

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Valparaíso – Chile



“IMPLEMENTACIÓN DE UN PAÑO A ESCALA DE UNA
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA PARA LA CONEXIÓN, AJUSTES Y
PRUEBAS DE PROTECCIONES DIGITALES EN UN SISTEMA
ELÉCTRICO REDUCIDO”

Alfonso Mendieta León

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

Profesor Guía

Esteban Pulido

Profesor Correferente

Salvador Luque

30 de Mayo del 2024

Resumen

Actualmente en la UTFSM, existen asignaturas para los estudiantes de Ingeniería Eléctrica que enseñan protecciones eléctricas desde un enfoque teórico hasta abarcar programas de simulación como DIgSILENT, permitiendo modelar redes eléctricas y efectuar análisis de cortocircuito para posteriormente realizar estudios de coordinación de protecciones. Sin embargo, en la UTFSM, aún no existe un Laboratorio de Protecciones Eléctricas que permita al estudiante de esta rama de la ingeniería consolidar sus conocimientos en la práctica y poder interactuar con dispositivos de protección eléctrica reales. Este trabajo de memoria aporta una solución a esta situación mediante un primer equipo para la Universidad que permite realizar experiencias básicas de un laboratorio de protecciones eléctricas. Este equipo consiste en una unidad modular (rack portátil) que representa un paño eléctrico a escala para la conexión de una línea de transmisión. Está conformado por los elementos mínimos necesarios que hacen posible a cualquier protección real realizar lecturas de la red y operar, como lo son interruptores, desconectadores, transformadores de corriente y transformadores de potencial. El equipo se dividió en tres zonas: zona de componentes, zona de circuitos (primario y secundario) y zona para el montaje de protecciones eléctricas. Su circuito primario está compuesto por cables de 6 [mm²] de sección, con capacidad de 33 [A]/750 [V], por otro lado, el circuito secundario está compuesto por cables de 2.5 [mm²] de sección, con capacidad de 20 [A]/750 [V]. Se ocuparon transformadores de corriente cuya razón de transformación es de 50/5 [A] y transformadores de potencial cuya razón de transformación es de 220/110 [V]. Se ocuparon relés de estado sólido para cumplir la función de interruptores (52), los que pueden interrumpir corrientes de hasta 80 [A]. También se ocuparon interruptores termomagnéticos de 40 [A] para cumplir la función de desconectadores. Los costos asociados al proyecto ascendieron a \$1,153,890 sin considerar la protección integrada al equipo, la que cuesta aproximadamente \$8,773,595.

Además, en este documento se describe cómo operar y ajustar una protección digital SEL 321-5, diseñando también la red eléctrica a escala sobre la que se realizan distintos ensayos de cortocircuito reales que permiten evaluar el desempeño de los ajustes de la protección y el funcionamiento del equipo.

Abstract

Currently at the UTFSM, there are courses for Electrical Engineering students that teach electrical protection from a theoretical approach to include simulation programs such as DIGSILENT, allowing modeling of electrical networks and short circuit analysis to subsequently perform protection coordination studies. However, there is still no electrical protection laboratory at the UTFSM that allows students of this branch of engineering to consolidate their knowledge in practice and to be able to interact with real protection devices. This memory work provides a solution to this situation by means of a first equipment for the university that allows to carry out basic experiences of an electrical protection laboratory. This equipment consists of a modular unit (portable rack) that represents an electrical panel as it is made up of the minimum necessary elements that make it possible for any protection to make readings of the network and operate, such as switches, current transformers, and potential transformers. The equipment was divided into three areas: components area, circuit area (primary and secondary) and area for the assembly of electrical protections. Its primary circuit is composed of 6 [mm²] cross-section cables, with a capacity of 33 [A]/750 [V]; on the other hand, the secondary circuit is composed of 2.5 [mm²] cross-section cables, with a capacity of 20 [A]/750 [V]. Current transformers with a transformation ratio of 50/5 [A] and potential transformers with a transformation ratio of 220/110 [V] were used. Solid state relays were used as circuit breakers (52), which can interrupt currents up to 80 [A]. Thermomagnetic switches of 40 [A] were also used as disconnectors. The costs associated with the project amounted to \$1,153,890 without considering the integrated protection of the equipment, which costs approximately \$8,773,595.

In addition, this document describes how to operate and adjust a SEL 321-5 digital protection, designing also the scaled electrical network on which different real short-circuit tests are performed to evaluate the performance of the protection settings and the operation of the equipment.

Agradecimientos

Agradecer a Dios por las oportunidades que me ha dado y por la familia que escogió para mí. Sin su ayuda este logro no sería posible.

A mi familia que siempre me ha apoyado y ha sido paciente conmigo. Este proceso ha sido mucho más llevadero a su lado.

A mi profesor guía, Esteban Pulido, por acogerme como su estudiante y orientarme en cada momento con mucha dedicación y perseverancia.

A Matías Pérez, Francisco Escobar y Dionel Uribe por su ayuda en los temas de ajuste y funcionamiento de una protección digital.

Al personal de pañol de electricidad: Cristian Andrade, Claudio Ramos, Cristian Videla, Jaime Aravena y Carlos Minay. Por su ayuda y buena disposición en aspectos prácticos de este trabajo.

A mis amigos. Su amistad fue una constante en todo mi período universitario y una gran fuente de motivación y alegría.

A mi polola, por su compañía y apoyo.

