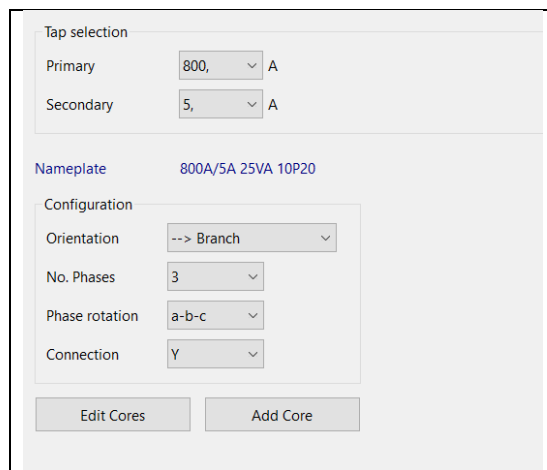


Imagen 55. Valores configurados de los CT(R-S)
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

Tap selection

Primary 13800, V (L-L)

Secondary 110, V (L-L)

Nameplate 13800V/110V

Configuration

No. Phases 3

Phase rotation a-b-c

Connection Y

Edit Windings Add Winding

Imagen 56. Valores configurados del PT
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

Una vez realizado los ajustes y las debidas parametrizaciones a cada elemento se procede a ejecutar las pruebas y simulaciones, posterior a este paso se realizará el análisis de los resultados obtenidos de los distintos escenarios planteados.

3.6. Pruebas y simulación de casos planteados

En las pruebas a realizar plantearemos cuatro casos de simulación, de los cuales obtendremos gráficas que nos detallan los puntos de respuesta y accionamiento del sistema ante alguna falla dentro de su parámetro de alcance:

- Caso 1: Condiciones sistema a plena carga.
- Caso 2: Energización del transformador.
- Caso 3: Fallas externas.
- Caso 4: Fallas internas.

3.6.1. Caso 1: Condiciones normales de operación

En condiciones normales de operación el relé de línea se encuentra en constante monitorización del estado del sistema.

$$IDiff = \sum I_{entrada} - \sum I_{salida} \approx 0$$

Para continuar con la simulación generaremos la gráfica de flujo del sistema y la gráfica de disparo del relé.

Por medio de cálculos llegamos los resultados obtenidos a continuación:

3.6.1.1. Condiciones normales de operación

$$87L = (I_r, I_s) \rightarrow (x, y) \rightarrow (I_{rest}, I_{diff})$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|288.8 + 144.3|}{2} = 216.55A \rightarrow x = 0.27pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |288.8| - |144.3| = 216.55A \rightarrow y = 0.18pu$$

3.6.1.1.1. Diagrama unifilar del sistema

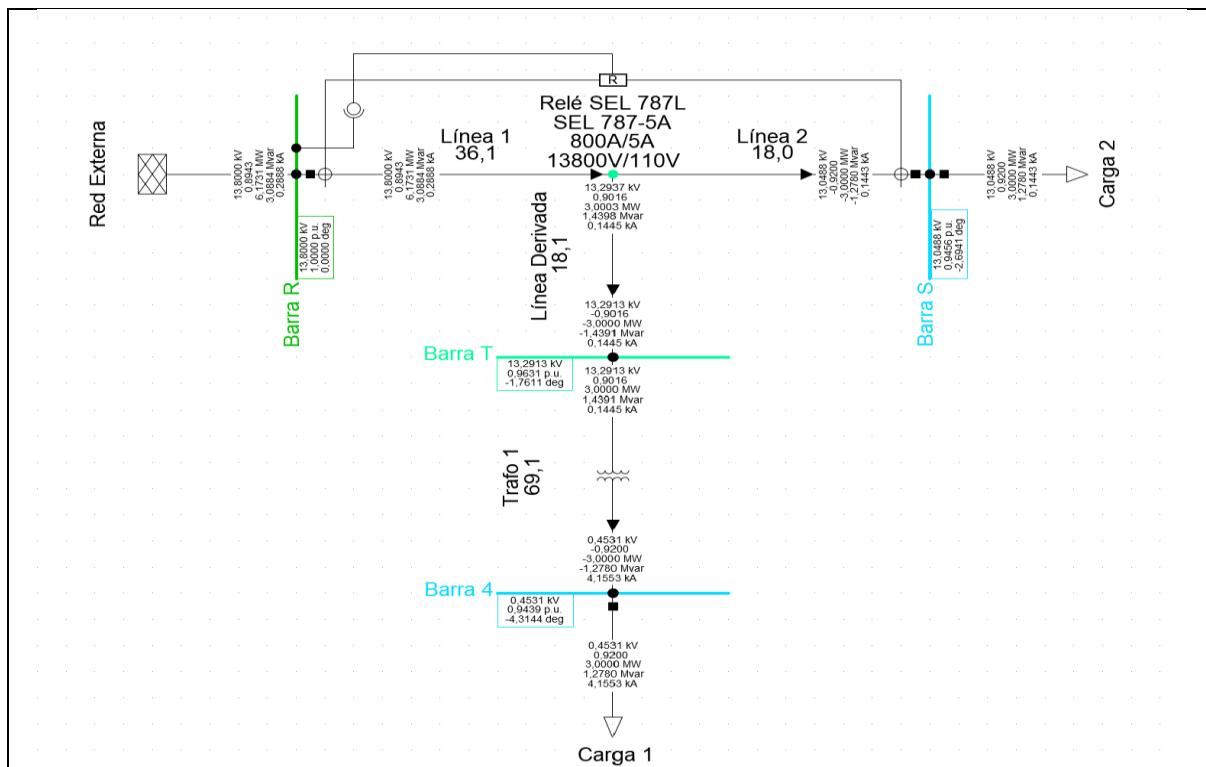


Imagen 57. Diagrama unifilar sistema en condiciones normales de operación
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.1.1.2. Gráfica de disparo del relé

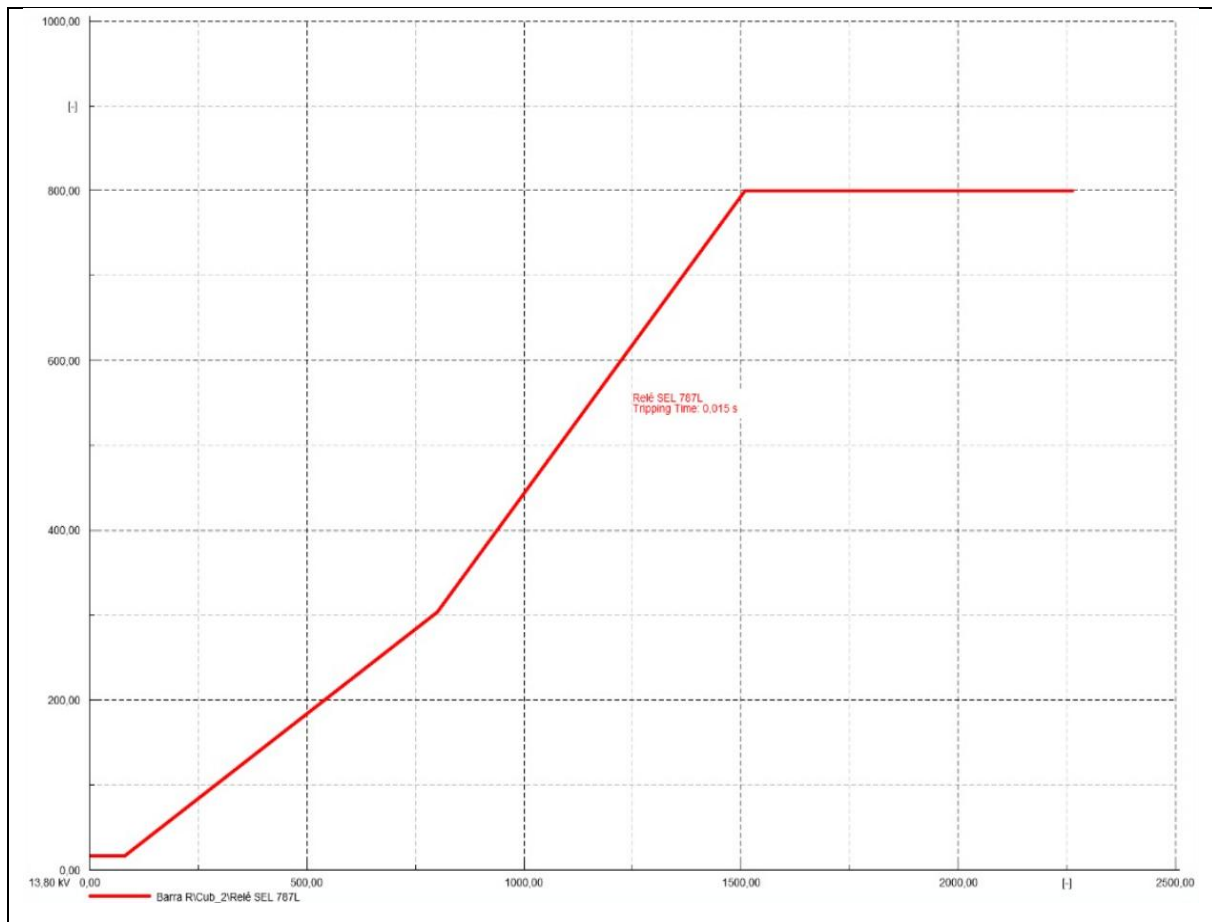


Imagen 58. Gráfica de señal de relé en condiciones normales de operación
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.2. Caso 2: Energización del transformador

3.6.2.1. Energización del transformador con carga

$$I_r = 141.4A ; I_s = 141.4A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|141.4 + 141.4|}{2} = 141.4 \rightarrow x = 0.18pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |141.4| - |141.4| = 0A \rightarrow y = 0pu$$

3.6.2.1.1. Energización del transformador con carga conectada

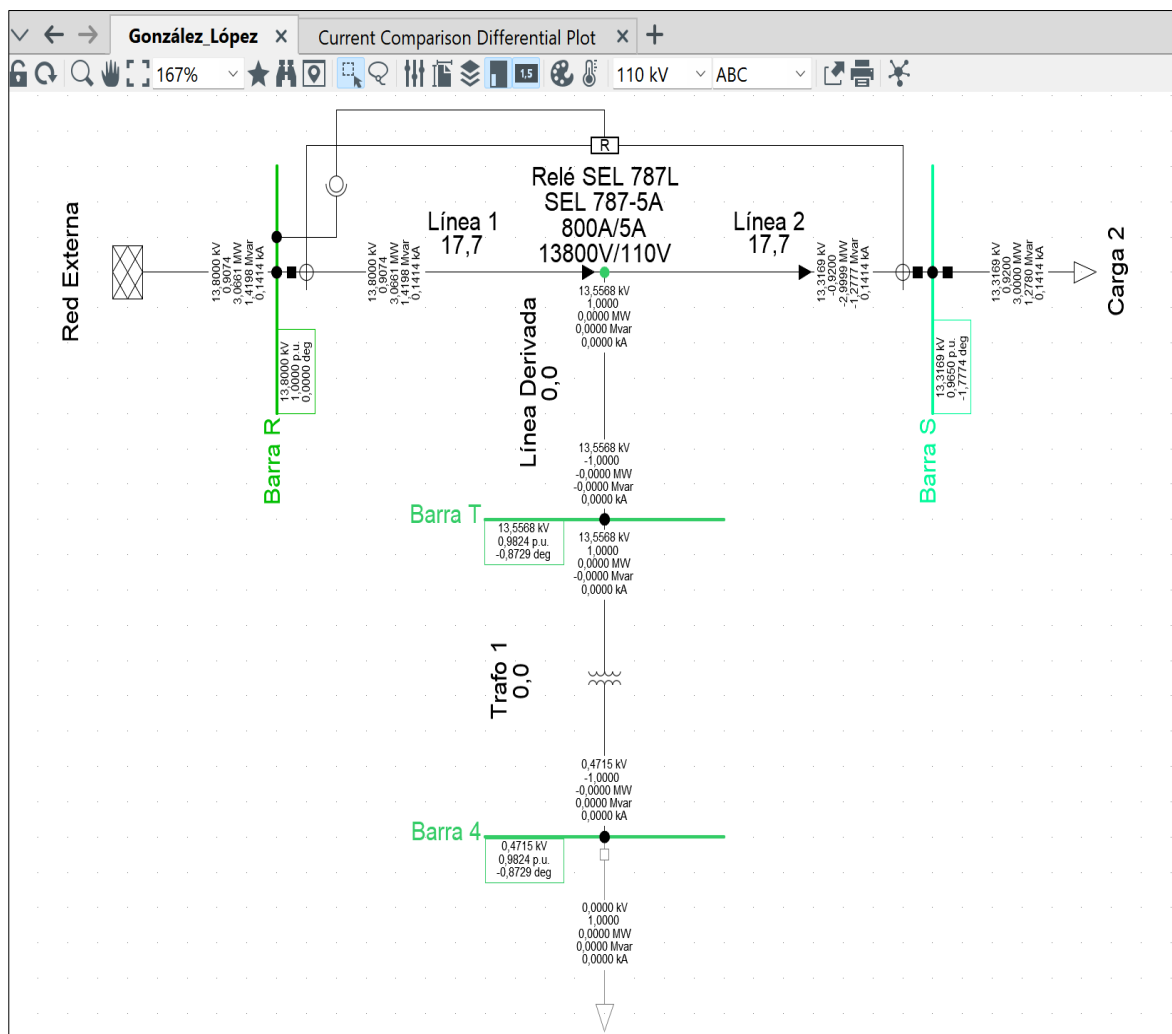


Imagen 59. Diagrama unifilar de transformador con carga conectada
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.2.1.2. Gráfica de relé energización de trafo con carga conectada

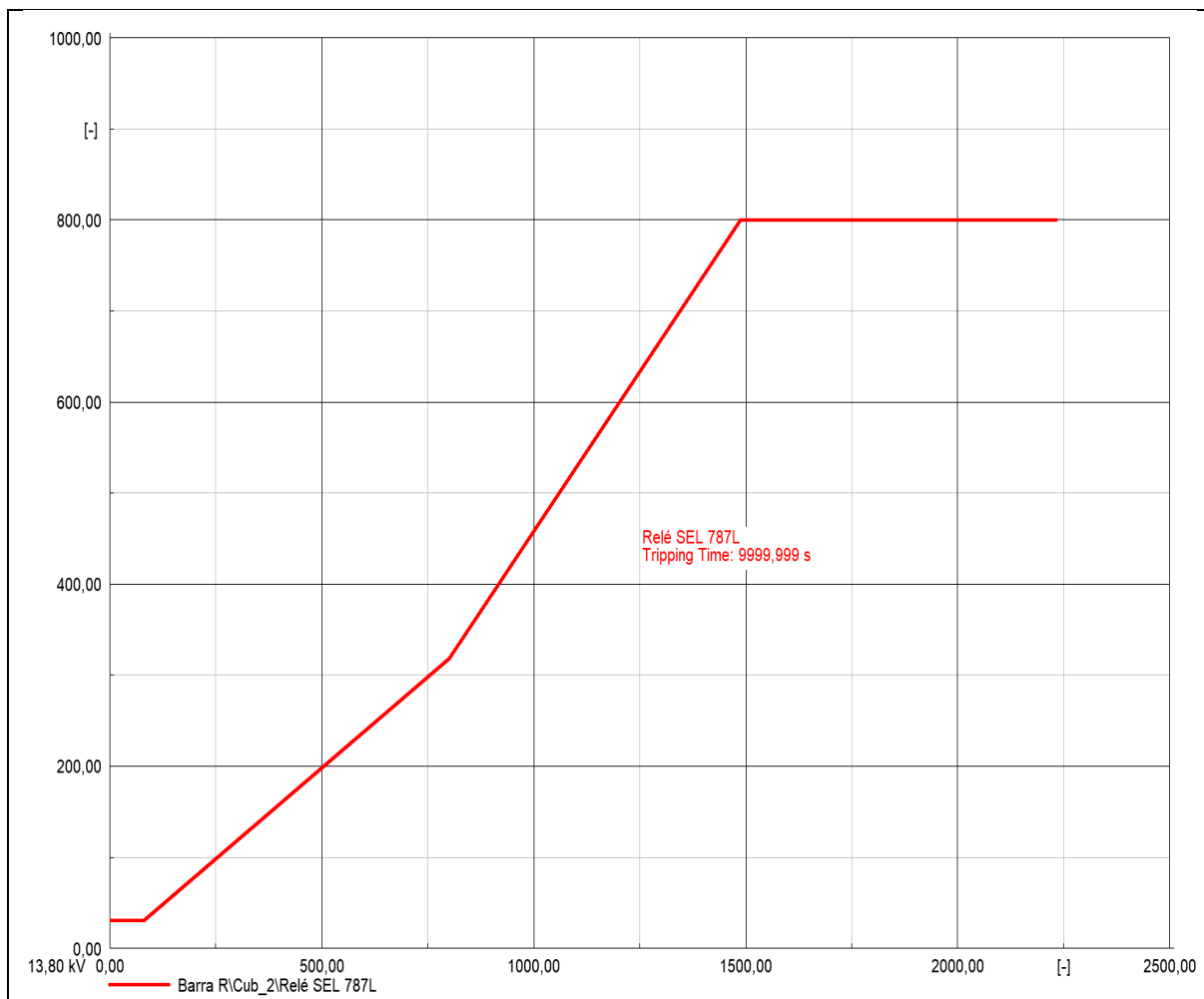


Imagen 60. Gráfica de relé arranque de transformador con carga

Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.2.2. Energización del transformador sin carga conectada

$$I_r = 0A; I_s = 0A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|0 + 0|}{2} = 0 \rightarrow x = 0pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |0| - |0| = 0A \rightarrow y = 0pu$$

