



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE
SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA
EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

PROPUESTA TECNOLÓGICA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO

Autor:

Cuenca Morales Wilmer Rene

Tutor:

Ing. Freire Freire Armando Salvador, Mg.

LATACUNGA – ECUADOR

Agosto 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Cuenca Morales Wilmer Rene**, con cédula de ciudadanía No. **1723507834**, estudiante de la carrera de Ingeniería Eléctrica declaro ser autor de la presente Propuesta Tecnológica: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI"**, siendo el Ing. Freire Freire Armando Salvador Mg., tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 18 de agosto del 2026



Wilmer Rene Cuenca Morales
C.C: 1723507834
AUTOR

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica sobre el título:

“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de Cuenca Morales Wilmer Rene, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicha propuesta tecnológica es merecedora del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 18 de agosto del 2026



Ing. Armando Salvador Freire Freire, Mg.

C.C. 0503842833

TUTOR

AVAIL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: **Cuenca Morales Wilmer Rene**, con el título de la Propuesta Tecnológica: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI"**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 18 de agosto del 2026

Para constancia firman:

Ing. Rueda Flores Walter Paul, Mg.
C.C: 0503689895
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Proaño Maldonado Xavier Alfonso, Mg.
C.C: 0502636424
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly, Mg.
C.C: 0604590216
LECTOR 3 (MIEMBRO)

GRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar con éxito esta etapa de mi formación profesional.

A la Universidad Técnica de Cotopaxi, por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, así como por proporcionarme los conocimientos y herramientas necesarias para desarrollar este trabajo de titulación.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, por compartir sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, contribuyendo de manera significativa a mi formación profesional y al desarrollo de este proyecto.

De manera especial, agradezco a mi tutor y a todas las personas que colaboraron en el desarrollo de este trabajo, por su orientación, paciencia y apoyo durante las diferentes etapas.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por su apoyo, comprensión y motivación constante, que fueron fundamentales para superar las dificultades y alcanzar esta meta.

.

Wilmer Cuenca

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor, apoyo incondicional y confianza durante todo este proceso de formación académica. Gracias por ser mi motivación y por enseñarme que, con esfuerzo y dedicación, es posible superar cada obstáculo y alcanzar los objetivos propuestos.

A mis hermanos, por estar presente en cada etapa de este camino, por sus palabras de aliento y por acompañarme en los momentos de dificultad y de alegría.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a mi formación profesional y me motivaron a seguir adelante para culminar esta importante etapa de mi vida.

Wilmer Cuenca

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TÍTULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”

Autor:

Cuenca Morales Wilmer Rene

RESUMEN

La propuesta tecnológica tuvo como objetivo principal implementar un módulo de protección contra sobrecorriente mediante el relé SEL-351 para el laboratorio de protecciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi. La metodología correspondió a una investigación aplicada, sustentada en procedimientos documentales, técnicos y experimentales; se revisaron criterios normativos y fundamentos de las funciones ANSI 50 y ANSI 51, se modeló un sistema eléctrico de nueve barras en DigSILENT PowerFactory, se analizaron las corrientes de las cargas y las relaciones de transformación de los TC, y posteriormente se configuraron y transfirieron los ajustes al relé mediante ACSELERATOR QuickSet. Los resultados determinaron corrientes normales de 339 A, 235 A y 260 A para las cargas A, B y C. Para ANSI 51 se establecieron ajustes secundarios de 5,50 A, 5,09 A y 5,67 A, con márgenes de 29,79%, 29,96% y 30,85% respecto a la operación normal, empleando la característica U3-U.S. Very Inverse T_{pset} de 0,50. Para ANSI 50 se configuraron 28,20 A, 35,76 A y 40,91 A secundarios, con T_{set} de 0,00 s. la comunicación serial con el SEL-351 se estableció mediante ACSELERATOR QuickSet, permitiendo leer, editar y transferir el Group 1. Se concluyó que la parametrización desarrollada diferencia adecuadamente el régimen normal, actuación temporizada y actuación de alta corriente, y vincula los resultados obtenidos en PowerFactory con la configuración física del relé, proporcionando una herramienta técnica para prácticas de protección eléctrica. Asimismo, el módulo fortalece la formación práctica en configuración y análisis de protecciones digitales.

Palabras clave: Ajustes de protección, ANSI 50/51, cargas eléctricas, relé SEL-351, sobrecorriente.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

**THEME: “IMPLEMENTATION OF AN OVERCURRENT PROTECTION MODULE
USING SEL-351 RELAY FOR LABORATORY PROTECTION AT TECHNICAL
UNIVERSITY OF COTOPAXI”**

Author:

Cuenca Morales Wilmer Rene

ABSTRACT

The primary objective of the technological proposal was to implement an overcurrent protection module using SEL-351 relay for laboratory protection at Technical University of Cotopaxi. The methodology involved applied research, based on documentary, technical, and experimental procedures; regulatory criteria and the fundamentals of ANSI 50 and ANSI 51 functions were reviewed; a nine-bus electrical system was modeled in DIgSILENT PowerFactory; load currents and CT transformation ratios were analyzed; and finally, the settings were configured and transferred to the relay using ACSELERATOR QuickSet. The results determined normal currents of 339 A, 235 A, and 260 A for loads A, B, and C. For ANSI 51, secondary settings of 5.50 A, 5.09 A, and 5.67 A were established, with margins of 29.79%, 29.96%, and 30.85% relative to normal operation, using U3-U.S. Very Inverse T_{pset} characteristic of 0.50. For ANSI 50, secondary settings of 28.20 A, 35.76 A, and 40.91 A were configured, with a T_{set} of 0.00 s. Serial communication with SEL-351 was established using ACSELERATOR QuickSet, allowing Group 1 to be read, edited, and transferred. It was concluded that the developed parameterization adequately distinguishes between normal operation, time-delayed operation, and high-current operation, and links the results obtained in PowerFactory with the relay physical configuration, providing a technical tool for electrical protection practices. Furthermore, the module enhances practical training in configuration and analysis of digital protection systems

Keywords: Protection settings, ANSI 50/51, electrical loads, SEL-351 relay, overcurrent.



UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE
COTOPAXI



CENTRO
DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: "IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI" presentado por: Wilmer Rene Cuenca Morales, egresado de la Carrera de: Electricidad, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicada, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 18 agosto del 2026

Atentamente,

Mg. Pacheco Pruna Edison Marcelo
CI: 0502617350

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN Error! Marcador no definido.	
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vi
ABSTRACT	1
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
1. INFORMACIÓN GENERAL	9
2. INTRODUCCIÓN	10
2.5 Justificación	17
2.6 Objetivos	17
2.7 Sistema de Tareas	18
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
3.1 Sistemas de protección de los sistemas eléctricos de potencia	20
3.1.2 Relés de protección	21
3.1.3 Relés digitales	21
3.1.4 Composición de un relé digital	22
3.1.5 Adquisición de señales	23
3.1.6 Muestreo de señales	23
3.1.7 Conversión analógico-digital	24
3.1.8 Filtrado de señales	24
3.1.9 Procesamiento digital de señales	25
3.1.10 Algoritmos de protección	25
3.1.11 Funciones ANSI de protección	25
3.1.12 Relé SEL-351	26
3.1.13 Módulo de protección con relé SEL -351	27
3.1.13.1 Arquitectura del relé SEL-351	27
3.1.13.2 Entradas analógicas del relé SEL-351	28
3.1.13.4 Entradas digitales del relé SEL-351	29
3.1.13.5 Contactos de salida del relé SEL-351	30
3.1.13.6 Configuración de protecciones de fase y tierra	31
3.1.14 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN DEL PANEL POSTERIOR	33
3.1.15 OPERACIÓN DE LOS BOTONES DEL PANEL FRONTAL	33
3.1.16 Cable de comunicación del relé SEL-351	34
3.1.16.1 Detalles Técnicos para la Conexión	34

3.1.17	Funciones de protección del SEL-351	35	
3.1.18	Parametrización del SEL-351	35	
3.1.19	Procedimiento de parametrización y verificación	36	
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO	36	
4.1.	Funciones ANSI de protección del relé SEL-351	36	
4.1.1	Sobrecorriente ANSI 50/51	37	
4.1.2	Sobrecorriente direccional ANSI 67.....	37	
4.1.3	Subtensión ANSI 27	37	
4.1.4	Sobretensión ANSI 59	38	
4.1.5	Frecuencia ANSI 81	38	
4.1.6	Recierre automático ANSI 79.....	38	
4.1.7	Verificación de sincronismo ANSI 25	38	
4.1.8	Secuencia negativa ANSI 46	38	
4.2	Características del relé SEL-351	38	
4.3	Parametrización de las funciones del relé SEL-351 en el acSELeator QuickSet	39	
4.3.1	Establecer Comunicación y Crear el Archivo Base.....	40	
4.3.2	Configuración de Parámetros Globales y Transformadores de Instrumentación	40	
4.3.3	Parametrización de Funciones de Sobrecorriente (ANSI 50 / 51).....	40	
4.3.4	Configuración de Entradas y Salidas de Hardware (I/O)	41	
4.3.5	Programación de la Lógica de Operación (Ecuaciones SELogic).....	41	
4.3.6	Extracción de Oscilografía y Registros de Eventos (SER).....	41	
4.3.7	Configuración e Integración de la Función de Recierre Automático (ANSI 79)	42	
4.3.8	Programación mediante ecuaciones SELogic y software QuickSet	43	
4.4	Establecimiento de la comunicación con el relé SEL-351	45	
4.4.2.	Acceso a las herramientas de comunicación	47	
4.4.3.	Configuración de los parámetros de comunicación serial	48	
4.4.4.	Lectura de los parámetros almacenados en el relé	51	
4.5.	Configuración de los parámetros del relé SEL-351.....	52	
4.5.1.	Acceso al editor de ajustes.....	52	
4.5.2.	Configuración de la identificación del relé.....	53	
4.5.3.	Configuración de la relación de transformación de corriente.....	54	
4.5.4.	Incorporación de los ajustes de las funciones ANSI 50, ANSI 51, ANSI 79 y ANSI 67	55	
4.5.5.	Ajustes correspondientes a las cargas del sistema de nueve barras.....	58	
4.5.6.	Configuración de los parámetros E51P, 50P1P y E79	59	
4.6.	Transferencia de los ajustes al relé SEL-351.....	60	
4.6.1.	Inicio del proceso de transferencia	60	
4.6.2.	Selección del grupo de ajustes.....	62	
4.6.3.	Confirmación previa al envío de los parámetros	66	
4.6.4.	Transferencia de los ajustes hacia el relé.....	66	
4.7.	Secuencia completa de parametrización implementada	67	
4.8.3.	identificación de la carga A	84	
4.9.	Parametrización correspondiente a la carga A	85	
4.9.1.	Ajuste de la función ANSI 51 para la carga A	85	
4.9.2.	Ajuste de la función ANSI 50 para la carga A	86	
4.9.3.	Curva tiempo-corriente de la carga A.....	86	
4.9.4	Ajuste de la función ANSI 67 para la carga A	87	
4.9.4.2	Parámetros a Configurar	87	
4.9.4.3	Configuración de Pickup para ANSI 67	87	
	Equivalente en primario:	88	

4.9.4.4 Curvas de tiempo Inverso	89
4.9.5 Ajuste de la función ANSI 79 para la carga A	90
4.9.5.1 Ciclo de Recierre	90
4.9.5.3 Configuración de tiempos muertos por ciclo.....	91
4.9.5.4 Configuración de Recierre por Tipo de Falla	91
4.9.5.5 Configuración en SEL-351:.....	92
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
5.1. Análisis de la Caracterización Eléctrica del Sistema de Nueve Barras; Error! Marcador no definido.	
5.1.1. Condiciones de Operación de las Cargas; Error! Marcador no definido.	
5.1.2. Interpretación de los Resultados de Caracterización; Error! Marcador no definido.	
5.2. Análisis de la Función ANSI 51 (Sobrecorriente Temporizada); Error! Marcador no definido.	
5.2.1. Configuración en el SEL-351	Error! Marcador no definido.
5.2.2 Interpretación de los Resultados de ANSI 51; Error! Marcador no definido.	
5.3. Análisis de la Función ANSI 50 (Sobrecorriente Instantánea); Error! Marcador no definido.	
5.3.1. Configuración en el SEL-351	Error! Marcador no definido.
5.3.2. Ajustes de la Función ANSI 50	Error! Marcador no definido.
5.3.3. Interpretación de los Resultados de ANSI 50; Error! Marcador no definido.	
5.4. Análisis de la Función ANSI 67 (Sobrecorriente Direccional); Error! Marcador no definido.	
5.4.1. Configuración en el SEL-351	Error! Marcador no definido.
5.4.2. Principio de Funcionamiento de ANSI 67...; Error! Marcador no definido.	
5.4.3. Parámetros Configurados para ANSI 67	Error! Marcador no definido.
5.4.4. Interpretación de los Resultados de ANSI 67; Error! Marcador no definido.	
5.5. Análisis de la Función ANSI 79 (Recierre Automático); Error! Marcador no definido.	
5.5.1. Configuración en el SEL-351	Error! Marcador no definido.
5.5.2. Ciclos de Recierre.....	Error! Marcador no definido.
5.5.3. Ajustes de la Función ANSI 79	Error! Marcador no definido.
5.5.4. Interpretación de los Resultados de ANSI 79; Error! Marcador no definido.	
5.6. Análisis de la Implementación en ACSELERATOR QuickSet; Error! Marcador no definido.	
5.6.1. Proceso de Comunicación con el SEL-351 .; Error! Marcador no definido.	
5.6.3. Parámetros Transferidos al SEL-351.....	Error! Marcador no definido.
5.7. Resultado Comparativo de los Ajustes ANSI 50/51/67/79; Error! Marcador no definido.	
5.7.1. Estructura de Protección Escalonada.....	Error! Marcador no definido.
5.8. Discusión de los Resultados	Error! Marcador no definido.
5.8.1. Caracterización Eléctrica del Sistema	Error! Marcador no definido.
5.8.2. Margen de Operación de la Función ANSI 51; Error! Marcador no definido.	
5.8.3. Función Instantánea ANSI 50	Error! Marcador no definido.
5.8.4. Función Direccional ANSI 67	Error! Marcador no definido.
5.8.5. Función de Recierre ANSI 79	Error! Marcador no definido.
5.8.6. Coordinación entre Funciones	Error! Marcador no definido.
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
9. Anexos	83
9.1 Anexo 1 Identificación de la carga B	83
9.2 Anexo 2 Identificación de la carga C	96
9.3 Anexo 3 Guía Practica 1	99
9.4 Anexo 4 Guía Practica 2	113

9.4 Anexo 5 Guía Practica 3.....**¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modalidad de titulación.....	10
Tabla 2. Área de conocimiento UNESCO.....	10
Tabla 3. Sistema de tareas del plan de titulación.....	18
Tabla 4. Funciones ANSI de protección.....	26
Tabla 5. Entradas digitales del relé SEL-351	29
Tabla 6. Contactos de salida del relé SEL.351	30
Tabla 7. Ajuste primario de la función 51P.....	32
Tabla 8. Características del relé SEL-351	39
Tabla 9. Relación del TC y RTC para configuración del relé de protección	55
Tabla 10. Ajustes para las protecciones ANSI 51 y ANSI 50 en el relé SEL-351.....	58
Tabla 11. Condiciones iniciales de las cargas y transformadores de corriente	85
Datos baseTabla 12. datos base para el ANSI 67	87
Tabla 13. datos de MTA.....	88
Tabla 14. Curvas de tiempo Inverso	89
Tabla 15. tiempos muertos	91
Tabla 16. Relación.....	91
Tabla 17. Recierre por fase.....	92
Tabla 18. Condiciones de operación para las cargas del sistema de nueve barras	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 19. Resultados de los ajustes de la función ANSI 51	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 20. Resultados de los ajustes de la función ANSI 50	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 21. Parámetros Configurados para ANSI 67	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 22. Ajustes de la Función ANSI 79.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 23. Tiempos muertos crecientes	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 24. Parámetros de comunicación configurados	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 25. Niveles de Acceso y Contraseñas.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 26. Parámetros configurados en el SEL-351	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 27. Comparación global de las regiones de protección ..	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. diagrama de bloques básico de un relé de protección digital.....	23
Figura 2. Diagrama de bloque de un convertidor analógico – digital	24
Figura 3. Arquitectura funcional simplificada del módulo com SEL-351	28
Figura 4. Diagrama del panel frontal y posterior —Modelo 0351x0 posterior y Modelo	33
Figura 5. Botones del panel frontal—Vista general	34
Figura 6. Diagrama de flujo de procedimiento de parametrización y verificación	36
Figura 7. diagrama de flujo de SELogic y software QuickSet	45
Figura 8 Pantalla de inicio del software ACSELERATOR QuickSet.....	46
Figura 9. Interfaz principal para la gestión de ajustes y configuración de la comunicación....	47
Figura 10. Configuración de los parámetros de comunicación serial con el relé SEL-351	49
Figura 11. Proceso de lectura de los ajustes almacenados en el relé SEL-351	52
Figura 12. Editor de ajustes del relé SEL-351 en ACSELERATOR QuickSet	53
Figura 13. Configuración de los parámetros de identificación y relación de transformación de corriente	54
Figura 14. Parametrización de los ajustes de sobrecorriente ANSI 50, ANSI 51 y el ANSI 79 en el SEL-351	59
Figura 15. Selección del comando para transferir los ajustes al relé SEL-351	60
Figura 16. Selección del grupo de ajustes destinado a la transferencia hacia el SEL-351	63
Figura 17. Confirmación previa a la transferencia del grupo de ajustes al relé.	66
Figura 18. Proceso de transferencia del Group 1 hacia el relé SEL-351.....	66
Figura 19. Parametrización del relé SEL-351	67
Figura 20. Diagrama unifilar del sistema de nueve barras utilizado para la parametrización de las protecciones de sobrecorriente	83
Figura 21. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga A.....	84
Figura 22. Característica tiempo-corriente de las funciones de sobrecorriente ANSI 50/51 para la carga A.....	86
Figura 23. diagrama de ciclo de recierre	90
Figura 24. diagrama de ciclo de recierre	¡Error! Marcador no definido.
Figura 25. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga B.....	93
Figura 26. Característica tiempo-corriente de las funciones ANSI 50/51 para la carga B.....	95

Figura 27. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga C.....	96
Figura 28. Característica tiempo-corriente de las funciones ANSI 50/51 para la carga C.....	98

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto: “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE MEDIANTE EL USO DEL RELÉ SEL 351 PARA EL

LABORATORIO DE PROTECCIONES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”.

Modalidad de Titulación

Tabla 1. Modalidad de titulación

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	X
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual	
	Artículo científico	

Equipo de trabajo de titulación:

Estudiante: Cuenca Morales Wilmer Rene

Tutor de Titulación: Ing. Armando Salvador Freire Freire, Mg.

Área de conocimiento:

Tabla 2. Área de conocimiento UNESCO

07 ingeniería, Industria y Construcción	071 ingeniería y Profesiones Afines	0713 Electricidad y Energía
		0714 Electrónica y Automatización

Línea de investigación: Tecnología de la información y las comunicaciones, robótica, automatización y optimización de sistemas

Sub líneas de investigación de la Carrera: Sublínea 2: 2. Automatización, control y protección de sistemas eléctricos en el sector productivo y los servicios

2. INTRODUCCIÓN

La evolución y modernización de la tecnología aplicada a los sistemas eléctricos ha propiciado el desarrollo de dispositivos digitales que permitan mejorar la protección, supervisar y controlar

las redes de potencia. Estos avances permiten ir sustituyendo progresivamente los equipos electromecánicos tradicionales por relés basados en microprocesadores, con unas mayores condiciones en cuanto a precisión, rapidez de respuesta y capacidad para registrar las condiciones de operación del sistema [1]. Resulta especialmente relevante su uso en instalaciones donde es importante detectar a tiempo las fallas eléctricas y realizar las acciones necesarias que reduzcan el riesgo de daños en los conductores, transformadores, alimentadores, etc.

Los sistemas de energía eléctrica son una infraestructura esencial e insustituible para que el funcionamiento de las actividades industriales, comerciales, educativas y sociales se desarrolle adecuadamente, proporcionando la energía necesaria para el desarrollo de la población. Por esta razón, su operación debe mantenerse dentro de condiciones adecuadas de seguridad, confiabilidad, estabilidad y continuidad [2]. Sin embargo, estos sistemas se encuentran expuestos a cortocircuitos, sobrecargas y variaciones anormales de corriente que pueden comprometer el funcionamiento de los equipos, interrumpir el servicio eléctrico y generar pérdidas económicas cuando no se dispone de esquemas de protección correctamente diseñados y coordinados.

Entre las opciones utilizadas para combatir estas condiciones de funcionamiento en el sistema eléctrico, la protección de sobrecorriente, cuya finalidad es la detección de valores de corriente más elevados que aquellos fijados para el funcionamiento habitual del sistema, constituye una de ellas. En la medida en que ocurre el desarrollo de la potencial falla, el sistema de protección tiene que ser capaz de actuar de forma suficientemente rápida, pero también con selectividad suficiente, protegiendo solo la zona afectada evitando la desconexión de zonas que no tendrían que ser afectadas [3]. El correcto funcionamiento de la protección por sobrecorriente radica en una adecuada determinación de sus parámetros, de sus curvas de funcionamiento, de las velocidades de respuesta o de los criterios de coordinación que debe regir el sistema de protección, aspectos que únicamente pueden ser comprendidos cuando se haya asentado la teoría de los sistemas de protección y se haya recorrido parte del camino de las experiencias prácticas del funcionamiento del sistema eléctrico.

La inclusión de los relés digitales ha modificado el enfoque de cómo se elaboran y aplican los esquemas de protección eléctrica. Aparte de los relés de protección convencional, estos componentes combinan varias funciones de protección, medición, vigilancia, comunicación y registro de eventos en un solo dispositivo. Además, permiten modificar sus ajustes de acuerdo

con las características del sistema, analizar la secuencia de una perturbación y verificar su respuesta mediante pruebas controladas [4]. Estas capacidades facilitan la coordinación entre dispositivos y aportan información relevante para determinar las causas de las fallas y mejorar posteriormente la operación de las instalaciones eléctricas.

Dentro de este grupo de dispositivos se encuentra el relé SEL-351, utilizado en aplicaciones de protección de alimentadores y sistemas de distribución debido a sus funciones de sobrecorriente, control, medición y almacenamiento de eventos. El montaje en el laboratorio de prácticas permite investigar la respuesta de las protecciones instantáneas y temporizadas, parametrizar los parámetros de funcionamiento y hacer el análisis del comportamiento del material en presencia de diferentes condiciones de fallas [5]. De esta forma, el alumnado no sólo se limita a estudiar conceptos teóricos, sino que podrá identificar dicha relación existente entre el valor de la corriente, el tiempo de actuación, la selectividad y la coordinación del esquema realizado.

Los laboratorios forman parte de las actividades de la práctica experimental de los futuros profesionales de la Ingeniería Eléctrica, las cuales son importantes ya que acercan a la práctica los conocimientos de asignaturas propias de los sistemas eléctricos de potencia, de protecciones y de coordinación. En cambio, la enseñanza de la práctica de los laboratorios puede limitarse a explicaciones conceptuales y simulaciones no a las prácticas de la reglamentación de los módulos didácticos, cuando estos no se han actualizado y los estudiantes finalmente no han visto o no han tenido contacto con dispositivos empleados en las instalaciones reales [6]. Esta situación reduce las posibilidades de desarrollar competencias vinculadas con la configuración de relés, interpretación de registros, evaluación de fallas y comprobación del funcionamiento de esquemas de protección.

En el laboratorio de protecciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi se evidencia la necesidad de disponer de una herramienta didáctica que permita realizar prácticas orientadas al análisis y aplicación de protecciones de sobrecorriente mediante tecnología digital. La ausencia o disponibilidad limitada de módulos especializados dificulta la ejecución de ensayos en los que se puedan comparar los resultados teóricos, simulados y experimentales [7]. Por consiguiente, se plantea la posibilidad de implementar un módulo que incorpore el relé SEL-351, así como los elementos que permitan replicar, en condiciones controladas, diferentes estados de operación y de falla vinculados a los sistemas eléctricos de potencia.

La ejecución del proyecto es técnica porque ayudará a acrecentar la infraestructura disponible para el estudio de los sistemas de protección. De esta forma, el módulo servirá para fijar parámetros, conocer señales eléctricas, realizar fallas y evaluar tiempos de actuación del relé, así como para analizar la coordinación de protecciones mediante una metodología controlada y de una cierta seguridad [8]. Proporcionará una plataforma para ensayar los procedimientos académicos, las demostraciones y futuros trabajos de investigación relacionados con la automatización de procesos, protección y mantenimiento de alimentadores eléctricos, análisis de eventos y funcionamiento de dispositivos digitales en redes eléctricas.

Desde la vertiente social y educativa, el proyecto contribuirá a proporcionar una mejor formación práctica al alumnado de la Universidad Técnica de Cotopaxi. La aproximación a los equipos que se utilizan en el ámbito profesional, a su vez, permitirá a los participantes fortalecer sus capacidades de interpretación de esquemas, ajustes, realización de evaluaciones y toma de decisiones ante condiciones anormales; este aprendizaje podrá traducirse, posteriormente, en una mejor y más responsable actuación profesional [9]. De igual manera, la disponibilidad del módulo beneficiará a docentes y estudiantes que requieran una herramienta de apoyo para actividades de enseñanza, experimentación y desarrollo de proyectos relacionados con protecciones eléctricas.

La propuesta también presenta importancia económica, debido a que la correcta aplicación de las protecciones de sobrecorriente ayuda a disminuir los daños producidos por fallas eléctricas y evita que una perturbación se extienda hacia otros componentes del sistema. En el contexto de la educación universitaria, la construcción de un módulo didáctico con elementos seleccionados según las necesidades del laboratorio optimiza los recursos de la institución, pues permite explotar el relé para realizar distintas prácticas [10]. También la posibilidad de poder hacer pruebas repetitivas y controladas reduce el grado de dependencia de instalaciones externas y facilita la formación de distintos grupos de estudiantes a lo largo de diferentes periodos académicos.

En función de la problemática identificada, el objetivo principal de la investigación consiste en implementar un módulo de protecciones de sobrecorriente mediante el uso del relé SEL-351 para el laboratorio de protecciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Para alcanzar esta finalidad se analizarán los fundamentos teóricos y los criterios técnicos relacionados con la protección de sobrecorriente, se establecerán los requerimientos necesarios para el diseño del

módulo, se configurarán las funciones de protección del relé y se comprobará su respuesta frente a condiciones normales y situaciones de falla previamente determinadas.

A la par, se persigue a través de los objetivos específicos la caracterización del comportamiento del relé SEL-351 y de sus posibilidades de uso en el ámbito de un sistema de protección; el diseño de la estructura eléctrica y física del módulo didáctico; el desarrollo de modelos de simulación en DlgSILENT PowerFactory; y la programación de los ajustes necesarios para la coordinación de las protecciones. También está previsto ejecutar ensayos de funcionamiento permitiendo comparar los resultados que se obtienen a través de la simulación con el comportamiento que realiza el equipo físico. Finalmente, se prevé la elaboración de una guía de prácticas básica para facilitar el uso seguro y ordenado del módulo en el laboratorio.

El alcance del proyecto abarca la concepción, edificación, programación y verificación funcional de un módulo que tiene como objetivo poder realizar un estudio relacionado con las protecciones de sobrecorriente. Con respecto a la propuesta de la práctica, la misma se centrará tanto en concretar situaciones didácticas de sobrecargas y cortocircuitos, así como también con valores de corriente controlados, con condiciones acordes a la seguridad del laboratorio. Algunas de las principales limitaciones son la disponibilidad de los equipos auxiliares, las características técnicas del relé, el nivel de tensión admisible por las prácticas y la imposibilidad de reproducir las condiciones de una red eléctrica de forma totalmente realista. Por tanto, los resultados estarán orientados principalmente a fines académicos y experimentales.

La metodología se desarrollará mediante una investigación aplicada, apoyada en procedimientos documentales, técnicos y experimentales. En un primer momento se revisarán conceptos, normas y criterios relacionados tanto con la protección de sobrecorriente como al cálculo de la coordinación de relés [11]. El siguiente paso será realizar el diseño del módulo, la selección de componentes y la configuración del SEL-351 de acuerdo con los escenarios propuestos. Posteriormente se modelará el sistema eléctrico, utilizando DlgSILENT PowerFactory, y se llevarán a cabo estudios de cortocircuito a los efectos de realizar los ajustes de protección. Finalmente, se realizarán ensayos controlados, registrándose los resultados, así como la evaluación de la coincidencia entre el comportamiento simulado y el experimental.