Índice de contenidos

Resumen	1
Abstract.....	2
Agradecimientos	3
1. Introducción	20
1.1. Contexto	20
1.2. Presentación del problema	20
1.3. Propuesta de trabajo.....	21
1.4. Objetivos.....	22
1.4.1. General.....	22
1.4.2. Específicos.....	22
2. Marco Teórico	23
2.1. Definición y elementos de un paño eléctrico	23
2.2. Características y funciones de las protecciones eléctricas.....	24
2.2.1. Función de protección de sobrecorriente (50/51/50N/51N).....	25
2.2.2. Función de protección de distancia (21/21N)	28
3. Diseño y construcción del paño eléctrico a escala	31
3.1. Consideraciones previas	31
3.1.1. Requisitos de diseño.....	31
3.1.2. Lugar de uso y restricciones.....	32
3.2. Diseño del rack	32
3.2.1. Aspectos generales del diseño	33
3.2.2. Diagramas Circuitales	35
3.3.3. Partes y Piezas	36

3.3.4. Conexiones	45
3.3.5. Fotos del paño eléctrico a escala	49
3.3. Diseño del generador de fallas	51
3.3.1. Elementos del generador de fallas	52
3.4. Costos de equipos, materiales y construcción	53
4. Diseño del circuito de pruebas	54
4.1. Aspectos considerados	54
4.1.1. Funciones de protección a ajustar	54
4.1.2. Restricciones de sensibilidad de la protección	54
4.1.3. Tipo de circuito a realizar.....	55
4.1.4. Restricciones de laboratorio y elementos disponibles.....	55
4.2. Diseño del circuito de pruebas.	57
4.2.1. Nivel de tensión escogido	57
4.2.2. Elección de los parámetros de líneas de secuencia positiva.....	57
4.2.3. Obtención de parámetros de secuencia cero y conductor neutro	60
4.2.4. Elección de la carga.....	61
4.2.5. Valores escogidos.....	62
4.3. Corriente de carga y niveles de cortocircuito	63
4.3.1. Ubicaciones seleccionadas para los cortocircuitos en la línea	64
4.4. Elementos circuitales escogidos para el circuito de prueba.	65
5. Configuración y uso de la protección digital SEL 321-5	68
5.1. Ajustes de las funciones de protección	68
5.1.1. Ajustes función de protección de sobrecorriente	70
5.1.2. Ajustes función de protección de distancia (21/21N)	71
5.2. Dispositivo de protección SEL321-5	73

5.2.1. Especificaciones generales SEL321-5	74
5.3. Uso del software AcSELERator QuickSET	74
5.3.1. Descarga del software	74
5.3.2. Interfaz de usuario del software AcSELERator QuickSET	75
5.3.3. Estableciendo comunicación con la protección	76
5.3.4. Claves de acceso de la protección SEL321-5.....	77
5.3.5. Ingresando la fecha y hora a la protección y por qué es importante	77
5.3.7. Abrir y cargar ajustes.....	78
5.3.8. Tipos de Grupos, ajustes y comandos.	82
5.4. Reporte de eventos y obtención de oscilografías.....	87
6. Pruebas y discusión de resultados	92
6.1. Procedimiento experimental	92
6.2. Pruebas para evaluar el funcionamiento de los transformadores de medida, de los relés de estado sólido y de la protección.....	93
6.2.1. Pruebas con Variac	93
6.2.2. Pruebas con la fuente alterna de tensión programable, Chroma.....	98
6.3. Ensayos de cortocircuito realizados	104
6.4. Resultados de los ensayos de cortocircuito	106
6.4.1. Cortocircuitos al 100% de la línea.....	106
6.4.2. Cortocircuitos al 85% de la línea.....	107
6.4.3. Cortocircuitos al 57% de la línea.....	109
6.5. Análisis de resultados	109
6.5.1. Cálculo de <i>loops</i> para cortocircuito trifásico al 57% de la línea.	110
6.5.2. Cálculo de <i>loops</i> para cortocircuito monofásico con resistencia de falla de 30 $[\Omega]$ al 57% de la línea.	113
6.5.3. Discusión de resultados	116

6.6.	Conclusiones.....	119
6.6.1.	Conclusiones generales.....	119
6.6.2.	Cumplimiento de objetivos.....	122
6.6.3.	Trabajo futuro	122
	Referencias	124
	Anexos	126
	Anexo A: Detalle del costo de equipos y materiales	126
A.1.	Costos del rack y componentes asociados al paño eléctrico a escala.....	126
A.2.	Costos del generador de fallas.....	129
	Anexo B: Datos de líneas de 220 [kV] utilizados.....	130
B.1.	Parámetros de secuencia positiva y secuencia cero.....	130
B.2.	Niveles de corriente de carga y cortocircuito en líneas de 220 [kV].....	131
	Anexo C: Montaje experimental.....	133
C.1.	Montaje experimental para ensayos de cortocircuito al 100% de la línea.....	133
C.2.	Montaje experimental para el resto de los ensayos de cortocircuito (85% y 57% de la línea).....	135
	Anexo D: Gráficos de tensión y corriente de los ensayos de cortocircuito.	137
D.1.	Fallas al 100% de la línea	137
D.1.1.	Cortocircuito trifásico aislado	137
D.1.2.	Cortocircuito bifásico aislado, fases b y c.....	138
D.1.3.	Cortocircuito bifásico a tierra, fases b y c	139
D.1.4.	Cortocircuito monofásico a tierra, fase a.....	140
D.1.5.	Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a.....	141
D.2.	Fallas al 85% de la línea	142
D.2.1.	Cortocircuito trifásico aislado	142