3.6.2.2.1. Energización del transformador con carga desconectada

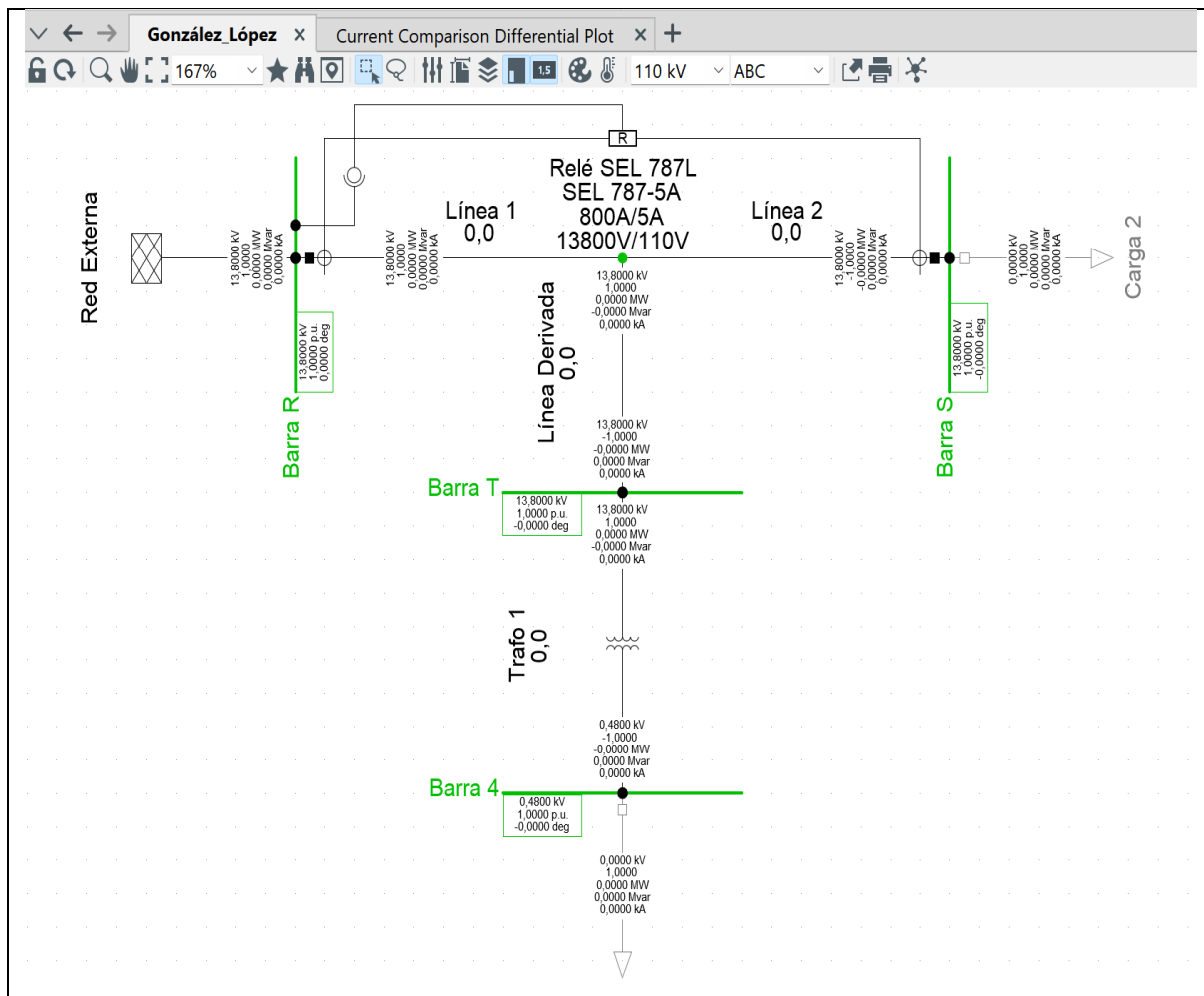


Imagen 61. Diagrama unifilar de energización de transformador con carga desconectada.

Fuente: Interfaz simulación DlgSilent.

3.6.2.2.2. Gráfica de energización del transformador con carga desconectada

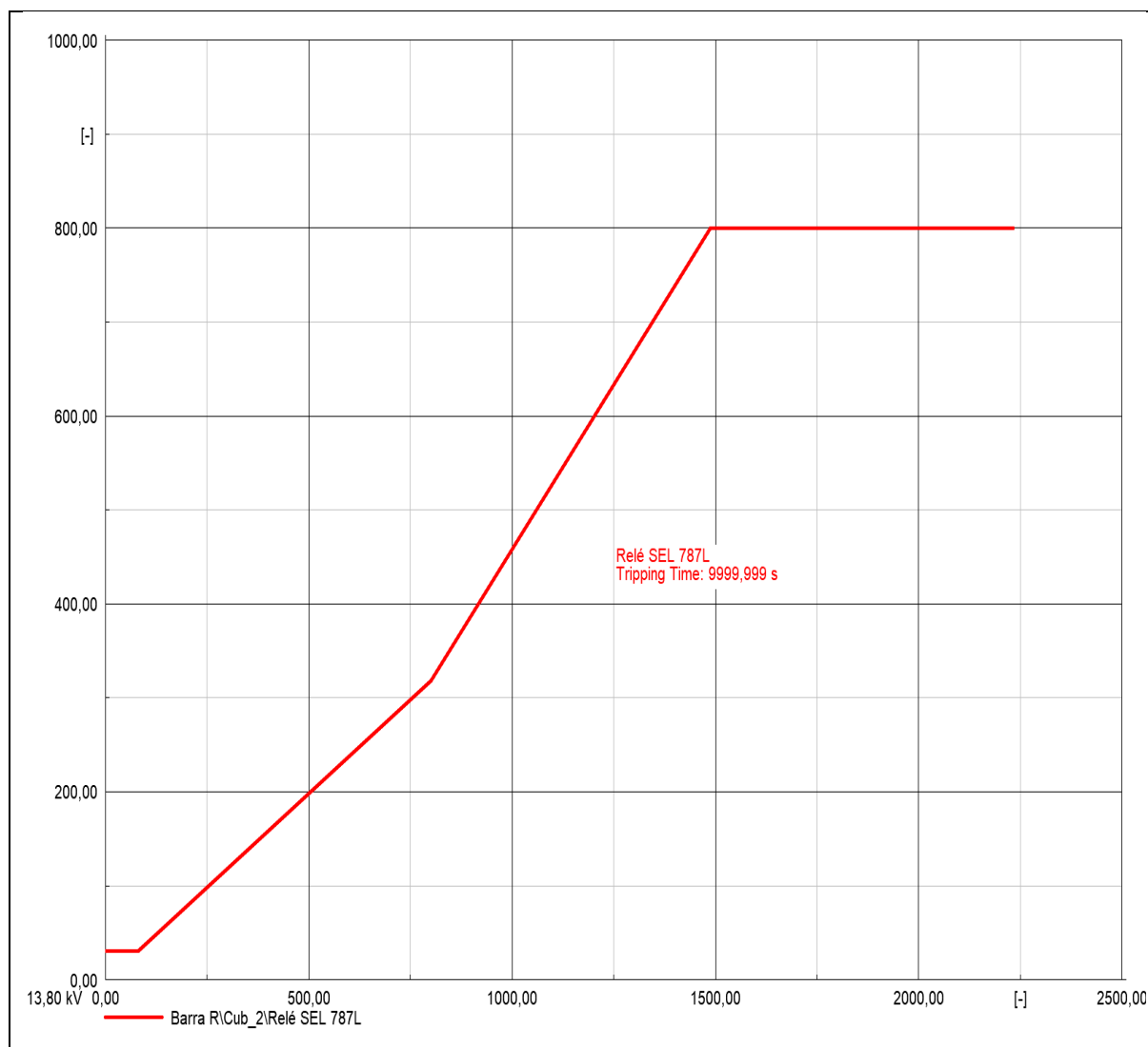


Imagen 62. Gráfica de energización del transformador con carga desconectada
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.3. Caso 3: Fallas externas

Las fallas externas serán todas aquellas que estén fuera de la zona de protección del relé, en este punto las corrientes diferenciales del sistema deberían ser bajas o nulas esto debido a que los TCs se encuentra en correcta operación junto con la coordinación del sistema.

Por medio de las siguientes ecuaciones también se puede saber de forma matemática como es que se detecta algún desbalance de zonas protegidas

$$IDiff = \sum I_{entrada} - \sum I_{salida}$$

La IDiff debe ser cercano a 0 esto se debe a que las corrientes en los extremos de la zona protegida son canceladas ya que no se generara un flujo desbalanceado.

Para continuar con la simulación y pruebas se ha configurado el sistema de tal forma que los valores que obtengamos fuera de la zona de protección el relé junto con los CT discriminarán estas corrientes por lo que el sistema no se verá afectado en su servicio u operación, con los siguientes datos a continuación obtendremos los puntos en la gráfica tanto para barra R y S.

3.6.3.1. Barra R

$$I_r = 0kA ; I_s = 0kA$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|0 + 0|}{2} = 0/2 \rightarrow x = 0pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |0| - |0| = 0A \rightarrow y = 0pu$$

3.6.3.1.1. Falla en barra R

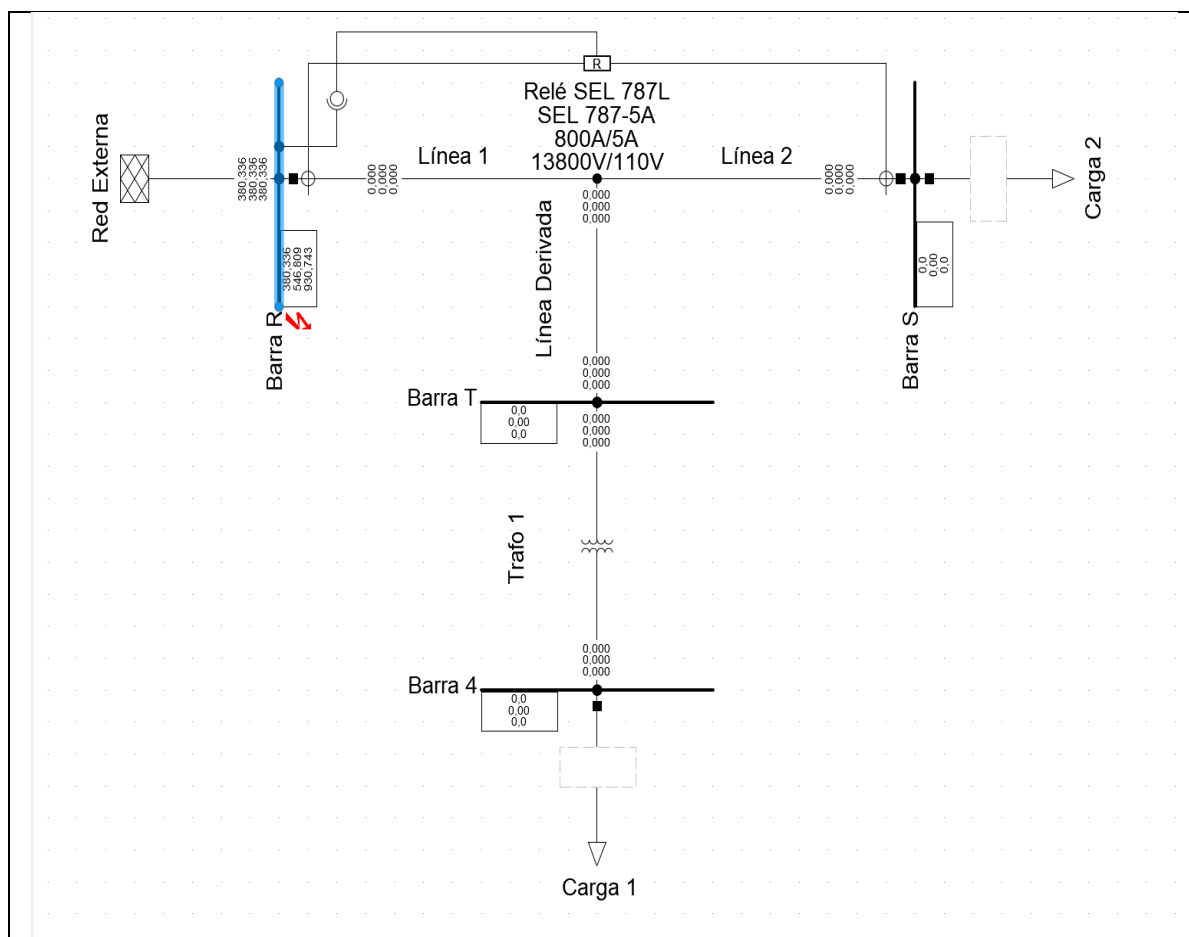


Imagen 63. Diagrama de simulación, falla en barra R
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.3.1.2. Relé Sel-787L, tiempo de accionamiento 9999.999s