El documento se encuentra organizado en epígrafes que permiten presentar de manera ordenada el desarrollo del proyecto. En los primeros epígrafes se expone el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación. El segundo y tercer apartado contiene la

introducción y los fundamentos teóricos relacionados con sistemas eléctricos de potencia, protecciones de sobrecorriente, relés digitales, el SEL-351 y el software DIgSILENT PowerFactory. En el cuarto y quinto numeral se describe la metodología y el diseño del módulo. Posteriormente se presentan la implementación, las pruebas, los resultados y su análisis, para finalizar en el sexto apartado con las conclusiones, recomendaciones. Al final, los epígrafes siete y ocho muestran las referencias bibliográficas y anexos correspondientes.

2.1 Situación Problemática

En Ecuador, la continuidad del suministro eléctrico depende de que las protecciones detecten y aíslen sobrecorrientes con rapidez y selectividad. La Regulación ARCONEL 009/24 juzga la calidad técnica evaluando la frecuencia y la duración de los cortes, que son parámetros que también representan la acción coordinada de los aparatos. En Cotopaxi, la red está conformada hasta la fecha actual por niveles de 7,96, 13,8, 22 y 69 kV, con subestaciones y alimentadores distribuidos a lo largo de toda la provincia. Las fallas, las correcciones erróneas, los equipos envejecidos y la falta de coordinación pueden extender la zona, afectar a los usuarios residenciales, a los industriales, a los académicos, aumentar los tiempos de reposición y generar pérdidas operativas, económicas y sociales.

En la Universidad Técnica de Cotopaxi, se presentan limitaciones para la realización de análisis experimentales de fallas por sobrecorriente con relación a la realización de formación práctica relacionada con protecciones eléctricas. En el laboratorio de protecciones, los alumnos disponen de escasas oportunidades para observar el comportamiento real de un relé digital ante cortocircuitos, sobrecargas y variaciones anormales de corriente, condición esta que hace difícil la comprensión de parámetros tales como la corriente de arranque, el tiempo de operación, las curvas de disparo, la selectividad y la coordinación de los dispositivos. Tal problemática provoca una disminución de la capacidad para poder relacionar los resultados obtenidos mediante DIgSILENT PowerFactory con el comportamiento físico de una protección de sobrecorriente al interior de un sistema eléctrico.

2.2 Formulación del problema

Necesidad de generar un procedimiento escrito para la parametrización y puesta en funcionamiento de un módulo didáctico de protecciones de sobrecorriente basado en el relé

SEL-351, que permita orientar su uso y aplicación práctica en el laboratorio de Protecciones Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi

2.3 Objeto y Campo de Acción

2.3.1 Objeto de investigación

Sistema de protecciones de sobrecorriente aplicado en instalaciones eléctricas, considerando su configuración, coordinación, operación y respuesta ante condiciones de sobrecarga y cortocircuito mediante el uso del relé digital SEL-351.

2.3.2 Campo de Acción

De acuerdo con la nomenclatura internacional de la UNESCO para los campos de la ciencia y la tecnología, la investigación se ubica en el código 3322.04: Ingeniería de Sistemas de Energía, específicamente en el área relacionada con la distribución eléctrica, subestaciones y sistemas de protección. El campo de acción se delimita al estudio, configuración y validación de las funciones de protección de sobrecorriente del relé SEL-351 en el laboratorio de protecciones de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

2.4 Beneficiarios

2.4.1 Directo

Los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi que desarrollen prácticas académicas en el laboratorio de protecciones porque se dispondrá de un módulo didáctico para estudiar, configurar y comprobar las funciones de protección de sobrecorriente mediante el relé SEL-351.

2.4.2 Indirecto

Docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, futuras promociones estudiantiles y las organizaciones del sector eléctrico de la provincia. A su vez, las empresas distribuidoras, industriales y de servicios eléctricos se beneficiarán de forma colateral al disponer de profesionales con mejores conocimientos de sistemas de protección de sobrecorriente en instalaciones eléctricas.

2.5 Justificación

La realización de este proyecto se justifica por la necesidad académica de fortalecer el aprendizaje de las protecciones eléctricas mediante experiencias prácticas directas, seguras e integrales con equipos empleados en sistemas reales. Desde la perspectiva teórica, supondría una contribución al conocimiento sobre sobrecorriente, selectividad, coordinación, curvas tiempos/corriente y funciones 50/51. Desde el plano metodológico, compaginaría análisis de documentos, simulación en DIGSILENT PowerFactory y verificaciones experimentales respecto de la capacidad de ajuste que configuraría en relé SEL-351. Finalmente, desde la perspectiva práctica, permitiría observar los tiempos de actuación, las corrientes de arranque y los tiempos de respuesta a las fallas forzadas.

La pertinencia laboral y social del proyecto se encuentra en que el sector eléctrico exige contar con profesionales que sean capaces de configurar, evaluar y coordinar relés con criterios relacionados con la seguridad, la rapidez y la confiabilidad. El contacto directo con el SEL-351 ofrece la posibilidad de que los estudiantes desarrollen competencias propias del diagnóstico de fallas, de la interpretación de eventos y de la toma de decisiones antes de dar el paso al ejercicio profesional. Para la Universidad Técnica de Cotopaxi, el módulo será un recurso pedagógico que facilitará la implementación de la práctica que se tiene a la mano y que se prestará para futuros proyectos de investigación. En su dimensión social, el módulo coadyuvará a la formación de ingenieros mejor preparados para prevenir daños, minimizar las interrupciones y proteger las instalaciones eléctricas, mientras que la utilización racional de los equipos disponibles permitirá un mejor aprovechamiento institucional de los recursos, a la vez que se fortalecerá la calidad del proceso de educación.

2.6 Objetivos

2.6.1 Objetivo General

Implementar un módulo didáctico de protección contra sobrecorriente basado en el relé SEL-351, mediante el desarrollo de un procedimiento de parametrización de sus funciones de protección, para evidenciar los tiempos de operación de un relé ante corriente de falla

2.6.2 Específicos

- Analizar los fundamentos de los relés digitales y sus procedimientos de parametrización para establecer los criterios técnicos de configuración aplicables al relé SEL-351.
- Desarrollar un procedimiento de parametrización de las funciones de protección del relé SEL-351 para orientar su configuración en el módulo didáctico.
- Realizar el procedimiento de parametrización de la función de sobrecorriente de protección del relé SEL-351 en el módulo didáctico.

2.7 Sistema de Tareas

Tabla 3. Sistema de tareas del plan de titulación

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Analizar los fundamentos de los relés digitales y sus procedimientos de parametrización para establecer los criterios técnicos de configuración aplicables al relé SEL-351	Revisión bibliográfica sobre relés digitales y sistemas de protección.	Fundamentación teórica sobre el funcionamiento de los relés digitales.	Revisión bibliográfica. Libros, artículos científicos, normas y documentación técnica.
	Analizar los mecanismos de muestreo, procesamiento y filtrado digital de señales eléctricas	digital de señales eléctricas. Identificación de los procesos utilizados para la adquisición y procesamiento de señales en relés digitales.	Análisis documental. Bibliografía especializada y manuales técnicos.
	Identificar el software utilizado para la parametrización del SEL-351.	Instalación y exploración de acSELeator QuickSet.	Identificación de las herramientas y menús necesarios para la configuración del relé.

Desarrollar un procedimiento de parametrización de las funciones de protección del relé SEL-351 para orientar su configuración en el módulo didáctico.	Crear un proyecto de configuración del SEL-351 en acSELerator QuickSet.	Creación de un nuevo dispositivo y selección del modelo correspondiente.	Proyecto de configuración del SEL-351 creado en el software.
	Configurar los parámetros generales del relé.	Ingreso de datos del sistema, relaciones de TC, frecuencia y demás parámetros generales.	Archivo de configuración inicial del SEL-351.
	Identificar el software utilizado para la parametrización del SEL-351.	Instalación y exploración de acSELerator QuickSet.	Identificación de las herramientas y menús necesarios para la configuración del relé.
Realizar el procedimiento de parametrización de las funciones de protección del relé SEL-351 en el módulo didáctico para poner en funcionamiento el sistema de protección contra sobrecorriente en el laboratorio de Protecciones Eléctricas	Ingresar los parámetros de la función de sobrecorriente en acSELerator QuickSet.	Configuración de los elementos instantáneos y temporizados de sobrecorriente.	Función de sobrecorriente parametrizada en el SEL-351.
	Incorporar los ajustes al módulo didáctico.	Aplicación de los parámetros definidos al esquema de protección del módulo.	Módulo didáctico configurado de acuerdo con los criterios establecidos.
	Comprobar la operación de la protección de sobrecorriente.	Pruebas mediante simulación y/o inyección de valores de corriente de prueba.	Verificación de la actuación de la protección ante condiciones de sobrecorriente.

Elaborado por: Elaboración propia

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Los relés digitales constituyen una evolución de los sistemas tradicionales de protección eléctrica y se caracterizan por utilizar sistemas de procesamiento digital para adquirir, analizar y procesar las señales eléctricas provenientes del sistema de potencia. Su funcionamiento comprende diferentes etapas, entre ellas la adquisición de las señales de corriente y tensión, el acondicionamiento, muestreo, conversión analógico-digital y procesamiento mediante algoritmos de protección. Durante este proceso pueden emplearse técnicas de filtrado digital para reducir componentes no deseadas y obtener información adecuada para la toma de decisiones. Estos principios permiten que los relés digitales integren diferentes funciones de protección dentro de un mismo dispositivo, además de capacidades de medición, registro y comunicación [1].

Dentro de esta tecnología se encuentra el relé SEL-351, utilizado en aplicaciones de protección y control de sistemas eléctricos. El equipo integra diversas funciones que permiten abordar diferentes condiciones de operación, entre ellas protección de sobrecorriente instantánea y temporizada, sobrecorriente direccional, protección de frecuencia, sobretensión y subtensión, recierre automático, detección de fallas del interruptor y funciones de supervisión y medición, dependiendo de la versión y configuración del equipo [2]. Por lo tanto, el fundamento teórico debe abordar inicialmente los principios de funcionamiento y procesamiento de los relés digitales y, posteriormente, describir de manera general las principales funciones disponibles en el SEL-351, para establecer una base técnica que permita comprender su configuración, parametrización y aplicación en el módulo didáctico.

3.1 Sistemas de protección de los sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas eléctricos de potencia están expuestos a diferentes condiciones anormales de funcionamiento, entre las que se encuentran los cortocircuitos, fallas a tierra, sobrecargas y otras perturbaciones. Estas condiciones pueden provocar esfuerzos térmicos y electromecánicos en los equipos eléctricos, por lo que es necesario disponer de sistemas de protección capaces de detectar las fallas y aislar el elemento afectado.

Los sistemas de protección están constituidos por diferentes elementos, entre ellos transformadores de corriente, transformadores de tensión, relés de protección, circuitos de control e interruptores. El funcionamiento coordinado de estos elementos permite detectar una

condición anormal y generar una orden de desconexión cuando los parámetros establecidos son superados [2].

La protección eléctrica debe cumplir diferentes criterios de funcionamiento, entre los cuales se encuentran la confiabilidad, selectividad, rapidez y sensibilidad. Estos criterios permiten limitar los efectos de las fallas y mantener la continuidad del servicio en las partes no afectadas del sistema [2].

3.1.2 Relés de protección

Los relés de protección son dispositivos electrónicos avanzados encargados de supervisar variables eléctricas como corriente, tensión, frecuencia, potencia, impedancia o ángulo de fase para detectar cortocircuitos o anomalías que pongan en riesgo la continuidad del servicio. A lo largo de su evolución tecnológica, estos equipos pasaron de ser sistemas electromecánicos y estáticos a convertirse en relés digitales basados en microprocesadores, lo que permitió integrar múltiples funciones de protección, medición y registro en un solo bloque. Cuando el relé identifica una falla, envía automáticamente una señal de disparo a los interruptores de potencia, los cuales aíslan físicamente el elemento afectado para evitar daños mayores, razón por la cual el diseño de las subestaciones coordina estratégicamente la ubicación de estos interruptores.

A pesar de su avanzada capacidad analítica, la efectividad de la protección depende estrictamente de la habilidad mecánica de los interruptores para responder y operar correctamente ante una orden de apertura. Para garantizar un desempeño óptimo, los relés digitales modernos ofrecen una gran flexibilidad operativa al permitir que sus parámetros de supervisión sean configurados de forma manual mediante el teclado del equipo o parametrizados de manera virtual. Esta gestión remota se realiza introduciendo los ajustes en un software especializado, el cual transmite toda la información técnica directamente a través de la red de comunicación con la que interactúa el dispositivo en la subestación.[1], [2].

3.1.3 Relés digitales

Los relés digitales basados en microprocesadores representan la vanguardia tecnológica en el estado del arte de la automatización y protección de los sistemas eléctricos de potencia, habiendo desplazado de forma progresiva a los equipos electromecánicos y estáticos tradicionales, [2]. Esta tecnología opera mediante un flujo de trabajo estructurado donde las señales analógicas de corriente y tensión son adquiridas, acondicionadas y filtradas para evitar

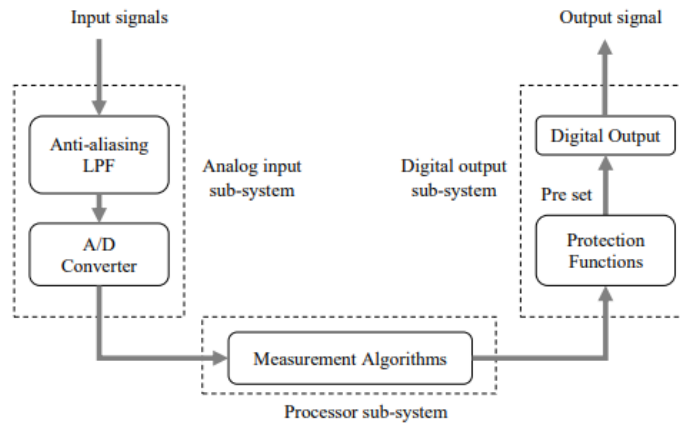
el efecto de aliasing; posteriormente, se someten a un proceso de muestreo y conversión digital que transforma las ondas continuas en una secuencia de valores discretos, [3]. A partir de esta información digitalizada, los procesadores ejecutan algoritmos matemáticos avanzados, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que calculan fasores en tiempo real y evalúan las condiciones operativas de la red con una velocidad y precisión analítica muy superiores a sus predecesores, [3].

Una de las ventajas más disruptivas de estos dispositivos numéricos es su capacidad multifuncional, la cual permite consolidar decenas de esquemas de protección (como sobrecorriente ANSI 50/51 o diferencial ANSI 87), medición de alta precisión, registro de eventos y oscilografía dentro de una única plataforma física compacta, [3]. Además de optimizar el espacio en las subestaciones y reducir drásticamente el consumo propio (burden) sobre los transformadores de medida, los relés digitales funcionan como nodos activos e inteligentes interconectados en red, [2]. Mediante el soporte nativo de arquitecturas estandarizadas como el protocolo IEC 61850 y el uso de mensajes de alta velocidad GOOSE, estos equipos permiten una parametrización flexible de manera manual o virtual mediante software especializado, asegurando un aislamiento rápido, selectivo y coordinado de cualquier falla para maximizar la continuidad del suministro eléctrico, [4].

3.1.4 Composición de un relé digital

La estructura de un relé digital está constituida por diferentes bloques funcionales. De forma general, pueden identificarse las entradas analógicas, circuitos de acondicionamiento, filtros, convertidores analógico-digitales, procesador, memoria, entradas y salidas digitales e interfaces de comunicación.

El proceso general puede representarse de la siguiente manera:

Figura 1. diagrama de bloques básico de un relé de protección digital

Las señales provenientes de los transformadores de medida son acondicionadas antes de ser procesadas. Posteriormente son convertidas en valores digitales que pueden ser utilizados por los algoritmos de protección [1].

3.1.5 Adquisición de señales

La adquisición de señales constituye una etapa fundamental en el funcionamiento de los relés digitales. Las señales de corriente y tensión procedentes del sistema eléctrico deben ser adaptadas a los niveles requeridos por los circuitos electrónicos del relé.

Los transformadores de corriente y tensión permiten obtener señales proporcionales a las magnitudes eléctricas existentes en el sistema. Estas señales posteriormente son procesadas por el sistema de adquisición del relé [2].

3.1.6 Muestreo de señales

Las señales eléctricas utilizadas en los sistemas de potencia son señales analógicas que varían continuamente en el tiempo. Para realizar su procesamiento mediante sistemas digitales es necesario convertirlas en una secuencia de valores discretos.

Este proceso se denomina muestreo y consiste en obtener valores de la señal en intervalos determinados de tiempo [1].

La frecuencia de muestreo puede expresarse como:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (1)$$

donde:

f_s = frecuencia de muestreo.

T_s = período de muestreo.

La selección de una frecuencia de muestreo adecuada permite representar las características relevantes de las señales eléctricas para su posterior procesamiento digital [1].

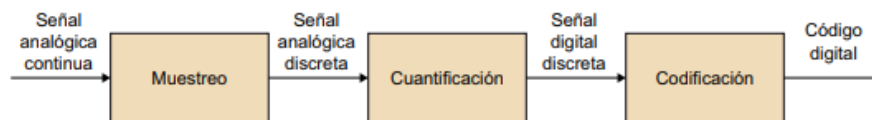
3.1.7 Conversión analógico-digital

Después del acondicionamiento y muestreo, las señales deben convertirse en información digital para poder ser procesadas por el microprocesador.

El convertidor analógico-digital transforma los valores de la señal analógica en representaciones numéricas. Estas muestras constituyen la información utilizada posteriormente por los algoritmos de protección [1].

La conversión analógico-digital forma parte de la arquitectura fundamental de los relés computarizados y determina, junto con las etapas de adquisición y procesamiento, la calidad de la información utilizada para las decisiones de protección.

Figura 2. Diagrama de bloque de un convertidor analógico – digital



3.1.8 Filtrado de señales

Las señales eléctricas pueden contener componentes no deseadas, como ruido y componentes armónicas, que pueden afectar el procesamiento realizado por el sistema de protección. Por esta razón, el filtrado constituye una etapa importante dentro de los sistemas de adquisición y procesamiento digital [1].

Los filtros utilizados en sistemas de procesamiento de señales pueden clasificarse en filtros analógicos y filtros digitales.

Los filtros analógicos pueden utilizarse antes de la conversión analógico-digital, mientras que los filtros digitales procesan las muestras obtenidas por el sistema de adquisición.

Entre las técnicas utilizadas para el procesamiento digital se encuentran los filtros FIR, filtros IIR y métodos relacionados con el análisis de Fourier [1].

3.1.9 Procesamiento digital de señales

El procesamiento digital de señales permite transformar las muestras de corriente y tensión en información útil para las funciones de protección.

A partir de las muestras obtenidas, los algoritmos pueden determinar características como magnitud, fase, frecuencia y componentes de secuencia. Estos parámetros pueden ser utilizados por las diferentes funciones de protección [1].

El procesamiento digital constituye uno de los principales elementos que diferencia a los relés digitales de las tecnologías de protección anteriores, debido a que permite ejecutar diferentes algoritmos sobre las señales adquiridas.

3.1.10 Algoritmos de protección

Los algoritmos de protección son procedimientos matemáticos utilizados para analizar las señales eléctricas y determinar si se presenta una condición que requiere la actuación del relé.

En una función de sobrecorriente, la magnitud de corriente calculada puede compararse con un valor de operación establecido:

$$I_{medida} > I_{pickup}$$

Cuando se cumplen las condiciones establecidas, el algoritmo puede generar una señal de operación que posteriormente será procesada por la lógica de control del relé.

La implementación específica de estos algoritmos depende de la función de protección y del fabricante del dispositivo [1].

3.1.11 Funciones ANSI de protección

La identificación de las funciones de protección mediante números ANSI permite establecer una nomenclatura común para los dispositivos de protección.

Entre las funciones de protección que pueden encontrarse en sistemas eléctricos se encuentran:

Tabla 4. Funciones ANSI de protección

ANSI	Función
25	Verificación de sincronismo
27	Subtensión
46	Secuencia negativa
50	Sobrecorriente instantánea
51	Sobrecorriente temporizada
59	Sobretensión
67	Sobrecorriente direccional
79	Recierre automático
81	Protección de frecuencia

Estas funciones pueden estar disponibles en diferentes relés digitales dependiendo del modelo, versión y configuración del fabricante

3.1.12 Relé SEL-351

El SEL-351 es un sistema digital de protección diseñado principalmente para aplicaciones de protección y control de alimentadores y otros circuitos de distribución. El equipo integra diferentes funciones de protección, medición, supervisión, registro de eventos, control y comunicación dentro de un mismo dispositivo. De acuerdo con la información oficial de Schweitzer Engineering Laboratories (SEL), el equipo puede emplearse en aplicaciones de sobrecorriente direccional y no direccional, protección de sistemas de distribución, recierre automático, detección de fallas del interruptor y protección relacionada con variaciones de frecuencia y tensión [28].

Una de las características relevantes del SEL-351 es su capacidad para integrar múltiples funciones que pueden ser configuradas de acuerdo con la aplicación. El fabricante documenta funciones de sobrecorriente de fase, secuencia negativa, tierra residual y neutro, además de control direccional; también incorpora capacidades de recierre automático, verificación de sincronismo y tensión, localización de fallas, supervisión del interruptor y medición de calidad de potencia [28], [29]. Estas características hacen que el SEL-351 sea apropiado para un módulo didáctico, ya que permite estudiar no solamente la protección de sobrecorriente, sino también

los principios de configuración y funcionamiento de diferentes funciones de un relé digital moderno.

El funcionamiento del SEL-351 se basa en la adquisición y procesamiento de señales eléctricas para determinar las condiciones de operación del sistema. A partir de las señales de corriente y tensión, el relé ejecuta las funciones de protección configuradas y, cuando se cumplen las condiciones establecidas, puede generar señales de control para la operación del interruptor. Además, el equipo dispone de entradas y salidas, interfaces de comunicación y herramientas de registro que permiten analizar posteriormente las condiciones de operación y los eventos registrados [27].

Para la implementación del módulo didáctico es necesario considerar la versión específica del SEL-351 disponible en el laboratorio, debido a que el fabricante dispone de diferentes versiones, entre ellas SEL-351-5, SEL-351-6 y SEL-351-7, con características y opciones de configuración que pueden variar. SEL proporciona los manuales de instrucciones, hojas de datos, hojas de ajustes y documentación técnica correspondiente a estas versiones, los cuales deben constituir la fuente principal para establecer los parámetros y procedimientos de configuración del equipo [30]

3.1.13 Módulo de protección con relé SEL -351

El módulo de protección es un sistema didáctico destinado a reproducir condiciones controladas de sobrecorriente, verificar la respuesta del relé y relacionar los ajustes teóricos con resultados experimentales [16]. Para cumplir esta finalidad debe integrar alimentación auxiliar, terminales de corriente y tensión, entradas digitales, contactos de salida, señalización, comunicación, dispositivos de maniobra y elementos de seguridad.

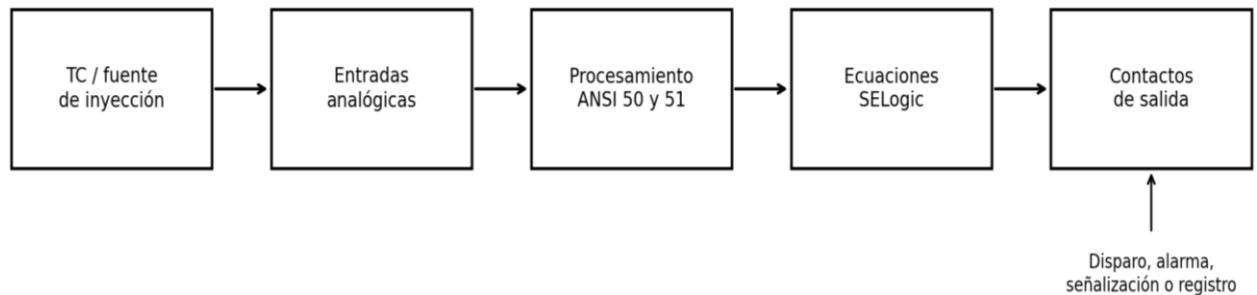
Su diseño debe permitir que el estudiante identifique la cadena completa de protección: generación o inyección de la corriente, adquisición de la señal, procesamiento, activación del elemento ANSI, evaluación de la lógica SELogic, operación del contacto y apertura del circuito [23]. Además, debe facilitar la recuperación de registros de eventos y la comparación entre la corriente aplicada, el ajuste y el tiempo medido.

3.1.13.1 Arquitectura del relé SEL-351

El SEL-351 es un relé numérico multifunción. Las señales analógicas de corriente y tensión

son acondicionadas, muestreadas y procesadas mediante algoritmos digitales. Los elementos de protección producen variables lógicas internas, denominadas Relay Word bits, que pueden combinarse con entradas digitales, temporizadores y condiciones de bloqueo mediante ecuaciones SELogic [11]. La figura 4 muestra la arquitectura funcional simplificada del módulo con SEL-351.

Figura 3. Arquitectura funcional simplificada del módulo con SEL-351



La hoja de datos indica que el SEL-351 integra protección, control, medición, registro de fallas, registro secuencial de eventos, interfaz de operador y comunicaciones [2]. Esta integración permite utilizar un solo equipo para observar la magnitud eléctrica, detectar la falla, generar el disparo y conservar la evidencia necesaria para el análisis posterior.

3.1.13.2 Entradas analógicas del relé SEL-351

Las entradas analógicas permiten adquirir las corrientes y tensiones del sistema representado. Las corrientes de fase corresponden a I_A , I_B e I_C , mientras que el canal I_N puede utilizarse para medir la corriente del neutro o una señal sensible de falla a tierra [18].

Según la hoja de datos, el SEL-351 puede suministrarse con entradas nominales de fase de 5 A o 1 A. También existen opciones de corriente nominal reducida en el canal de neutro para aplicaciones sensibles de tierra [26]. Por esta razón, antes de aplicar cualquier corriente debe verificarse la placa, el número de parte y la configuración física del relé.

En el módulo, las entradas pueden conectarse a una fuente de inyección secundaria o a transformadores de corriente. Deben respetarse la polaridad, la secuencia de fases y la referencia común [2]. Cuando se utilicen transformadores de corriente reales, su secundario no debe quedar abierto mientras el primario esté energizado, debido a que pueden generarse tensiones peligrosas.

La corriente residual para las funciones 50G y 51G se obtiene internamente mediante:

$$I_G = I_A + I_B + I_C = 3I_0 \quad (10)$$

Cuando se conecta una medición independiente al canal de neutro, la magnitud utilizada es:

$$I_N = I_{TC \text{ de neutro}} \quad (11)$$

Las entradas de tensión V_A , V_B , V_C y V_S son necesarias para funciones direccionales, verificación de sincronismo y otras aplicaciones dependientes de tensión. Para las prácticas básicas de sobrecorriente no direccional, las funciones 50 y 51 pueden evaluarse principalmente con señales de corriente. [11]

3.1.13.4 Entradas digitales del relé SEL-351

Las entradas digitales incorporan al relé estados externos, como la posición del interruptor, la habilitación de disparo, una condición de bloqueo, el accionamiento de un pulsador o una parada de emergencia [7]. Estas señales son optoaisladas y se interpretan como estados lógicos. En el módulo pueden asignarse en las entradas digitales como lo muestra la tabla 15.

Tabla 5. Entradas digitales del relé SEL-351

Entrada digital	Señal propuesta	Finalidad
IN1	52a: interruptor cerrado	Confirmar que el dispositivo de maniobra se encuentra cerrado.
IN2	52b: interruptor abierto	Confirmar la apertura después del disparo.
IN3	Bloqueo general	Impedir la salida de disparo durante ajustes o mantenimiento.
IN4	Disparo manual	Comprobar el circuito de salida sin aplicar una falla.
IN5	Restablecimiento	Reiniciar memorias, alarmas o señalización.
IN6	Parada de emergencia	Llevar el módulo a una condición segura.

La cantidad de entradas disponibles depende de la opción de hardware. La hoja de datos identifica tarjetas con ocho o dieciséis entradas adicionales y diferentes cantidades de salidas [11]. En consecuencia, el plano de conexiones debe elaborarse después de verificar la tarjeta instalada.

El tiempo de eliminación de rebotes debe seleccionarse de forma que filtre transiciones mecánicas indeseadas sin introducir retrasos innecesarios. Para señales de protección rápidas,

el valor debe mantenerse bajo; para pulsadores y selectores mecánicos puede utilizarse un tiempo mayor.