D.2.2. Cortocircuito monofásico a tierra, fase a.....	143
D.2.3. Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a	144
D.3. Fallas al 57% de la línea	145
D.3.1 Cortocircuito trifásico aislado	145
D.3.2. Cortocircuito monofásico a tierra, fase a.....	146
D.3.3 Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a	147
Anexo E: Hoja de datos del paño eléctrico a escala	149

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1:</i> Componentes básicos de un paño eléctrico.....	23
<i>Figura 2.2:</i> Curvas de sobrecorriente estándar IEC y U.S.....	26
<i>Figura 2.3:</i> Tipos de Diagramas R-X.....	28
<i>Figura 3.1:</i> Vista del diseño final del Panel Frontal del Paño Eléctrico a escala.	32
<i>Figura 3.2:</i> Vista posterior del paño eléctrico a escala.	33
<i>Figura 3.3:</i> Medidas del gabinete de piso.	34
<i>Figura 3.4:</i> Diagrama circuital del paño eléctrico a escala.	35
<i>Figura 3.5:</i> Circuito de control del disparo de los interruptores (52).	36
<i>Figura 3.6:</i> Gabinete de piso.	37
<i>Figura 3.7:</i> Bandeja rack.....	37
<i>Figura 3.8:</i> Riel Din ranurado.....	37
<i>Figura 3.9:</i> Zapatilla eléctrica.	37
<i>Figura 3.10:</i> Cable 6mm ²	38
<i>Figura 3.11:</i> Placa de acrílico	38
<i>Figura 3.13:</i> Conectores hembra tipo banana.	39
<i>Figura 3.14:</i> Terminales tipo punta y tipo paleta.....	39
<i>Figura 3.15:</i> Disyuntor monopolar.	40
<i>Figura 3.16:</i> Calota riel DIN.....	40
<i>Figura 3.17:</i> Relé estado sólido.	40
<i>Figura 3.18:</i> Transformador de corriente de medida (TC).	41
<i>Figura 3.19:</i> Transformador de potencial (TP).	41
<i>Figura 3.20:</i> Fuente de tensión continua.....	42
<i>Figura 3.21:</i> Repartidor tetrapolar de 7 puntos.	42
<i>Figura 3.22:</i> Repartidor tetrapolar de 11 puntos.....	42

<i>Figura 3.23:</i> Bornera de paso de libre mantención	42
<i>Figura 3.24:</i> Bornera ST 2.5.	43
<i>Figura 3.25:</i> Borne conexión ST 4-MT.	43
<i>Figura 3.26:</i> Borne URTK S-BEN10.	43
<i>Figura 3.27:</i> Bornera UTRK/S.....	44
<i>Figura 3.28:</i> Bornera UTME 6.	44
<i>Figura 3.29:</i> Eslabón puenteador SB-ME-2-8.	44
<i>Figura 3.30:</i> Tope para riel DIN.	44
<i>Figura 3.31:</i> Peine de unión para bornera.	45
<i>Figura 3.32:</i> Adaptador de prueba.	45
<i>Figura 3.33:</i> Cinta adhesiva de etiquetado.....	45
<i>Figura 3.34:</i> Diseño de las conexiones del circuito primario.	46
<i>Figura 3.35:</i> Disposición y rotulación real del cableado del circuito primario en el rack. ..	46
<i>Figura 3.36:</i> Diseño de las conexiones en el circuito secundario.	48
<i>Figura 3.37:</i> Accesorios borne UTME6.....	49
<i>Figura 3.38:</i> Eslabón Puenteador.	49
<i>Figura 3.39:</i> Vista frontal del paño eléctrico a escala.....	50
<i>Figura 3.40:</i> Vista posterior del paño eléctrico a escala.	50
<i>Figura 3.41:</i> Vista lateral del paño eléctrico a escala.	51
<i>Figura 3.42:</i> Diseño del generador de fallas.	51
<i>Figura 3.43:</i> Interruptor automático 3P	52
<i>Figura 3.44:</i> Cable THHN.	52
<i>Figura 3.45:</i> Caja estanca.....	52
<i>Figura 3.46:</i> Interruptor balancín.	53
<i>Figura 4.1:</i> Circuito de un sistema de transmisión radial.	55

<i>Figura 4.2:</i> Inductancia disponible en laboratorio.	55
<i>Figura 4.3:</i> Resistencia de alambre enrollado.	56
<i>Figura 4.4:</i> Bornera.	56
<i>Figura 4.5:</i> Interruptor trifásico.	56
<i>Figura 4.6:</i> Chroma.	56
<i>Figura 4.7:</i> Circuito de prueba con conductor neutro.	60
<i>Figura 4.8:</i> Circuito de pruebas diseñado.	63
<i>Figura 4.9:</i> Bornes de las inductancias presentes en laboratorio.	64
<i>Figura 4.10 :</i> Circuito de prueba con los elementos seleccionados.	67
<i>Figura 5.1:</i> Resumen de ajustes primarios que se ocuparon en la protección.	69
<i>Figura 5.2:</i> Protección SEL321-5.	73
<i>Figura 5.3:</i> Panel frontal de la protección SEL321-5.	73
<i>Figura 5.4:</i> Panel posterior de la protección SEL321-5.	73
<i>Figura 5.5:</i> Interfaz del software AcSELerator QuickSET.	75
<i>Figura 5.6:</i> Parámetros de comunicación.	76
<i>Figura 5.7:</i> Ingresando fecha y hora en la protección.	78
<i>Figura 5.8:</i> Archivos de ajustes con extensión “.rdb”.	79
<i>Figura 5.9:</i> Distintos ajustes guardados en un solo archivo de extensión “.rdb”.	79
<i>Figura 5.10:</i> Grupos de ajustes existentes en la protección.	80
<i>Figura 5.11:</i> Planilla de ajustes de la protección.	80
<i>Figura 5.12:</i> Mensaje de error que indica que el “Grupo 1” de ajustes no se transmitió. ...	81
<i>Figura 5.13:</i> Ventana de terminal: ajustes transmitidos exitosamente.	82
<i>Figura 5.14:</i> Comando OPEN.	87
<i>Figura 5.15:</i> Obtener archivo de eventos.	88
<i>Figura 5.16:</i> Historial de eventos.	89