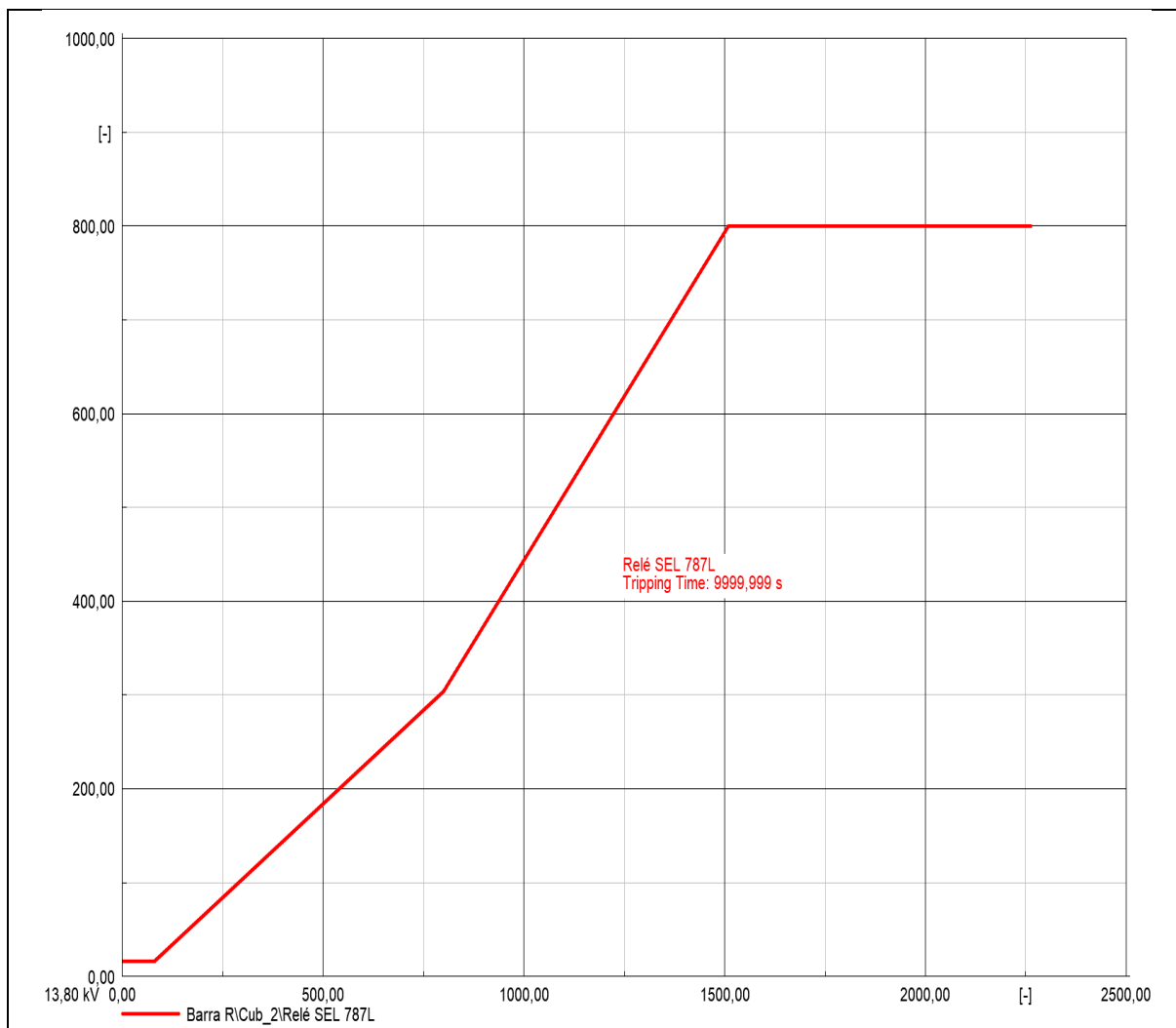


Imagen 64. Gráfica de accionamiento del relé barra R
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.3.2. Barra S

$$I_r = 3023A ; I_s = 3023A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|3023 + 3023|}{2} = 3023 \rightarrow x = 3.78pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |3023| - |3023| = 0A \rightarrow y = 0pu$$

3.6.3.2.1. Falla en barra S

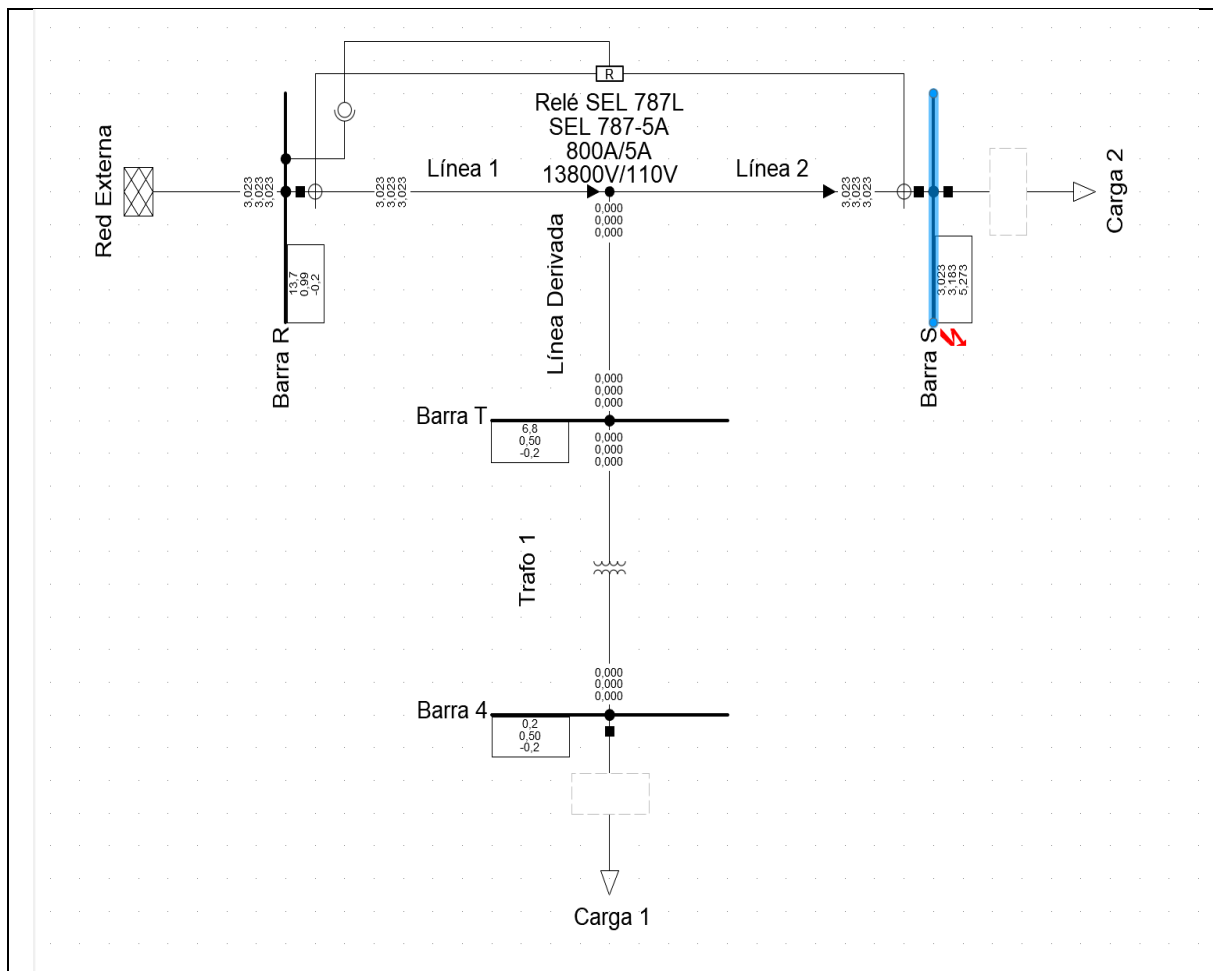


Imagen 65. Diagrama de unifilar, falla en barra S
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.3.2.2. Relé Sel-787L, barra S tiempo de accionamiento 9999.999s

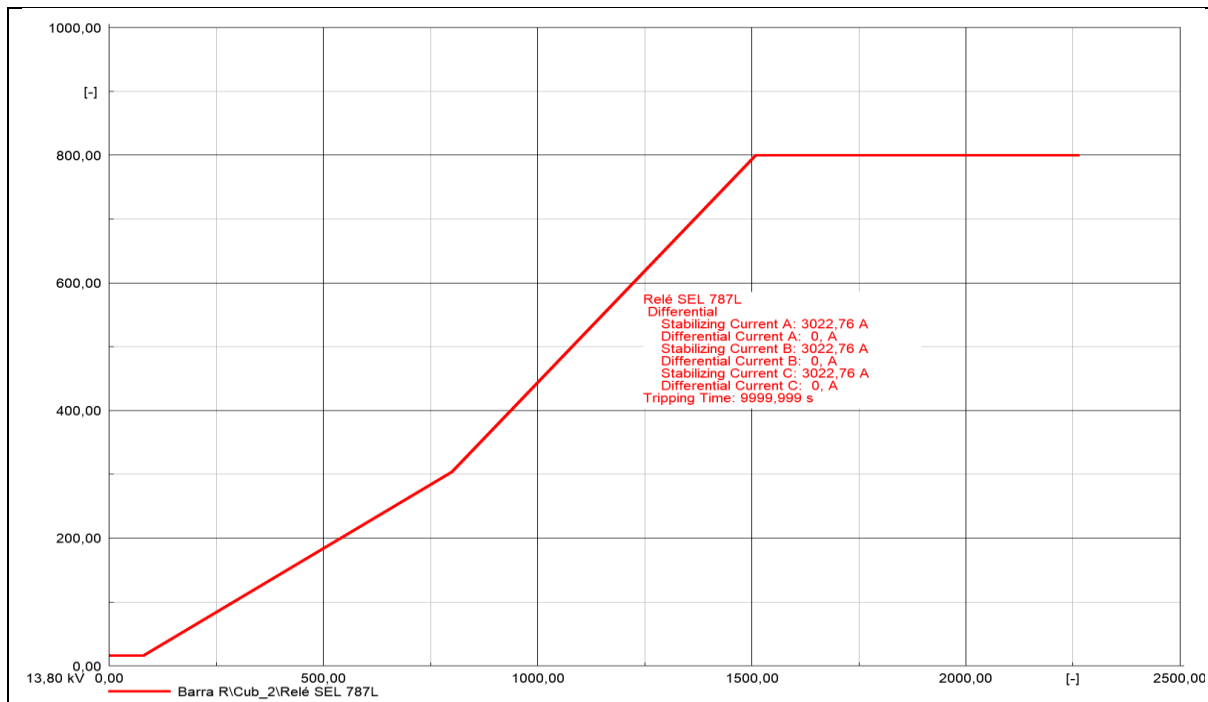


Imagen 66. Gráfica de simulación, falla en barra S
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4. Caso 4: Fallas internas

En el caso de detección de fallas internas, el relé SEL-787L cuenta poseer la capacidad de poder actuar, detectar identificar y despejar de manera rápida la falla que se encuentre dentro de su zona de protección. El relé hace una comparación entre la corriente diferencial y la corriente restringida según la característica diferencial, si la IDiff excede un valor mínimo definido y se encuentra dentro de esta zona de operación definida por las pendientes (m1 y m2) automáticamente el relé lo censará como falla interna.

$$IDiff = \sum I_{entrada} - \sum I_{salida}$$

Es una falla interna cuando IDiff es alto.

Corriente restringida IRes:

$$I_{Res} = \left(\frac{\sum |I_{entrada}| + \sum |I_{salida}|}{2} \right)$$

La IR es ayuda a evitar falsas actuaciones.

Por medio de los valores obtenidos en simulación y por medio de cálculos compararemos resultados para confirmar que el sistema se encuentra operando dentro las condiciones establecidas.

3.6.4.1. 25% de la línea

$$I_r = 11825A ; I_s = 0kA$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|11825 + 0|}{2} = 5912.5A \rightarrow x = 7.39pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |11825| - |0| = 11825A \rightarrow y = 14.78pu$$

3.6.4.1.1. Falla 25% línea

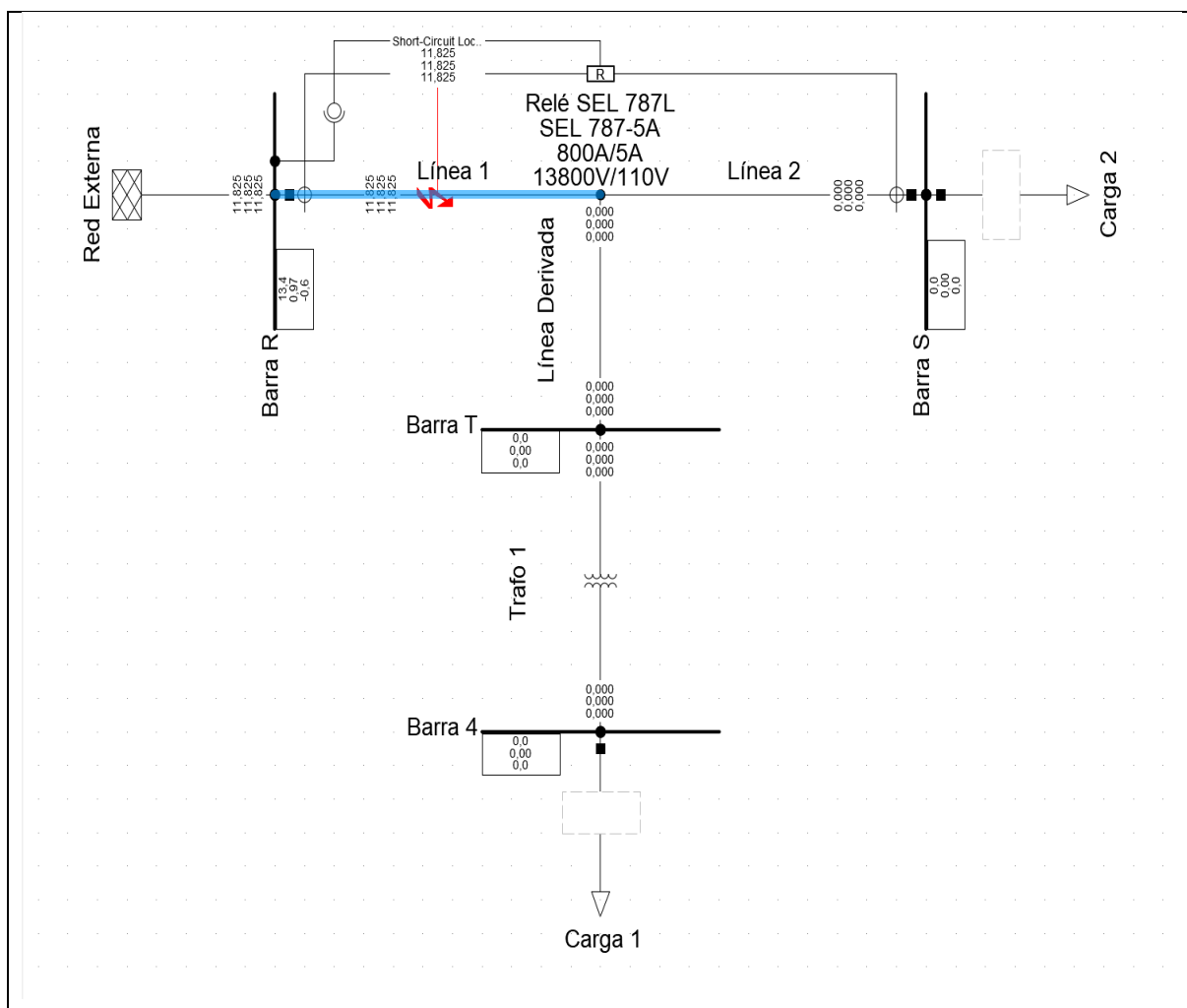


Imagen 67. Diagrama unifilar de fallo al 25% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.1.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema al 25%, tiempo de accionamiento 0.015s