3.1.13.5 Contactos de salida del relé SEL-351

Los contactos de salida materializan la decisión del relé. Pueden activar la bobina de un contactor, un relé auxiliar, una alarma, una lámpara piloto o una entrada de un sistema de supervisión [4]. El contacto utilizado para disparo debe seleccionarse de acuerdo con la corriente y la tensión de la carga conectada.

Tabla 6. Contactos de salida del relé SEL.351

Salida	Aplicación propuesta
OUT101	Orden de disparo al contactor o relé auxiliar.
OUT102	Alarma general de protección.
OUT103	Indicación de arranque de fase.
OUT104	Indicación de falla a tierra.
OUT105	Señal de protección habilitada.
OUT106	Señal para registro o equipo externo.

Si la bobina del dispositivo de maniobra demanda una corriente superior a la capacidad de interrupción del contacto, debe emplearse un relé auxiliar [21]. También se recomienda instalar supresión de transitorios en cargas inductivas de corriente continua, siempre que sea compatible con el tiempo de liberación requerido.

La lógica conceptual de disparo puede expresarse como lo muestra la ecuación (12) de la lógica general de disparo.

$$TRIP = (50P \vee 51P \vee 50G \vee 51G) \wedge \overline{BLOCK} \quad (12)$$

Donde

TRIP = variable o comando de disparo

50P = Elemento de sobrecorriente instantánea de fase

51P = Elemento de sobrecorriente temporizada de fase

50G = Elemento de sobrecorriente instantánea de tierra

51G = Elemento de sobrecorriente temporizada de tierra

$\vee$ = OR / O lógico

$\wedge$ = AND / Y lógico

$\overline{\text{BLOCK}}$ = NOT BLOCK / Negación del bloqueo

La expresión significa que existe disparo cuando opera cualquiera de las funciones seleccionadas y no está activa la señal de bloqueo [12]. A su vez, la asignación al contacto se representa mediante la ecuación (13).

$$\text{OUT101} = \text{TRIP} \quad (13)$$

Donde

OUT101 = contacto de salida física

TRIP = variable o comando de disparo

Los nombres reales de los elementos deben comprobarse en la base de datos de ajustes del modelo utilizado. La ecuación anterior explica el criterio lógico, pero no sustituye la sintaxis específica de QuickSet [23].

3.1.13.6 Configuración de protecciones de fase y tierra

La configuración debe comenzar con los parámetros generales: frecuencia nominal, secuencia de fases, relación de transformación de corriente, relación de tensión y tipo de conexión [22]. Después se establecen las funciones de fase y tierra.

Ajuste de la función 51P:

La corriente primaria de arranque se puede estimar mediante la ecuación (14) con el ajuste primario de la función 51P. Asimismo, la tabla 17 muestra las unidades del ajuste primario de la función 51P [13].

$$I_{51P,prim} = K_s I_{carga,max} \quad (14)$$

Tabla 7. Ajuste primario de la función 51P

Símbolo	Significado
$I_{51P,prim}$	Ajuste primario de la función temporizada de fase.
K_s	Factor de seguridad superior a uno.
$I_{carga,max}$	Máxima corriente de carga prevista.

El valor secundario que debe ingresarse al relé se muestra en la ecuación (15) como ajuste secundario de 51P.

$$I_{51P,sec} = \frac{I_{51P,prim}}{RTC} \quad (15)$$

La verificación básica se realizaría según la ecuación (16).

$$I_{carga,max} < I_{51P,prim} < I_{cc,min} \quad (16)$$

Por ejemplo, si la carga máxima es 120 A, se adopta $K_s = 1,20$ y el TC es 200/5 A:

$$I_{51P,prim} = 1,20 \times 120 \text{ A} = 144 \text{ A}$$

$$I_{51P,sec} = \frac{144 \text{ A}}{40} = 3,60 \text{ A}$$

El ajuste propuesto será de 3,60 A secundarios, siempre que permanezca por debajo de la corriente mínima de falla y dentro del rango permitido por el relé [26].

Ajuste de la función 50P:

El elemento instantáneo se selecciona por encima de la máxima corriente transitoria y por debajo de la corriente mínima de falla de la zona instantánea, como se interpreta en la ecuación (17).

$$I_{transitorio,max} < I_{50P} < I_{cc,min,zona} \quad (17)$$

Si no existe separación suficiente entre estos valores, la función instantánea puede requerir un retardo definido, control direccional o incluso mantenerse deshabilitada para evitar operaciones incorrectas [7].

Ajuste de tierra residual:

La corriente de operación de las funciones 50G y 51G es según la ecuación (18).

$$I_G = 3I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (18)$$

El valor de arranque debe situarse por encima del máximo desequilibrio normal y por debajo de la corriente mínima de falla a tierra, como se ilustra en la ecuación (19).

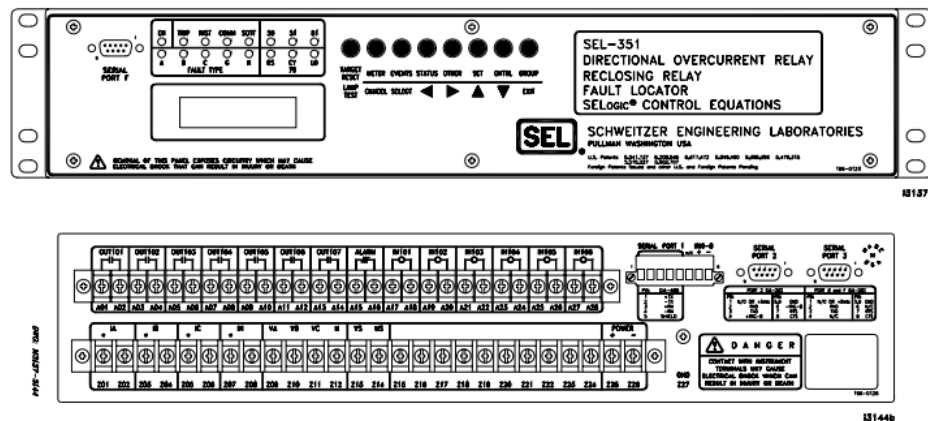
$$I_{desbalance,max} < I_{51G} < I_{falla\ a\ tierra,min} \quad (19)$$

Cuando se utiliza el canal independiente de neutro, se configuran las funciones 50N y 51N. Esta alternativa puede ofrecer mayor sensibilidad si se emplea un transformador toroidal o un TC de neutro con relación específica [19].

3.1.14 DIAGRAMAS DE CONEXIÓN DEL PANEL POSTERIOR

Desde la Figura 19 se muestran el relé de altura 3U pueden ser ordenados con block de terminales, conectores enchufables o tarjeta adicional de entradas / salidas. Todos los relés modelos SEL-351-5, -6, -7 de altura 2U pueden ser equipados sólo con block de terminales. Otros modelos de la familia SEL-351 pueden estar disponibles en altura 2U con conectores enchufables. Para identificar las opciones, ver el “Model Option Table” del Relé SEL-351 en nuestro sitio web, o contacte al representante local de ventas SEL.

Figura 4. Diagrama del panel frontal y posterior —Modelo 0351x0 posterior y Modelo



3.1.15 OPERACIÓN DE LOS BOTONES DEL PANEL FRONTAL

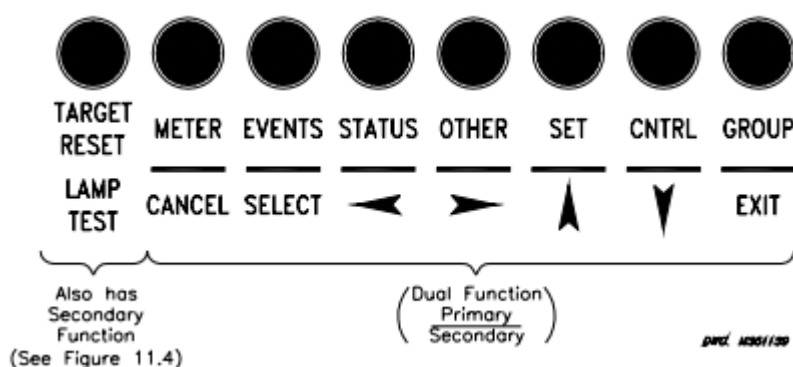
La mayoría de los botones tiene funciones duales (primaria/secundaria).

Una función primaria es aquella que se selecciona primero (ejemplo: botón METER).

Luego que la función primaria es seleccionada, los botones operan según su función secundaria

(CANCEL, SELECT, flechas hacia izquierda/derecha, flechas hacia arriba/abajo, EXIT). Por ejemplo, después de presionar el botón METER, se emplean las flechas hacia arriba/abajo para recorrer las pantallas de medida del panel frontal. Las funciones primarias se activan nuevamente cuando la función seleccionada (medida) se abandona (presionando en botón EXIT) o cuando el despliegue retorna a su pantalla por defecto, luego de que no se registra actividad en el panel frontal durante un período de tiempo ajustable minutos).

Figura 5. Botones del panel frontal—Vista general



3.1.16 Cable de comunicación del relé SEL-351

La comunicación entre el relé digital SEL-351 y el computador constituye una etapa fundamental para la parametrización, supervisión y adquisición de información del sistema de protección. Esta comunicación permite establecer un enlace entre el relé y el software ACSELERATOR QuickSet, mediante el cual se pueden ingresar, modificar y verificar los ajustes de las funciones de protección, además de consultar información de operación y registros almacenados por el dispositivo.

Para el establecimiento de la interfaz física de comunicación y parametrización local con el relé de protección SEL-351, se empleó el cable de conversión USB a serial original SEL-C662 provisto por Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Este enlace utiliza el estándar de comunicación asíncrona EIA-232 a través de un puerto serial configurado en modo DCE, garantizando la compatibilidad de transmisión y recepción de datos con el puerto frontal del dispositivo. Asimismo, el uso de este accesorio original homologado asegura la inmunidad ante perturbaciones electromagnéticas típicas de subestaciones, permitiendo la transferencia transparente de tramas de datos mediante el software de configuración AcSELeRator QuickSet SEL-5030 bajo los parámetros de velocidad y modulación preestablecidos en el firmware del equipo.

3.1.16.1 Detalles Técnicos para la Conexión

Si vas a utilizar el cable SEL-C662, ten en cuenta estos pasos clave para establecer la

comunicación con el software AcSELeRator Quickset:

1. Instalación del Driver: Antes de conectar el cable, debes descargar e instalar el controlador UART oficial de la página de soporte de SEL. Esto creará un puerto COM virtual en tu computadora.
2. Interruptor DTE/DCE: El conector DB9 de este cable tiene un pequeño interruptor físico. Para conectarte a los puertos seriales del relé SEL-351, debes colocar el interruptor en la posición DCE.
3. Interruptor de +5 Vdc: Asegúrate de que el interruptor de energía (+5V Pin 1) esté en la posición OFF, ya que el relé no requiere alimentación externa a través del cable serial.
4. Velocidad de comunicación (Baud Rate): Por defecto, muchos relés SEL se comunican a una velocidad de 2400 o 9600 bps. Sin embargo, la velocidad de conexión típica requerida en el software suele ser 24,400 bps (o la que esté configurada directamente en el panel frontal del equipo en la sección SET -> PORT).

3.1.17 Funciones de protección del SEL-351

El estudio del SEL-351 no debe limitarse a la protección contra sobrecorriente. El equipo incorpora diferentes funciones de protección y automatización, cuya disponibilidad depende de la versión y configuración.

3.1.18 Parametrización del SEL-351

La parametrización consiste en establecer los valores y condiciones de operación que determinan el comportamiento de las funciones del relé.

Entre los parámetros que pueden ser configurados se encuentran:

- Relaciones de transformación.
- Valores nominales.
- Corrientes de operación.
- Curvas de tiempo.
- Temporizaciones.
- Entradas digitales.
- Salidas digitales.

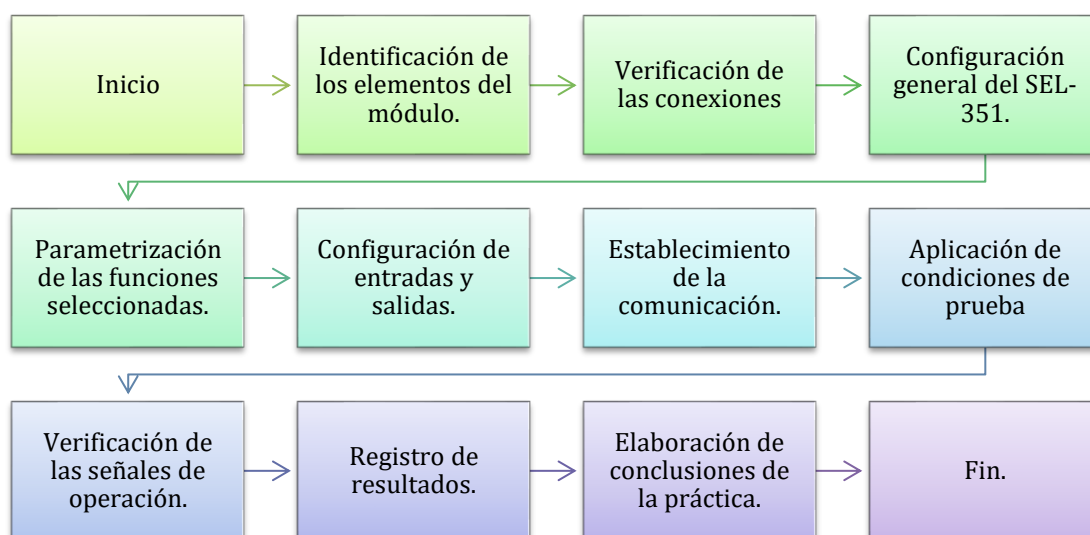
- Lógica de control.
- Funciones habilitadas.
- Parámetros de comunicación.

3.1.19 Procedimiento de parametrización y verificación

La ausencia de un procedimiento escrito para la parametrización del SEL-351 constituye uno de los aspectos que justifican el desarrollo del módulo didáctico.

El procedimiento puede incluir:

Figura 6. Diagrama de flujo de procedimiento de parametrización y verificación



Esto permitirá que el módulo no sea únicamente un equipo instalado en el laboratorio, sino una herramienta acompañada de un procedimiento que facilite su utilización con fines didácticos.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO

4.1. Funciones ANSI de protección del relé SEL-351

El relé SEL-351 integra diferentes funciones de protección y control destinadas a supervisar las condiciones eléctricas de un sistema de potencia. Estas funciones permiten detectar condiciones

anormales relacionadas con corriente, tensión, frecuencia, dirección de la falla y condiciones de operación del interruptor [31].

Entre las principales funciones que pueden estudiarse en el SEL-351 se encuentran las funciones de sobrecorriente (50/51), sobrecorriente direccional (67), subtensión (27), sobretensión (59), frecuencia (81), recierre automático (79), sincronismo (25) y elementos relacionados con potencia y secuencia negativa, además de funciones de detección de falla de interruptor, localización de fallas y bloqueo por segunda armónica. El equipo también dispone de capacidades de medición, registro secuencial de eventos y supervisión del interruptor, lo que permite analizar el comportamiento del sistema de protección [31].

4.1.1 Sobrecorriente ANSI 50/51

Las funciones 50 y 51 constituyen una parte importante de la protección del SEL-351. La función 50 corresponde a la protección de sobrecorriente instantánea, mientras que la 51 utiliza una característica temporizada. El SEL-351 permite aplicar protección de sobrecorriente direccional y no direccional para diferentes aplicaciones de sistemas eléctricos [31].

4.1.2 Sobrecorriente direccional ANSI 67

La función 67 incorpora un criterio direccional a la protección de sobrecorriente. Esto permite determinar si la corriente de falla se encuentra en la dirección definida para la operación del elemento. El SEL-351 incorpora elementos direccionales y utiliza técnicas de polarización para mejorar la estabilidad de la protección durante las fallas [31].

4.1.3 Subtensión ANSI 27

La función 27 supervisa la tensión del sistema y puede generar una señal de operación cuando la magnitud medida disminuye por debajo del valor establecido durante las condiciones configuradas.

Esta función puede utilizarse, por ejemplo, en esquemas de protección, control o automatización donde una disminución significativa de tensión requiera una acción determinada.

4.1.4 Sobretensión ANSI 59

La función 59 supervisa las condiciones de sobretensión. Su operación se produce cuando la tensión supera el valor establecido durante el tiempo definido en la configuración.

El SEL-351 incorpora protección de baja y sobretensión dentro de sus capacidades de protección.

4.1.5 Frecuencia ANSI 81

La función 81 permite supervisar la frecuencia del sistema. En el SEL-351 se incluyen elementos para subfrecuencia, sobrefrecuencia y razón de cambio de frecuencia, los cuales pueden utilizarse, entre otras aplicaciones, para esquemas de tiro de carga.

4.1.6 Recierre automático ANSI 79

La función 79 permite controlar el recierre automático del interruptor después de una operación de disparo. El SEL-351 admite esquemas de recierre de hasta cuatro intentos y puede incorporar verificación de sincronismo y de tensión.

4.1.7 Verificación de sincronismo ANSI 25

La función 25 permite verificar las condiciones eléctricas necesarias antes de efectuar una operación de cierre. Esta función puede integrarse con el control de recierre para evitar operaciones de cierre cuando las condiciones del sistema no sean adecuadas. El SEL-351 dispone de lógica de verificación de sincronismo y tensión asociada a sus funciones de control de recierre.

4.1.8 Secuencia negativa ANSI 46

La función 46 permite detectar condiciones de desequilibrio asociadas con componentes de secuencia negativa. Este tipo de protección es importante porque los desequilibrios pueden producir efectos térmicos y electromagnéticos perjudiciales en determinados equipos eléctricos.

4.2 Características del relé SEL-351

El SEL-351 está orientado a la protección de alimentadores y a aplicaciones industriales o de empresas eléctricas. Incluye elementos de sobrecorriente de fase, secuencia negativa, tierra

residual y neutro [16]. También puede incorporar control direccional, falla de interruptor, recierre, supervisión, localización de fallas, medición y comunicación, dependiendo del modelo y de las opciones instaladas.

Tabla 8. Características del relé SEL-351

Función	Identificación	Aplicación en el módulo
Sobrecorriente instantánea de fase	50P	Detección rápida de corrientes elevadas en las fases.
Sobrecorriente temporizada de fase	51P	Evaluación de curvas y coordinación temporal.
Sobrecorriente instantánea de tierra	50G o 50N	Detección rápida de fallas con retorno por tierra.
Sobrecorriente temporizada de tierra	51G o 51N	Protección sensible y coordinada de fallas a tierra.
Falla de interruptor	50BF	Supervisión de la persistencia de corriente después de una orden de apertura.
Recierre	79	Control de secuencias de apertura y cierre, cuando la práctica lo requiera.
Lógica programable	LGC/SELogic	Combinación de elementos, bloqueos, temporizadores y salidas.
Registro de eventos	DFR/SER	Análisis de corrientes, señales y secuencia temporal.

La hoja de datos del SEL-351-5, -6 y -7 señala que todos los modelos contienen elementos de sobrecorriente de fase, secuencia negativa, tierra residual y neutro. Para corriente máxima de fase se dispone de un elemento inverso 51P y seis elementos instantáneos 50P1–50P6; para tierra residual se incluyen dos elementos inversos y seis instantáneos [16]. La disponibilidad exacta debe confirmarse en el número de parte y firmware del equipo instalado.

4.3 Parametrización de las funciones del relé SEL-351 en el acSELerator QuickSet

La parametrización del relé SEL-351 se realizó mediante el software acSELerator QuickSet SEL-5030, herramienta desarrollada por Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) para la configuración, puesta en servicio y administración de dispositivos empleados en sistemas de protección, control, medición y monitoreo. El software permite crear y modificar grupos de ajustes, verificar los valores configurados y establecer la lógica de operación de los dispositivos compatibles.

El procedimiento de parametrización se desarrolló a partir de los parámetros eléctricos obtenidos del sistema de estudio y de los criterios de coordinación de protecciones establecidos

previamente. Para ello, se consideraron las relaciones de transformación de los transformadores de corriente (TC), los valores de corriente de carga, las corrientes de cortocircuito y los tiempos de operación requeridos para las funciones de protección de sobrecorriente.

4.3.1 Establecer Comunicación y Crear el Archivo Base

- Conecta el relé SEL-351 al ordenador mediante un cable serial (EIA-232), USB frontal o puerto Ethernet según la versión del equipo.
- Abre el acSELerator QuickSet, crea un nuevo archivo de dispositivo seleccionando el modelo exacto y la versión de firmware (FID/RID) correspondiente al relé físico.
- Establece el enlace de comunicación online (Communications > Connect) para sincronizar o descargar los ajustes iniciales (Read Settings).

4.3.2 Configuración de Parámetros Globales y Transformadores de Instrumentación

En la sección de ajustes generales (General Settings / Global Settings):

- Identificación: Configura los campos de identificación del relé (RID) y de la terminal (TID) para auditoría del proyecto.
- Relación de TCs (CTR y CTRN): Ingresa los valores secundarios y primarios de los transformadores de corriente. Por ejemplo, si se usan TCs de 600:5 A, define CTR = 120 (relación para fases) y CTRN = 120 (relación para neutro/tierra).

4.3.3 Parametrización de Funciones de Sobrecorriente (ANSI 50 / 51)

Despliega el submenú de sobrecorriente (Overcurrent Elements):

- Habilitación de Grupos: Activa los elementos en el grupo de ajustes deseado (por ejemplo, Grupo 1) cambiando la variable de habilitación a Sí (E50P = Y para fase instantáneo, E51P = Y para fase temporizado).
- Ajuste de Pickup y Curvas:
 - Asigna la corriente de arranque instantáneo (50P1P) en múltiplos o amperios secundarios según el estudio de coordinación (ej. 0.50 A secundarios).
 - Configura el umbral de arranque temporizado (51P1P), el tipo de curva característica (51PT - ej. Very Inverse / U3) y el dial de tiempo (51PD).

- Repite el procedimiento equivalente para los elementos de tierra y neutro (50G/51G o 50N/51N).

4.3.4 Configuración de Entradas y Salidas de Hardware (I/O)

- Entradas Digitales (Inputs - IN101–IN106): Asigna las entradas optoaisladas físicas para supervisar el estado del interruptor de potencia (contacto auxiliar 52a/52b) o bloqueos externos.
- Salidas de Contacto (Outputs - OUT101–OUT107): Configura los relés de salida física. Asigna el contacto principal OUT101 como la salida de disparo físico (Trip) orientada a la bobina de apertura del interruptor.

4.3.5 Programación de la Lógica de Operación (Ecuaciones SELogic)

Mediante el editor de ecuaciones lógicas o de control booleano (SELogic Control Equations):

- Programa la ecuación general de disparo (TR) vinculando los elementos de protección configurados hacia el contacto físico de salida OUT101:

$$TR = 50P1 + 51P1 + 50G1 + 51G1 \quad (2)$$

Donde

TR = Trip Relay / Disparo Interno

$50P1$ = Sobrecorriente Instantánea de Fase – Elemento 1

$51P1$ = Sobrecorriente Temporizada de Fase – Elemento 1

$50G1$ = Sobrecorriente Instantánea de Tierra Residual – Elemento 1

$51G1$ = Sobrecorriente Temporizada de Tierra Residual – Elemento 1

- Verifica que los ajustes no presenten errores de rango mediante el validador automático del software (Optimal Settings Design) antes de transferir la información al equipo físico mediante la opción Send Settings

4.3.6 Extracción de Oscilografía y Registros de Eventos (SER)

Una vez aplicado el ajuste y simulado o ocurrido un evento en el relé SEL-351, se realiza la recuperación de los archivos de onda:

- **Conexión y Descarga:** Establece comunicación en línea con el equipo mediante el software, dirígete al menú superior y selecciona Database > Retrieve Event Reports (o el botón directo de reportes de eventos).
- **Selección del Archivo:** El relé almacena los eventos de forma secuencial en formato binario y ASCII. Selecciona el último reporte de falla disponible según la marca temporal (Time Stamp) registrada por el equipo.
- **Exportación y Análisis:** Guarda el archivo en formato compatible (como .evr o extensiones estándar IEEE COMTRADE) para abrirlo y analizarlo mediante herramientas especializadas como acSELerator QuickPlot (SEL-5039) o software de visualización de oscilografía

4.3.7 Configuración e Integración de la Función de Recierre Automático (ANSI 79)

Para programar un ciclo de reconexión secuencial (por ejemplo, de un disparo rápido y tres intentos lentos):

- **Parámetros de Disparo y Secuencia:** En la sección de configuración de recierre (Autoreclose Settings), habilita la función asignando E79 = Y. Configura el número máximo de intentos de recierre (Shots) mediante el parámetro MAXS = 4 y establece los temporizadores de intervalo abierto (Open Interval Timers, ej. 79DT1 para el primer recierre y 79DT2 para los subsiguientes).
- **Supervisión de Tensión y Sincronismo:** Vincula el chequeo de sincronismo o tensión de línea muerta (ANSI 25 o 27/59) asegurando que el relé no reconecte si el ángulo de fase entre la barra y la línea es peligroso.
- **Lógica SELogic para el Recierre (RECL):** Programa la ecuación de inicio del ciclo de recierre enlazando el disparo de sobrecorriente temporal y bloqueando el sistema ante una falla permanente (cuando se agotan los intentos o actúa una protección diferencial/instantánea irreversible):

$$RECL = (51P1 + 51G1) * NOT(LOCKOUT) \quad (3)$$

Donde

RECL = Reclose Initiate / Inicialización del Recierre

51P1 = Sobrecorriente Temporizada de Fase

51G1 = Sobrecorriente Temporizada de Tierra

$NOT(LOCKOUT)$ = No Bloqueado

4.3.8 Programación mediante ecuaciones SELogic y software QuickSet

Las ecuaciones SELogic permiten combinar variables internas del relé con entradas digitales, temporizadores y memorias. Su principio se basa en operaciones booleanas. La función OR se cumple cuando cualquiera de las condiciones es verdadero; la función AND exige que todas las condiciones sean verdaderas; la función NOT invierte el estado lógico [14].

Una lógica conceptual de disparo es la ecuación (4).

$$\mathbf{TRIP} = (50P1T \vee 51PT \vee 50G1T \vee 51GT) \wedge \overline{\mathbf{BLOCK}} \quad (4)$$

Donde

TRIP = variable o comando de disparo

50P1T = Phase Instantaneous Overcurrent Element 1 Trip/Timer

51P1T = Phase Time – Overcurrent Definite Time / Trip

50G1T = Ground Instantaneous Overcurrent Element 1 Trip/Timer

51G1T = Ground Time – Overcurrent Definite Time / Trip

$\vee$ = OR / O lógico

$\wedge$ = AND / Y lógico

$\overline{\mathbf{BLOCK}}$ = NOT BLOCK / Negación del bloqueo

En lenguaje directo, la ecuación significa: disparar si opera el elemento instantáneo de fase, el temporizado de fase, el instantáneo de tierra o el temporizado de tierra, siempre que no exista bloqueo [2].

La supervisión de la posición del interruptor puede añadirse mediante la ecuación (5).

$$TRIP_PERMIT = 52A \wedge \overline{BLOCK} \quad (5)$$

Donde

$TRIP_{PERMIT}$ = variable lógica de control interno

$52A$ = contacto auxiliar "normalmente abierto"

$\overline{BLOCK}$ = NOT BLOCK / Negación del bloqueo

La salida final sería lo que representa la ecuación (6).

$$OUT101 = TRIP \wedge TRIP_PERMIT \quad (6)$$

Donde

$OUT101$ = contacto de salida física

$TRIP$ = variable o comando de disparo

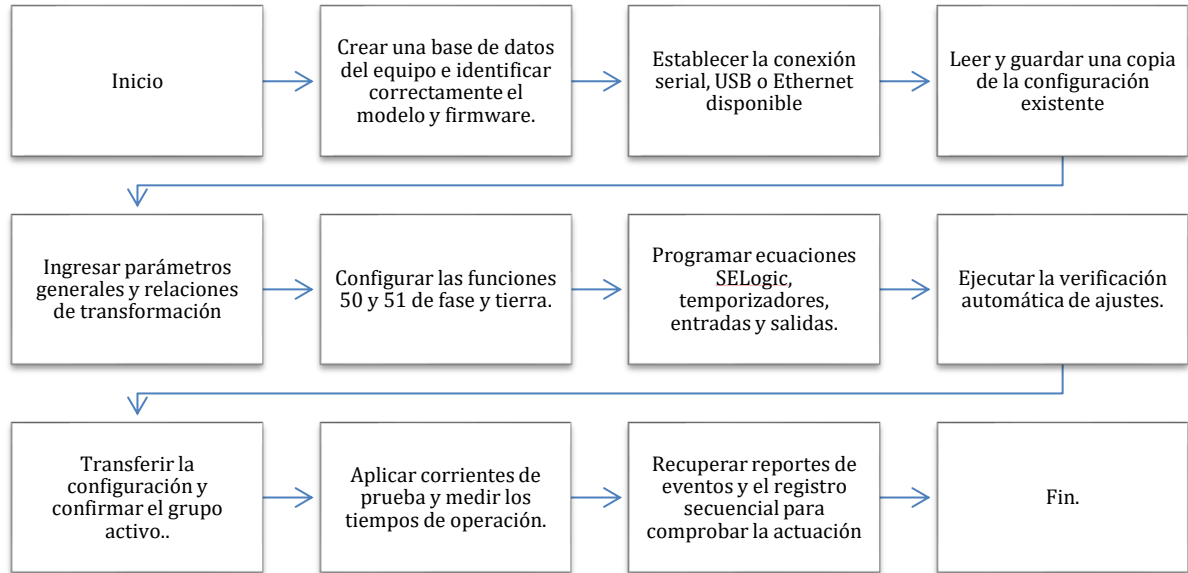
$TRIP_{PERMIT}$ = variable lógica de control interno

Esta condición evita emitir una orden de disparo cuando el interruptor ya está abierto o cuando el módulo se encuentra bloqueado [16]. Los nombres exactos de los *Relay Word bits* deben verificarse en el archivo de ajustes correspondiente al modelo y firmware.