<i>Figura 5.17:</i> Oscilografía de 4 muestras por ciclo vista mediante el software SynchroWAVE Event.	90
<i>Figura 5.18:</i> Oscilografía de 16 muestras por ciclo vista mediante el software SynchroWAVE Event.	91
<i>Figura 6.1:</i> Conexiones para el caso 1, sin 52 conectados.....	94
<i>Figura 6.2:</i> Conexiones para el caso 2, con 52 conectados.	95
<i>Figura 6.3:</i> Tensiones primarias y secundarias de cada fase para el caso 1.	95
<i>Figura 6.4:</i> Corrientes primarias y secundarias de cada fase para el caso 1.	96
<i>Figura 6.5:</i> Corriente en la fase A para el caso 2, con 3.9 [V] de alimentación.	97
<i>Figura 6.6:</i> Caso 2. Corriente y tensión en la fase A una vez que se supera la tensión interna de los relés de estado sólido.	98
<i>Figura 6.7:</i> Circuito de pruebas con la Chroma.	99
<i>Figura 6.8:</i> Tensión y corriente de la fase A, caso sin 52 conectados para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	99
<i>Figura 6.9:</i> Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 10 [V] en la fuente para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	100
<i>Figura 6.10:</i> Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 60 [V] en la fuente para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	100
<i>Figura 6.11:</i> Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 120 [V] en la fuente para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	101
<i>Figura 6.12:</i> Tensiones secundarias en los TTPP de línea y de barra cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	102
<i>Figura 6.13:</i> Corrientes primarias de la red cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	102
<i>Figura 6.14:</i> Primera oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la <i>Figura 6.7</i>	103

<i>Figura 6.15:</i> Segunda oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la Figura 6.7.....	103
<i>Figura 6.16:</i> Tercera oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la Figura 6.7.....	104
<i>Figura 6.17:</i> Montaje experimental del circuito de pruebas diseñado en el capítulo 4.	105
<i>Figura 6.18:</i> Salidas lógicas de la protección SEL-321-5 durante la falla monofásica a tierra con R_f al 85% de la línea.	108
<i>Figura 6.19:</i> Oscilografías registradas por los osciloscopios (primer y tercer gráfico) y por la protección (segundo y cuarto gráfico) para la falla trifásica al 57% de la línea.....	111
<i>Figura 6.20:</i> Ubicación de los <i>loops</i> en el diagrama R-X de la protección durante un cortocircuito trifásico al 57% de la línea.	113
<i>Figura 6.21:</i> Oscilografías registradas por los osciloscopios (primer y tercer gráfico) y por la protección (segundo y cuarto gráfico) para la falla monofásica con $R_f=30[\Omega]$ al 57% de la línea.	114
<i>Figura 6.22:</i> Ubicación de los <i>loops</i> en el diagrama R-X de la protección durante un cortocircuito monofásico con $R_f=30[\Omega]$ al 57% de la línea.....	116
<i>Figura C.0.1:</i> Montaje experimental para cortocircuitos al 100% de la línea.	134
<i>Figura C.0.2:</i> Montaje experimental para cortocircuitos a tierra al 85% y 57% de la línea.	136
<i>Figura D.0.3:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 100% de la línea.	137
<i>Figura D.0.4:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 100% de la línea.	138
<i>Figura D.0.5:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico aislado, fases b y c, al 100% de la línea.....	138
<i>Figura D.0.6:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico aislado, fases b y c, al 100% de la línea.....	139

<i>Figura D.0.7:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico a tierra, fases b y c, al 100% de la línea.....	139
<i>Figura D.0.8:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico a tierra, fases b y c, al 100% de la línea.....	140
<i>Figura D.0.9:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 100% de la línea.	140
<i>Figura D.0.10:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 100% de la línea.	141
<i>Figura D.0.11:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 100% de la línea.	141
<i>Figura D.0.12:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 100% de la línea.	142
<i>Figura D.0.13:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 85% de la línea.	142
<i>Figura D.0.14:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 85% de la línea.....	143
<i>Figura D.0.15:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 85% de la línea.	143
<i>Figura D.0.16:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 85% de la línea.	144
<i>Figura D.0.17:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 85% de la línea.	144
<i>Figura D.0.18:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 85% de la línea.	145
<i>Figura D.0.19:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para para cortocircuito trifásico aislado al 57% de la línea.	145
<i>Figura D.0.20:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para para cortocircuito trifásico aislado al 57% de la línea.	146