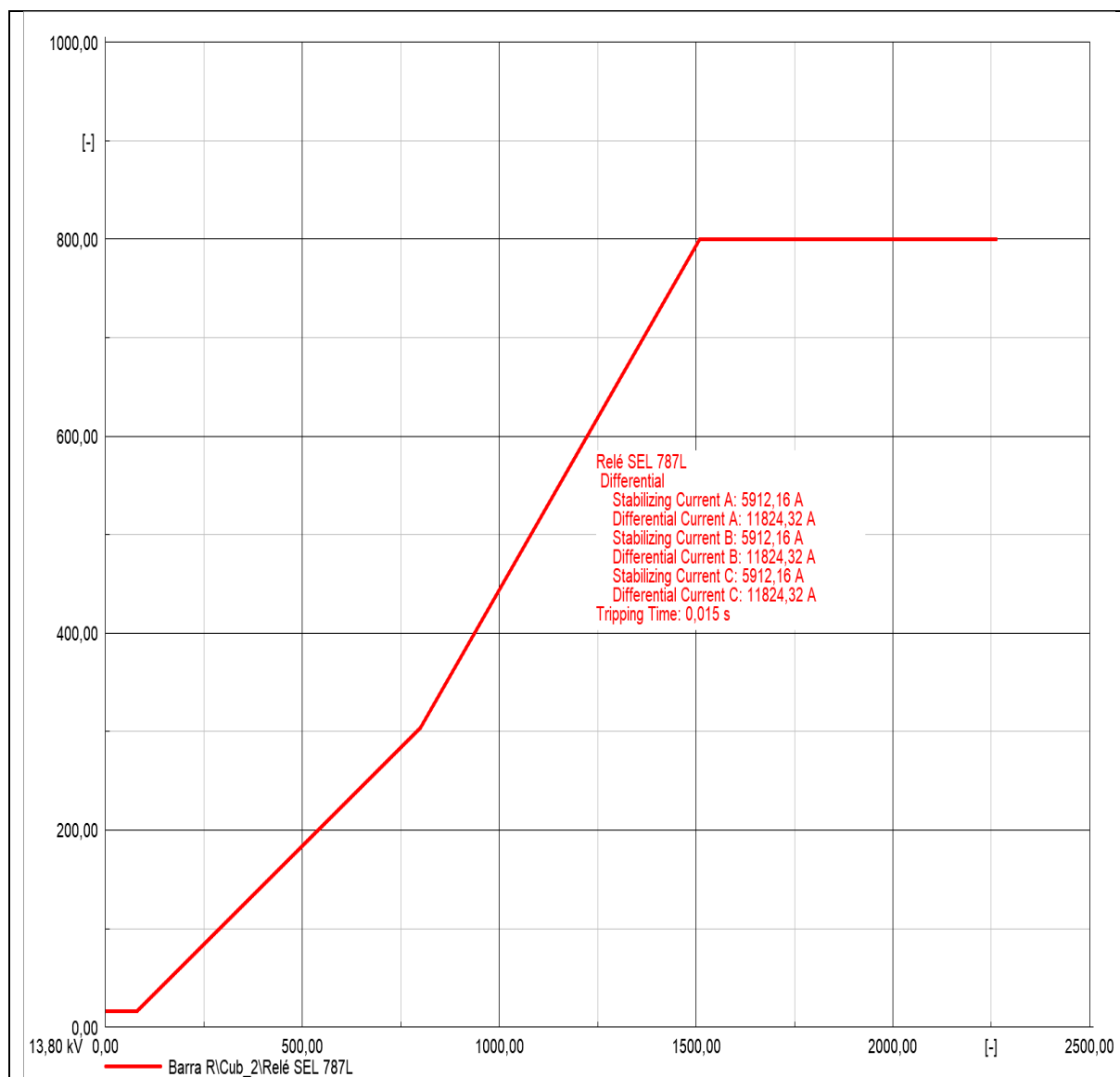


Imagen 68. Gráfica de simulación del sistema con falla al 25% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.2. 50% línea

$$I_r = 6001 ; I_s = 0kA$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|6001 + 0|}{2} = 3000.5A \rightarrow x = 3.75pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |6001| - |0| = 6001A \rightarrow y = 7.50pu$$

3.6.4.2.1. Falla 50% línea

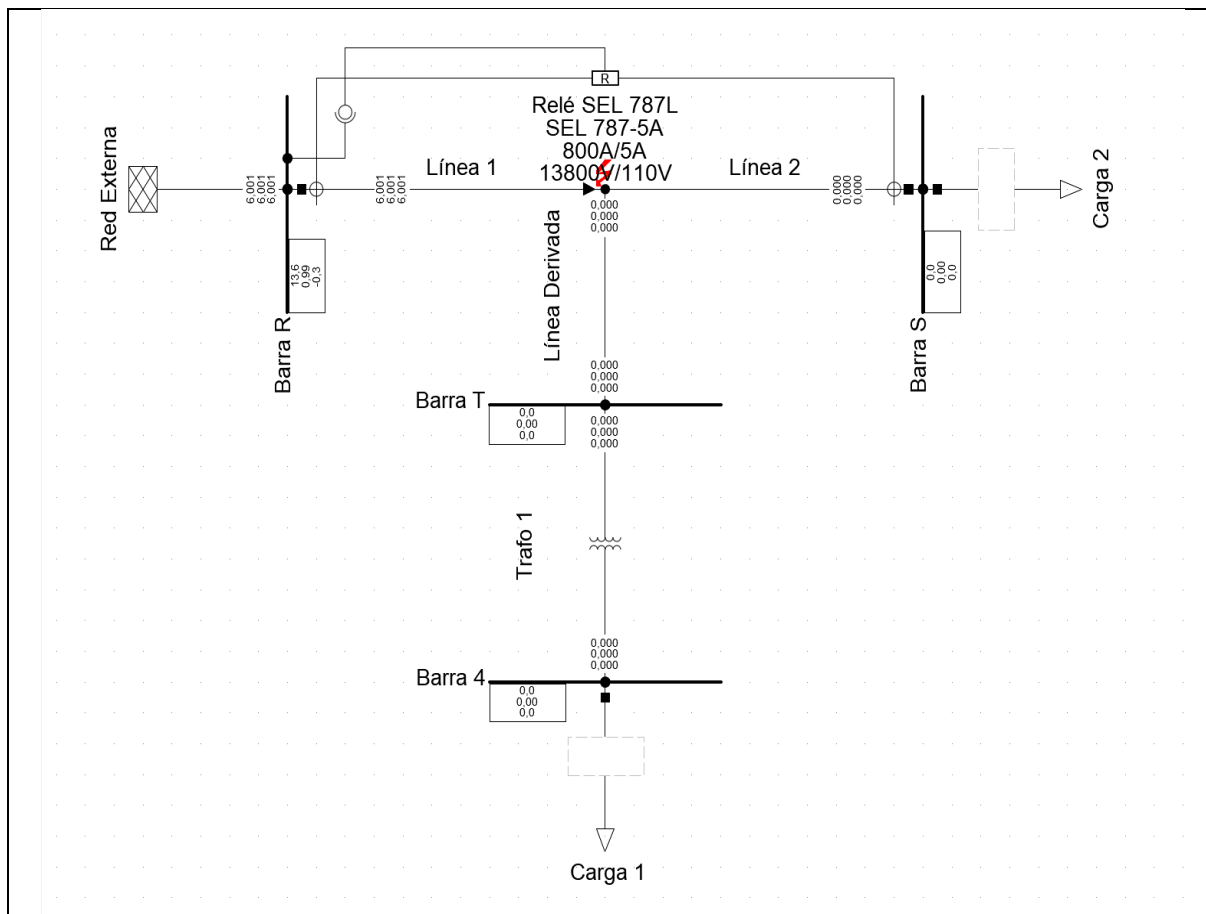


Imagen 69. Diagrama unifilar de fallo al 50% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.2.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema tiempo de accionamiento 0.015s

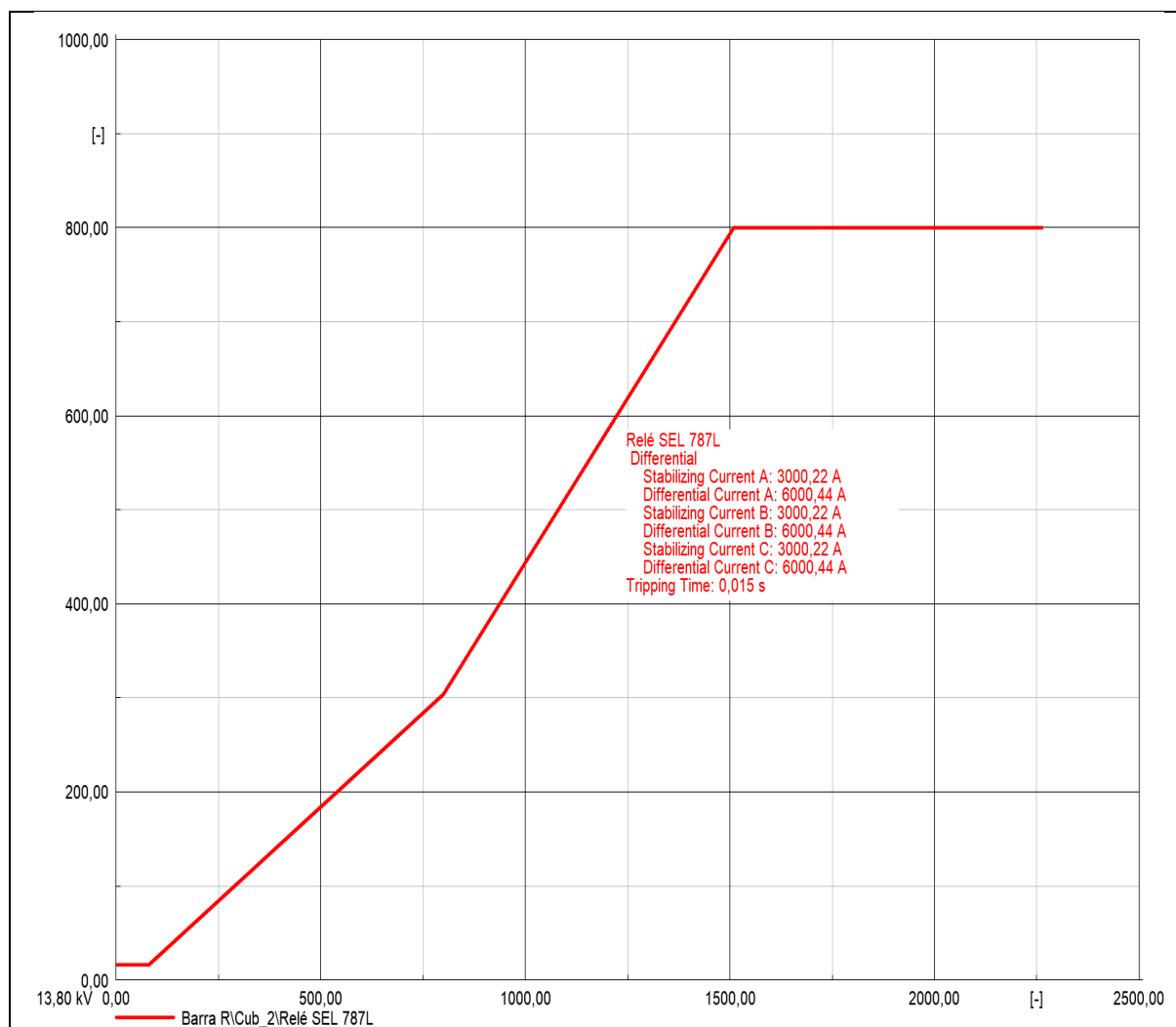


Imagen 70. Gráfica de simulación del sistema de falla al 50% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.3. 75% línea

$$I_r = 4021A ; I_s = 0A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|4021 + 0|}{2} = 2010.5A \rightarrow x = 2.51pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |4021| - |0| = 4021A \rightarrow y = 5.03pu$$

3.6.4.3.1. Falla al 75% línea

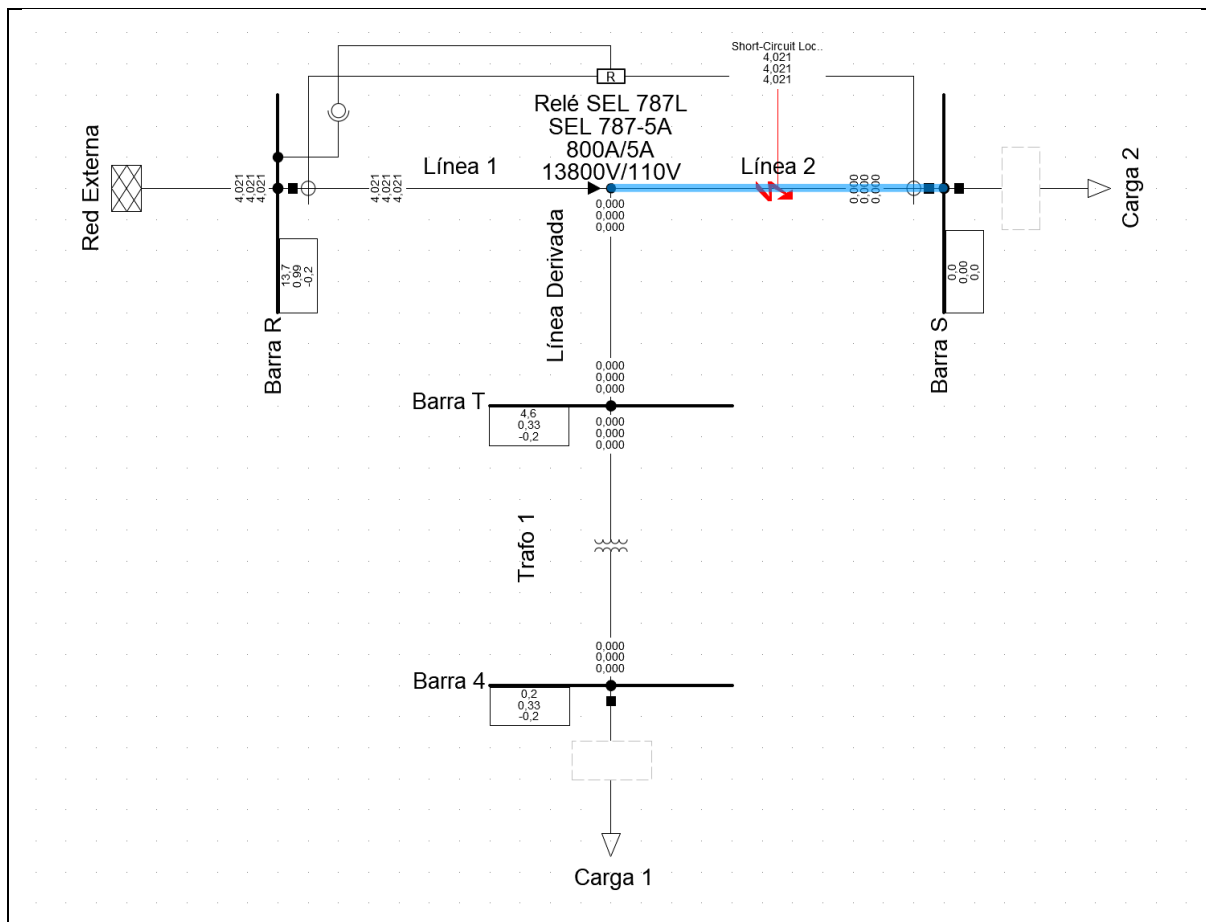


Imagen 71. Diagrama unifilar de falla en línea al 75% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSILENT

3.6.4.3.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema al 75% de la línea, tiempo de accionamiento 0.015s

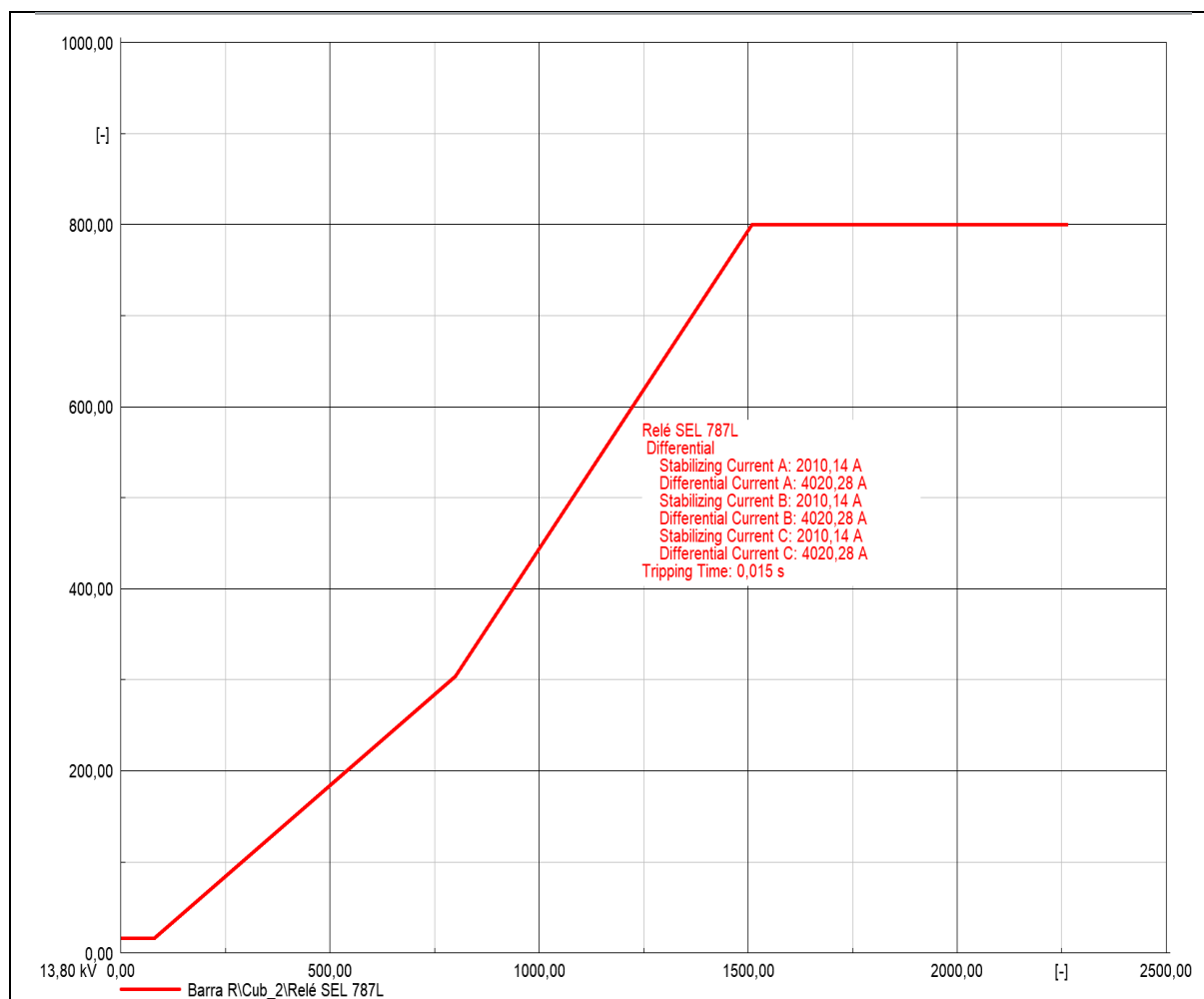


Imagen 72. Gráfica de simulación del sistema al 75% de la línea
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.4. 50% línea derivada

$$I_r = 5973A ; I_s = 0A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|5973 + 0|}{2} = 2986.5A \rightarrow x = 3.73pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |5973| - |0| = 5973A \rightarrow y = 7.47pu$$