El software acSELerator QuickSet SEL-5030 permite configurar, poner en servicio y administrar dispositivos SEL. La plataforma organiza los ajustes por grupos, verifica que los valores se encuentren dentro del rango permitido y dispone de herramientas para desarrollar ecuaciones SELogic y diagramas lógicos. SEL señala que QuickSet puede utilizarse para crear configuraciones fuera de línea, transferirlas al relé y mantener una base de datos de dispositivos.

El procedimiento recomendado es el siguiente:

Figura 7. diagrama de flujo de SELogic y software QuickSet



[26].

La validación debe comprobar que el elemento configurado arranque en el valor previsto, complete su temporización, active el contacto correcto y genere un registro consistente [21]. De esta manera, el módulo no se limita a demostrar el disparo, sino que permite analizar la cadena completa de medición, decisión y actuación.

4.4 Establecimiento de la comunicación con el relé SEL-351

4.4.1. Software ACCELERATOR QuickSet

ACCELERATOR QuickSet constituye la interfaz utilizada para acceder a los parámetros configurables del relé SEL-351. Dentro del procedimiento desarrollado permitió establecer la conexión con el dispositivo, recuperar los ajustes existentes y acceder posteriormente al editor de configuración.

Antes de modificar cualquier parámetro de protección fue necesario garantizar que el software reconociera correctamente al relé. Esta etapa es importante porque la parametrización no debe iniciarse mientras no exista un canal de comunicación funcional entre el computador y el equipo de protección.

Figura 8 Pantalla de inicio del software ACSELERATOR QuickSet



Fuente: Elaboración propia

La figura anterior presenta la pantalla de inicio de ACSELERATOR QuickSet utilizada durante el proceso experimental. A partir de esta herramienta se desarrollaron las etapas de comunicación, lectura, modificación y transferencia de los parámetros asociados al relé SEL-351.

El software ACSELERATOR QuickSet se utilizó como herramienta de configuración y comunicación entre el computador y el relé de protección SEL-351 instalado en el módulo experimental. Su aplicación permitió establecer el enlace con el dispositivo, realizar la lectura de los ajustes almacenados y acceder al editor de parámetros del relé. Esta etapa fue necesaria para disponer de una interfaz que permitiera trasladar al equipo físico los parámetros de protección obtenidos previamente durante el análisis del sistema eléctrico de nueve barras. El procedimiento documentado parte precisamente del establecimiento de la comunicación con el relé antes de realizar cualquier modificación en sus ajustes.

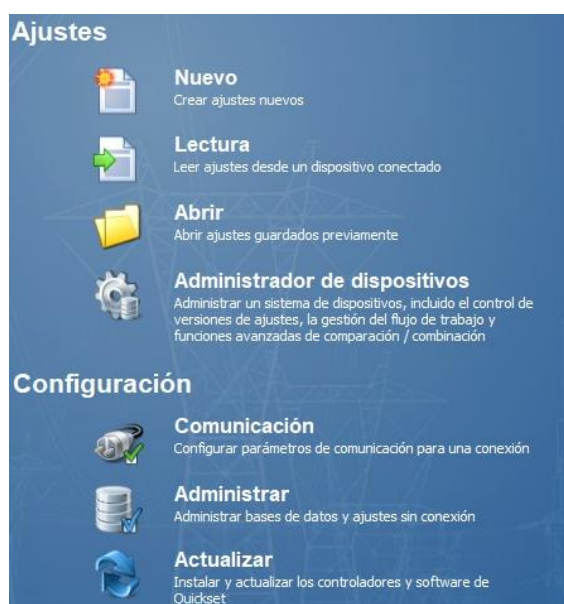
Dentro del desarrollo experimental, ACSELERATOR QuickSet permitió modificar los parámetros requeridos para implementar las funciones de sobrecorriente ANSI 50 y ANSI 51, utilizando los valores de corriente secundaria definidos para cada condición de protección. En particular, el procedimiento contempla la configuración de los parámetros asociados a la función temporizada y al elemento de alta corriente y, posteriormente, la transferencia del grupo de ajustes hacia el SEL-351. De esta manera, el software constituyó el vínculo entre los resultados obtenidos mediante la simulación en PowerFactory y su implementación práctica en el relé utilizado en el módulo de protecciones.

4.4.2. Acceso a las herramientas de comunicación

Una vez iniciado ACCELERATOR QuickSet, se accedió a su interfaz principal, desde la cual se encuentran disponibles las funciones relacionadas con la creación, lectura y administración de ajustes, además de las opciones destinadas a establecer la comunicación con los dispositivos SEL.

Para el procedimiento desarrollado se seleccionó la opción de comunicación, puesto que inicialmente fue necesario establecer los parámetros del enlace entre el computador y el relé. Posteriormente, mediante la opción de lectura, fue posible recuperar la configuración almacenada en el SEL-351; es decir, primero se establece la comunicación con el relé y posteriormente se efectúa la lectura de sus parámetros.

Figura 9. Interfaz principal para la gestión de ajustes y configuración de la comunicación.



Fuente: Elaboración propia.

Detallaremos cada uno de los iconos

Sección: Ajustes

- **Nuevo (Crear ajustes nuevos):** Permite iniciar un archivo de configuración desde cero. Al pulsar este botón, el software solicita especificar el modelo de relé, el código de firmware (FID) y la versión técnica correspondiente del equipo físico que se planea proteger.
- **Lectura (Leer ajustes desde un dispositivo conectado):** Extrae de forma directa toda la parametrización, umbrales de sobrecorriente y lógicas almacenadas en la memoria

del relé físico conectado a la computadora. Descarga la configuración real de campo hacia el entorno del software.

- **Abrir (Abrir ajustes guardados previamente):** Da acceso a un explorador de archivos para cargar en pantalla bases de datos de ajustes (.rdb) u hojas de parámetros que fueron guardadas previamente en el disco duro o almacenamiento local del computador.
- **Administrador de dispositivos:** Abre la plataforma centralizada para gestionar el ciclo de vida del equipo. Controla las diferentes versiones de ajustes efectuadas, organiza el flujo de trabajo de ingeniería de la subestación y ejecuta funciones avanzadas para comparar o combinar parámetros entre dos archivos distintos.

Sección: Configuración

- **Comunicación (Configurar parámetros de comunicación para una conexión):** Abre la ventana de puertos para definir las propiedades físicas y lógicas del enlace entre el PC y el relé SEL. Aquí se ajusta si la conexión se hará de forma serial (Puerto COM, velocidad de baudios) o mediante red Ethernet (Dirección IP, protocolos de red).
- **Administrar (Administrar bases de datos y ajustes sin conexión):** Da acceso local a los almacenes de datos (database) instalados en la computadora. Permite editar, copiar, mover, respaldar o borrar archivos y plantillas de ajustes cargados de forma offline (sin necesidad de estar físicamente conectados al relé).
- **Actualizar (Instalar y actualizar los controladores y software de Quickset):** Ejecuta la herramienta de mantenimiento del software. Conecta con el repositorio del fabricante para verificar, descargar e instalar nuevos drivers, bases de datos o extensiones de firmware requeridas para soportar nuevas variantes o revisiones del relé SEL-351.

En la figura se observa la interfaz principal de ACSELERATOR QuickSet, en la cual se dispone de las herramientas necesarias para administrar los ajustes del dispositivo. Para establecer el enlace inicial con el SEL-351 se utilizó la opción correspondiente a la configuración de la comunicación. Una vez disponible el canal de conexión, la herramienta de lectura permitió obtener los parámetros almacenados previamente en el relé.

4.4.3. Configuración de los parámetros de comunicación serial

La comunicación entre el software y el SEL-351 requiere que los parámetros del enlace sean compatibles con la configuración existente en el dispositivo. Por esta razón, antes de iniciar la

lectura se verificó el tipo de conexión y se seleccionó la velocidad de transmisión correspondiente.

En la evidencia experimental se utiliza una conexión de tipo serial mediante una interfaz SEL CP210x USB to UART Bridge. En la ventana de configuración se selecciona una velocidad de transmisión de 2400, mientras que los demás parámetros permanecieron bajo la configuración establecida para el enlace. El procedimiento seleccionó la velocidad correspondiente al relé y posteriormente se aplicaron y aceptaron los parámetros antes de ejecutar la lectura.

Desde el punto de vista funcional, esta etapa permite sincronizar los parámetros de comunicación del computador con aquellos utilizados por el relé. Una configuración incorrecta del puerto o de la velocidad de transmisión impediría la lectura y posterior transferencia de los ajustes.

Figura 10. Configuración de los parámetros de comunicación serial con el relé SEL-351

Fuente: Elaboración propia.

1. Desarrollo del Menú Parámetros de Comunicación

Esta ventana se utiliza de forma obligatoria antes de realizar cualquier acción de lectura o envío de ajustes, ya que establece las reglas físicas y lógicas de sincronización entre el ordenador y el microprocesador del relé.

2. Tipo de conexión activa y pestañas de interfaz

- **Tipo de conexión activa:** Menú desplegable que define el canal físico principal de comunicación. En la figura se encuentra seleccionado en modo Serial. Se

utiliza cuando la PC se conecta físicamente al puerto frontal (EIA-232) o posterior del relé a través de un cable serial o un adaptador USB a Serial.

- **Pestañas (Serial / Red / Módem):** Permiten alternar la configuración según el hardware disponible. La pestaña Red se utiliza si el relé posee tarjeta Ethernet para comunicarse mediante dirección IP, y Módem cuando la subestación se gestiona de forma remota a través de líneas telefónicas conmutadas.

3. Configuración de Puerto y Enlace Serial (Capa Física)

- **Disposit (Dispositivo):** Define el puerto de comunicaciones lógico asignado por el sistema operativo. En la imagen se observa COM3: SEL CP210x USB to UART Bridge, lo que indica que se está empleando un cable con convertidor integrado de la propia marca SEL.
- **Velocidad de datos (Baudrate):** Determina la velocidad de transmisión en bits por segundo. Está configurada en 2400 baudios. En la práctica, se utiliza 2400 para puertos serie traseros tradicionales o enlaces de comunicación antiguos; sin embargo, para el puerto frontal del SEL-351 se suele elevar a 9600 o 38400 baudios para agilizar la transferencia de oscilografías pesadas.
- **Bits de datos, Bits de paro y Paridad:** Definen la estructura de la trama de datos asíncrona. La configuración de la imagen (8 bits de datos, 1 bit de paro, paridad Ninguno) representa el estándar universal de la industria para garantizar que los caracteres de texto no sufran distorsiones durante el viaje por el cable de cobre.
- **RTS/CTS, DTR, XON/XOFF, RTS:** Parámetros de control de flujo de hardware y software encargados de coordinar cuál equipo transmite y cuál recibe para evitar la pérdida de información por saturación de memoria en el búfer del relé.

4. Niveles de Acceso y Contraseñas de Fábrica del Relé SEL

El relé opera con un sistema de seguridad jerárquico basado en contraseñas para proteger los algoritmos de la subestación contra manipulaciones accidentales o accesos no autorizados:

- **Contraseña de nivel uno (Level 1):**
 - **Significado y accesos:** Es el nivel de operación básico o de solo lectura. Permite al ingeniero o técnico visualizar los ajustes actuales, leer la medición de voltajes y corrientes en tiempo real, extraer registros de eventos

secuenciales (SER) y descargar los archivos de oscilografía. No permite modificar ninguna protección ni operar el interruptor.

- **Contraseña por defecto:** La clave de fábrica universal establecida por SEL es OTTER (en mayúsculas).
- **Contraseña de nivel dos (Level 2):**
 - **Significado y accesos:** Es el nivel de control y configuración total (Acceso de Ingeniería). Otorga permisos estrictos para modificar los umbrales de sobrecorriente (ANSI 50/51), editar las ecuaciones lógicas SELogic, cambiar el grupo operativo de ajustes, resetear contadores de fallas, ejecutar pruebas de laboratorio y forzar la apertura o cierre físico del interruptor de potencia desde el software o terminal.
 - **Contraseña por defecto:** La clave de fábrica universal establecida por SEL es TAIL (en mayúsculas).

La figura anterior muestra la configuración utilizada para establecer el enlace serial entre ACSELERATOR QuickSet y el SEL-351. En la ventana se seleccionó el dispositivo de comunicación identificado por el sistema y se configuró la velocidad de transmisión correspondiente. Una vez establecidos los parámetros se procedió a aplicar y aceptar la configuración, habilitando de esta manera la comunicación necesaria para acceder a los ajustes del relé.

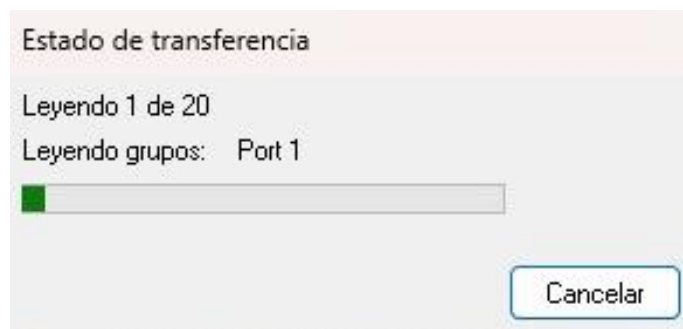
4.4.4. Lectura de los parámetros almacenados en el relé

Después de establecer la comunicación se seleccionó la función Lectura de ACSELERATOR QuickSet. Mediante este procedimiento, el software solicita al dispositivo los grupos de ajustes almacenados y los incorpora al entorno de edición.

Esta operación es conveniente antes de modificar el relé, debido a que permite trabajar sobre una configuración recuperada directamente del dispositivo y no únicamente sobre un archivo creado de forma independiente.

Durante la lectura, QuickSet presenta una ventana de estado que permite observar el progreso de la transferencia de información. El documento muestra el proceso de lectura y señala que es necesario esperar hasta que la carga de los parámetros haya finalizado.

Figura 11. Proceso de lectura de los ajustes almacenados en el relé SEL-351



Fuente: Elaboración propia.

La figura presenta el estado de transferencia durante la lectura de los ajustes del SEL-351. La barra de progreso permite supervisar el intercambio de información entre el dispositivo y ACSELERATOR QuickSet. Finalizada esta etapa, los parámetros recuperados quedan disponibles en el editor de ajustes para realizar las modificaciones requeridas.

4.5. Configuración de los parámetros del relé SEL-351

4.5.1. Acceso al editor de ajustes

Concluida la lectura del equipo, ACSELERATOR QuickSet habilita el editor correspondiente a la configuración del SEL-351. En esta interfaz se encuentran agrupados los diferentes parámetros del relé, permitiendo identificar y modificar únicamente aquellos relacionados con la aplicación desarrollada.

El procedimiento aplicado se concentró fundamentalmente en los parámetros generales de identificación, la relación de transformación de corriente y los valores correspondientes a las funciones de sobrecorriente ANSI 50 y ANSI 51. Una vez finalizada la lectura, se accedió a la configuración del SEL-351 y se procedió a modificar los valores de acuerdo con los resultados previamente determinados en PowerFactory.

Figura 12. Editor de ajustes del relé SEL-351 en ACCELERATOR QuickSet

Group	Setting	Value	Range	Comment	Description
1	RID	FEEDER 1	30 CHARACTERS		RID Relay Identifier
1	TID	STATION A	30 CHARACTERS		TID Terminal Identifier
1	CTR	120	1-6000		CTR Current Transformer Ratio
1	CTRN	120	1-10000		CTRN Neutral (IN) Current Transformer Ratio
1	PTR	180.00	1.00-10000.00		PTR Phase (VA, VB, VC) Potential Transformer Ratio
1	PTRS	180.00	1.00-10000.00		PTRS Synch Voltage (VS) Potential Transformer Ratio
1	Z1MAG	2.14	0.10-510.00 OHMS		Z1MAG Positive Seq. Line Impedance Magnitude
1	Z1ANG	88.86	40.00-90.00 DEGREES		Z1ANG Positive Seq. Line Impedance Angle
1	Z2MAG	6.38	0.10-510.00 OHMS		Z2MAG Zero Sequence Line Impedance Magnitude
1	Z2ANG	72.47	40.00-90.00 DEGREES		Z2ANG Zero Sequence Line Impedance Angle
1	Z3MAG	10.33	0.05-255 OHMS(5AMP)		Z3MAG Zero Sequence Line Impedance Magnitude
1	Z3ANG	45	0.00-90.00 DEGREES		Z3ANG Zero Sequence Line Impedance Angle
1	LL	4.84	0.10-999.00		LL Line Length
1	ESDP	1	N-1-6		ESDP Phase Element Levels
1	ESDN	N	N-1-6		ESDN Enable Number of Residual Instantaneous Overcurrent Levels
1	ESOG	N	N-1-6		ESOG Residual Ground Element Levels
1	ESIG	N	N-1-6		ESIG Negative Sequence Element Levels
1	ESIP	1	N-1-2		ESIP Phase Element
1	ESIN	N	Y-N		ESIN Residual Time Overcurrent Element Enable
1	ESIG	Y	Y-N		ESIG Residual Ground Element
1	ESIG	N	Y-N		ESIG Negative Sequence Element
1	E32	N	Y-AUTO-N		E32 Directional Control
1	ELOAD	N	Y-N		ELOAD Load Encroachment
1	ESOTF	N	Y-N		ESOTF Switch-Open-Fault Enable
1	EVOLT	N	Y-N		EVOLT Enable Voltage Elements
1	E25	N	Y-N		E25 Enable Synchronism Checking
1	EFLOC	Y	Y-N		EFLOC Fault Location
1	ELOP	Y	Y-Y-N		ELOP Enable Loss-of-Potential
1	ECOMM	N	N/DCB.POTT.DCUB1.DCUB2		ECOMM Communications Assisted Trip Scheme
1	E81	1	N-1-6		E81 Frequency Elements

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se presenta el editor de ajustes obtenido después de efectuar la lectura del dispositivo. La interfaz organiza los parámetros del SEL-351 mediante grupos, nombres de configuración, valores y descripciones. Esta estructura facilita la identificación de los parámetros que deben modificarse para adaptar el comportamiento del relé a las condiciones establecidas previamente en el caso de estudio.

4.5.2. Configuración de la identificación del relé

La identificación del dispositivo facilita la diferenciación del relé dentro de una instalación y permite relacionar la configuración almacenada con el elemento eléctrico que está siendo protegido.

En el procedimiento registrado se modificó el campo RID, utilizado para establecer la denominación asociada a la carga que se encontraba bajo análisis. De manera complementaria, el parámetro TID, asociado a la identificación dentro de la configuración; para ello, se presenta los siguientes valores:

$$RID = CARGA A$$

$$TID = STATION A$$

Figura 13. Configuración de los parámetros de identificación y relación de transformación de corriente

Group	Setting	Value
1	RID	CARGA A
1	TID	STATION A
1	CTR	60
1	CTRN	60

Fuente: Elaboración propia.

donde

El **CTR** y **CTRN** se coloca el valor de TC

La figura muestra los campos utilizados para identificar la configuración del relé y establecer los parámetros asociados a los transformadores de corriente. La identificación mediante RID permite relacionar el conjunto de ajustes con la carga correspondiente, mientras que los valores vinculados con la transformación de corriente permiten adaptar las magnitudes primarias del sistema a las señales secundarias empleadas por el SEL-351.

4.5.3. Configuración de la relación de transformación de corriente

La relación de los transformadores de corriente es un parámetro fundamental en la parametrización del relé, puesto que establece la correspondencia entre la corriente primaria que circula por el sistema eléctrico y la corriente secundaria suministrada al dispositivo de protección.

La relación puede expresarse mediante:

$$RTC = \frac{I_{prim}}{I_{sec}} \quad (7)$$

Para un transformador de corriente de 300/5 A:

$$RTC = \frac{300}{5}$$

$$RTC = 60$$

Mientras que para un TC de 400/5 A:

$$RTC = \frac{400}{5}$$

$$RTC = 80$$

Los parámetros CTR y CTRN configurados con un valor de 60 fueron establecidos a partir de la relación del transformador de corriente. Los valores que deben utilizarse según los resultados obtenidos previamente en PowerFactory se muestran en la tabla 6.

Tabla 9. Relación del TC y RTC para configuración del relé de protección

Carga	Relación del TC	RTC
A	400/5 A	80
B	300/5 A	60
C	300/5 A	60

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de estudio, el modelo de la carga A utiliza un TC de 400/5 A, mientras que las cargas B y C emplean relaciones de 300/5 A.

4.5.4. Incorporación de los ajustes de las funciones ANSI 50, ANSI 51, ANSI 79 y ANSI 67

Una vez configurados los parámetros generales, se procedió a introducir los ajustes correspondientes a las protecciones de sobrecorriente.

Para la propuesta tecnológica se utilizaron las funciones:

- **ANSI 51:** protección de sobrecorriente temporizada.
- **ANSI 50:** protección de sobrecorriente de actuación instantánea o de alta corriente.
- **ANSI 79:** Control de secuencias de apertura y cierre, cuando la práctica lo requiera.
- **ANSI 67:** Sobrecorriente Direccional

El parámetro utilizado para la función ANSI 51 corresponde a E51P, mientras que para la función ANSI 50 se utilizó 50P1P. Los valores ingresados corresponden a corrientes secundarias determinadas previamente durante la parametrización realizada en PowerFactory,

En la función ANSI 67 se utiliza desde el DIR1 a DIR4. Estos ajustes definen si los elementos de sobrecorriente operan en sentido Forward (F), Reverse (R) o son No Direccionales (N)

Donde el ajuste de dirección se aplica a los niveles de sobrecorriente y determina el comportamiento de los elementos instantáneos y temporizados asociados.

Ajustes Principales:

- DIR1 = F (Forward): Configura los elementos de nivel 1, incluyendo la función temporizada 51PT, para que operen en sentido hacia adelante.
- DIR2 = F (Forward): Configura los elementos de nivel 2 para sentido hacia adelante (común en esquemas de teleprotección) .
- DIR3 = R (Reverse): Configura los elementos de nivel 3 para sentido inverso, útil en esquemas de bloqueo por teleprotección .
- DIR4 = N (Nondirectional): Configura los elementos de nivel 4 como no direccionales si no se requiere direccionalidad para esa etapa.

Parámetros de Supervisión Direccional

Para una funcionalidad direccional más específica, el SEL-351 permite el uso de ecuaciones de control SELogic que pueden anular el ajuste DIR1 y establecer condiciones direccionales detalladas.

- Control de Torque: Se pueden definir ecuaciones como $67P1TC = 32PF$ para hacer que el elemento de fase 67P1 sea direccional hacia adelante (Forward). Similarmente, $67G1TC = 32GF$ se usa para elementos de tierra.
- Ajuste de Impedancia (Z1F/Z2F): Para aplicaciones avanzadas, se pueden configurar las impedancias de secuencia. Sin embargo, se recomienda $E32 = AUTO$ para que el relevador calcule automáticamente estos valores, evitando configuraciones incorrectas.

En la función ANSI 79 la lógica de recierre se habilita y configura principalmente a través del ajuste E79, que define el número de intentos de recierre y el comportamiento ante fallos de supervisión .

Habilitación y Número de Intentos (E79)

- E79 = N: Deshabilita completamente la función de recierre .
- E79 = 1, 2, 3, 4: Define el número de intentos de recierre (ej. E79 = 4 para cuatro intentos). Si un intento falla, el relevador pasa a estado de Bloqueo (Lockout).

- E79 = C1, C2, C3, C4: Similar a los anteriores, pero en caso de fallo de supervisión, el relevador no entra en bloqueo, sino que pasa al siguiente intento de recierre, emulando un temporizador de tambor rotatorio .

Iniciación del Recierre (79RI y 79RIS)

La iniciación del ciclo de recierre se controla con ecuaciones SELogic .

- 79RI (Reclose Initiate): Define la condición que inicia el recierre. Se configura típicamente como $79RI = TRIP$ para que un disparo del relevador inicie el proceso .
- 79RIS (Reclose Initiate Supervision): Supervisa la condición 79RI. Para que el recierre se inicie, 79RIS debe estar en estado lógico 1 en el momento en que 79RI detecta un flanco ascendente .
- Ajuste de fábrica: $79RIS = 52A + 79CY$ permite la iniciación si el interruptor está cerrado ($52A = 1$) o si ya se está en un ciclo de recierre ($79CY = 1$) .

Temporizadores de Intervalo Abierto

Se utilizan hasta cuatro temporizadores para definir los tiempos de espera entre cada intento de recierre .

- 79INT1D: Tiempo para el primer recierre.
- 79INT2D: Tiempo para el segundo recierre.
- 79INT3D: Tiempo para el tercer recierre.
- 79INT4D: Tiempo para el cuarto recierre.

Estos ajustes se realizan en segundos o ciclos (ej. $79INT1D = 0.50$ para 0.5 segundos).

Supervisión de Cierre y Control de Estados

El estado del recierre se refleja en bits de palabra de relevo y LEDs frontales, y se puede supervisar con otros ajustes .

Estados del Recierre:

- Reset (79RS): El sistema está listo para un ciclo. El LED RESET se ilumina .
- Reclose Cycle (79CY): El relevador está en un ciclo de recierre activo. El LED CYCLE se ilumina .

- Lockout (79LO): Todos los intentos fallaron. El LED LOCKOUT se ilumina y se requiere una intervención manual para restablecer .

Supervisión de Cierre (79CLS): Permite añadir una condición adicional justo antes del cierre, como verificar sincronismo (ej. 79CLS = 25A1) .

Temporizador de Límite de Supervisión (79CLSD): Define una ventana de tiempo (en ciclos) para que se cumpla la condición de 79CLS .

Esta relación entre ambos objetivos es metodológicamente importante: PowerFactory permitió determinar los ajustes, mientras que ACSELERATOR QuickSet permitió llevar esos parámetros desde el modelo de simulación al relé SEL-351.

4.5.5. Ajustes correspondientes a las cargas del sistema de nueve barras

Los valores obtenidos durante el desarrollo del estudio del sistema de nueve barras en PowerFactory pueden organizarse como parámetros de entrada para QuickSet como se aprecia en la tabla 7.

Tabla 10. Ajustes para las protecciones ANSI 51 y ANSI 50 en el relé SEL-351

Carga	RTC	Ajuste utilizado para ANSI 51	Ajuste utilizado para ANSI 50	Ajuste utilizado para ANSI 67	Ajuste utilizado para ANSI 79
A	80	5,50 A sec.	28,20 A sec.	6,60 A sec.	4
B	60	5,09 A sec.	35,76 A sec.	6,12 A sec.	4
C	60	5,67 A sec.	40,91 A sec.	6,72 A sec.	4

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la carga A fueron obtenidos con $I_{pset} = 5,50$ A secundarios y un umbral de alta corriente de 28,20 A secundarios. Para la carga B se determinaron 5,09 A y 35,76 A secundarios, respectivamente. Finalmente, para la carga C se establecieron 5,67 A y 40,91 A secundarios.