<i>Figura D.0.21:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para para cortocircuito monofásico en la fase A, al 57% de la línea.....	146
<i>Figura D.0.22:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para para cortocircuito monofásico en la fase A, al 57% de la línea.....	147
<i>Figura D.0.23:</i> Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 57% de la línea.	147
<i>Figura D.0.24:</i> Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 57% de la línea.	148
<i>Figura E.0.25:</i> Principales componentes del paño eléctrico a escala	149

Índice de Tablas

<i>Tabla 1:</i> Ecuaciones de las curvas de sobrecorriente de la protección SEL321-5.	26
<i>Tabla 2:</i> Loops fase-fase y fase-tierra.	30
<i>Tabla 3:</i> Valores de corriente y tensión de cada laboratorio.	32
<i>Tabla 4:</i> Equivalencia de rotulaciones en cableado del circuito secundario.	47
<i>Tabla 5:</i> Resumen de los costos totales del proyecto.	53
<i>Tabla 6:</i> Valores promedio de parámetros de línea de secuencia positiva según tramo.	57
<i>Tabla 7:</i> Valores promedio parámetros de línea según criterio tensión (DIgSILENT 2015).	58
<i>Tabla 9:</i> Resumen parámetros de línea	62
<i>Tabla 10:</i> NCC del circuito de pruebas para distintas fallas simuladas con DIgSILENT. ..	63
<i>Tabla 11:</i> Ubicaciones de falla a lo largo de la línea e impedancia correspondiente de la línea hasta el punto de falla.	64
<i>Tabla 12:</i> Ubicaciones de falla a lo largo del conductor neutro e impedancia correspondiente del conductor neutro hasta el punto de falla.	65
<i>Tabla 13:</i> Número de inductancias por fase.	65
<i>Tabla 14:</i> Resistencias variables a ocupar en los ensayos.	66
<i>Tabla 15:</i> Detalle de las resistencias variables seleccionadas.	66
<i>Tabla 16:</i> Ajustes función 51	70
<i>Tabla 17:</i> Ajustes función 51N.	71
<i>Tabla 18:</i> Ajustes función 21.	72
<i>Tabla 19:</i> Ajustes función 21N	72
<i>Tabla 20:</i> Claves de acceso para cada nivel de la protección SEL321-5.	77
<i>Tabla 21:</i> Tipos de reportes de eventos.	89
<i>Tabla 22:</i> Tipos de cortocircuitos a realizar para cada ubicación de falla en la línea.	104

<i>Tabla 23:</i> Resultados de ensayos de cortocircuitos al 100 %.	106
<i>Tabla 24:</i> Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 100% de la línea.	107
<i>Tabla 25:</i> Resultados de ensayos de cortocircuito al 85%.	107
<i>Tabla 26:</i> Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 85% de la línea.	108
<i>Tabla 27:</i> Resultados de ensayos de cortocircuito al 57%.	109
<i>Tabla 28:</i> Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 57% de la línea.	109
<i>Tabla 29:</i> Fasores obtenidos de las oscilografías mostradas en la <i>Figura 6.19</i> .	112
<i>Tabla 30:</i> <i>Loops</i> obtenidos por la protección vs los calculados según mediciones para el caso de falla trifásica al 57% de la línea.	112
<i>Tabla 31:</i> Fasores obtenidos de las oscilografías mostradas en la <i>Figura 6.21</i> .	115
<i>Tabla 32:</i> <i>Loops</i> obtenidos por la protección vs los calculados según mediciones para el caso de falla monofásica con $R_f=30\ [\Omega]$ al 57% de la línea.	115
<i>Tabla 33:</i> Costos de los materiales y componentes del paño eléctrico a escala.	129
<i>Tabla 34:</i> Costos del generador de fallas.	129
<i>Tabla 35:</i> Datos de líneas de 220 [kV] mediante DIGSILENT2015.	131
<i>Tabla 36:</i> Niveles de corriente de carga y cortocircuito en líneas de 220 [kV].	132
<i>Tabla 37:</i> Especificaciones de los principales componentes del paño eléctrico a escala.	149

Abreviaturas y Definiciones

TTCC:	Transformadores de medida de corriente
TC:	Transformador de corriente
TTPP:	Transformadores de medida de potencial
TP:	Transformador de potencial
51:	Función de protección de sobrecorriente de fase
51N:	Función de protección de sobrecorriente residual
21:	Función de protección de distancia fase-fase
21N:	Función de protección de distancia residual
52:	Interruptor
89:	Desconectador
U:	Unidad de rack
NA:	Normalmente abierto
NC:	Normalmente cerrado
O/C:	Corriente de supervisión
SEN:	Sistema Eléctrico Nacional
I_{pkp} :	Corriente Pickup
LL	Largo de línea

1. Introducción

1.1. Contexto

Actualmente en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), los estudiantes de la rama de Ingeniería Eléctrica cursan diversas asignaturas en donde se enseñan los contenidos de manera teórica, pero también se complementan de manera práctica mediante actividades de laboratorio. Estas experiencias prácticas permiten que el alumno consolide aún más sus conocimientos al aplicar lo aprendido en clases a una situación real. Si bien las carreras de ingeniería eléctrica poseen laboratorios en las áreas de electrotecnia, máquinas eléctricas y alta tensión, aún no existe en la universidad un laboratorio que abarque el área de protecciones eléctricas.