3.6.4.4.1. Falla al 50% en línea derivada

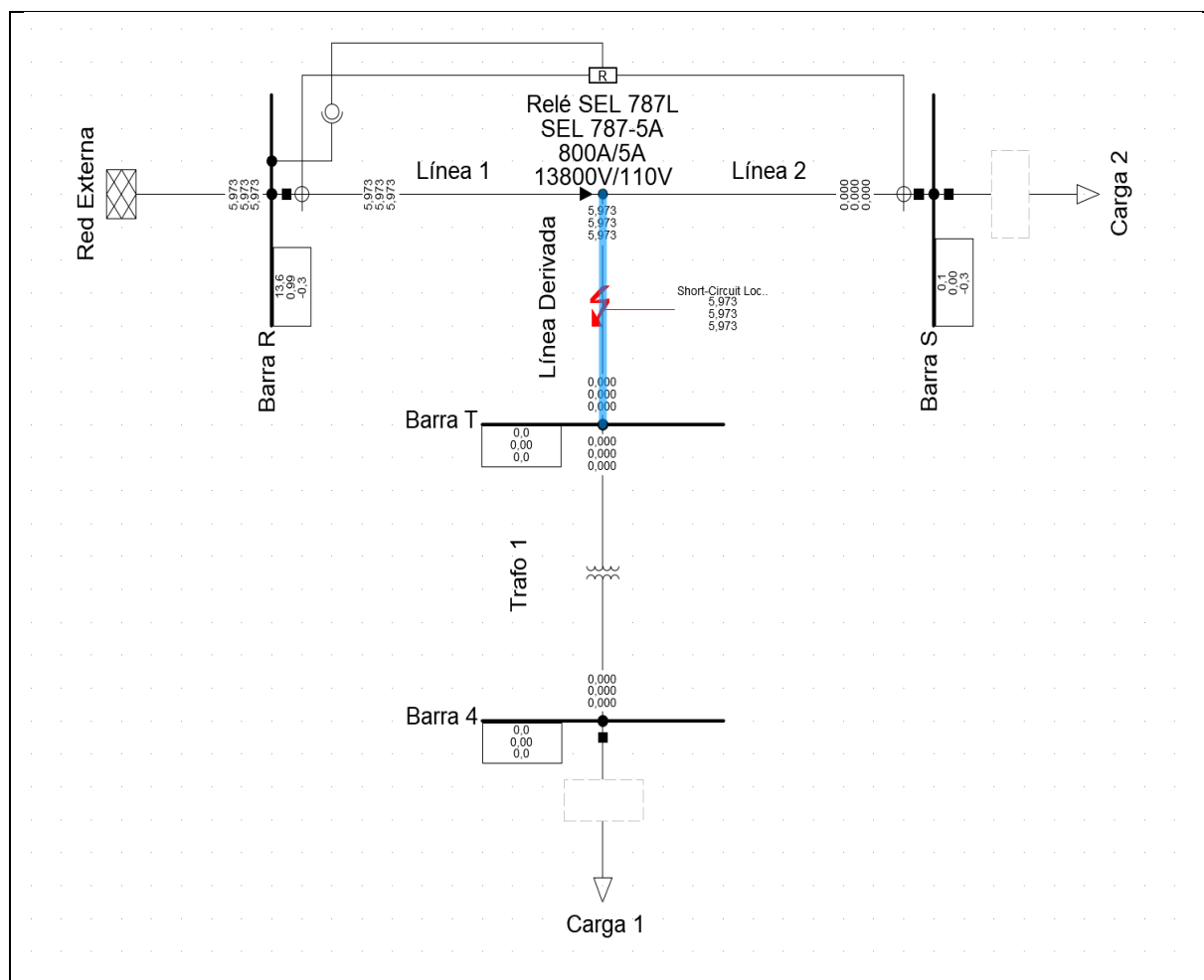


Imagen 73. Diagrama unifilar falla al 50% de la línea derivada
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.4.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema al 50% de la línea derivada, tiempo de accionamiento 0.015s

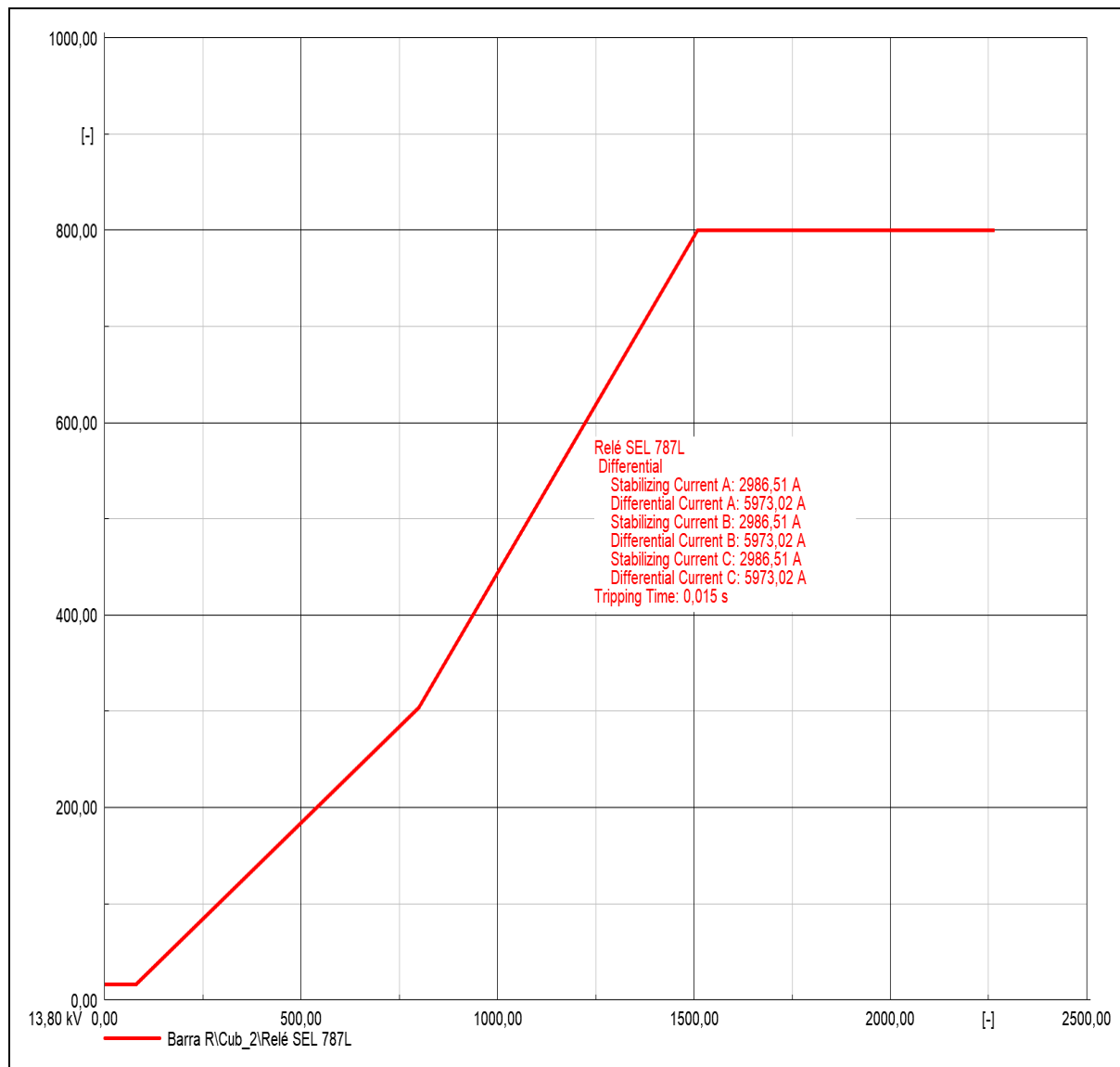


Imagen 74. Gráfica de simulación del sistema al 50% de la línea derivada
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.5. Barra T

$$I_r = 5946A ; I_s = 0A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|5946 + 0|}{2} = 2973A \rightarrow x = 3.72pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |5946| - |0| = 5946A \rightarrow y = 7.43pu$$

3.6.4.5.1. Falla barra T

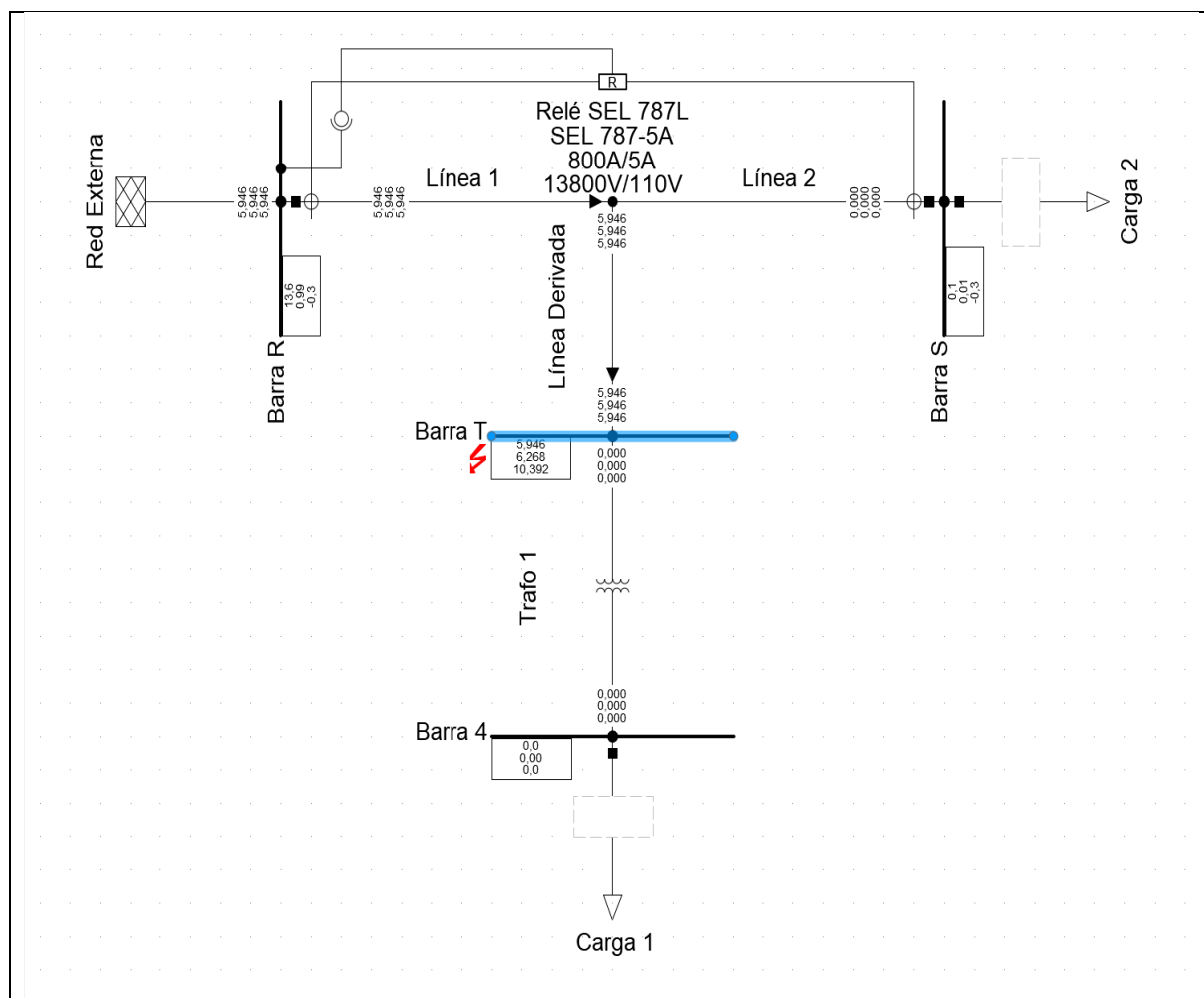


Imagen 75. Diagrama unifilar barra T
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.5.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema en barra T, tiempo de accionamiento 0.015s