4.5.6. Configuración de los parámetros E51P, 50P1P y E79

En la configuración de los parámetros E51P, 50P1P y E79 se muestran los siguientes valores:

$$E51P = 5,67$$

$$50P1P = 40,91$$

$$E79 = 4$$

Estos parámetros fueron ingresados en el grupo de ajustes seleccionado del SEL-351. Los valores señalaron que el primero se utilizó para la función ANSI 51, el segundo para la función ANSI 50 y el tercero es el ANSI 79

Al comparar estos valores con los resultados obtenidos en PowerFactory, ambos corresponden al conjunto determinado para la carga C: 5,67 A secundarios para la protección temporizada, 40,91 A secundarios para el elemento de alta corriente y el tercero es 2 son los intentos para el cierre.

Figura 14. Parametrización de los ajustes de sobrecorriente ANSI 50, ANSI 51 y el ANSI 79 en el SEL-351

1	E51P	5.67
1	E51N	N
1	E51G	Y
1	E51Q	N
1	E32	N
1	ELQAD	N
1	ESOTF	N
1	EVOLT	N
1	E25	N
1	EFLOC	Y
1	ELOP	Y
1	ECOMM	N
1	E81	1
1	E79	2
1	ESV	1
1	EDEM	THM
1	50P1P	40.91
1	50P2P	OFF
1	50P3P	OFF
1	50P4P	OFF
1	50P5P	OFF
1	50P6P	OFF

Fuente: Elaboración propia.

La figura anterior presenta los parámetros de sobrecorriente ingresados en ACSELERATOR QuickSet. Para la función temporizada ANSI 51 se incorporó el valor secundario correspondiente mediante el parámetro E51P, mientras que el umbral de actuación asociado a la función ANSI 50 se estableció mediante 50P1P. Los valores mostrados, 5,67 A y 40,91 A,

respectivamente, proceden de la parametrización desarrollada previamente para la carga C en PowerFactory.

4.6. Transferencia de los ajustes al relé SEL-351

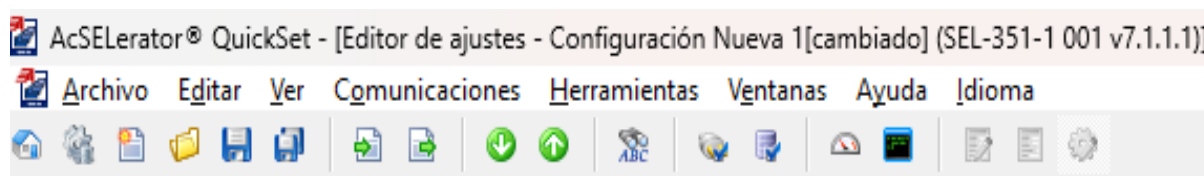
4.6.1. Inicio del proceso de transferencia

Después de completar la configuración de los parámetros requeridos, fue necesario transferir los ajustes desde ACSELERATOR QuickSet hacia el relé físico.

Para iniciar esta operación se utilizó la herramienta de envío disponible en la barra de comandos del software. El documento muestra el icono seleccionado inmediatamente después de modificar E51P, 50P1P y el E79.

La transferencia constituye una etapa diferente a la edición: modificar un valor dentro del editor no implica automáticamente que ese parámetro se encuentre almacenado en el SEL-351. Por ello, es necesario ejecutar explícitamente el proceso de envío.

Figura 15. Selección del comando para transferir los ajustes al relé SEL-351



Fuente: Elaboración propia.

Detallaremos cada uno de los iconos

- **Ir a la página de inicio (Icono de Casa):** Cierra el editor de ajustes actual y regresa al usuario a la pantalla principal o panel de control general de acSElerator QuickSet, donde se administran los diseños de los proyectos y las conexiones globales.
- **Administrador de aplicaciones (Icono de Engranajes con Llave):** Abre la herramienta de administración del software para configurar las preferencias del sistema, las rutas de almacenamiento de las bases de datos de ajustes, la integración con otros programas de la suite SEL (como QuickPlot) y los permisos de usuario.
- **Nuevo diseño de ajustes (Icono de Hoja con Estrella):** Permite crear un archivo de configuración completamente limpio desde cero. Al presionarlo, despliega un asistente para seleccionar el modelo exacto del dispositivo, el firmware y el código de identificación de la revisión.

- **Abrir archivo de ajustes (Icono de Carpeta Abierta):** Abre el explorador de archivos del sistema operativo para cargar bases de datos de parámetros preexistentes (.rdb, .sel o similares) almacenadas localmente en la computadora.
- **Guardar cambios (Icono de Disquete):** Guarda las modificaciones y parámetros que se hayan editado en la sesión de trabajo actual directamente sobre el archivo que se encuentra abierto.
- **Guardar como (Icono de Dos Disquetes):** Permite duplicar el archivo de ajustes actual, guardándolo con un nombre diferente, una nueva ruta o una extensión distinta para mantener un respaldo del archivo original antes de aplicar cambios críticos.
- **Copiar ajustes desde un archivo (Icono de Hoja con Flecha hacia la Derecha):** Permite importar o migrar un bloque específico de configuraciones (por ejemplo, solo las curvas de sobrecorriente o la lógica de una entrada digital) desde otro archivo de ajustes guardado en la PC directamente hacia el archivo actual.
- **Comparar archivos de ajustes (Icono de Dos Hojas Paralelas con Flecha):** Abre la herramienta de comparación de QuickSet. Contrasta el archivo abierto en pantalla con otro archivo de referencia para resaltar de forma visual qué filas, comandos, umbrales o ecuaciones booleanas difieren entre ambos, evitando errores humanos de parametrización.
- **Leer ajustes del dispositivo (Icono de Círculo Verde con Flecha Abajo):** Ejecuta la descarga completa de la memoria del relé físico conectado (en este caso el SEL-351) hacia la computadora. Es el paso obligatorio para visualizar qué ajustes reales operan actualmente en la subestación.
- **Enviar ajustes al dispositivo (Icono de Círculo Verde con Flecha Arriba):** Transfiere y programa de forma definitiva toda la matriz de umbrales, lógicas y variables modificadas en el software directamente hacia la memoria no volátil del relé. Requiere de forma obligatoria la contraseña de nivel 2 (TAIL).
- **Editor de ecuaciones SELogic de texto (Icono ABC con Lápiz):** Abre el editor clásico para escribir e implementar las cadenas y ecuaciones de control lógicas en formato de texto empleando el álgebra de Boole (+ para OR, * para AND, ! para NOT).
- **Verificar ajustes (Icono de Libreta con visto azul):** Ejecuta un análisis de consistencia de los datos ingresados. Revisa que ningún valor numérico se encuentre fuera de los rangos operativos permitidos por el fabricante o que existan conflictos lógicos en las ecuaciones SELogic.

- **Verificar y corregir de forma óptima (Icono de Libreta con visto azul doble):** Aplica un algoritmo automático del software que no solo detecta incoherencias en los parámetros seleccionados, sino que sugiere y corrige de forma autónoma los rangos mínimos y máximos ideales basándose en el modelo físico del equipo.
- **HMI del panel frontal virtual (Icono de Tacómetro/Medidor):** Despliega una réplica gráfica e interactiva del panel frontal real del relé SEL-351. Permite observar qué luces LED de protección estarían encendidas, el estado de los targets de disparo y las mediciones básicas como si se estuviera frente al tablero físico.
- **Ventana de terminal (Icono de Pantalla Negra con Símbolos >_):** Abre el emulador de terminal serie directo. Permite interactuar con el microprocesador del relé mediante líneas de comando tradicionales de SEL (comandos como DAT, MET, SET, HIS), siendo indispensable para pruebas de laboratorio avanzadas y depuración de errores de hardware.
- **Editor de diseño de la interfaz (Icono de Hoja con Lápiz):** Permite personalizar los menús visibles de la pantalla, ocultando o mostrando las pestañas del árbol de ajustes según el nivel de experticia del operador.
- **Historial de cambios del archivo (Icono de Hoja con Líneas de Texto):** Muestra la bitácora interna de auditoría del archivo de ajustes, detallando qué usuario modificó un parámetro, qué fecha se guardó y cuáles fueron las variables modificadas.
- **Fijar/Cambiar grupo operativo (Icono de Engranaje Gris):** Abre el acceso directo para conmutar entre los diferentes grupos de ajustes que posee el relé SEL-351 (cuenta con hasta 6 grupos independientes), permitiendo activar configuraciones alternativas para contingencias, mantenimiento o cambios de topología en la red eléctrica.

En la figura, la flecha de color verde dentro de una hoja en blanco se identifica como el comando utilizado para iniciar la transferencia de la configuración hacia el relé. Una vez completada la edición de los parámetros, esta función permite enviar al dispositivo los grupos de ajustes seleccionados y sustituir la configuración correspondiente por los nuevos valores establecidos.

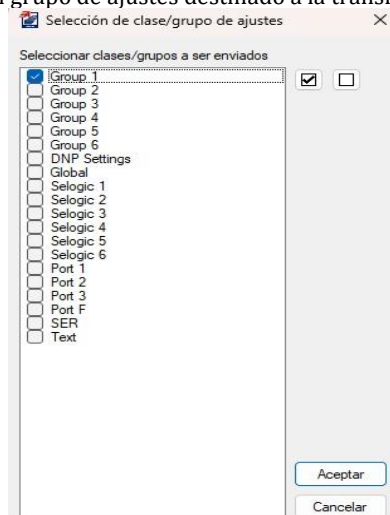
4.6.2. Selección del grupo de ajustes

El SEL-351 dispone de diferentes grupos o clases de configuración. Por esta razón, antes de realizar la transferencia es necesario seleccionar específicamente qué conjunto de parámetros será enviado al dispositivo.

En el procedimiento se seleccionó Group 1, tal como se observa en la ventana de selección de clase/grupo de ajustes. Posteriormente se confirmó la operación para continuar con el envío.

La selección correcta del grupo es importante porque evita modificar configuraciones que no forman parte del procedimiento experimental desarrollado.

Figura 16. Selección del grupo de ajustes destinado a la transferencia hacia el SEL-351



Fuente: Elaboración propia.

La ventana Selección de clase/grupo de ajustes de acSELERator QuickSet es la matriz de filtrado que utiliza el software antes de realizar una transferencia de datos (Lectura o Envío) hacia el relé SEL-351. Su función principal es permitir al ingeniero seleccionar selectivamente qué porción de la memoria del equipo desea sobrescribir o descargar, evitando alterar otras configuraciones que ya estén validadas en la subestación.

Detalle el significado técnico y operativo de cada uno de los elementos

1. Grupos de Protección Independientes (Group 1 al Group 6)

- Significado: El SEL-351 posee seis perfiles de memoria idénticos e independientes para almacenar curvas de sobrecorriente (50/51), lógicas de disparo y parámetros operativos.
- Uso: Permiten almacenar configuraciones distintas para diferentes escenarios de la red. Por ejemplo, el Group 1 se activa para la operación normal del alimentador, el Group 2 puede configurarse con curvas más rápidas para días de mantenimiento en condiciones de "Carga Fría" (Cold Load Pickup), y el Group 3 para cuando el circuito se alimenta temporalmente desde otra subestación

(cambio de topología). El relé cambia entre estos grupos de forma automática mediante entradas digitales o comandos de red sin necesidad de volver a programarlo.

2. Parámetros de Telecontrol (DNP Settings)

- Significado: Contiene el mapa de datos y las reglas del protocolo de comunicación industrial DNP3 (Distributed Network Protocol), ampliamente utilizado en sistemas SCADA de potencia.
- Uso: Aquí se definen los índices de los puntos binarios y analógicos que el relé enviará al centro de control (por ejemplo, qué posición de memoria representa el estado del interruptor o la medición de corriente de la fase A).

3. Ajustes del Sistema y Maquinaria (Global)

- Significado: Almacena los parámetros base de la infraestructura que afectan a todo el relé por igual, independientemente del grupo de protección activo.
- Uso: Aloja las relaciones de transformación de los TCs (CTR, CTRN) y TPs, la frecuencia nominal de la red (60 Hz), los nombres de identificación del dispositivo (RID, TID), y las asignaciones físicas fijas de los contactos de las tarjetas de entradas y salidas.

5. Ecuaciones Lógicas de Control (Selogic 1 al Selogic 6)

- Significado: Son los bloques de programación booleana asociados directamente a cada uno de los seis grupos de protección mencionados al inicio.
- Uso: Contienen las variables lógicas, temporizadores virtuales y ecuaciones específicas (como la ecuación de disparo TR o de inicio de recierre RECL) que operan exclusivamente cuando su grupo correspondiente está activo en la subestación.

6. Configuración de Canales Físicos de Comunicación (Port 1, Port 2, Port 3, Port F)

- Significado: Gobiernan los parámetros de la capa física y los protocolos asignados a cada puerto físico del hardware del relé.
- Uso:
 - Port 1, 2, 3: Corresponden a los puertos serie traseros (EIA-232 o EIA-485) o tarjetas Ethernet posteriores. Configuran velocidades de baudios, paridad y protocolos (SEL, DNP3 o Modbus).

- Port F: Hace referencia exclusiva al puerto Frontal (físico de la carátula) del relé. Generalmente se reserva para conectar la computadora de los técnicos de mantenimiento en campo.

7. Registrador Secuencial de Eventos (SER)

- Significado: Define la lista de prioridades para la bitácora interna de almacenamiento cronológico del equipo.
- Uso: Configura qué transiciones lógicas exactas (por ejemplo, el momento exacto en que operó el elemento 51P1 o cuando cambió de estado la entrada digital IN101) deben quedar registradas con una stampa de tiempo con precisión de milisegundos en la memoria histórica.

8. Etiquetas de Texto Personalizadas (Text)

- Significado: Bloque de memoria destinado a almacenar cadenas de caracteres personalizables por el usuario.
- Uso: Permite renombrar físicamente las etiquetas que aparecen en el software o en la pantalla LCD del relé para identificar las señales con nombres comunes de la planta (por ejemplo, cambiar la visualización de IN101 a un texto descriptivo como "BAJA_PRESSION_SF6").

Casos de uso prácticos

- **Cuando seleccionar solo Group 1 y Selogic 1:** Se utiliza cuando estás haciendo pruebas de laboratorio específicas para la función de sobrecorriente y solo necesitas cargar o modificar las curvas y lógicas del perfil de protección primario, disminuyendo el tiempo de transferencia de datos con el PC.
- **Cuando seleccionar todo:** Es obligatorio durante la puesta en servicio inicial del relé en la subestación, garantizando que el equipo reciba de forma integral toda la arquitectura de red (Ports), protocolos (DNP), variables físicas (Global) y lógica interna.

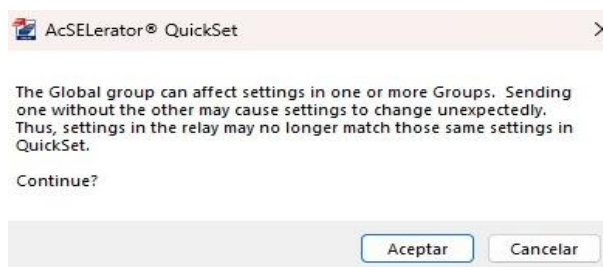
La figura presenta la ventana de selección de los grupos disponibles en ACSELERATOR QuickSet. Para el procedimiento se seleccionó el **Group 1**, correspondiente al conjunto de parámetros que debía ser transferido al relé. Esta selección delimita la información que será enviada y evita modificar grupos que no intervienen en la configuración analizada.

4.6.3. Confirmación previa al envío de los parámetros

Después de seleccionar el grupo, ACSELERATOR QuickSet genera una ventana de confirmación antes de ejecutar la transferencia. Esta advertencia permite verificar que el usuario desea continuar con el envío de la configuración seleccionada.

En esta etapa se aceptó la operación para permitir que el software iniciara la escritura de los parámetros en el dispositivo. El procedimiento muestra esta confirmación inmediatamente antes del estado de transferencia.

Figura 17. Confirmación previa a la transferencia del grupo de ajustes al relé.



Fuente: Elaboración propia.

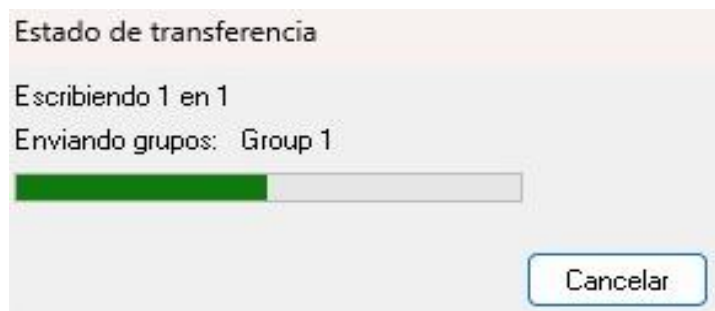
La figura corresponde a la ventana de confirmación presentada por ACSELERATOR QuickSet antes de efectuar la transferencia. Esta etapa constituye una medida de control previa a la escritura de la nueva configuración, ya que permite confirmar de forma explícita el envío del grupo seleccionado hacia el SEL-351.

4.6.4. Transferencia de los ajustes hacia el relé

Una vez confirmada la operación, el software inició la transferencia de la configuración. Durante esta etapa se presenta una barra de progreso que permite supervisar el proceso de escritura.

En la barra de progreso se puede observar el estado "Escribiendo 1 en 1" y la indicación correspondiente al envío del Group 1, mostrando que el conjunto de ajustes seleccionado se encuentra siendo transferido al dispositivo. El procedimiento finaliza dejando completar la transferencia de información hacia el relé.

Figura 18. Proceso de transferencia del Group 1 hacia el relé SEL-351.



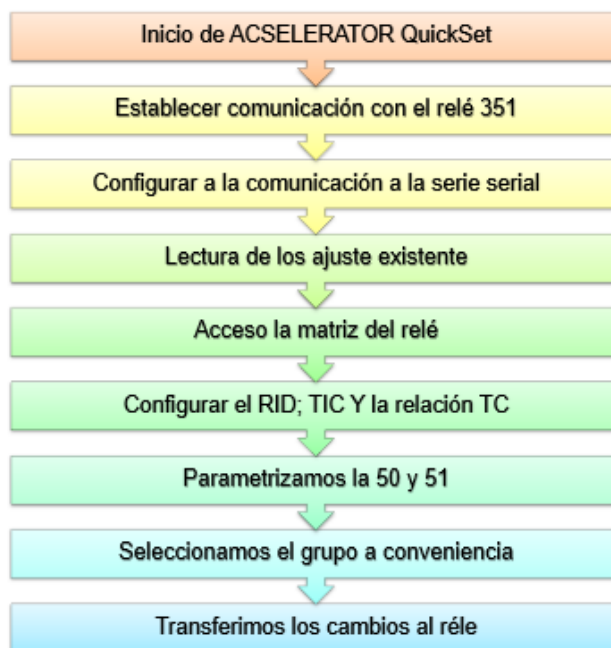
Fuente: Elaboración propia.

La figura presenta el proceso de escritura del grupo de ajustes seleccionado en el relé SEL-351. La barra de progreso permite supervisar el envío de la información desde ACSELERATOR QuickSet hasta el dispositivo. Durante esta etapa debe mantenerse activa la comunicación hasta que el procedimiento de transferencia haya concluido.

4.7. Secuencia completa de parametrización implementada

A partir del procedimiento desarrollado puede establecerse la siguiente secuencia operacional, como se aprecia en el diagrama de flujo de la figura 14.

Figura 19. Parametrización del relé SEL-351



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación del procedimiento permitió establecer la comunicación entre ACSELERATOR QuickSet y el relé SEL-351, recuperar la configuración almacenada en el equipo y acceder a los parámetros requeridos para la implementación de las protecciones de sobrecorriente.

Posteriormente se incorporaron los valores obtenidos a partir del modelo desarrollado en PowerFactory, estableciendo tanto los parámetros asociados a la transformación de corriente como los ajustes correspondientes a las funciones ANSI 50 y ANSI 51.

Con el establecimiento de la comunicación entre el computador y el relé SEL-351 fue posible acceder a la configuración del dispositivo mediante ACSELERATOR QuickSet. A partir de la lectura inicial se identificaron los parámetros requeridos y se incorporaron los ajustes relacionados con la identificación del equipo, la relación de transformación de corriente y las funciones de sobrecorriente ANSI 50 y ANSI 51.

Finalmente, se seleccionó el grupo correspondiente y se ejecutó la transferencia de los parámetros hacia el relé, integrando de esta manera los ajustes previamente obtenidos en PowerFactory con el dispositivo físico instalado en el módulo de protecciones.

Para esto se utilizó el sistema de nueve barras implementado en DIgSILENT PowerFactory, a partir del cual se determinaron las condiciones eléctricas de operación de las cargas A, B y C. Posteriormente, se establecieron las relaciones de transformación de corriente asociadas a cada punto de protección y se definieron los parámetros de las funciones de sobrecorriente temporizada ANSI 51 e instantánea ANSI 50.

La metodología desarrollada se dividió en tres actividades. La primera comprendió la caracterización eléctrica de las cargas y de los transformadores de corriente. La segunda correspondió a la determinación de los ajustes de las funciones ANSI 50 y 51. Finalmente, la tercera actividad consistió en verificar gráficamente la respuesta de cada protección mediante las curvas tiempo-corriente generadas en PowerFactory.

4.8 Aplicación de la corriente de prueba

Una vez finalizada la parametrización, se procedió a realizar una prueba de funcionamiento mediante la aplicación de una corriente de 2 A al relé SEL-351.

La corriente fue aplicada como señal de prueba al sistema de medición del relé, permitiendo verificar la capacidad del equipo para adquirir, procesar y registrar la condición eléctrica aplicada. Durante la prueba se mantuvo la señal de corriente durante el intervalo establecido para la comprobación.

4.9 Análisis del Evento y Verificación de la Configuración

La aplicación de 2 A permitió comprobar experimentalmente el proceso de adquisición y registro de señales del SEL-351. Sin embargo, para determinar si la función de sobrecorriente ANSI 50/51 produjo una actuación de protección, es necesario comparar la corriente aplicada con el pickup o corriente de arranque configurado.

a) Obtención y Análisis del Reporte del Evento

El reporte del evento te dará la información necesaria para comparar el comportamiento teórico con el real. Debes obtenerlo y analizarlo.

- Usando el software acSELeator QuickSet SEL-5030: Es la forma más recomendada, ya que permite visualizar la oscilografía y la secuencia de operación de los elementos. Incluye capturas de pantalla en tu tesis como evidencia.
- Usando el comando CEV: Si no dispones del software, puedes enviar el comando CEV a través del puerto serial. Por ejemplo, CEV 1 mostrará el último evento en formato de texto.

b) Verificación de los Ajustes de Sobrecorriente

Es crucial confirmar que los parámetros que has configurado en el relé son los correctos y coherentes con los cálculos realizados. Los ajustes clave para la función de sobrecorriente de tiempo inverso son los siguientes :

51P1P (Pickup): Es el valor de corriente de arranque. Para que el elemento se active con la prueba de 2 A, este valor debe ser inferior a 2 A.

51P1C (Curve): Define el tipo de curva de temporización que utilizará el elemento.

51P1TD (Time Dial): Es el dial de tiempo, que ajusta la pendiente de la curva.

51P1TC (Torque Control): Es la ecuación lógica que habilita o deshabilita el elemento. Para pruebas básicas, se configura como 1 (siempre activo).

Se configuro los parámetros de la siguiente manera para un carga de 2A

$$51P1P = 1.0 \text{ A}$$

$$51P1C = C1 \text{ (Curva de tiempo inverso normal según estándar IEC)}$$

$$51P1TD = 0.2$$

Con estos valores, y aplicando la fórmula de la curva C1, puedes calcular el tiempo de operación teórico para una corriente de 2 A. Compara ese resultado con el tiempo que el relé registró en el evento. Si coinciden, la parametrización es la correcta.

4.10 Procedimiento Detallado de Parametrización

- Establecer la comunicación entre tu PC y el relé SEL-351.
- Leer la configuración actual del relé para identificar los parámetros de sobrecorriente que están activos y poder modificarlos.
- Verificar y modificar los ajustes necesarios:

51P1P = [Valor de pickup calculado, 2.0 A]

51P1C = [Tipo de curva seleccionada, C1]

51P1TD = [Valor del dial de tiempo, 0.2]

51P1TC = 1 (para que el elemento esté siempre activo)

- Guardar los cambios en el software y enviarlos al relé.
- Inyectar una corriente de prueba los 2 A
- Descargar y analizar el nuevo evento para documentar el tiempo de operación real y, con ello, validar la configuración.

4.10 Ajuste y Validación (El Ciclo de Mejora)

La parametrización no suele ser un proceso de "un solo intento". Es probable que necesites ajustar los valores para lograr el comportamiento deseado.

- Parte de los valores que ya has calculado. La prueba con 2 A te dio una primera base.
- Si el tiempo de operación del relé fue demasiado rápido o demasiado lento, modifica el Time Dial (51P1TD) o el tipo de curva (51P1C) según tus necesidades de coordinación con otras protecciones.

Figura 20. Registro oscilográfico de la actuación de la función de sobrecorriente del relé SEL-351.



Análisis

En la parte superior de la figura se presentan las corrientes IA, IB e IC. La corriente que presenta una variación sinusoidal significativa corresponde a la fase B (IB), mientras que las señales de las fases A y C permanecen aproximadamente en cero. La magnitud IB.Mag se mantiene alrededor de 240 A durante el intervalo mostrado, lo que evidencia la presencia de una condición de sobrecorriente en dicha fase.

El valor observado en el registro oscilográfico corresponde al valor de corriente presentado por el sistema de medición y escalamiento del relé. Debido a que durante la prueba se aplicó una corriente de 2 A, la diferencia entre este valor y el valor mostrado en el registro debe ser relacionada con la configuración de la relación de transformación de los transformadores de corriente (TC) y los factores de escalamiento establecidos en el SEL-351. Por esta razón, para la interpretación definitiva de los valores primarios y secundarios se debe considerar la relación de TC configurada en el equipo.

En la segunda sección muestra las señales de tensión VA, VB y VC. Durante el intervalo de la prueba, estas señales permanecen aproximadamente en cero, por lo que la condición observada en el registro se encuentra principalmente asociada con la señal de corriente aplicada al relé

La parte inferior de la figura presenta los estados de operación de la protección. Se observa que la señal 51PT se activa durante la condición de sobrecorriente, indicando la operación del elemento de sobrecorriente temporizado de fase. Posteriormente, se evidencia la activación de la señal TRIP, correspondiente a la orden de disparo generada por el sistema de protección.

La activación de 51PT demuestra que la corriente registrada por el relé superó el umbral de operación configurado para el elemento de sobrecorriente temporizado y permaneció en dicha condición durante el tiempo necesario para producir la actuación. La posterior activación de TRIP confirma que el proceso de protección alcanzó la etapa de disparo.

Se observa también la activación de la señal TRIP. Esto permite establecer que la condición detectada por el elemento 51PT produjo la orden de disparo registrada por el relé. Por lo tanto, en este caso sí existe evidencia gráfica de actuación de la protección, y no únicamente de almacenamiento de un evento.

el registro oscilográfico permite comprobar experimentalmente el funcionamiento de la protección de sobrecorriente del SEL-351. La secuencia observada corresponde a la aplicación de la condición de corriente, detección de la sobrecorriente mediante el elemento 51PT y

generación de la señal TRIP. Por tanto, la prueba permitió verificar la respuesta del relé frente a una condición de sobrecorriente y validar el procedimiento de parametrización realizado previamente mediante acSELerator QuickSet.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DEL SISTEMA DE NUEVE BARRAS

5.1.1 Interpretación de los Resultados de Caracterización

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes observaciones:

1. Las corrientes secundarias calculadas (4.24 A, 3.92 A y 4.33 A) representan las señales que percibirá el relé SEL-351 durante condiciones normales de operación. Estos valores constituyen la referencia base para la determinación de los ajustes de protección.
2. La selección de transformadores de corriente con relaciones de 400/5 A y 300/5 A asegura que las corrientes secundarias se mantengan dentro del rango nominal de operación del relé (5 A), permitiendo una medición precisa y confiable.
3. Los valores de corriente secundaria se encuentran en el rango de 3.92 A a 4.33 A, lo que representa entre el 78.4% y el 86.6% de la corriente nominal secundaria (5 A). Este margen es adecuado para permitir incrementos de carga sin llegar a condiciones de saturación.