1.2. Presentación del problema

Las protecciones eléctricas son un área de estudio indispensable de la ingeniería eléctrica al ser dispositivos que están presentes en todo el sistema de potencia de cualquier región o país y que protegen los diversos equipos presentes en la red ante fallas eléctricas y, por tanto, el suministro eléctrico a los consumos. Es por esto que la UTFSM cuenta con asignaturas que enseñan protecciones eléctricas desde un enfoque teórico hasta abarcar programas de simulación como DIGSILENT y que permiten modelar redes eléctricas y efectuar análisis de cortocircuito para posteriormente realizar estudios de coordinación de protecciones. Sin embargo, para cualquier estudiante interesado en profundizar en esta área de estudio, se hace necesario que la universidad cuente con un Laboratorio de protecciones eléctricas orientado a la interacción del estudiante con estos dispositivos y los elementos básicos de su manejo, aspectos aún no cubiertos por las asignaturas que se imparten actualmente. No obstante, la solución anterior de crear un Laboratorio de protecciones eléctricas no es una opción viable al corto plazo ya que implica recursos económicos importantes para la universidad y un nivel de planificación académico y docente considerable.

1.3. Propuesta de trabajo

Considerando lo expuesto anteriormente, se propuso construir un equipo que permita a los estudiantes de la rama de ingeniería eléctrica interactuar de manera práctica con protecciones digitales, pero que al mismo tiempo pueda conectarse a las instalaciones ya existentes en la universidad. Así, los estudiantes podrían reforzar su aprendizaje en el área de protecciones eléctricas mediante actividades prácticas y, por otro lado, no se tendrían que hacer los grandes esfuerzos económicos ni académicos relacionados con la creación de un nuevo laboratorio. Para lograr lo anterior, este equipo debe poder integrarse a una red eléctrica reducida y cumplir las funciones de un paño eléctrico a escala al contener todos los elementos mínimos necesarios que permitan a cualquier protección realizar lecturas de la red mediante transformadores de corriente y transformadores de potencial y operar sobre los interruptores. Esto permitirá a los estudiantes tener actividades de laboratorio que consistan en realizar pruebas de funcionamiento de cualquier protección a través de ensayos de falla reales en una red reducida.

En este trabajo se presenta el diseño de un paño eléctrico a escala, así como las pruebas que permiten evaluar el correcto funcionamiento de sus distintos componentes y el uso de una protección digital real. En el siguiente capítulo se expone el marco teórico de este trabajo, que consiste en describir los elementos de un paño eléctrico y las funciones básicas de protección de una protección eléctrica. El capítulo 3 muestra el diseño del paño eléctrico a escala, sus partes y piezas y los costos asociados a la adquisición de equipos para su construcción. El capítulo 4 trata del diseño del circuito de pruebas escogido para probar el desempeño del sistema de protección y los ajustes del mismo. El capítulo 5 presenta la configuración y uso de la protección digital SEL-321-5, así como el uso del software AcSELerator QuickSET, programa necesario para comunicarse con cualquier protección de la marca SEL. Finalmente, en el capítulo 6, se discuten las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones del trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Implementar un paño a escala de una subestación eléctrica que pueda integrarse a un sistema eléctrico a escala para conectar, ajustar y probar protecciones digitales.

1.4.2. Específicos

- Diseñar los componentes de un paño de una subestación eléctrica y de un sistema eléctrico reducido a escala.
- Diseñar y construir un rack que contenga el paño a escala y permita su interconexión con un sistema eléctrico reducido donde se puedan efectuar diferentes tipos de cortocircuito.
- Especificar y cargar los ajustes de la protección digital, que forma parte del paño, considerando algunas funciones básicas de protección.
- Efectuar cortocircuitos en el sistema eléctrico reducido para evaluar el comportamiento de la protección digital.

2. Marco Teórico

2.1. Definición y elementos de un paño eléctrico

La *Figura 2.1* muestra los elementos básicos de un paño eléctrico, que se define como el conjunto de equipos que permite conectar un elemento serie o paralelo a una barra y, generalmente, está compuesto por interruptores, desconectores y transformadores de corriente y potencial, entre otros [1].

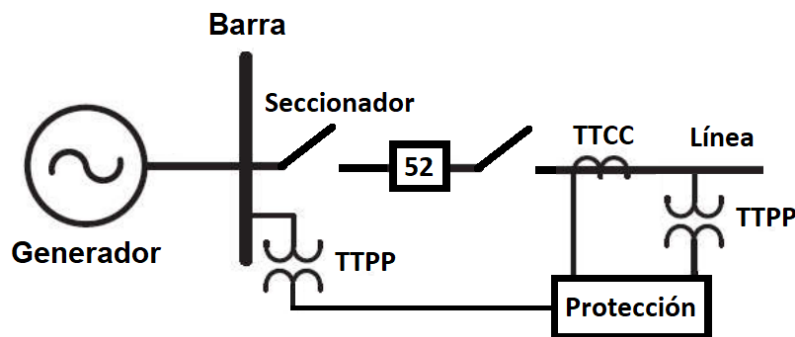


Figura 2.1: Componentes básicos de un paño eléctrico.

Como ejemplo, en el caso de la *Figura 2.1*, se puede suponer que la línea es un elemento serie recién agregado a un punto de conexión o “Barra” para transmitir la energía del generador hacia un nuevo sistema. En este caso, además de los equipos del paño antes mencionados, el equipo de protección digital también puede verse como parte del paño eléctrico ya que es un elemento esencial en la seguridad y funcionamiento de la línea de transmisión y, por lo tanto, garantiza su operación en la red.