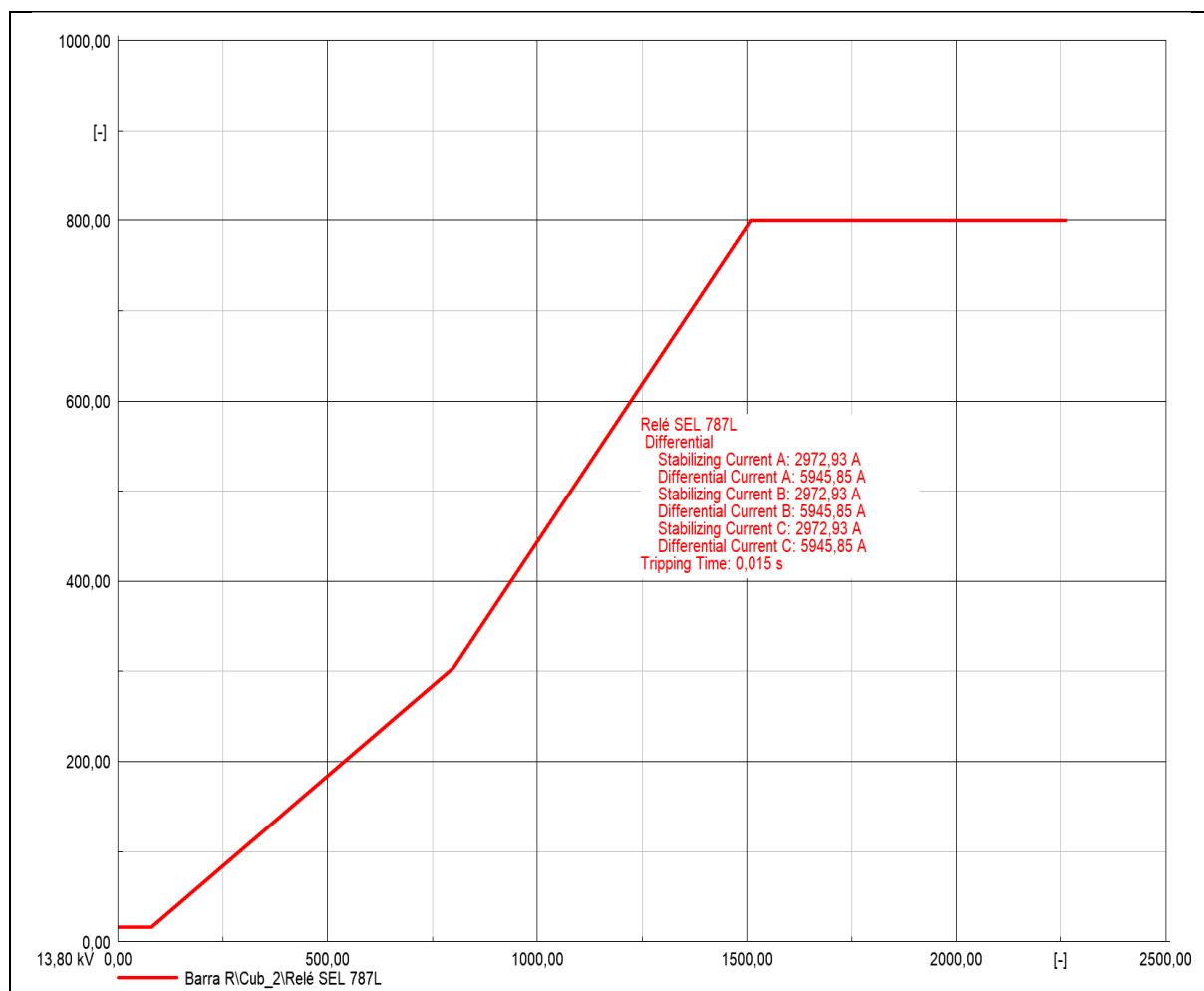


Imagen 76. Gráfica de simulación barra T
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.6. Barra 4

$$I_r = 2064A ; I_s = 0A$$

$$I_{rest} = \frac{|I_r + I_s|}{2} = \frac{|2064 + 0|}{2} = 1032A \rightarrow x = 1.29pu$$

$$I_{diff} = |I_r| - |I_s| = |2064| - |0| = 2064A \rightarrow y = 2.58pu$$

3.6.4.6.1. Falla barra 4

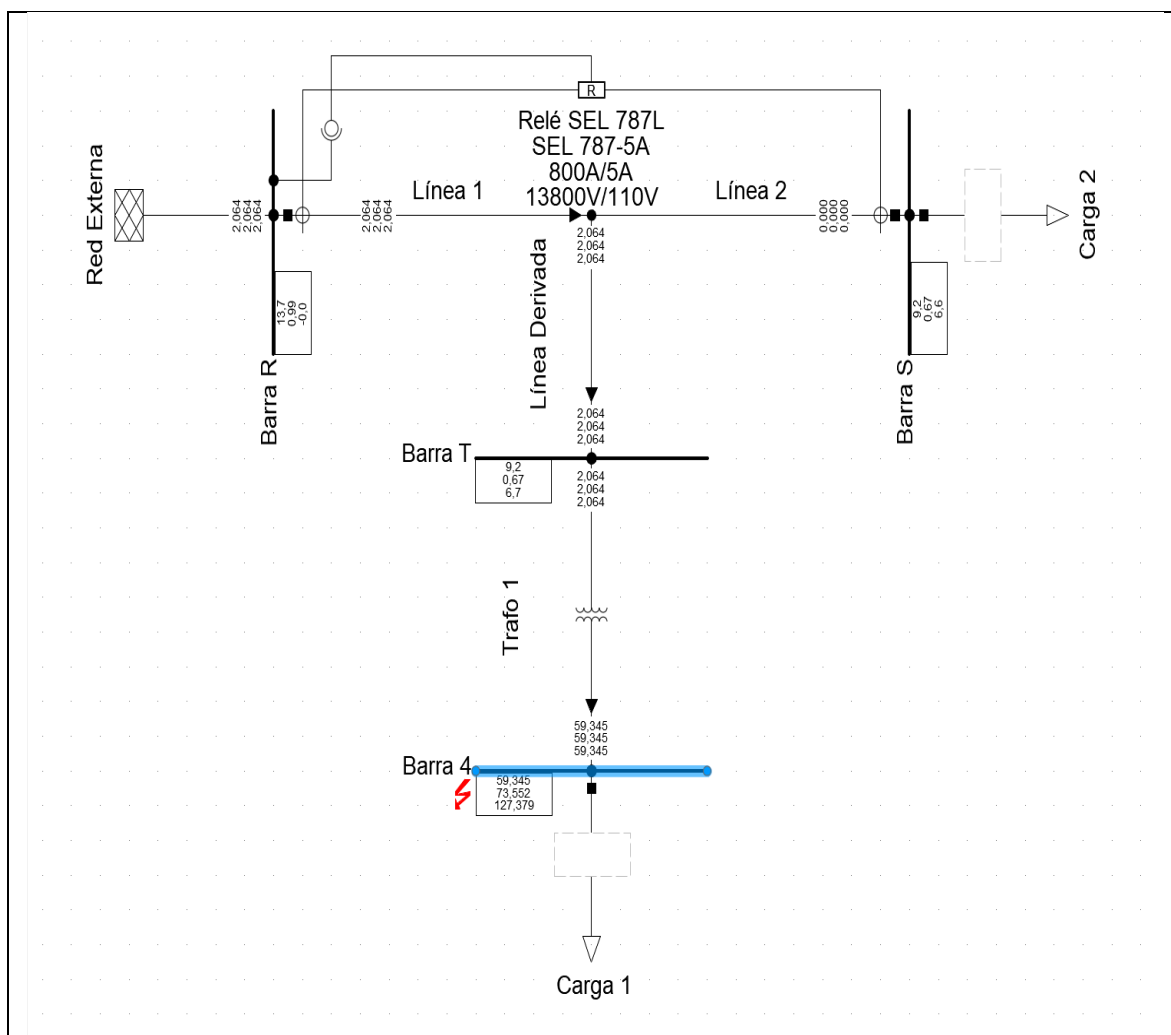


Imagen 77. Diagrama unifilar falla en barra 4
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.6.4.6.2. Relé SEL-787L, curva de accionamiento ante una falla interna del sistema en barra 4, tiempo de accionamiento 0.015s

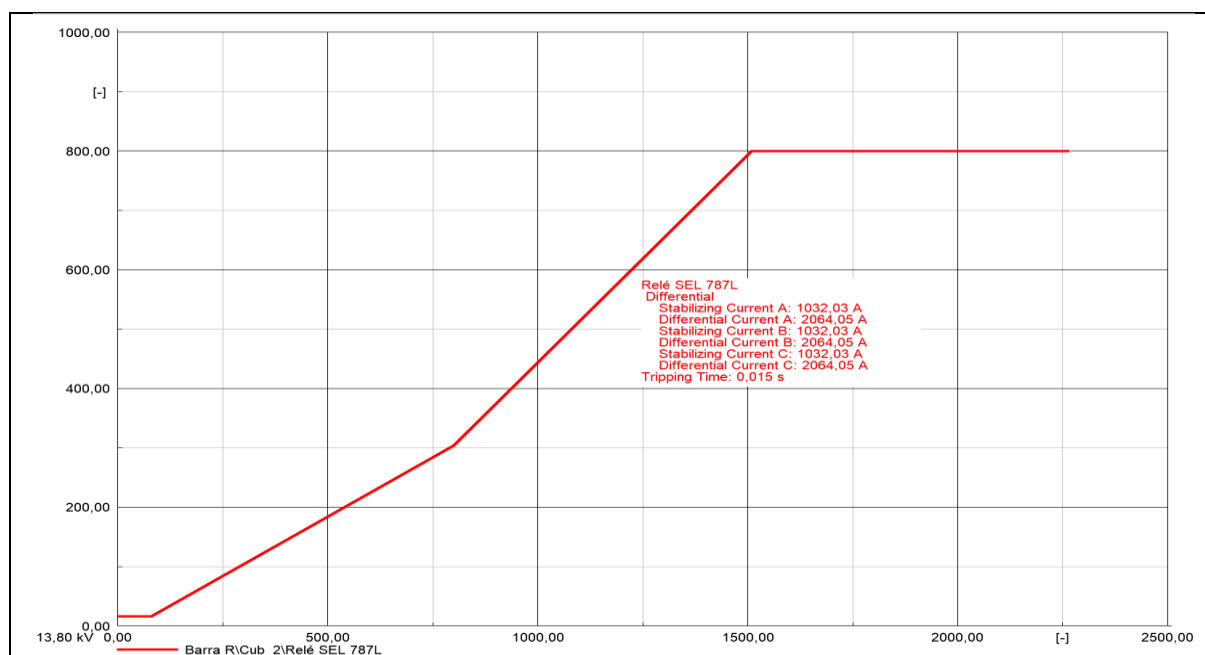


Imagen 78. Gráfica de simulación falla en barra T
Fuente: Interfaz simulación DIgSilent

3.7. Datos obtenidos

En el siguiente apartado por medio los datos adquiridos en la simulación se explicarán de manera gráfica el funcionamiento del relé SEL-787L ante los distintos casos de operación

Datos del sistema relé SEL-787L

I nom	800	A				Eje X	Eje Y	ESTATUS
# caso estudio	Casos de estudio	I1	I2	I1 pu	I2 pu	I restricción	I Diferencial	
1	Sistema a plena carga	288,80	144,30	0,36	0,18	0,27	0,18	NO TRIP
3	Falla Barra R	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO TRIP
3	Falla Barra S	3023,00	3023,00	3,78	3,78	3,78	0,00	NO TRIP
4	Falla 25% línea	11825,00	0,00	14,78	0,00	7,39	14,78	TRIP
4	Falla 50% línea	6001,00	0,00	7,50	0,00	3,75	7,50	TRIP
4	Falla 75% línea	4021,00	0,00	5,03	0,00	2,51	5,03	TRIP
4	Falla 50% línea derivada	5973,00	0,00	7,47	0,00	3,73	7,47	TRIP
4	Falla Barra T	5946,00	0,00	7,43	0,00	3,72	7,43	TRIP
4	Falla Barra 4	2064,00	0,00	2,58	0,00	1,29	2,58	TRIP
2	Trafo energ. carga conect.	141,40	141,40	0,18	0,18	0,18	0,00	NO TRIP
2	Trafo energ. carga desconect.	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	NO TRIP

Tabla 7. Datos de simulación.
Fuente: Datos obtenidos en simulación DIgSilent

Pendiente

Iopmin	0,3
m1	0,3
m2	8
Breakpoint	3

Tabla 8. Valores de pendiente.

Fuente: Datos obtenidos en simulación DIgSilent

	#Par ordenado	X	Y
lop_min (segmento1)	1	0	0,3
	2	1	0,3
m1_(segmento2)	3	8	3,2
m2_(segmento3)	4	15	8

Tabla 9. Valores pares ordenados

Fuente: Datos obtenidos en simulación DIgSilent

- **Gráfica de Característica Diferencial**

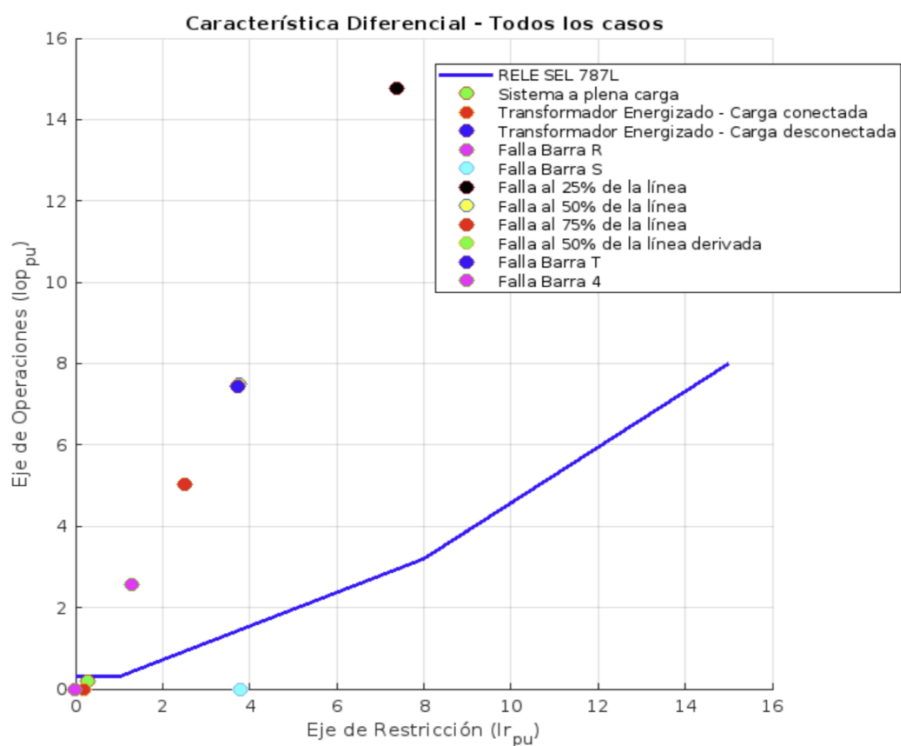


Imagen 79. Gráfica de Característica Diferencial

Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- Gráfica de sistema de operación en sistema a plena carga

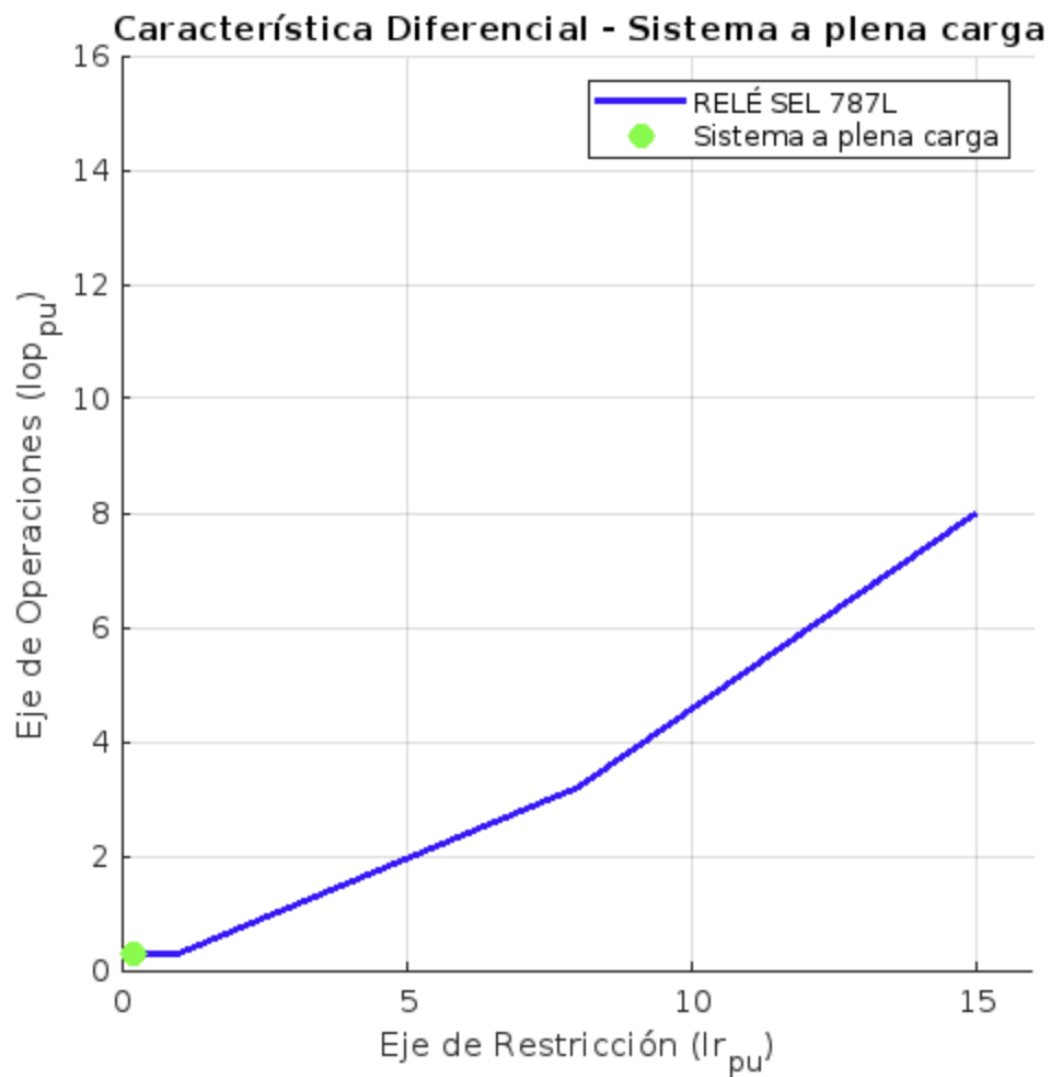


Imagen 80. Sistema de operación en condiciones normales
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Energización del transformador con carga conectada.**