5.2 ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN EN ACSELERATOR QUICKSET

5.2.1 Proceso de Comunicación con el SEL-351

La comunicación entre el computador y el relé SEL-351 se estableció mediante el software acSELerator QuickSet SEL-5030, utilizando los siguientes parámetros:

Tabla 11. Parámetros de comunicación configurados

Parámetro	Configuración
Puerto	COM3
Dispositivo	SEL CP210x USB to UART Bridge
Velocidad (Baudrate)	2400
Bits de datos	8
Bits de paro	1
Paridad	Ninguna
Control de flujo	RTS/CTS

Tabla 12. Niveles de acceso y contraseñas

Nivel	Acceso	Contraseña por defecto
Level 1	Lectura de ajustes, mediciones, eventos	OTTER
Level 2	Configuración completa, transferencia de ajustes	TAIL

5.2.2 Proceso de Transferencia de Ajustes

La secuencia completa de parametrización implementada comprendió las siguientes etapas:

1. Establecimiento del enlace mediante cable serial SEL-C662
2. Ajuste de parámetros en el software
3. Descarga de la configuración existente del relé
4. Edición de los ajustes necesarios
5. Comprobación de la consistencia de los parámetros
6. Envío del Group 1 al relé físico
7. Lectura final para confirmar la configuración

5.3 RESULTADO COMPARATIVO DE LOS AJUSTES ANSI 50/51/67/79

5.3.1 Estructura de Protección Escalonada

Los valores configurados para cada función de protección, estableciendo una estructura escalonada que permite diferenciar claramente las condiciones de operación

Tabla 13. Comparación global de las regiones de protección

Función	Carga A (Asec)	Carga B (Asec)	Carga C (Asec)	Régimen de operación
Corriente normal	4.24	3.92	4.33	Operación normal
ANSI 51	5.50	5.09	5.67	Sobrecorriente temporizada
ANSI 67	6.60	6.12	6.72	Sobrecorriente direccional
ANSI 50	28.20	35.76	40.91	Sobrecorriente instantánea
Margen 51 vs normal (%)	29.79	29.96	30.85	-
Margen 67 vs normal (%)	55.75	56.26	55.08	-
Relación 50/51	5.13	7.03	7.22	-

5.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.4.1 Caracterización Eléctrica del Sistema

La caracterización eléctrica del sistema de nueve barras en PowerFactory permitió determinar las condiciones reales de operación de las cargas y establecer las bases para la parametrización

de las protecciones. Los resultados obtenidos (339 A, 235 A y 260 A para las cargas A, B y C) son consistentes con los niveles de demanda establecidos para sistemas de distribución de media tensión.

5.4.2 Margen de Operación de la Función ANSI 51

El margen establecido del 29.79% al 30.85% para ANSI 51 cumple con los criterios de la práctica de protección eléctrica, proporcionando un balance entre sensibilidad y selectividad. Este margen permite:

- Detecta condiciones anormales antes de que se conviertan en fallas severas
- Evita operaciones innecesarias por fluctuaciones normales de carga
- Permite la coordinación con dispositivos aguas abajo

5.4.3 Función Instantánea ANSI 50

La configuración de ANSI 50 con valores de 28.20 A, 35.76 A y 40.91 A secundarios establece un umbral de protección de alta velocidad que:

- Opera instantáneamente para corrientes de cortocircuito
- Reduce el tiempo de exposición de los equipos a corrientes de falla
- Actúa como respaldo para fallas de alta magnitud

5.4.4 Función Direccional ANSI 67

La implementación de ANSI 67 con un factor de seguridad de 1.20 y la curva Muy Inversa con TMS de 0.12 a 0.15 permite una operación direccional más rápida que la función temporizada:

- Tiempos de operación: 0.180 a 0.225 segundos para fallas a 10 veces el pickup
- Selectividad mejorada: Detecta fallas según la dirección del flujo de corriente
- Aplicación en redes complejas: Adecuada para sistemas con múltiples fuentes o topologías en anillo

5.4.5 Función de Recierre ANSI 79

La estrategia de cuatro ciclos de recierre con tiempos muertos progresivos:

- Hasta cuatro oportunidades de restablecimiento
- El bloqueo (79LO) evita intentos repetidos sobre fallas permanentes
- Disminuye la necesidad de intervención manual para fallas transitorias

5.4.6 Coordinación entre Funciones

La estructura de protección escalonada establece una secuencia jerárquica de operación:

1. Fallas leves/moderadas: Opera ANSI 51 (temporizada)
2. Fallas direccionales: Opera ANSI 67 (direccional) antes que ANSI 51
3. Fallas severas: Opera ANSI 50 (instantánea) antes que cualquier otra
4. Fallas transitorias: ANSI 79 intenta restablecer el servicio

5.5 ANÁLISIS DEL REGISTRO OSCILOGRÁFICO DEL EVENTO

5.5.1 Descripción del Evento Registrado

La prueba realizada con una corriente de 2 A generó un evento que fue capturado por el sistema de registro del relé SEL-351, como se muestra en la figura 5.1. El registro oscilográfico permite analizar las señales de corriente, tensión y los estados de los elementos de protección durante el evento.

Figura 21. Registro oscilográfico de la actuación de la función de sobrecorriente del relé SEL-351.



5.5.2 Análisis de las Señales de Corriente

Canal	Comportamiento	Interpretación
IA	Señal sinusoidal de amplitud constante (~0.4 A)	Corriente en fase A sin variación significativa, dentro del régimen normal
IB	Incremento en amplitud (aproximadamente de 0.4 a 2 A)	La fase B presenta una sobrecorriente que activa la protección
IC	Señal sinusoidal de amplitud constante (~0.4 A)	Corriente en fase C sin variación significativa

La corriente en la fase B incrementa su amplitud desde aproximadamente 0.4 A hasta alcanzar el valor de 2 A, superando el umbral de pickup configurado para ANSI 51. Las fases A y C

permanecen en valores normales, lo que indica una condición de falla monofásica o un incremento de carga en una sola fase.

5.5.3 Análisis de los Estados de Protección

Elemento	Comportamiento	Interpretación
51PT	Se activa durante la condición de sobrecorriente	El elemento de sobrecorriente temporizada detecta la condición anormal
TRIP	Se activa tras 51PT	El relé genera la orden de disparo, operando la salida correspondiente

La activación de 51PT demuestra que la corriente registrada por el relé superó el umbral de operación configurado para el elemento de sobrecorriente temporizado. La posterior activación de TRIP confirma que el proceso de protección alcanzó la etapa de disparo, lo cual evidencia el correcto funcionamiento de la lógica de protección implementada.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

La parametrización de las funciones de protección en el relé SEL-351 permitió diferenciar adecuadamente los tres estados de operación del sistema de nueve barras: régimen normal, actuación temporizada (ANSI 51) y actuación de alta corriente (ANSI 50). Los ajustes secundarios establecidos para las cargas A, B y C (5,50 A, 5,09 A y 5,67 A para ANSI 51; 28,20 A, 35,76 A y 40,91 A para ANSI 50) generaron márgenes de seguridad del 29,79% al 30,85% para la función temporizada y de 6,65 a 9,44 veces la corriente normal para la función instantánea, cumpliendo con los criterios de selectividad requeridos. Esta configuración escalonada garantiza que el relé SEL-351 responda de manera diferenciada según la severidad de la perturbación, evitando disparos innecesarios durante condiciones normales de operación.

La implementación de la función ANSI 67 (Sobrecorriente Direccional) en el SEL-351 con un factor de seguridad $K=1,20$ y márgenes del 55,08% al 56,26% sobre la corriente normal, aproximadamente el doble de los de ANSI 51, permitió establecer una protección direccional con tiempos de operación entre 0,180 y 0,225 segundos, garantizando que actúe antes que la función temporizada (0,580 a 0,834 segundos) en fallas direccionales. La configuración de DIR1 = F (Forward) y E32 = AUTO simplificó la parametrización del relé y aseguró una operación direccional consistente para los alimentadores del sistema.

La comunicación establecida mediante ACSELERATOR QuickSet y el cable SEL-C662 validó la robustez del enlace serial (2400 baudios, 8 bits de datos, 1 bit de paro, sin paridad) para la transferencia bidireccional de datos entre el software y el relé. El registro oscilográfico obtenido durante la prueba de inyección de corriente de 2 A demostró experimentalmente que el relé SEL-351 adquiere, procesa y registra correctamente las señales eléctricas, evidenciando la activación de la señal 51PT y la posterior generación de la señal TRIP, lo que confirma el correcto funcionamiento del procedimiento de parametrización desarrollado y su integración con el módulo didáctico implementado en el laboratorio de protecciones.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda expandir el alcance didáctico del módulo del SEL-351 mediante la parametrización de funciones adicionales disponibles en el firmware del relé, tales como la protección de frecuencia (ANSI 81), subtensión (ANSI 27), sobretensión (ANSI 59) y la

función de falla de interruptor (ANSI 50BF). Estas funciones pueden ser configuradas utilizando los parámetros específicos del SEL-351 (81D1D, 27D1P, 59D1P, 50BFD) y permitirán el desarrollo de guías prácticas avanzadas para simular esquemas de protección más complejos en sistemas de distribución, fortaleciendo la formación de los estudiantes en el uso integral de relés digitales modernos.

Se sugiere incorporar en futuras prácticas un equipo de inyección secundaria calibrado que permita aplicar corrientes de falla controladas en un rango más amplio (desde 0,5 A hasta 50 A secundarios), con el fin de trazar experimentalmente las curvas tiempo-corriente completas de las funciones ANSI 50 y ANSI 51. Esta herramienta facilitaría la verificación precisa de los tiempos de operación del relé y permitiría a los estudiantes comparar directamente los resultados teóricos calculados con las mediciones reales, mejorando la comprensión de la coordinación de protecciones y el impacto de los ajustes de Time Dial y curva característica en el comportamiento del sistema de protección.

Se recomienda implementar un sistema de adquisición de datos y monitoreo en tiempo real que permita visualizar las formas de onda de corriente, tensión y los estados de los elementos de protección (51PT, 50PT, TRIP) durante la operación del módulo. Esta herramienta complementaria, integrada con el software acSELeator QuickSet y SynchroWAVE, facilitaría el análisis detallado de eventos y la interpretación de oscilografías, fortaleciendo las competencias de los estudiantes en diagnóstico de fallas, análisis de secuencias de operación y verificación del comportamiento de los esquemas de protección configurados en el relé SEL-351.

7. REFERENCIAS

- [1] C. Méndez, G. Rueda, J. Castro, Ó. Tobar y G. Zapata, «Esquema dinámico de protección en un entorno digital de sistemas eléctricos,» *Revista Ingeniería para Transformar Territorios*, vol. XI, nº 10.26507/paper.3369, pp. 1-11, 2023.
- [2] D. Vázquez, «Desarrollo de una herramienta para la docencia de relés de distancia basada en el estudio de casos,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2021.
- [3] E. Romero, «Análisis de la coordinación de la protección 67 en las líneas del anillo de 230kV del Sistema Nacional Ecuatoriano en el escenario de máxima lluvia,» Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2024.
- [4] J. Contreras, A. Batalla, J. Cano, M. Juárez y L. Merchan, «Modelado, simulación y validación experimental de relés de protección de sistemas eléctricos de potencia en software para análisis de transitorios electromagnéticos,» *Revista Verano de la Ciencia*, vol. XXXVII, nº 5, pp. 1-9, 2025.
- [5] A. Alarcón y J. Saldarriaga, «Implementación de un sistema de protección mediante el uso de relé SEL-551 contra sobrecorrientes en una red de media tensión,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2021.
- [6] G. Jiménez, «Estudio y puesta en marcha del relé SEL-351S para prácticas de protecciones eléctricas en el laboratorio,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2024.
- [7] V. Moscoso y N. Silva, «Diseño e Implementación de un Sistema de Protección contra Sobrecorriente en una Red de Distribución Mediante el uso de Relé SEL-751 y SEL-3530 RTAC,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2021.
- [8] C. Flores y L. Marca, «Análisis de respuesta de los relés de sobrecorriente en régimen permanente,» Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2022.
- [9] C. Toledo, «Cálculo de ajustes para la protección de la subestación Tres Mesas Fase III,» Instituto Tecnológico del Istmo, México D.F., 2022.
- [10] K. Encala y M. Tonato, «Coordinación de proteccion sistemas electricos de distribución, mediante el uso de relés SEL-751,» Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2023.

- [11] H. Roballo y J. Rueda, «Metodología de coordinación de protecciones en redes de distribución de media tensión, considerando generación fotovoltaica y eólica: estado del arte,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2021.
- [12] Z. Shi y Z. Druzhinin, «Development of 3-phase fault detection, protection, and automation application with the present of DG in AC power system using GOOSE protocol,» *Heliyon Journal*, vol. X, n° 6, pp. 1-22, 2024.
- [13] A. Vafadar, M. Hejazi, H. Hashemi y N. Mohagheghi, «Optimal Protection Coordination of Active Distribution Networks Using Smart Selection of Short Circuit Voltage-Based Relay Characteristics,» *Energies Journal*, vol. XVI, n° 14, pp. 23-55, 2023.
- [14] E. Piesciorovsky, G. Hahn, R. Borges, A. Werth y A. Lee, «Electrical substation grid testbed for DLT applications of electrical fault detection, power quality monitoring, DERs use cases and cyber-events,» *Energy Reports Journal*, vol. X, n° 1, pp. 1099-1115, 2023.
- [15] Z. Issabekov, V. Romashchenko, D. Kachan, B. Ordabayev, B. Issabekova, O. Talipov y D. Bayev, «Preselective Ground Fault Detection Using Vector Reactive Asymmetry in Hierarchical Relay Protection Automation Environments,» *Electricity Journal*, vol. VII, n° 3, pp. 75-96, 2026.
- [16] S. Woo, G. Sim, H. Jung, S. Park, W. Choi y W. Bae, «AI Control of Power Converters Under Semiconductor Constraints: A Critical Review of Deployment Readiness,» *Electronics Journal*, vol. XV, n° 15, pp. 14-33, 2026.
- [17] D. Issabekov, A. Petrovich, V. Markovskiy, N. Shakaevich, A. Kairullovna y D. Serikovich, «Resource-Saving Overcurrent Protection,» *Energies Journal*, vol. XVII, n° 16, pp. 40-71, 2024.
- [18] A. Eladl, A. Sheta, M. Saeed, V. Bures y B. Sedhom, «Assessing the impact of distributed energy resources on overcurrent protection in microgrids for enhanced effectiveness,» *Results in Engineering Journal*, vol. XXV, n° 1, pp. 104-125, 2025.
- [19] X. Li, S. Li, A. Wei, Y. Zhang y H. Fang, «Grid-Connected VSG Low-Voltage Ride-Through Control Based on Dynamic Current Limitation under Asymmetric Faults,» *Lecture Notes in Electrical Engineering Journal*, vol. XVI, n° 59, pp. 189-203, 2026.

- [20] B. Grisales, S. Pérez y J. Mora, «Qualitative and Quantitative Evaluation of Overcurrent Protection in Active Distribution Systems,» *Revista Tecnologías*, vol. XXV, n° 55, pp. 1-23, 2022.
- [21] J. Andruszkiewicz, J. Lorenc, B. Staszak, A. Weychan y B. Zieba, «Overcurrent protection against multi-phase faults in MV networks based on negative and zero sequence criteria,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. CXXXIV, n° 12, pp. 121-156, 2022.
- [22] S. Alam, F. Saleh, S. Masiur y A. Hossain, «Planning and protection of DC microgrid: A critical review on recent developments,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. XLI, n° 1, pp. 101-133, 2023.
- [23] T. Saranya y P. Bhowmik, «A comprehensive review of microgrid architectures, power management and resilient operation,» *Energy Reports Journal*, vol. XV, n° 1, pp. 109-121, 2026.
- [24] X. Feng, S. Strank, P. Paz y R. Hebner, «Enhancing fault identification in rural power distribution systems,» *Electric Power Systems Research Journal*, vol. CCXLI, n° 10, pp. 213-246, 2025.
- [25] X. Cao, J. Weng, Z. Wu, D. Liu, G. Li y W. Auyang, «A fault location method for DC distribution networks with DC circuit breaker and current limiter coordination,» *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. CLXIX, n° 10, pp. 230-259, 2025.
- [26] P. Satpathy, V. Ramachandaramurthy y Padma, «Advanced protection technologies for microgrids: Evolution, challenges, and future trends,» *Energy Strategy Reviews Journal*, vol. LVIII, n° 13, pp. 47-83, 2025.
- [27] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, «Metodología de la Investigación,» 14 Abril 2014. [En línea]. Available: https://uniclanet.unicla.edu.mx/assets/contenidos/254857_DOC_2023-03-01_18:46:18.pdf.
- [28] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., *SEL-351 Protection System*, Pullman, WA, USA: SEL.

- [29] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., *SEL-351 Protection System—Product Brochure*, Pullman, WA, USA: SEL.
- [30] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., *SEL-351-5, -6, -7 Protection System: Instruction Manual and Documentation*, Pullman, WA, USA: SEL.
- [31] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., *SEL-351-5, -6, -7 Protection System: Instruction Manual*, Pullman, WA, USA: SEL.

4.8.2. Principio de medición mediante transformadores de corriente

Debido a que las corrientes primarias presentes en una red eléctrica pueden superar ampliamente los valores admisibles directamente por un relé de protección, se utilizan transformadores de corriente (TC) para reducir proporcionalmente la magnitud medida.

La relación de transformación puede expresarse mediante:

$$RTC = \frac{I_{TC,prim}}{I_{TC,sec}} \quad (8)$$

Donde:

RTC : Es la relación de transformación del TC

$I_{TC,prim}$: Corriente nominal primaria

$I_{TC,sec}$: Corriente nominal secundaria

Una vez conocida la relación del TC, la corriente secundaria que será interpretada por el relé se obtiene mediante:

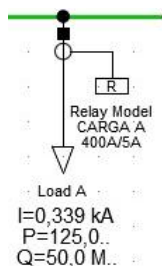
$$I_{sec} = \frac{I_{prim}}{RTC} \quad (9)$$

Esta conversión resulta fundamental, debido a que los parámetros de corriente observados en las curvas de los modelos de relé están expresados en amperios secundarios, mientras que las corrientes mostradas en el diagrama unifilar corresponden a magnitudes primarias del sistema.

4.8.3. identificación de la carga A

La carga A se encuentra asociada al modelo de protección CARGA A y utiliza un transformador de corriente de 400/5 A. El diagrama del sistema presenta una corriente de operación de aproximadamente 0,339 kA, equivalente a 339 A, para esta carga.

Figura 23. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga A



Fuente: Elaboración propia mediante DlgSILENT PowerFactory.

Para este caso, la relación de transformación del TC es:

$$RTC_A = \frac{400}{5}$$

$$RTC_A = 80$$

Por lo tanto, la corriente secundaria correspondiente a la condición normal de carga es:

$$I_{sec,A} = \frac{339}{80}$$

$$I_{sec,A} = 4,24 \text{ A}$$

Este resultado significa que una corriente primaria aproximada de 339 A es reproducida en el secundario del TC como una corriente cercana a 4,24 A. Este valor constituye la referencia para determinar el arranque de la función temporizada ANSI 51.

Por tanto, las tres cargas presentan corrientes secundarias inferiores a los valores de arranque posteriormente configurados para la función ANSI 51, condición necesaria para evitar la operación de la protección durante el régimen normal de funcionamiento.

Tabla 14. Condiciones iniciales de las cargas y transformadores de corriente

Carga	Barra	Corriente primaria	TC	RTC	Corriente secundaria
A	Bus 5	339 A	400/5 A	80	4,24 A
B	Bus 6	235 A	300/5 A	60	3,92 A
C	Bus 8	260 A	300/5 A	60	4,33 A

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos en PowerFactory

4.9. Parametrización correspondiente a la carga A

4.9.1. Ajuste de la función ANSI 51 para la carga A

Para la carga A, PowerFactory presenta un valor de arranque de:

$$I_{51,A} = 5,50 A_{sec}$$

Al expresar este ajuste en magnitud primaria:

$$I_{51,A,prim} = 5,50 \times 80$$

$$I_{51,A,prim} = 440 \text{ A}$$

Si se compara este valor con la corriente normal aproximada de 339 A:

$$\frac{440 \text{ A}}{339 \text{ A}} = 1,30$$

Esto indica que el arranque de la función ANSI 51 se encuentra aproximadamente 30% por encima de la corriente normal de la carga. La diferencia entre la corriente de operación y el valor de arranque proporciona un margen que evita que pequeñas variaciones propias de la demanda provoquen innecesariamente la activación de la protección.

9.9.2. Ajuste de la función ANSI 50 para la carga A

El modelo correspondiente a la carga A establece para el elemento de alta corriente:

$$I_{50,A} = 28,20 A_{sec}$$

Con:

$$T_{set} = 0,00 s$$

Su valor primario equivalente es:

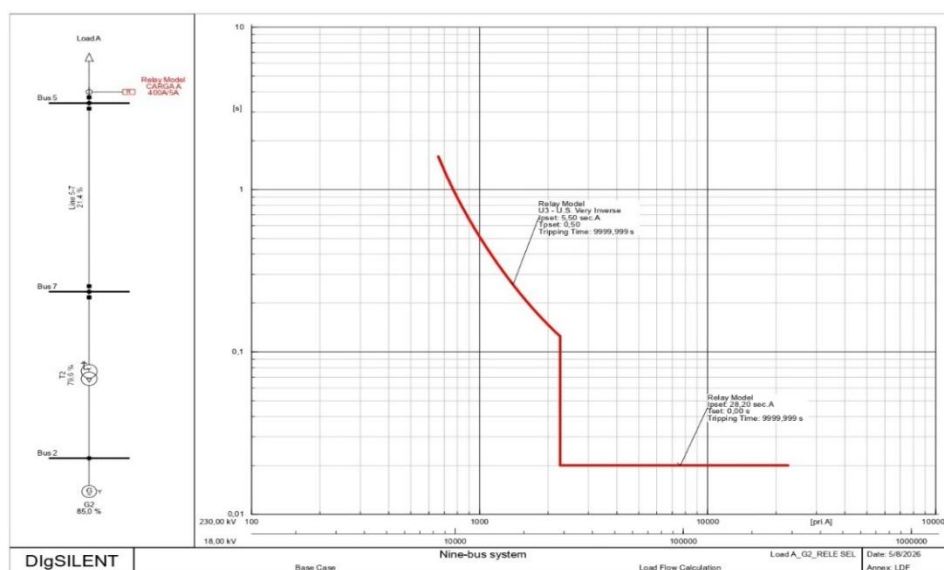
$$I_{50,A,prim} = 28,20 \times 80$$

$$I_{50,A,prim} = 2256 A$$

Por consiguiente, la función ANSI 50 permanece separada de la corriente normal de carga y queda destinada a la detección de corrientes de elevada magnitud.

9.9.3. Curva tiempo-corriente de la carga A

Figura 24. Característica tiempo-corriente de las funciones de sobrecorriente ANSI 50/51 para la carga A



Fuente: Elaboración propia mediante DiGSILENT PowerFactory.

La curva obtenida para la carga A muestra una característica U3 – U.S. Very Inverse, con una corriente de arranque de 5,50 A secundarios y un multiplicador temporal de 0,50. El mismo gráfico presenta un segundo umbral de 28,20 A secundarios asociado a la actuación de alta corriente.

4.9.4 Ajuste de la función ANSI 67 para la carga A

La función ANSI 67 es una protección de sobrecorriente direccional, lo que significa que solo opera cuando la corriente de falla fluye en una dirección específica (hacia adelante o hacia atrás). Es fundamental en sistemas con múltiples fuentes de alimentación o topologías en anillo.

4.9.4.1 Principio de Funcionamiento

La direccionalidad se determina comparando el ángulo de fase entre:

Voltaje de polarización (V_{pol}): Generalmente el voltaje de la fase correspondiente

Corriente de operación (I_{op}): Corriente medida por el TC

Si $|I| > Pickup_{67}$ y ángulo(V_{pol}, I) esta dentro del sector direccional $\rightarrow$ Disparo

9.9.4.2 Parámetros a Configurar

Datos baseTabla 15. datos base para el ANSI 67

Parámetro	Valor	Descripción
Corriente nominal primaria (I_{prim})	339 A	Corriente de carga normal
$RTCA$	80	Relación de transformación $\frac{400}{5}$
Corriente secundaria normal	4.24 A	$I_{SEC} = \frac{339}{80}$
Pickup ANSI 51 (I_{51})	5.50 A_{sec}	Referencia base

9.9.4.3 Configuración de Pickup para ANSI 67

Establecer la corriente de pickup

Para la función direccional, el pickup debe ser ligeramente superior al de la función 51 para evitar operaciones no deseadas:

$$I_{Pickup67} = I_{51} * K$$

Donde

$K = \text{factor de seguridad (1.10 a 1.30)}$

Para la carga A

$$I_{pickup67} = 5.50 * 1.20$$

$$I_{pickup67} = 6.6 A_{sec}$$

Equivalente en primario:

$$I_{pickup67prim} = I_{pickup67} * RTC_A$$

$$I_{pickup67prim} = 6.60 * 80$$

$$I_{pickup67prim} = 528 A$$

Verificación de margen:

$$Margen = \frac{(528 A - 339 A)}{339 A} * 100\%$$

$$Margen = 55.75$$

Definir el ángulo de torque máximo (MTA)

El MTA (Maximum Torque Angle) es el ángulo donde la protección es más sensible. Para sistemas de transmisión típicos:

Tabla 16. datos de MTA

Tipo de Sistema	MTA Recomendado
Líneas aéreas cortas	45° - 60°
Líneas aéreas largas	60° - 80°
Sistemas de distribución	30° - 45°
Cable subterráneo	60° - 85°

$MTA = 60^\circ$ valor típico para la línea de transmisión

Configurar el sector direccional

El sector de operación se define como:

$$Sector_{operación} = MTA \pm 45^\circ$$

$$Sector_{operación} = 60 \pm 45^\circ$$

$$Sector_{operación} = [15^\circ + 105^\circ]$$

Ángulo de polarización V_{pol}

Para un sistema trifásico balanceado, el voltaje de polarización se toma como:

$$V_{pol} = V_{fase} \text{ tensión fase tierra}$$

Condición de operación direccional:

Si Ángulo $(V_{pol}, I) \in [15^\circ + 105^\circ] \rightarrow$ falla hacia adelante $\rightarrow$ Disparo

Si Ángulo $(V_{pol}, I) \notin [15^\circ + 105^\circ] \rightarrow$ falla hacia atrás $\rightarrow$ Bloqueo

9.9.4.4 Curvas de tiempo Inverso

Selección de la curva

Para la función direccional se recomiendan curvas más rápidas que la 51 para garantizar selectividad:

Tabla 17. Curvas de tiempo Inverso

Curva	Aplicación	Ecuación (IEC)
Curva Extremadamente Inversa (EI)	Fallas cercanas al generador	$t = \frac{(80 * TMS)}{(I^2 - 1)}$
Curva Muy Inversa (VI)	Líneas de transmisión	$t = \frac{(13.5 * TMS)}{(I - 1)}$
Curva Normal Inversa (NI)	Distribución general	$t = \frac{(0.14 * TMS)}{(I^{0.02} - 1)}$

Curva seleccionada: Muy Inversa (VI)

TMS = 0.15 (más rápido que 51 para garantizar selectividad)

Tiempo de operación calculado

Para un fallo típico de $I_{falla} = 10 * I_{Pickup}$:

$$I_{multiplo} = \frac{I_{falla}}{I_{pickup67}}$$

$$I_{multiplo} = 10$$

Para curva muy inversa (VI):

$$t_{67} = \frac{(13.5 * TMS)}{(I_{multiplo} - 1)}$$

$$t_{67} = \frac{(13.5 * 0.15)}{(10 - 1)}$$

$$t_{67} = \frac{(2.025)}{9}$$

$$t_{67} = 0.225 \text{ s}$$

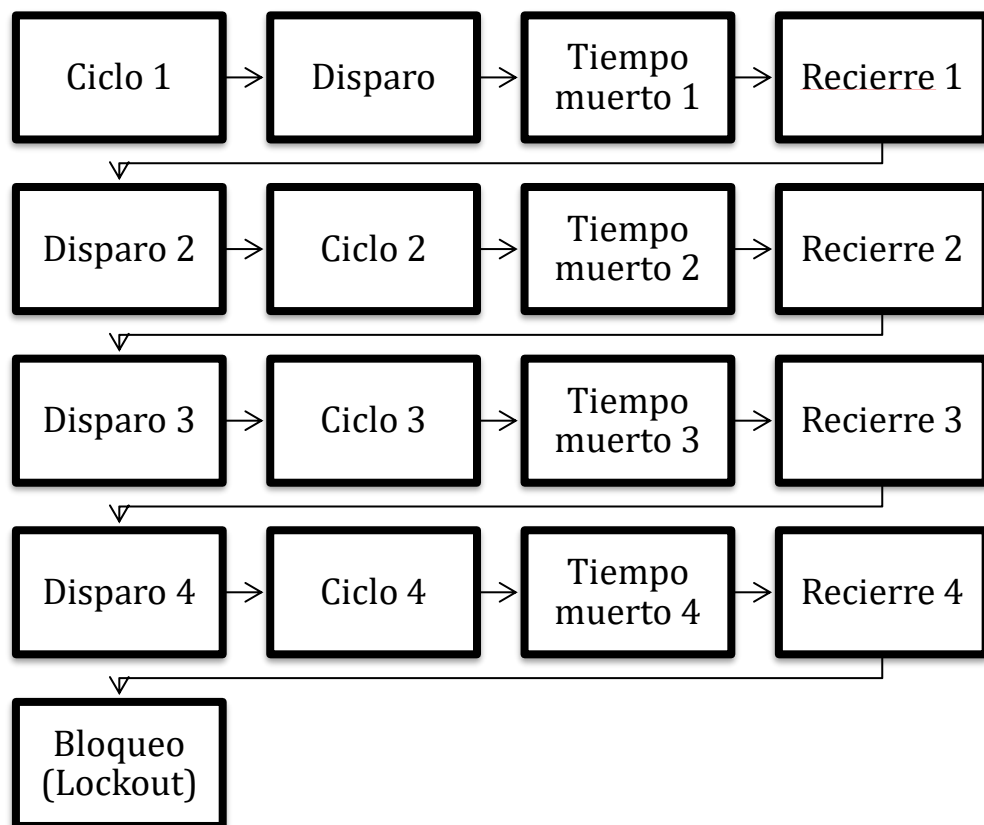
4.9.5 Ajuste de la función ANSI 79 para la carga A

La función ANSI 79 permite que el interruptor se recierre automáticamente después de un disparo por falla, con el objetivo de restablecer el servicio si la falla fue transitoria (ej: rayo, contacto de rama, etc.).