En base a lo expuesto anteriormente, cuando existe un paño eléctrico, implica “algo” que se quiere conectar a “otra cosa” mediante un punto de conexión o barra. Dependiendo de lo que se quiera conectar, el paño eléctrico va a contar con mínimo dos terminales, uno orientado hacia la barra y otro hacia el objeto que se desea conectar. En el caso del ejemplo, el paño eléctrico tendría un terminal orientado a la barra y otro hacia la línea de transmisión.

A continuación, se definen los elementos de un paño eléctrico que tendrán relevancia en este trabajo.

1. **Relé de Protección:** Dispositivo físico o elemento funcional de éste, encargado de detectar un determinado tipo de falla o condición anormal en una instalación eléctrica mediante el análisis y procesamiento de variables medidas en ella y con la capacidad de decidir un cambio de estado en su salida (interruptor y/o señal de comunicación) según un criterio preestablecido [1].
2. **Barra:** punto de conexión o punto de arranque en una línea de transmisión, en el cual se interconectan diversas instalaciones eléctricas [1].
3. **Transformadores de medida:** corresponden a transformadores de potencial y corriente, los cuales se encargan de reducir las magnitudes de las variables eléctricas presentes en el circuito primario, en una proporción dada por su razón de transformación, para que puedan ser medidas por equipos de menor capacidad y que se encuentran conectados a sus devanados secundarios.
4. **Interruptores:** son los elementos encargados de abrir sus contactos para interrumpir la circulación de corriente tanto en una situación de falla como en operación normal. Generalmente son comandados por una señal de tensión dada por un sistema de protección o control remoto. Su código ANSI es 52.
5. **Desconectores:** elementos que se utilizan para abrir o cerrar los extremos de cada interruptor de una línea durante operaciones de mantenimiento de la red. Aportan con una ayuda visual para verificar la desenergización del terminal de línea en mantenimiento y no sirven para interrumpir corrientes de carga ni de cortocircuitos. Su código ANSI es 89.

2.2. Características y funciones de las protecciones eléctricas

Las protecciones eléctricas son elementos indispensables en cualquier sistema eléctrico ya que protegen a sus distintos componentes de daños provocados por alguna contingencia o falla.

Si bien, en un comienzo, las protecciones eléctricas eran dispositivos electromecánicos con una sola función de protección, hoy en día las protecciones eléctricas son digitales y poseen varias funciones de protección integradas en un solo equipo. De todas ellas, las

funciones de protección tratadas en este trabajo serán dos de las más relevantes: las de sobrecorriente (código ANSI 51/51N) y las de distancia (código ANSI 21/21N).

2.2.1. Función de protección de sobrecorriente (50/51/50N/51N)

Esta función de protección actúa midiendo la corriente del sistema y si ésta sobrepasa un valor definido, llamada corriente “pickup” (I_{pkp}), entonces, dependiendo del tiempo asociado a la curva de operación de la protección, la protección manda a abrir los interruptores (52) de manera instantánea o retrasada en el tiempo.

2.2.1.1. Tipos de curva de sobrecorriente

Hay diversos estándares para el cálculo de las curvas de sobrecorriente. Algunos de ellos son los estándares IEEE, IEC, IAC y U.S. [2] [3], sin embargo, en esta sección se describirán sólo las curvas pertenecientes a los estándares IEC y U.S debido a que el dispositivo de protección empleado en este trabajo (SEL321-5), ocupa estos estándares de curvas.

Cada estándar posee una familia de curvas, como se describe a continuación:

- Estándar IEC (C1, C2, C3, C4 y C5), y
- Estándar U.S. (U1, U2, U3, U4 y U5).

Particularmente, la protección SEL-321-5, sólo trabaja con las curvas C1, C2, C3 y C4; y con las curvas U1, U2, U3 y U4.

2.2.1.2. Ecuaciones de las curvas de sobrecorriente

En la *Tabla 1* se muestran las ecuaciones que utiliza la protección SEL321-5 [3] para las curvas de sobrecorriente en sus estándares IEC y U.S. En las ecuaciones, el tiempo de operación de la curva está dado por la variable “**tm**”, la corriente pickup se representa con la letra “**M**” y “**TD**” corresponde al time dial. La corriente pickup activa la función de protección de sobrecorriente de la protección, por otro lado, el “time dial” desplaza la curva de sobrecorriente en el eje vertical, modificando el tiempo de operación de la función de protección.

<i>Ecuaciones de curvas familia IEC</i>	<i>Ecuaciones de curvas familia U.S</i>
$C1: t_M = TD \left[\frac{0.14}{M^{0.02} - 1} \right] \quad (1)$	$U.S\ 1: t_M = TD \left[0.0226 + \frac{0.0104}{M^{0.02} - 1} \right] \quad (2)$
$C2: t_M = TD \left[\frac{13.5}{M - 1} \right] \quad (3)$	$U.S\ 2: t_M = TD \left[0.180 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right] \quad (4)$
$C3: t_M = TD \left[\frac{80.0}{M - 1} \right] \quad (5)$	$U.S\ 3: t_M = TD \left[0.0963 + \frac{3.88}{M^2 - 1} \right] \quad (6)$
$C4: t_M = TD \left[\frac{120.0}{M - 1} \right] \quad (7)$	$U.S\ 4: t_M = TD \left[0.0352 + \frac{5.67}{M^2 - 1} \right] \quad (8)$

Tabla 1: Ecuaciones de las curvas de sobrecorriente de la protección SEL321-5.