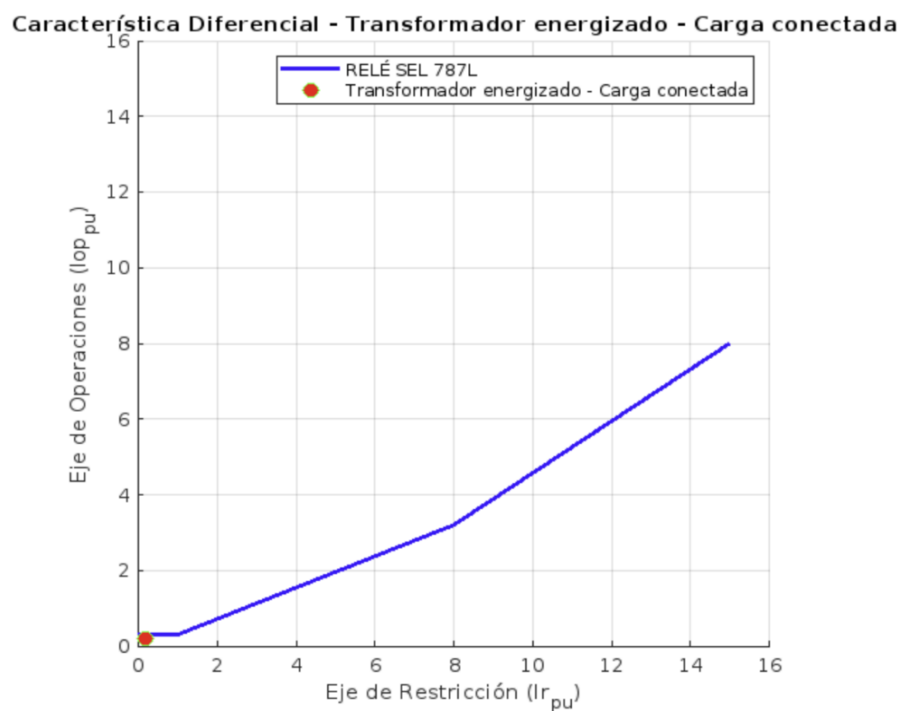


Imagen 81. Energización del transformador con carga conectada
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Energización del transformador con carga desconectada**

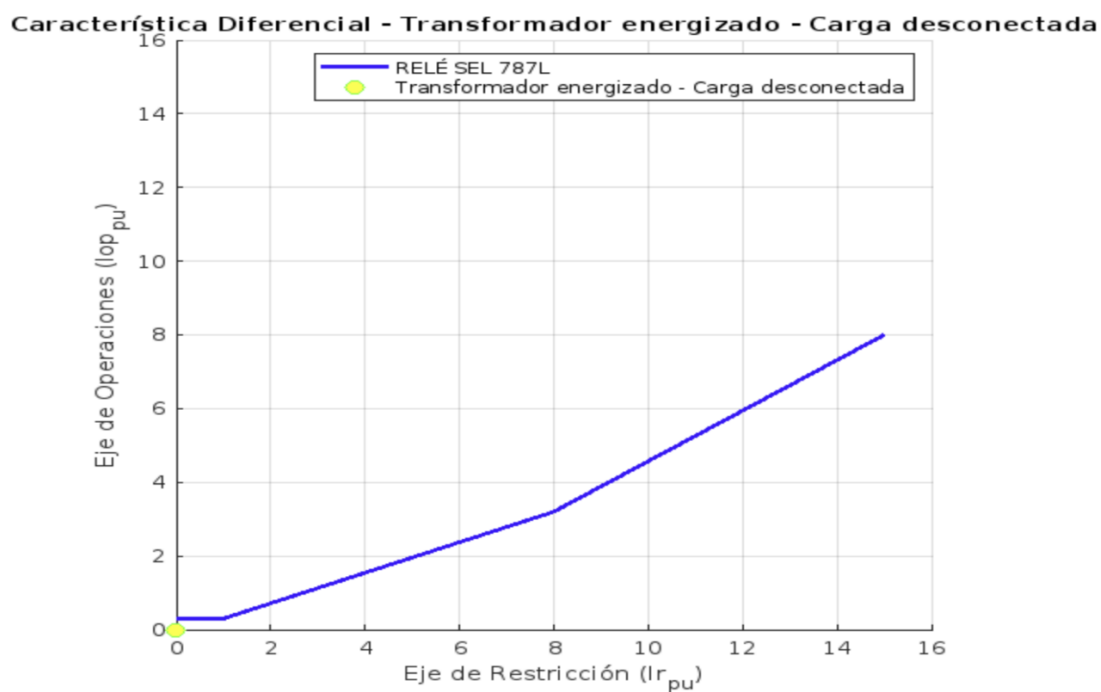


Imagen 82. Energización del transformador con carga desconectada
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla externa en barra R**

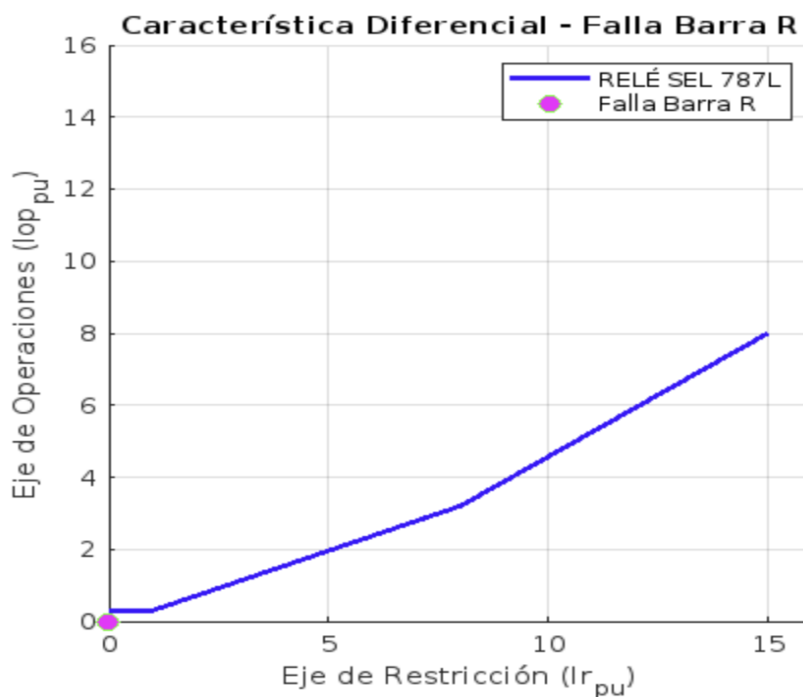


Imagen 83. Falla externa en barra R
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla externa en barra S**

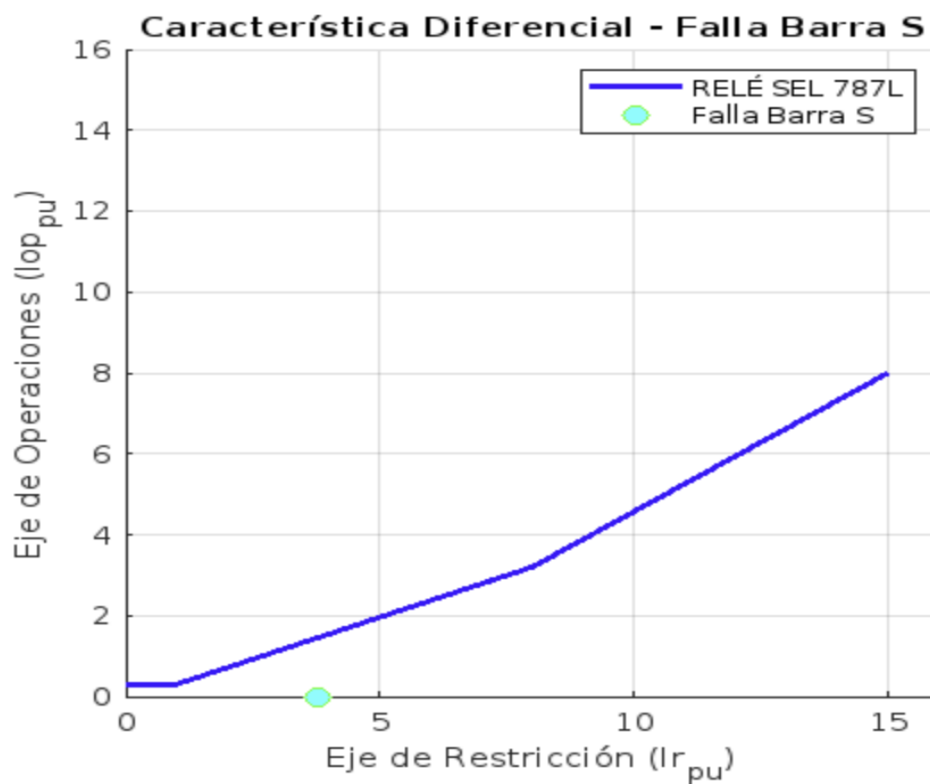


Imagen 84. Falla externa en barra S
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla interna 25%**

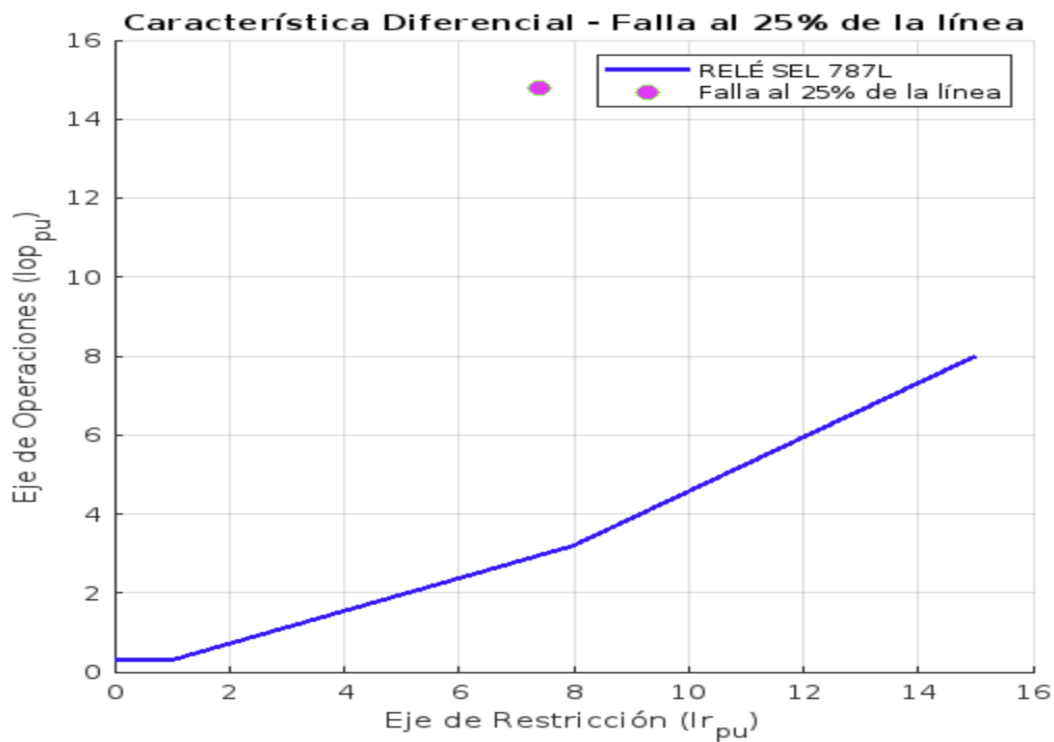


Imagen 85. Falla al 25% de línea
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla interna 50%**

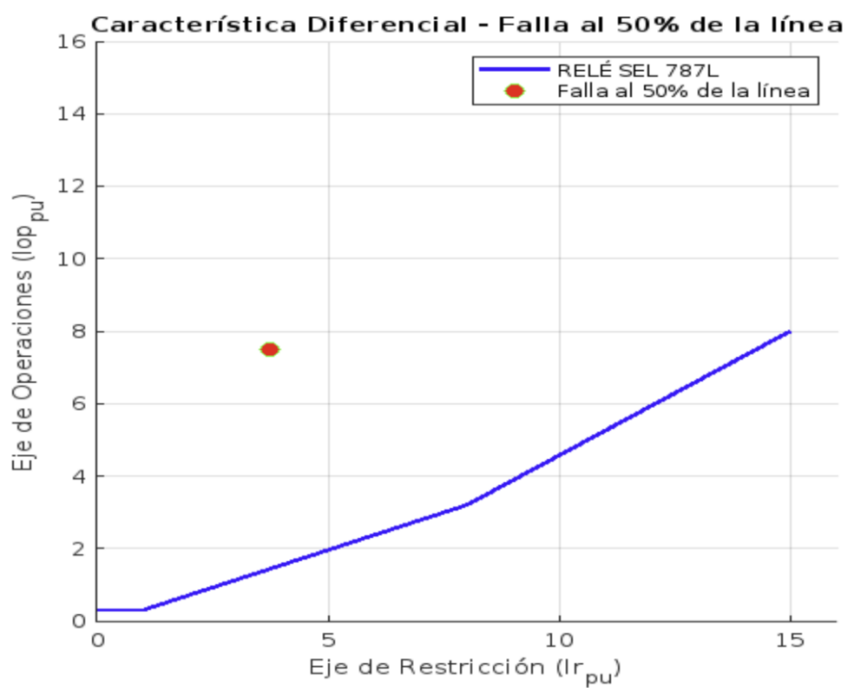


Imagen 86. Falla al 50% de línea
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla interna 75%**

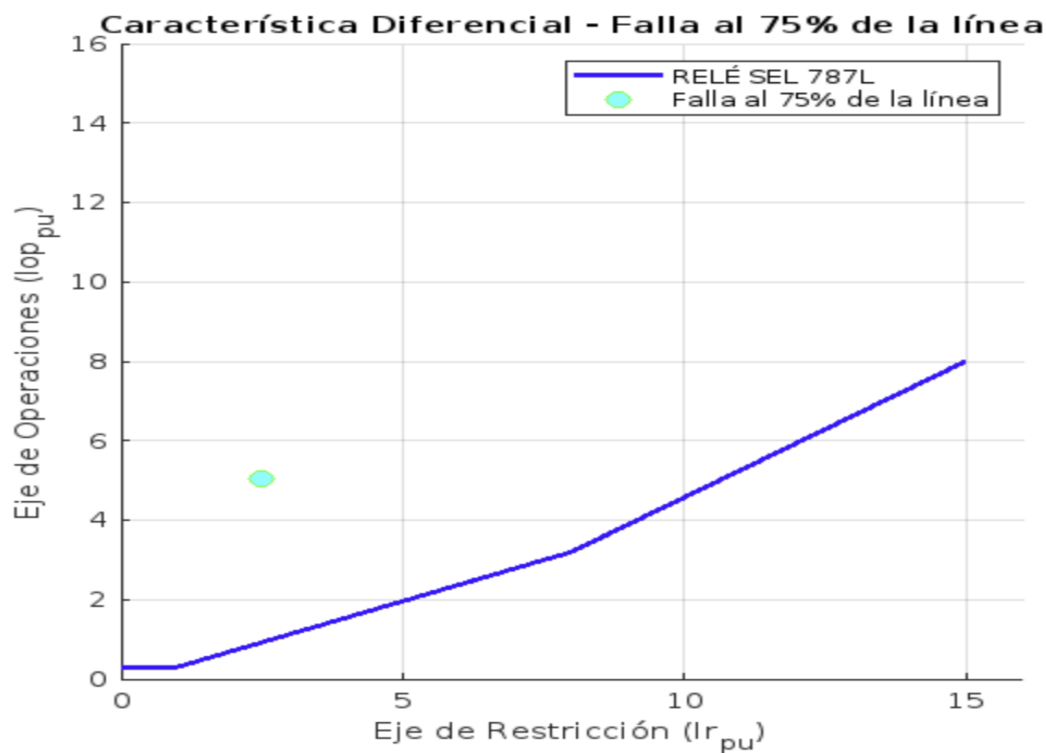


Imagen 87. Falla al 75% de línea
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla al 50% en línea derivada**