4.9.5.1 Ciclo de Recierre

El SEL-351 permite configurar hasta 4 ciclos de recierre:

Figura 25. diagrama de ciclo de recierre



4.9.5.2 Configuración de Tiempos Muertos

Los tiempos muertos deben coordinarse con:

Tiempo de desionización del arco ($\approx 0.3 - 0.5 \text{ s}$)

Tiempo de reposición del sistema

Tiempo de actuación de protecciones (ANSI 50, 51, 67)

Cálculo del tiempo muerto base

$$t_{muerto_{mínimo}} = t_{apertura_{interruptor}} + t_{desionización} + margen$$

Donde

$$t_{apertura_{interruptor}} = 0.05 - 0.008$$

$$t_{desionización} = 0.2 - 0.3$$

$$t_{muerto_{mínimo}} = 0.08 + 0.30 + 0.12$$

$$t_{muerto_{mínimo}} = 0.50 \text{ s}$$

4.9.5.3 Configuración de tiempos muertos por ciclo

Tabla 18. tiempos muertos

Ciclo	Tiempo Muerto (s)	Razonamiento
Ciclo 1	0.50	Recierre rápido para fallas transitorias (rayos)
Ciclo 2	3.00	Permite extinción de arco para fallas persistentes
Ciclo 3	10.00	Espera para estabilización del sistema
Ciclo 4	60.00	Último intento antes de bloqueo permanente

Basado en la relación (RTC):

$$Relación = \frac{t_{ciclo}}{RTC}$$

Tabla 19. Relación

Ciclo	t_{ciclo}	RTC	Relación
1	0.50	80	0.00625
2	3.00	80	0.03750
3	10.00	80	0.12500
4	60.00	80	0.75000

4.9.5.4 Configuración de Recierre por Tipo de Falla

Recierre por fase

Para sistemas con interruptores por fase:

Tabla 20. Recierre por fase

Tipo de Falla	Recierre	Configuración
Falla monofásica (L-G)	Habilitado	Recierre en fase fallada
Falla bifásica (L-L)	Opcional	Recierre con criterio adicional
Falla trifásica (L-L-L)	Deshabilitado	Bloqueo inmediato

4.9.5.5 Configuración en SEL-351:

Recierre: 3P (trifásico) o 1P (monofásico)

Retardo de recierre: configuración por ciclo

Parámetros de Bloqueo (Lockout)

Condiciones de bloqueo

El SEL-351 bloqueará el recierre bajo las siguientes condiciones:

Condición₁: $I > Pickup_{50} \rightarrow$ falla de alta corriente

Condición₂: Número de recierres $\rightarrow Ciclos_{máximos}(4)$

Condición₃: señal externa de bloqueo

Condición₄: fallo en el propio recierre

Conteo de fallas:

Conteo = 0 $\rightarrow$ 1er disparo $\rightarrow$ Recierre 1 $\rightarrow$ OK $\rightarrow$ Reseteo

Conteo = 1 $\rightarrow$ 2do disparo $\rightarrow$ Recierre 2 $\rightarrow$ OK $\rightarrow$ Reseteo

Conteo = 2 $\rightarrow$ 3er disparo $\rightarrow$ Recierre 3 $\rightarrow$ OK $\rightarrow$ Reseteo

Conteo = 4 $\rightarrow$ 4to disparo $\rightarrow$ Recierre 4 $\rightarrow$ Falla $\rightarrow$ LOCKOUT

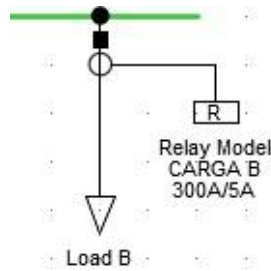
Tiempo de reset después de recierre exitoso:

$$t_{reset} = 5 - 60 [s] \text{ (configurable)}$$

9.2 Anexo 1 Identificación de la carga B

Para la carga B se empleó el modelo denominado CARGA B, asociado a un TC con relación nominal de 300/5 A. En el flujo de carga se registra una corriente aproximada de 0,235 kA, equivalente a 235 A, asociada a una demanda de 90 MW y 30 MVar.

Figura 26. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga B



Fuente: Elaboración propia mediante DIgSILENT PowerFactory.

La relación del TC se determina mediante:

$$RTC_B = \frac{300}{5}$$

$$RTC_B = 60$$

Por consiguiente:

$$I_{sec,B} = \frac{235}{60}$$

$$I_{sec,B} = 3,92 \text{ A}$$

La corriente secundaria obtenida representa la magnitud que percibiría el relé SEL-351 bajo la condición normal de operación de la carga B.

Parametrización correspondiente a la carga B

Ajuste de la función ANSI 51 para la carga B

Para la carga B se configuró:

$$I_{51,B} = 5,09 \text{ A}_{sec}$$

Con:

$$T_{pset} = 0,50$$

Considerando una relación de transformación de 60:

$$I_{51,B,prim} = 5,09 \times 60$$

$$I_{51,B,prim} = 305,4 \text{ A}$$

Al compararlo con la corriente normal aproximada de 235 A:

$$\frac{305,4}{235} = 1,30$$

De esta forma, el umbral de la función ANSI 51 se encuentra aproximadamente un 30% por encima de la corriente correspondiente al estado normal de carga.

Ajuste de la función ANSI 50 para la carga B

El valor configurado para el elemento instantáneo es:

$$I_{50,B} = 35,76 \text{ A}_{sec}$$

Con un ajuste:

$$T_{set} = 0,00 \text{ s}$$

Llevando el ajuste al lado primario:

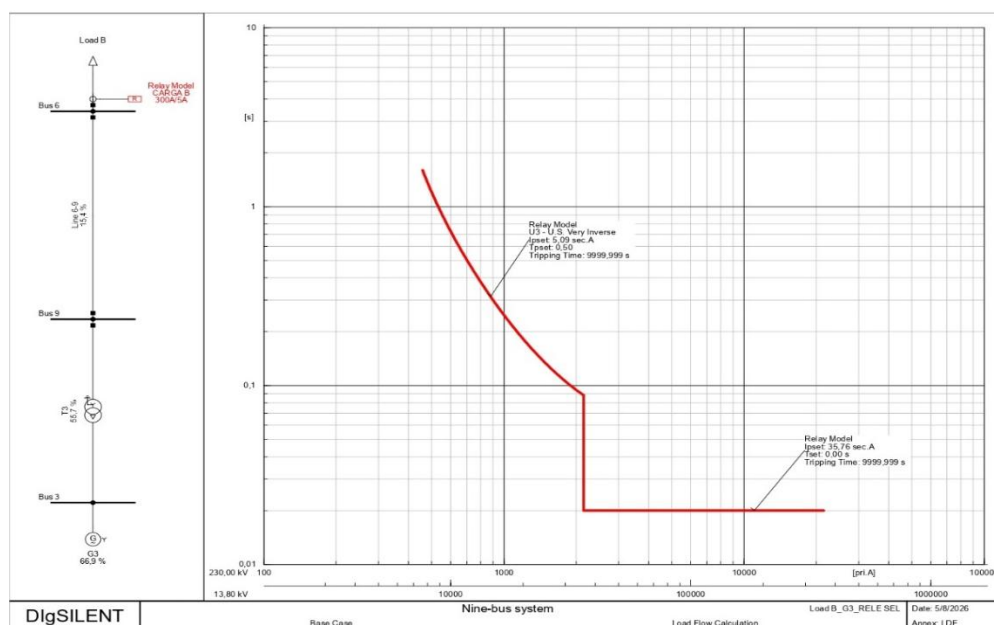
$$I_{50,B,prim} = 35,76 \times 60$$

$$I_{50,B,prim} = 2145,6 \text{ A}$$

Este umbral es considerablemente superior a la corriente normal de la carga B, por lo que el elemento ANSI 50 queda reservado para eventos de corriente elevada.

Curva tiempo-corriente de la carga B

Figura 27. Característica tiempo-corriente de las funciones ANSI 50/51 para la carga B



Fuente: Elaboración propia mediante DigSILENT PowerFactory.

La curva correspondiente a la carga B conserva la característica U3 – U.S. Very Inverse y un *Tpset* de 0,50. El punto de arranque de la función temporizada se encuentra en 5,09 A secundarios y el umbral correspondiente al elemento de alta corriente se establece en 35,76 A secundarios.

Interpretación de la curva de la carga B

En la primera región de la gráfica se aprecia que el tiempo de actuación disminuye progresivamente a medida que se incrementa la corriente. Esta zona corresponde a la función ANSI 51 y permite que la protección responda de forma temporizada frente a sobrecorrientes superiores al valor de arranque.

Una vez alcanzado el equivalente aproximado de 2.145,6 A primarios, el comportamiento cambia hacia la región correspondiente a la función ANSI 50.

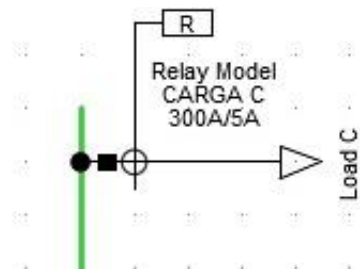
En condiciones normales, la carga presenta aproximadamente 235 A, mientras que el inicio de actuación de la función ANSI 51 corresponde a 305,4 A primarios. La separación entre ambas magnitudes proporciona un margen operacional cercano al 30 %, manteniendo al relé fuera de la zona de disparo durante el funcionamiento previsto de la carga.

9.2 Anexo 2 Identificación de la carga C

La tercera zona analizada corresponde a la carga C. En este punto se implementó el modelo CARGA C con una relación de transformación de corriente de 300/5 A.

En el diagrama unifilar de PowerFactory se observa para esta carga una corriente de aproximadamente 0,260 kA, con una demanda cercana a 100 MW y 35 MVar.

Figura 28. Modelo de protección y relación de transformación de corriente correspondiente a la carga C



Fuente: Elaboración propia mediante DIgSILENT PowerFactory.

La relación del TC es:

$$RTC_C = \frac{300}{5}$$

$$RTC_C = 60$$

La corriente secundaria aproximada es:

$$I_{sec,C} = \frac{260}{60}$$

$$I_{sec,C} = 4,33 \text{ A}$$

Por tanto, las tres cargas presentan corrientes secundarias inferiores a los valores de arranque posteriormente configurados para la función ANSI 51, condición necesaria para evitar la operación de la protección durante el régimen normal de funcionamiento.

Parametrización correspondiente a la carga C

ajuste de la función ANSI 51 para la carga C

Para la carga C, el ajuste registrado en PowerFactory es:

$$I_{51,C} = 5,67 A_{sec}$$

Con:

$$Tpset = 0,50$$

Al considerar el TC de 300/5 A:

$$I_{51,C,prim} = 5,67 \times 60$$

$$I_{51,C,prim} = 340,2 A$$

Al comparar el resultado con la corriente aproximada de 260 A:

$$\frac{340,2}{260} = 1,31$$

El ajuste se encuentra, por lo tanto, alrededor de un 31 % por encima de la corriente de operación mostrada en el caso de estudio.

Ajuste de la función ANSI 50 para la carga C

Para el elemento de actuación instantánea se obtuvo:

$$I_{50,C} = 40,91 A_{sec}$$

Y:

$$Tset = 0,00 s$$

Su equivalente primario corresponde a:

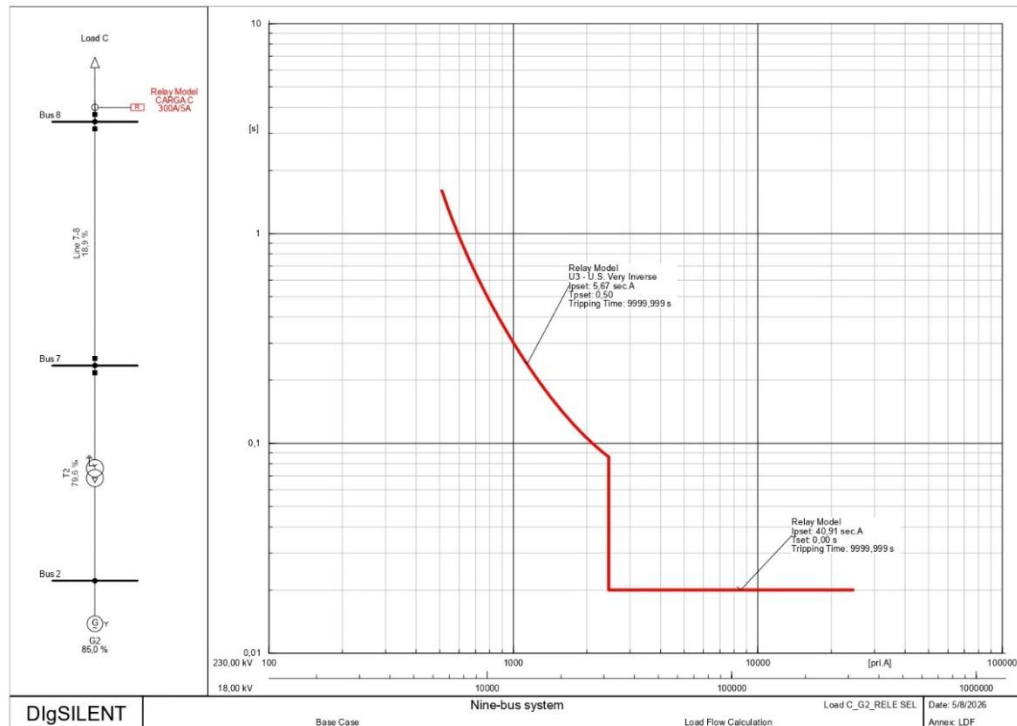
$$I_{50,C,prim} = 40,91 \times 60$$

$$I_{50,C,prim} = 2454,6 A$$

El valor obtenido establece una separación importante respecto a la corriente de funcionamiento de la carga, diferenciando claramente la zona de actuación temporizada de la zona correspondiente a corrientes elevadas.

Curva tiempo-corriente de la carga C

Figura 29. Característica tiempo-corriente de las funciones ANSI 50/51 para la carga C



Fuente: Elaboración propia mediante DlgSILENT PowerFactory.

En la curva generada para la carga C se identifican los ajustes de 5,67 A secundarios para el elemento temporizado y de 40,91 A secundarios para el elemento de alta corriente. Se mantiene nuevamente la característica U3 – U.S. Very Inverse y el valor de $T_{pset} = 0,50$.

Interpretación de la curva de la carga C

La función ANSI 51 presenta inicialmente una respuesta de tiempo inverso. Conforme aumenta la corriente, disminuye el tiempo de operación, comportamiento propio de la característica seleccionada.

Al alcanzar aproximadamente 2454,6 A primarios, correspondientes a los 40,91 A secundarios configurados, se ingresa en la zona asociada a la función ANSI 50.

La corriente normal aproximada de 260 A permanece por debajo del valor de arranque equivalente de 340,2 A correspondiente a ANSI 51. Por tanto, los ajustes diferencian la condición normal de operación de una condición de sobrecorriente y, a su vez, separan la actuación temporizada de la actuación ante corrientes de mayor magnitud.

9.4 Anexo 3 Guía Practica 1

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	 CARRERA DE ELECTRICIDAD ACREDITADA INTERNACIONALMENTE 2025-2028
	GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
	UTC-MT-CIYA-XXXXXX-XXX	

LABORATORIO DE SIMULACIÓN**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Carrera	Código de la asignatura	Nombre de la asignatura
ELECTRICIDAD	IELPE083	PROTECCIONES DE SISTEMASELÉCTRICOS DE POTENCIA

Práctica N°	Laboratorio:	XXXXXX	Duración (horas)
XXX	Nombre de la práctica:	Instalación y configuración inicial del software acSELeRator QuickSet SEL-5030 para la parametrización del relé SEL-351.	3

Integrantes:**Grupo XX:**

1. XXXXXXXX
2. XXXXXXXX
3. XXXXXXXX

1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Establecer el procedimiento para la configuración y comunicación del relé digital SEL-351 mediante el software acSELeRator QuickSet, identificando sus principales interfaces de comunicación y parámetros de configuración, con la finalidad de adquirir las competencias necesarias para realizar posteriormente la parametrización de las funciones de protección y verificar el intercambio de información entre el computador y el relé.

2 INTRODUCCIÓN

El acSELeRator QuickSet SEL-5030 es una herramienta utilizada para configurar, poner en servicio y administrar dispositivos de protección, control, medición y supervisión de SEL. Para el SEL-351 permite trabajar con los ajustes del relé mediante una interfaz gráfica, además de desarrollar configuraciones fuera de línea y verificar automáticamente determinados ajustes relacionados.

El fabricante SEL indica que el SEL-351 puede configurarse, supervisarse y controlarse mediante acSELeRator QuickSet. Asimismo, el software permite trabajar con archivos de ajustes y plantillas de configuración.

Para el SEL-351 también se encuentra disponible documentación oficial del fabricante, incluyendo manuales de instrucciones para diferentes generaciones del equipo.

En esta práctica se utilizará acSELerator QuickSet SEL-5030 para realizar una configuración offline de un relé SEL-351. La configuración offline permite trabajar con los ajustes del dispositivo sin establecer comunicación física con el relé.

El objetivo es aprender a identificar los diferentes grupos y parámetros de configuración que posteriormente serán utilizados para implementar las funciones ANSI 50/51, ANSI 67 y ANSI 79. La práctica se desarrolla completamente en el computador, por lo que los valores introducidos representan una configuración de estudio y no son enviados a ningún dispositivo físico.

1. Instalación y Conexión Inicial

Ingresar y crearse una cuenta institucional: [Enlace](#)

Nota: la aceptación de la cuenta se puede demorar una semana

1.1. Software y Controladores

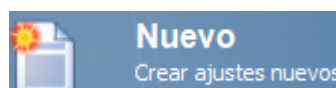
- AcSELerator QuickSet SEL-5030: Es el software estándar para configurar el relay. Permite desarrollar ajustes fuera de línea, transferir archivos de configuración y programar la lógica de control de manera gráfica o textual. [Enlace](#)

2. Software acSELerator QuickSet

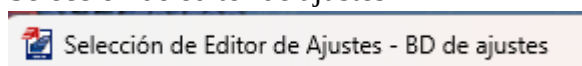
acSELerator QuickSet es una herramienta utilizada para configurar y administrar ajustes de dispositivos de protección SEL compatibles.

Para esta práctica, el software permite:

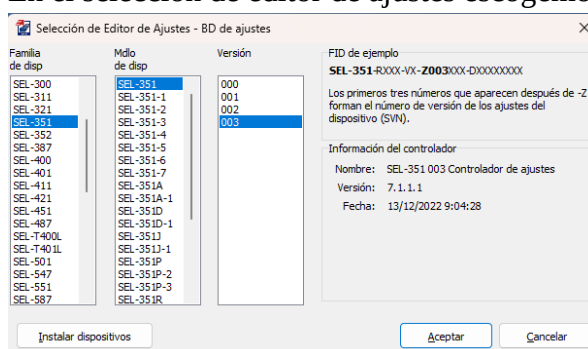
1. Crear o abrir un proyecto.



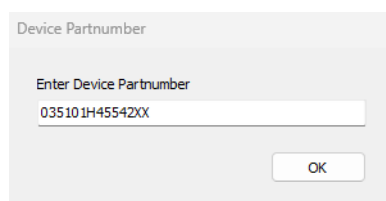
2. Selección de editor de ajustes



3. En la selección de editor de ajustes escogemos la familia modelo y la versión



4. Device Partnumber



Nota: es mejor poner el modelo del relé existente

- Elementos de conexión del módulo.

4 MEDIDAS DE SEGURIDAD

4.1 EQUIPO DE SEGURIDAD

- El estudiante deberá utilizar los elementos de protección personal establecidos por el laboratorio.
- Cuando se trabaje con circuitos energizados se deberán cumplir las normas de seguridad eléctrica correspondientes. No aplica

4.2 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD:

- Verificar que el módulo se encuentre desenergizado antes de realizar conexiones.
- Revisar el estado de los cables antes de conectarlos.
- No realizar modificaciones de cableado con el módulo energizado.
- Comprobar la polaridad y conexión de los circuitos de medición.
- Verificar los niveles de tensión antes de energizar el módulo.
- No manipular terminales energizados.
- Evitar distracciones durante la práctica.
- Mantener ordenada el área de trabajo.
- Utilizar únicamente los cables y accesorios destinados para la práctica.
- Antes de transferir ajustes al relé, comprobar que los parámetros introducidos sean los correspondientes al ensayo.
- Al finalizar la práctica, desconectar la alimentación y retirar las conexiones.

5 TRABAJO PREPARATORIO

Antes de realizar la práctica, el estudiante deberá investigar y responder las siguientes preguntas.

1. ¿Qué función cumple un relé digital dentro de un sistema eléctrico de potencia?

- Transformar niveles de tensión.
- Detectar condiciones anormales y generar señales de protección.
- Almacenar energía eléctrica.
- Regular exclusivamente la tensión.

Respuesta: **b**

2. ¿Cuál es la función principal de un transformador de corriente (TC) en un sistema de protección?

- Elevar la tensión.
- Reducir la frecuencia.
- Proporcionar al relé una corriente proporcional a la corriente del sistema.
- Desconectar directamente el circuito.

Respuesta: **c**

3. ¿Para qué se utiliza acSELerator QuickSet?

- a) Para diseñar transformadores.
- b) Para configurar y administrar ajustes del relé.
- c) Para calcular únicamente flujos de potencia.
- d) Para medir la resistencia de puesta a tierra.

Respuesta: **b**

4. ¿Qué información debe conocerse antes de configurar la relación de TC del relé?

Respuesta: **Relación nominal del TC, corriente nominal del sistema, conexión de los TC, relación de transformación del equipo y capacidad de sobrecarga esperada**

5. ¿Por qué es importante verificar la comunicación antes de transferir los ajustes al relé?

Respuesta: **Para evitar pérdida de configuración, confirmar accesibilidad, verificar integridad de la conexión, prevenir disparos no deseados, validar compatibilidad y respaldar la configuración existente**

6 ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR

La práctica se llevará a cabo mediante la conexión del relé SEL-351 a un computador utilizando el software acSELerator QuickSet. El estudiante deberá identificar las interfaces disponibles, establecer la comunicación, realizar una configuración básica y verificar que los parámetros hayan sido correctamente transferidos.

6.1 Comunicación del software acSELerator QuickSet.

1. Iniciar el software acSELerator QuickSet desde el computador.
2. Seleccionar la opción correspondiente para establecer comunicación con el dispositivo.
3. Seleccionar el puerto de comunicación utilizado.
4. Configurar los parámetros de comunicación requeridos por la interfaz.

6.2 Creación de la configuración en acSELerator QuickSet

1. Abrir el software acSELerator QuickSet y acceder al entorno de configuración.
2. Crear un nuevo proyecto o configuración.
3. Seleccionar el modelo correspondiente al SEL-351 y verificar que la configuración corresponda a la versión del equipo.
4. Ingresar los valores correspondientes a las funciones ANSI 50, ANSI 51 y ANSI 79, utilizando la nomenclatura de ajustes empleada por acSELerator QuickSet.

Tabla de valores de configuración

Función	Nomenclatura en QuickSet	Nuevo valor	Unidad
ANSI 50 fase	50P1P	5.00	A
ANSI 51 fase	51P1P	1.20	A
ANSI 51 fase	51P1C	U1	—
ANSI 51 fase	51PTD	0.50	—
ANSI 50 tierra	50G1P	2.00	A
ANSI 51 tierra	51G1P	0.40	A
ANSI 51 tierra	51G1C	U1	—
ANSI 51 tierra	51GTD	0.50	—
ANSI 79	79RI	Y	—
ANSI 79	79RSD	0.50	s
ANSI 79	79RS	2	intentos
Frecuencia	NFREQ	60	Hz
Relación TC	CTR	60	—

5. Revisar individualmente cada parámetro ingresado y comprobar que los valores, unidades y curvas seleccionadas sean los establecidos para la práctica.
6. Guardar la configuración utilizando un nombre que permita identificar fácilmente el archivo y la práctica realizada..

Se recomienda utilizar una nomenclatura como:

P1_SEL351_CONFIGURACION

7 REFERENCIAS

- [1] Schweitzer Engineering Laboratories, **SEL-351 Protection System**, manual de instrucciones y documentación técnica del fabricante.
- [2] Schweitzer Engineering Laboratories, **acSELErator QuickSet**, documentación de configuración de dispositivos SEL.
- [3] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power System Relaying*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2014.
- [4] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 4th ed. CRC Press, 2014.
- [5] J. M. Gers and E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*, 3rd ed. Institution of Engineering and Technology, 2011.

9.6 Anexo 3 Guía Practica 2

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	 CARRERA DE ELECTRICIDAD ACREDITADORA DE CHILE ACREDITACIÓN & CALIDAD ACREDITADA INTERNACIONALMENTE 2025-2028
	GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
	UTC-MT-CIYA-XXXXX-XXX	

LABORATORIO DE SIMULACIÓN**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

Carrera	Código de la asignatura	Nombre de la asignatura
ELECTRICIDAD	IELPE083	PROTECCIONES DE SISTEMASELÉCTRICOS DE POTENCIA

Práctica N°	Laboratorio:	XXXXXX	Duración (horas)
XXX	Nombre de la práctica:	Instalar el software acSELeRator QuickSet para el Relé SEL-351	3

Integrantes:**Grupo XX:**

4. XXXXXXXX
5. XXXXXXXX
6. XXXXXXXX

1 OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Establecer el procedimiento para la configuración y comunicación del relé digital SEL-351 mediante el software acSELeRator QuickSet, identificando sus principales interfaces de comunicación y parámetros de configuración, con la finalidad de adquirir las competencias necesarias para realizar posteriormente la parametrización de las funciones de protección y verificar el intercambio de información entre el computador y el relé.

2 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia requieren dispositivos de protección capaces de detectar condiciones anormales de operación y generar señales de actuación que permitan aislar las fallas de manera rápida y selectiva. La evolución de los sistemas de protección ha permitido sustituir progresivamente los dispositivos electromecánicos y estáticos por relés digitales, los cuales incorporan funciones de medición, protección, supervisión, registro de eventos y comunicación. El SEL-351 es un relé digital destinado a aplicaciones de protección y automatización de sistemas eléctricos. Su configuración permite establecer diferentes parámetros de operación de acuerdo con las características del sistema protegido, las relaciones de transformación de los transformadores de corriente y tensión y los criterios de coordinación de protecciones.

La configuración de un relé digital requiere una comunicación adecuada entre el dispositivo y un computador. Para este propósito se emplea el software acSELerator QuickSet, mediante el cual es posible crear, modificar, consultar y transferir ajustes al relé. Esta herramienta permite organizar los parámetros de configuración y facilitar el proceso de parametrización del dispositivo.

En esta práctica se realizará la identificación de las interfaces del SEL-351, la conexión entre el relé y el computador, la configuración de los parámetros básicos y la transferencia de los ajustes mediante acSELerator QuickSet. El procedimiento constituye la etapa inicial para las prácticas posteriores relacionadas con las funciones de protección ANSI 50/51 y ANSI 79.