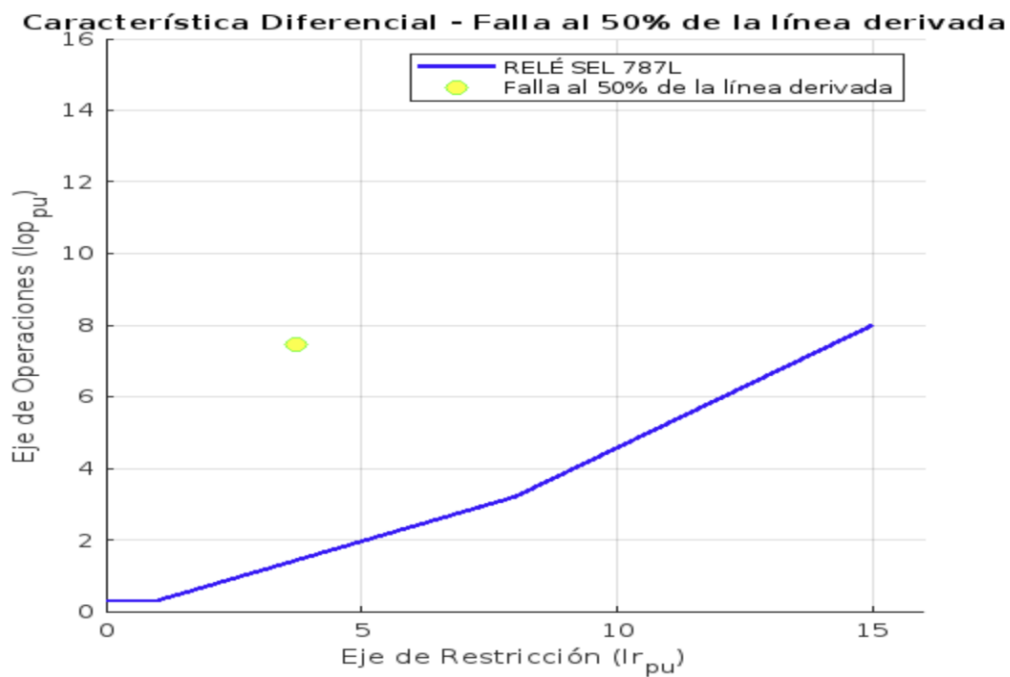


Imagen 88. Falla en línea derivada
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla en barra T**

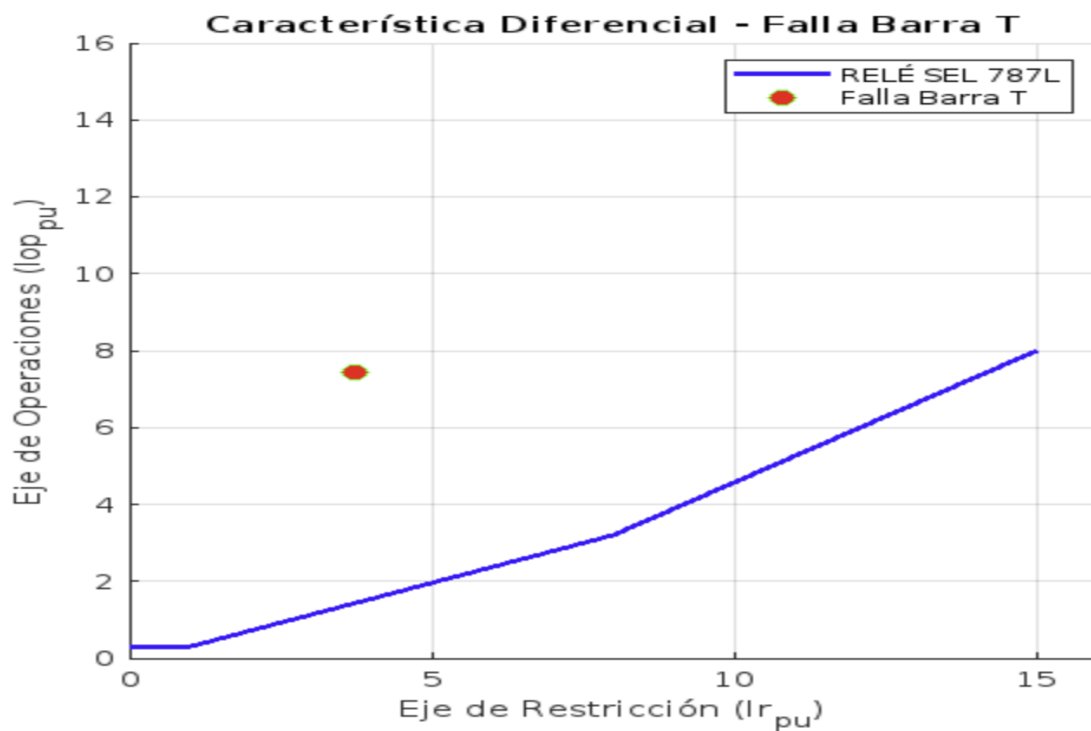


Imagen 89. Falla en barra T
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

- **Falla en barra 4**

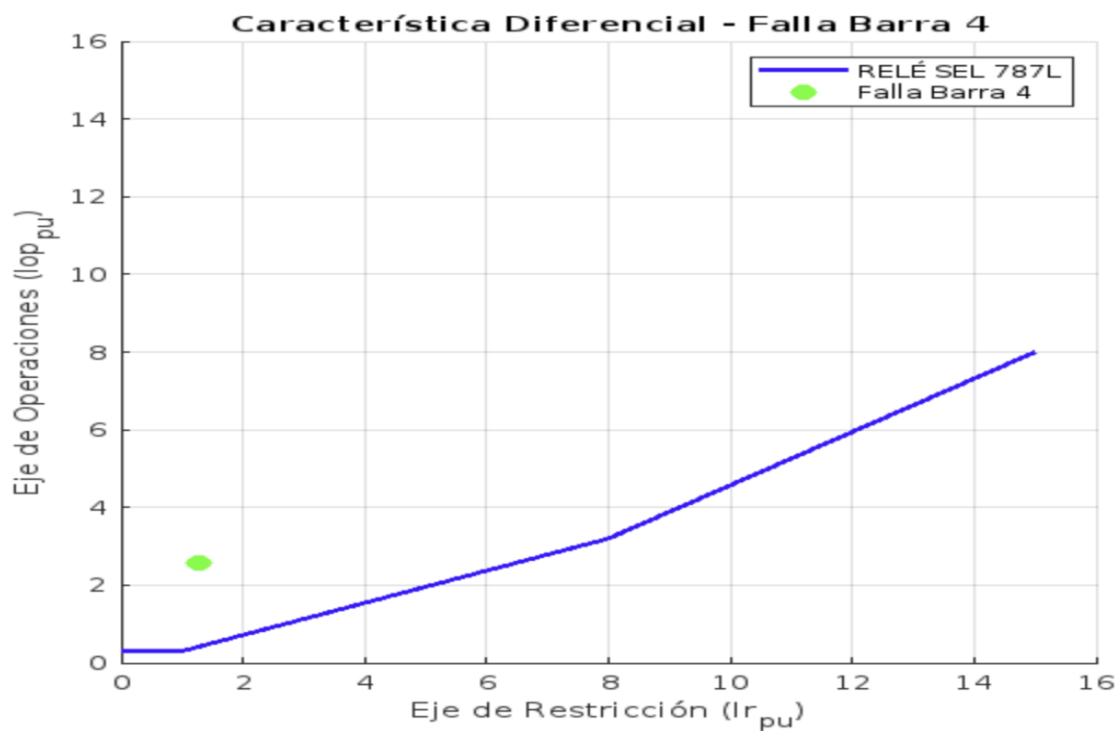


Imagen 90. Falla en barra T
Fuente: Datos ejecutados en Matlab

3.8. Presupuesto

Numeración	Item	cantidad	Unidad	Costo Unitario (US\$)	Costo total (US\$)
1	Insumos de oficina	1	U	\$ 100,00	\$ 100,00
2	Transporte	1	U	\$ 100,00	\$ 100,00
3	computadora	1	U	\$ 200,00	\$ 200,00
4	software	2	U	\$ 200,00	\$ 400,00
				Subtotal	\$ 800,00
				IVA 15%	\$ 120,00
IVA	\$ 15,00			Total	\$ 920,00

Tabla 10. Tabla de presupuesto
Fuente: Gastos generados por autores

4. CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se desarrolló un modelo de simulación efectivo, el cual nos permitió evaluar el desempeño del sistema de protección diferencial de líneas de distribución. Las simulaciones realizadas en los softwares DIgSilent y Matlab demostraron que el esquema realizado fue capaz de identificar de manera precisa y confiable las fallas internas y externas esto nos dio como finalidad el poder validar la eficacia del relé SEL-787L bajo los diferentes escenarios de operación.
- Por medio de las pruebas realizadas que incluyen las condiciones de operación normales, energización el transformador, fallas externas y fallas internas, se permitió medir el tiempo de respuestas y precisión del sistema ante la detección de fallas, esto con la finalidad de establecer un protocolo el cual asegure que el relé actúe únicamente cuando cense alguna condición crítica, cumpliendo con el objetivo de minimizar falsas alarmas y garantizando el completo funcionamiento y estabilidad del sistema
- Mediante las diferentes configuraciones que se realizaron y con los ajustes de pendiente (m1 y m2) del relé SEL-787L, los resultados arrojados indicaron que las configuraciones con pendientes ajustadas a las características de las líneas protegidas, dieron como resultado una mejora significativa ante la discriminación de fallas internas y externas mejorando la selectividad del sistema.
- Las perturbaciones externas como corrientes de magnetización y fallas cercanas, en la simulación del sistema de protección mostraron que el uso de armónicos de segundo orden y ajusten de los tiempos de respuestas permiten que el sistema mantenga su estabilidad evitando así actuaciones innecesarias.

4.2. Recomendaciones

- La implementación de este modelo de protección diferencial de líneas desarrollado en sistemas reales de distribución eléctrica debe iniciarse con pruebas en entornos controlados para garantizar una confiabilidad antes del despliegue definitivo.
- Se recomienda realizar ajustes periódicos de las pendientes m_1 y m_2 del relé SEL-787L, teniendo en consideración las condiciones específicas de las líneas protegidas y los datos obtenidos en las pruebas para mantener un alto nivel de precisión, confiabilidad y evitar falsa alarmas.
- Fortalecer el modelo de simulación desarrollada en DIgSilent y Matlab incorporando escenarios de mayor complejidad como variaciones de carga, cambios en las configuraciones de los TCs y perturbaciones externas de mayor nivel de dificultad.
- Realizar simulaciones adicionales en las cuales se incluyan nuevas configuraciones de protección diferencial, con esto podremos analizar nuevos tiempos de respuesta y los niveles de error en los diferentes escenarios a simular, con esto evaluaremos el desempeño del esquema simulado.

4.3. Anexo

```

clc; clear; close all;

% Definir los límites del plano cartesiano
xlim([0 16]);
ylim([0 16]);

% Crear la figura y los ejes
figure;
hold on;
grid on;
axis equal;
axis([0 16 0 16]);

% Etiquetas de los ejes
xlabel('Eje de Restricción (Ir_p_u)');
ylabel('Eje de Operaciones (Iop_p_u)');
title('Característica Diferencial - Relé SEL 787L');

% Definir los puntos para la línea
x_line = [0, 1, 8, 15];
y_line = [0.3, 0.3, 3.2, 8];

% Graficar la línea
plot(x_line, y_line, '-b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'RELÉ SEL 787L');
legend;

% Mostrar la cuadrícula
grid on;

hold off;

```

Imagen 91. Codificación de la característica diferencial del Relé SEL 787L en Matlab.
Fuente: Codificación Autores

4.4. Bibliografía

- [1] putri Kurniawati, vol. 01. 2017.
- [2] D. Bejmert, W. Rebizant, and A. Wiszniewski, “Enhanced differential protection algorithm for tapped transmission lines,” *2011 IEEE PES Trondheim PowerTech Power Technol. a Sustain. Soc. POWERTECH 2011*, 2011, doi: 10.1109/PTC.2011.6019270.
- [3] V. Nasimba Medina and E. Díaz Ocampo, *Introducción a las líneas de transmisión*, vol. 1. 2020.
- [4] “Escuela politécnica nacional,” 2022.
- [5] J. J. Barraza Morales, “Parametrización y pruebas en relevadores de protección para línea transmisión Santa Ana 69kv,” *Univ. San Carlos Guatemala*, 2017.
- [6] U. Nacional, D. E. L. Centro, and D. E. L. Pero, “Universidad nacional del centro del,” p. 2023, 2001.
- [7] A. Peralta and P. Robles, “Ubicación de equipos de seccionamiento e interconexión en alimentadores primarios,” *Univ. Politécnica Sales.*, no. December 2001, 2001, doi: 10.13140/2.1.1180.6083.
- [8] X. X. X. X. Chen *et al.*, *Nucleic Acids Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2018.
- [9] R. W. Osorio, “Selección y Especificación de Transformadores de Corriente y Potencial en Instalaciones Eléctricas Industriales,” *Univ. Nac. Autónoma México*, p. 75, 2014.
- [10] E. P. Ing. Gonzalez Flores, “Fundamentos en la aplicación de relevadores de protección en sistemas eléctricos de potencia,” *Univ. Autónoma Nuevo León*, 1994.
- [11] A. De, R. De, Q. De, N. En, and N. P. Por, “A SESOR : I NG . A LICIA M ARÍA R EYES D UKE,” 2021.
- [12] “Diseno_de_Subestaciones_Electricas_Jose.pdf.” .
- [13] L. Garza, “Eléctricos De Potencia,” *Ieee*, pp. 1–134, 2005.
- [14] “SEL 787L DATASHEET.pdf.” .
- [15] R. Horta bernús, “Redes de alta tensión,” *Redes alta tensión*, pp. 1–129, 2021.
- [16] IEEE Power Engineering Society. Power Systems Relaying Committee., IEEE Power Engineering Society. IEEE Power System Communications Committee., Institute of Electrical and Electronics Engineers., American National Standards Institute., and IEEE-SA Standards Board., “IEEE standard for N times 64 kilobit per second optical fiber interfaces between teleprotection and multiplexer equipment,” vol. 2017, p. 12, 2003.
- [17] Iec, “TECHNICAL SPECIFICATION Communication networks and systems for power utility automation-Part 2: Glossary INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION,” 2019.
- [18] S. M. Naik, M. Fernandes, G. Pushpakumar, and R. Pathak, “Smart grid communication protocol test automation along with protection test automation,” *Proc. Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2019*, no. Icoei, pp. 1313–1317, 2019,

doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862793.

- [19] O. Ronen, “Synchronization monitoring in IEEE1588 synchronization networks,” *IEEE Int. Symp. Precis. Clock Synchronization Meas. Control. Commun. ISPCS*, pp. 95–100, 2013, doi: 10.1109/ISPCS.2013.6644770.
- [20] K. E. Martin *et al.*, *IEEE standard for synchrophasors for power systems*, vol. 13, no. 1. 1998.
- [21] ISO 5167-2:2003(E), “International Standard International Standard,” *61010-1 © Iec2001*, vol. 2003, p. 13, 2003.
- [22] A. Assouak, “Setting and coordination of distance relays in interconnected power systems using DIGSILENT PowerFactory software,” *2022 2nd Int. Conf. Adv. Electr. Eng.*, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICAEE53772.2022.9962071.
- [23] “Manual básico R 2023 b,” 2023.
- [24] L. Current and D. Relay, “SEL-387L Line Current Differential Relay.”