2. Instalación y Conexión Inicial

Ingresar y crearse una cuenta institucional: [Enlace](#)

Nota: la aceptación de la cuenta se puede demorar una semana

3.1. Software y Controladores

- AcSELerator QuickSet SEL-5030: Es el software estándar para configurar el relay. Permite desarrollar ajustes fuera de línea, transferir archivos de configuración y programar la lógica de control de manera gráfica o textual.

<https://selinc.com/products/5033/support/#downloads>

- Controladores USB: Si utilizas un cable USB a serial, instala los controladores proporcionados por SEL para garantizar la comunicación entre el PC y el puerto USB del dispositivo.

En caso de que no este instalado el drive del cable se deben descargar

[Enlace](#) deben ingresar con la cuenta

1.2 Conexión Física

1.2.1 Conecta el cable de comunicación (DB9 o USB-DB9) entre el PC y el puerto frontal (F) del SEL-351.

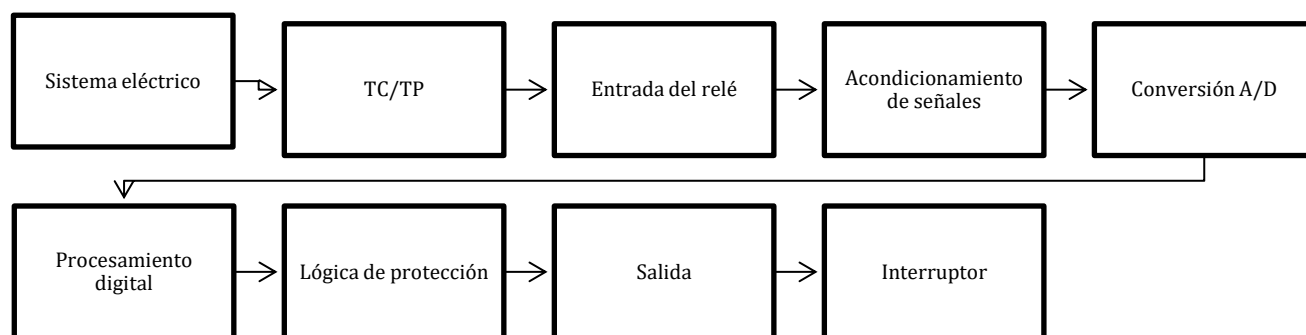
1.2.2 El puerto frontal es el más utilizado para configuración inicial y acceso local.

1.2.3 Identifica el número de puerto COM asignado en tu PC (Ej. COM3, COM4).

4. Relé digital SEL-351

El relé SEL-351 es un dispositivo digital empleado en sistemas eléctricos para realizar funciones de protección, medición, supervisión y control. A diferencia de un relé electromecánico convencional, el relé digital procesa señales eléctricas mediante sistemas electrónicos y algoritmos digitales.

El funcionamiento general de un relé digital puede representarse mediante las siguientes etapas:



Las señales provenientes de los transformadores de corriente y tensión son acondicionadas para que puedan ser procesadas por el sistema electrónico del relé.

5. Comunicación con el relé

La comunicación permite intercambiar información entre el computador y el SEL-351. Mediante esta comunicación se pueden realizar actividades como:

- Lectura de información del relé.
- Consulta de ajustes.
- Modificación de parámetros.
- Transferencia de ajustes.
- Supervisión de variables.
- Obtención de información para análisis.

La interfaz utilizada debe corresponder al puerto disponible en el modelo específico del relé instalado en el laboratorio.

6. Software acSELerator QuickSet

acSELerator QuickSet es una herramienta utilizada para configurar y administrar ajustes de dispositivos de protección SEL compatibles.

Para esta práctica, el software permite:

1. Crear o abrir un proyecto.
2. Seleccionar el dispositivo.
3. Configurar parámetros.
4. Establecer comunicación.
5. Leer los ajustes existentes.
6. Modificar los parámetros.
7. Transferir los ajustes al relé.
8. Verificar la configuración.

7. Parámetros básicos de configuración

Antes de realizar la parametrización de las funciones de protección, se deben establecer parámetros generales del sistema y del dispositivo.

Entre ellos pueden encontrarse:

- Identificación del relé.
- Frecuencia nominal.
- Relación de transformación de TC.

- Relación de transformación de TP, cuando corresponda.
- Grupo de ajustes.
- Configuración de entradas.
- Configuración de salidas.
- Parámetros de comunicación.

Los valores que se ingresen deben corresponder a las características reales del módulo de laboratorio y del sistema eléctrico utilizado.

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- Relé digital SEL-351.
- Computador
- Software acSELerator QuickSet.
- Cable de comunicación compatible con el puerto disponible del SEL-351.
- Fuente de alimentación del módulo.
- Módulo de protecciones eléctricas.
- Transformadores de corriente, si forman parte del módulo.
- Transformadores de tensión, si forman parte del módulo.
- Manual técnico del SEL-351.
- Elementos de conexión del módulo.

4 MEDIDAS DE SEGURIDAD

4.3 EQUIPO DE SEGURIDAD

- El estudiante deberá utilizar los elementos de protección personal establecidos por el laboratorio.
- Cuando se trabaje con circuitos energizados se deberán cumplir las normas de seguridad eléctrica correspondientes. No aplica

4.4 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD:

- Verificar que el módulo se encuentre desenergizado antes de realizar conexiones.
- Revisar el estado de los cables antes de conectarlos.
- No realizar modificaciones de cableado con el módulo energizado.
- Comprobar la polaridad y conexión de los circuitos de medición.

- Verificar los niveles de tensión antes de energizar el módulo.
- No manipular terminales energizados.
- Evitar distracciones durante la práctica.
- Mantener ordenada el área de trabajo.
- Utilizar únicamente los cables y accesorios destinados para la práctica.
- Antes de transferir ajustes al relé, comprobar que los parámetros introducidos sean los correspondientes al ensayo.
- Al finalizar la práctica, desconectar la alimentación y retirar las conexiones.

5 TRABAJO PREPARATORIO

Antes de realizar la práctica, el estudiante deberá investigar y responder las siguientes preguntas.

1. ¿Qué función cumple un relé digital dentro de un sistema eléctrico de potencia?

- Transformar niveles de tensión.
- Detectar condiciones anormales y generar señales de protección.
- Almacenar energía eléctrica.
- Regular exclusivamente la tensión.

Respuesta: **b**

2. ¿Cuál es la función principal de un transformador de corriente (TC) en un sistema de protección?

- Elevar la tensión.
- Reducir la frecuencia.
- Proporcionar al relé una corriente proporcional a la corriente del sistema.
- Desconectar directamente el circuito.

Respuesta: **c**

3. ¿Para qué se utiliza acSELerator QuickSet?

- Para diseñar transformadores.
- Para configurar y administrar ajustes del relé.
- Para calcular únicamente flujos de potencia.
- Para medir la resistencia de puesta a tierra.

Respuesta: **b**

4. ¿Qué información debe conocerse antes de configurar la relación de TC del relé?

Respuesta: **Relación nominal del TC, corriente nominal del sistema, conexión de los TC, relación de transformación del equipo y capacidad de sobrecarga esperada**

5. ¿Por qué es importante verificar la comunicación antes de transferir los ajustes al relé?

Respuesta: **Para evitar pérdida de configuración, confirmar accesibilidad, verificar integridad de la conexión, prevenir disparos no deseados, validar compatibilidad y respaldar la configuración existente**

6 ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR

La práctica se llevará a cabo mediante la conexión del relé SEL-351 a un computador utilizando el software acSELerator QuickSet. El estudiante deberá identificar las interfaces disponibles, establecer la comunicación, realizar una configuración básica y verificar que los parámetros hayan sido correctamente transferidos.

6.1 Identificación del relé SEL-351

1. Ubicar físicamente el relé SEL-351 en el módulo de laboratorio.
2. Identificar la placa de características.
3. Registrar el modelo del relé.
4. Registrar el número de serie, si corresponde.
5. Identificar las entradas de corriente.
6. Identificar las entradas de tensión, si están disponibles.
7. Identificar las entradas digitales.
8. Identificar las salidas digitales.
9. Identificar los puertos de comunicación disponibles.
10. Registrar la información en la siguiente tabla.

Tabla 7.1. Identificación del relé

Parámetro	Información obtenida
Fabricante	
Modelo	
Número de serie	
Tensión de alimentación	
Frecuencia nominal	
Entradas de corriente	
Entradas de tensión	
Entradas digitales	
Salidas digitales	
Puerto de comunicación utilizado	

6.2 Conexión del computador al SEL-351

5. Identificar el puerto de comunicación que será utilizado.
6. Conectar el cable de comunicación entre el computador y el SEL-351.

7. Energizar el equipo de acuerdo con el procedimiento establecido por el laboratorio.
8. Verificar que el relé complete su proceso de inicialización.
9. Abrir el software acSELerator QuickSet.
10. Seleccionar la opción correspondiente para establecer comunicación con el dispositivo.
11. Seleccionar el puerto de comunicación utilizado.
12. Configurar los parámetros de comunicación requeridos por la interfaz.
13. Intentar establecer comunicación con el relé.
14. Comprobar que el software reconozca correctamente el dispositivo

6.3 Creación de la configuración en acSELerator QuickSet

7. Abrir acSELerator QuickSet.
8. Crear un nuevo proyecto o configuración.
9. Seleccionar el dispositivo correspondiente al SEL-351.
10. Introducir la información solicitada por el software.
11. Guardar el proyecto con un nombre que permita identificar la práctica.

Se recomienda utilizar una nomenclatura como:

P1_SEL351_CONFIGURACION

6.4 Lectura de los ajustes existentes

Antes de modificar los parámetros se debe obtener la configuración existente del relé.

1. Establecer comunicación con el SEL-351.
2. Seleccionar la opción de lectura de ajustes.
3. Transferir la configuración del relé hacia el computador.
4. Guardar una copia de respaldo.
5. Revisar los parámetros obtenidos.
6. Identificar los grupos de ajustes disponibles.

Tabla 6.2. Registro de configuración inicial

Parámetro	Valor inicial	Unidad
Frecuencia		Hz
Relación TC		
Relación TP		
Grupo de ajustes		
Identificación del relé		
Estado de comunicación		

6.5 Configuración de parámetros básicos

Una vez obtenida la configuración, se deberán establecer los parámetros correspondientes al sistema de estudio.

Tabla 6.3. Parámetros a configurar

Parámetro	Valor de diseño	Valor ingresado
Frecuencia nominal		12
TC fase A		2.5
TC fase B		
TC fase C		
TC residual, si aplica		
TP		
Grupo de ajustes		
Identificación del relé		

Ingresa los datos de la tabla

6.6 Verificación de la comunicación

Para verificar que la configuración fue exitosa se deberá comprobar:

- Reconocimiento del SEL-351.
- Comunicación estable.
- Lectura de parámetros.
- Transferencia de ajustes.
- Coincidencia entre los valores configurados y almacenados.
- Ausencia de errores durante la comunicación.

Tabla 7.4. Verificación de comunicación

Ensayo	Resultado esperado	Resultado obtenido	Estado
Reconocimiento del relé	SEL-351 identificado		
Lectura de ajustes	Configuración descargada		
Modificación de parámetro	Cambio aceptado		
Transferencia	Ajustes enviados		

7	REFERENCIAS
[1] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL-351 Protection System, manual de instrucciones y documentación técnica del fabricante. [2] Schweitzer Engineering Laboratories, acSELeRator QuickSet, documentación de configuración de dispositivos SEL. [3] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, <i>Power System Relaying</i>, 4th ed. John Wiley & Sons, 2014. [4] J. L. Blackburn and T. J. Domin, <i>Protective Relaying: Principles and Applications</i>, 4th ed. CRC Press, 2014. [5] J. M. Gers and E. J. Holmes, <i>Protection of Electricity Distribution Networks</i>, 3rd ed. Institution of Engineering and Technology, 2011.	

9.4 Anexo 4 Guía Practica 2

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	 CARRERA DE ELECTRICIDAD ACREDITADA INTERNACIONALMENTE 2025-2028
	GUÍA DE PRÁCTICA DE LABORATORIO	
	UTC-MT-CIYA-XXXXX-XXX	

LABORATORIO DE SIMULACIÓN
CARRERA DE ELECTRICIDAD

Carrera	Código de la asignatura	Nombre de la asignatura
ELECTRICIDAD	IELPE083	PROTECCIONES DE SISTEMASELÉCTRICOS DE POTENCIA

Práctica N°	Laboratorio:	XXXXXX	Duración (horas)
XXX	Nombre de la práctica:	Parametrización y comprobación de las funciones ANSI 50/51 del relé SEL-351	3

Integrantes:
Grupo XX: 7. XXXXXXXX 8. XXXXXXXX 9. XXXXXXXX

1	OBJETIVO DE LA PRÁCTICA
	Parametrizar las funciones de protección de sobrecorriente ANSI 50 y ANSI 51 del relé digital SEL-351 mediante el software acSELeator QuickSet, considerando la corriente nominal, la relación de transformación de los transformadores de corriente, la corriente de operación y las características tiempo-corriente, con la finalidad de comprobar la actuación del relé ante diferentes condiciones de sobrecorriente y evaluar su comportamiento de protección.

2	INTRODUCCIÓN
	La protección contra sobrecorriente constituye una de las funciones fundamentales utilizadas en los sistemas eléctricos de potencia para detectar corrientes superiores a los valores establecidos para la operación normal. Una condición de sobrecorriente puede producirse debido a cortocircuitos entre fases, fallas a tierra o condiciones de sobrecarga, por lo que es necesario establecer ajustes adecuados que permitan detectar la falla sin provocar operaciones innecesarias. En los relés digitales, las funciones ANSI 50 y ANSI 51 permiten establecer diferentes características de actuación. La función ANSI 50 corresponde a la protección de sobrecorriente instantánea, mientras que la ANSI 51 corresponde a la protección de sobrecorriente temporizada. En el SEL-351 estas funciones están disponibles para diferentes magnitudes, incluyendo corriente

de fase, corriente de tierra y secuencia negativa, dependiendo de la configuración y opciones del equipo.

La correcta parametrización de estas funciones requiere determinar previamente las condiciones de operación del sistema protegido, las corrientes nominales, las relaciones de transformación de los TC y las corrientes de cortocircuito. Asimismo, para la función ANSI 51 se debe seleccionar una característica tiempo-corriente apropiada y establecer el ajuste de pickup y el dial de tiempo de acuerdo con los criterios de coordinación.

El software acSELerator QuickSet facilita la configuración del SEL-351 mediante una interfaz gráfica que permite desarrollar los ajustes, modificar parámetros y transferir la configuración al dispositivo. La documentación del fabricante señala que QuickSet permite desarrollar ajustes fuera de línea y verificar automáticamente relaciones entre ajustes.

En esta práctica se realizará el cálculo de los parámetros de las funciones ANSI 50 y ANSI 51, su incorporación en acSELerator QuickSet y la comprobación de su comportamiento mediante ensayos de sobrecorriente. Los resultados obtenidos permitirán comparar los tiempos de operación esperados con los registrados durante la prueba.

2.1 Protección de sobrecorriente

La protección de sobrecorriente tiene como principio de funcionamiento la comparación de la corriente medida por el relé con un valor de operación previamente establecido.

Cuando:

$$I_{medida} > I_{pickup}$$

Donde

I_{medida} : Corriente medida por el relé (secundaria)

I_{pickup} : Corriente de arranque configurada

El elemento de protección puede iniciar su operación.

El comportamiento final dependerá de la función configurada, del valor de corriente y de los tiempos establecidos.

2.2 Función ANSI 50

La función ANSI 50 corresponde a un elemento de sobrecorriente instantánea.

Su principio de operación consiste en comparar la corriente medida con un valor de pickup. Cuando la corriente supera el umbral configurado, el elemento genera una señal de operación sin utilizar una curva inversa de tiempo como característica principal.

De forma simplificada:

$$I_{falla} \geq I_{50}$$

Donde

I_{falla} : corriente medida durante la falla.

I_{50} : corriente de pickup de la función ANSI 50.

El ajuste debe ser seleccionado de forma que la función opere para fallas que se encuentren dentro de la zona que se desea proteger y no opere para corrientes normales de operación o eventos transitorios que no correspondan a una falla.

2.3 Función ANSI 51

La función ANSI 51 corresponde a la protección de sobrecorriente temporizada.

A diferencia de la función 50, la actuación de ANSI 51 depende tanto de la magnitud de la corriente como del tiempo establecido mediante la característica tiempo-corriente.

Cuando:

$$I_{falla} \geq I_{pickup}$$

El elemento inicia su temporización y el tiempo de operación depende de la corriente y de la curva seleccionada.

2.4 Corriente de pickup

La corriente de pickup es el valor de corriente a partir del cual el elemento de sobrecorriente comienza a detectar una condición de operación.

Para realizar el ajuste se debe considerar:

- Corriente nominal del circuito.
- Corriente máxima de carga.
- Capacidad del conductor.
- Capacidad del transformador.
- Relación del TC.
- Corrientes de arranque o transitorias.
- Criterios de coordinación.

En términos generales, el ajuste debe cumplir:

$$I_{carga,max} < I_{pickup} < I_{falla,min}$$

Donde

$I_{carga,max}$: Corriente máxima de carga esperada en condiciones normales

I_{pickup} : Corriente de arranque configurada en el relé

$I_{falla,min}$: Corriente mínima de falla en la zona protegida

2.5 Relación de transformación del TC

Los transformadores de corriente permiten reducir la corriente del sistema a valores adecuados para los circuitos de medición y protección.

La relación del TC puede expresarse como:

$$RTC = \frac{I_{primario}}{I_{secundario}}$$

Donde

RTC: Relación de Transformación del TC

$I_{primario}$: Corriente nominal del primario del TC

$I_{secundario}$: Corriente nominal del secundario del TC

Esta relación debe ser considerada durante la parametrización del relé.

2.6 Corriente de pickup primaria y secundaria

Si el ajuste de pickup se encuentra expresado en amperios secundarios:

$$I_{pickup,sec} = \frac{I_{pickup,prim}}{RTC}$$

2.7 Curvas tiempo-corriente

La función ANSI 51 utiliza una característica tiempo-corriente para determinar el tiempo de actuación.

Dependiendo de la configuración disponible, pueden utilizarse características de tiempo inverso, muy inverso, extremadamente inverso u otras disponibles en el dispositivo.

En una característica inversa, un aumento de la corriente de falla produce generalmente una disminución del tiempo de operación.

Por lo tanto:

$$I_{falla} \uparrow \Rightarrow t_{operación} \downarrow$$

2.8 Dial de tiempo

El dial de tiempo permite modificar el tiempo de operación de la función temporizada.

Para una misma corriente de falla, un incremento del dial generalmente produce un incremento del tiempo de operación

Por ello, el ajuste debe permitir que el relé más cercano a la falla opere primero y que el dispositivo de respaldo opere posteriormente.

2.9 Coordinación de protecciones

La coordinación tiene como objetivo conseguir que, ante una falla, opere primero el dispositivo ubicado más próximo al punto de falla y que los dispositivos aguas arriba actúen como respaldo. El margen de coordinación puede determinarse mediante:

$$\Delta t = t_{\text{respaldo}} - t_{\text{principal}}$$

Δt : Margen de discriminación o tiempo de coordinación

t_{respaldo} : Tiempo de operación del relé de respaldo (aguas arriba)

$t_{\text{principal}}$: Tiempo de operación del relé principal (aguas abajo)

3 EQUIPOS, INSTRUMENTOS Y MATERIALES NECESARIOS

- Relé digital SEL-351.
- Computador.
- Software acSELerator QuickSet.
- Cable de comunicación compatible.
- Módulo de protecciones.
- Transformadores de corriente.
- Fuente de alimentación.
- Equipo de inyección secundaria, si se encuentra disponible.
- Cables de conexión.
- Manual del SEL-351.
- Datos del sistema eléctrico de estudio.

4 MEDIDAS DE SEGURIDAD

4.5 EQUIPO DE SEGURIDAD

Utilizar los elementos de protección personal establecidos por el laboratorio.

4.6 INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD:

- Verificar el estado del módulo antes de iniciar la práctica.
- Desenergizar el circuito antes de realizar modificaciones de cableado.
- Revisar las conexiones antes de aplicar corriente.
- No manipular terminales energizados.
- Verificar que el equipo de inyección se encuentre configurado correctamente antes de iniciar el ensayo.
- No superar los valores máximos permitidos por el relé o equipo de prueba.
- Comprobar la polaridad de las señales de corriente.
- No realizar cambios de configuración durante una prueba sin autorización del docente.

- Mantener el área de trabajo despejada.
- Desenergizar los equipos una vez finalizada la práctica.

5 TRABAJO PREPARATORIO

Revisión de conocimientos

1. La función ANSI 50 corresponde a:

- a) Sobretensión.
- b) Sobrecorriente instantánea.
- c) Sobrecorriente temporizada.
- d) Recierre automático.

Respuesta: **b**

2. La función ANSI 51 corresponde a:

- a) Sobrecorriente temporizada.
- b) Subtensión.
- c) Recierre.
- d) Diferencial.

Respuesta: **a**

3. ¿Qué representa el pickup de un relé de sobrecorriente?

- a) La tensión máxima del sistema.
- b) El valor de corriente a partir del cual el elemento comienza a operar.
- c) La corriente nominal del interruptor.
- d) El tiempo de apertura del interruptor.

Respuesta: **b**

4. Un TC de 400/5 A tiene una relación de transformación de:

a) 40

b) 60

c) 80

d) 100

Respuesta: **c**

5. ¿Qué ocurre generalmente con el tiempo de operación de una curva inversa cuando aumenta la corriente de falla?

a) Aumenta.

b) Disminuye.

c) Permanece siempre constante.

d) Se vuelve cero.

Respuesta: **b**

6. ¿Por qué es necesaria la coordinación entre dos relés de sobrecorriente?

Respuesta: **Selectividad, minimización de interrupciones, margen de discriminación, estabilidad del sistema, protección de equipos y cumplimiento normativo**

6 ACTIVIDADES PARA DESARROLLAR

La práctica se realizará mediante la parametrización de las funciones ANSI 50 y 51 del SEL-351 y la comprobación de su actuación ante diferentes valores de corriente.

6.1 Determinación de los datos del sistema

Antes de realizar la configuración se deberán recopilar los siguientes datos:

Tabla 7.1. Datos eléctricos del sistema

Parámetro	Valor	Unidad
-----------	-------	--------

Tensión nominal		kV
Potencia nominal		MVA
Corriente nominal		A
Corriente máxima de carga		A
Corriente mínima de falla		A
Corriente máxima de falla		A
TC primario		A
TC secundario		A
Relación del TC		
Frecuencia		Hz

6.2 Cálculo de la corriente nominal

Para un sistema trifásico, la corriente nominal puede calcularse mediante:

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3}V_{LL}}$$

Donde

I_{nom} : Corriente nominal de línea

S_{nom} : Potencia aparente nominal

V_{LL} : Tensión nominal entre líneas (line-to-line)

6.3 Determinación de la relación del TC

Registrar los datos del transformador de corriente utilizado.

$$RTC = \frac{I_{primario}}{I_{secundario}}$$

Tabla 7.2. Relación de transformación

Parámetro	Valor
Corriente primaria del TC	A
Corriente secundaria del TC	A
Relación de transformación	
Corriente nominal secundaria	A

6.4 Determinación del pickup de ANSI 51

Para la práctica se deberá seleccionar un valor de pickup superior a la corriente máxima de carga y compatible con la corriente mínima de falla.

El criterio utilizado deberá justificarse.

$$I_{pickup,prim} = I_{nom} * OLF$$

Posteriormente se transforma al lado secundario:

$$I_{pickup,sec} = \frac{I_{pickup,prim}}{RTC}$$

Tabla 6.3. Ajuste de ANSI 51

Parámetro	Valor calculado	Valor configurado
Pickup primario	A	A
Pickup secundario	A	A
Curva		
Dial de tiempo		
Tiempo de coordinación	s	s

6.5 Determinación del ajuste ANSI 50

La función ANSI 50 deberá configurarse considerando la corriente máxima de carga y el nivel de corriente de falla que se pretende detectar instantáneamente.

El estudiante deberá justificar el valor seleccionado:

$$I_{50} = I_{cc3\phi}$$

Tabla 7.4. Ajuste de ANSI 50

Parámetro	Valor
Pickup ANSI 50 primario	A
Pickup ANSI 50 secundario	A
Corriente máxima de carga	A
Corriente mínima de falla	A
Corriente máxima de falla	A

9.6 Configuración de ANSI 50 en acSELerator QuickSet

1. Abrir el proyecto correspondiente al SEL-351.
2. Establecer comunicación con el relé.
3. Acceder al grupo de ajustes correspondiente.

4. Identificar los elementos de sobrecorriente de fase.
5. Localizar el elemento instantáneo ANSI 50.
6. Introducir el valor de pickup calculado.
7. Revisar las unidades utilizadas por el software.
8. Verificar que el valor se encuentre dentro del rango permitido.
9. Configurar la lógica de disparo de acuerdo con el esquema del laboratorio.
10. Guardar los ajustes.
11. Transferir la configuración al relé.
12. Leer nuevamente los ajustes para comprobar que el valor fue almacenado.

6.7 Configuración de ANSI 51 en acSELerator QuickSet

1. Abrir el grupo de ajustes seleccionado.
2. Identificar los elementos de sobrecorriente temporizada.
3. Seleccionar la función de fase correspondiente a ANSI 51.
4. Introducir el valor de pickup calculado.
5. Seleccionar la curva tiempo-corriente.
6. Configurar el dial de tiempo.
7. Revisar la lógica de operación.
8. Verificar las condiciones de disparo.
9. Guardar la configuración.
10. Transferir los ajustes al SEL-351.
11. Leer nuevamente la configuración.
12. Comprobar que los parámetros coincidan con los valores calculados.

6.8 Ensayo de la función ANSI 50

El ensayo deberá realizarse mediante una fuente de inyección secundaria o mediante el sistema de prueba disponible en el laboratorio.

Aplicar progresivamente diferentes valores de corriente y registrar la respuesta del relé.

Tabla 6.5. Comprobación de ANSI 50

Ensayo	Corriente aplicada [Asec]	Pickup [Asec]	Operación esperada	Operación obtenida	Resultado
1			No opera		
2			No opera		
3			Opera		
4			Opera		
5			Opera		

Se deberá identificar el valor de corriente a partir del cual el elemento comienza a operar.

6.9 Ensayo de la función ANSI 51

Para comprobar la función temporizada se deberán aplicar diferentes valores de corriente superiores al pickup.

Para cada ensayo registrar:

- Corriente aplicada.
- Corriente secundaria.
- Tiempo esperado.
- Tiempo medido.
- Diferencia.
- Error relativo.

Tabla 6.6. Comprobación de ANSI 51

Ensayo	I aplicada [Asec]	I/Ipickup	Tiempo calculado [s]	Tiempo medido [s]	Error [%]
1					
2					
3					
4					
5					

6.10 Cálculo del error

Para comparar el tiempo teórico con el tiempo medido se utilizará:

$$Error(\%) = \frac{|t_{medido} - t_{calculado}|}{t_{calculado}} * 100$$

Donde

t_{medido} : Tiempo de operación medido experimentalmente (segundos)

$t_{calculado}$: Tiempo de operación calculado teóricamente (segundos)

6.11 Comprobación de la coordinación

Cuando se disponga de dos niveles de protección, se deberá verificar la coordinación entre el relé principal y el relé de respaldo.

El margen se calculará mediante:

$$\Delta t = t_{respaldo} - t_{principal}$$

Donde:

Δt : Margen de discriminación o tiempo de coordinación (segundos).

$t_{respaldo}$: Tiempo de operación del relé de respaldo (aguas arriba).

$t_{principal}$: Tiempo de operación del relé principal (aguas abajo, más cercano a la falla).

Tipo de falla	Tiempo relé principal [s]	Tiempo relé respaldo [s]	Δt [s]	¿Coordina?
Trifásica				
Bifásica				
Monofásica				
Bifásica a tierra				

7	REFERENCIAS
[1] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL-351 Protection System, manual de instrucciones y documentación técnica del fabricante. [2] Schweitzer Engineering Laboratories, acSELeRator QuickSet, documentación de configuración de dispositivos SEL. [3] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, <i>Power System Relaying</i>, 4th ed. John Wiley & Sons, 2014. [4] J. L. Blackburn and T. J. Domin, <i>Protective Relaying: Principles and Applications</i>, 4th ed. CRC Press, 2014. [5] J. M. Gers and E. J. Holmes, <i>Protection of Electricity Distribution Networks</i>, 3rd ed. Institution of Engineering and Technology, 2011.	