En la *Figura 2.2* se muestra un ejemplo cualitativo de las curvas de sobrecorriente de los estándares IEC y U.S para un mismo valor de corriente pickup “**M**” y time dial “**TD**” utilizando las ecuaciones descritas en la *Tabla 1*.

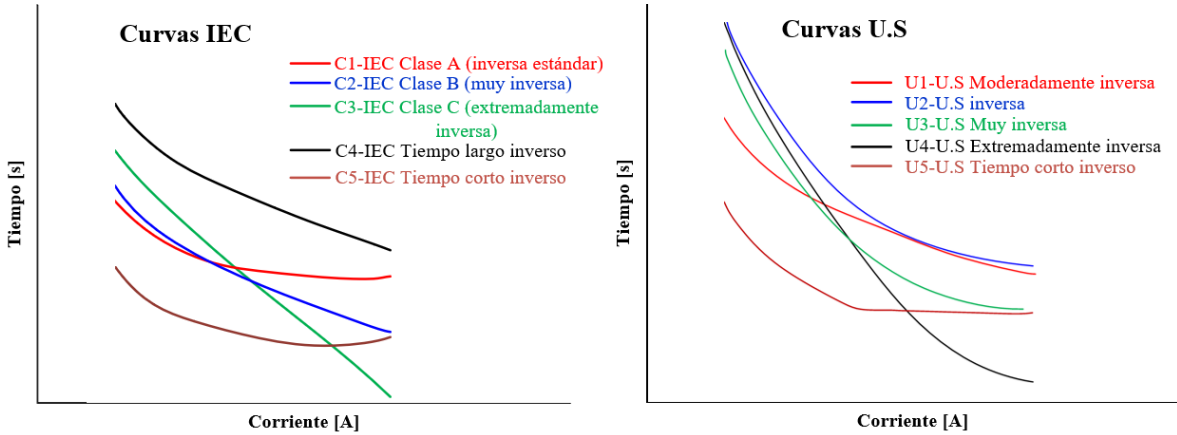


Figura 2.2: Curvas de sobrecorriente estándar IEC y U.S.

2.2.1.2. Tipos de protecciones de sobrecorriente

En primer lugar, se puede hacer la separación entre protecciones de sobrecorriente instantáneas y las protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso.

- **Protección de sobrecorriente instantánea:** es aquella que una vez que se alcanza su corriente pickup (I_{pkp}), opera instantáneamente.

- **Protección de sobrecorriente de tiempo inverso:** son aquellas que cuando alcanzan el valor de la corriente pickup, su operación depende del tiempo dado por alguna de las curvas descritas anteriormente.

Por otro lado, las funciones de protección de sobrecorriente pueden ser de fase o residuales.

- **Función de sobrecorriente de fase:** está orientada a medir las corrientes de fase del sistema para protegerlo de corrientes de cortocircuito elevadas sobre los valores de carga de la red.
- **Función de sobrecorriente residual:** está orientada a detectar valores de corrientes de cortocircuito menores a los de carga y funciona midiendo la corriente residual del sistema, es decir, las corrientes de secuencia cero de la red.

Finalmente, otro elemento distintivo en este tipo de protecciones es la direccionalidad.

- **Protecciones de sobrecorriente no direccionales:** no distinguen la dirección de los flujos de corriente, por lo que al cumplirse su I_{pkp} , se activan. Este tipo de protecciones sólo mide corriente.
- **Protecciones de sobrecorriente direccionales:** este tipo de protección es capaz de discriminar la ubicación de la falla y, aunque se alcance su I_{pkp} , podría no activarse ya que es más selectiva al momento de operar contra fallas, sin embargo, requiere medir la corriente y tensión del sistema.

2.2.1.3. Tipos de funciones de protección de sobrecorriente

Teniendo en cuenta lo mencionado en la sección 2.2.1.2, hay seis tipos de funciones de protección de sobrecorriente:

1. Función de protección de sobrecorriente instantánea de fase 50 (código ANSI).
2. Función de protección de sobrecorriente instantánea residual o 50N (código ANSI).
3. Función de protección de sobrecorriente de tiempo inverso de fase o 51 (código ANSI).
4. Función de protección de sobrecorriente de tiempo inverso residual o 51N (código ANSI).
5. Función de protección direccional de sobrecorriente de tiempo inverso de fase o 67 (código ANSI).

6. Función de protección direccional de sobrecorriente de tiempo inverso residual o 67N (código ANSI).

2.2.2. Función de protección de distancia (21/21N)

Este tipo de protecciones se utilizan fundamentalmente para proteger de fallas a las líneas de transmisión. Funcionan midiendo tensión y corriente para estimar la impedancia de la línea. En condiciones de falla, las variables eléctricas de la red cambian por lo que la impedancia registrada por la protección también. De esta manera, se ajusta la protección para que, a través de este valor de impedancia medido, relacione si existe una condición de operación normal o de falla.

2.2.2.1. Tipos de diagramas R-X

Así como las funciones de protección de sobrecorriente tienen sus curvas características, las protecciones de distancia también, las cuales se llaman “Diagramas R-X” ya que la variable de interés es la impedancia. Estos diagramas pueden ser de tipo “mho” o “cuadrilateral”, tal como se muestra en la Figura 2.3

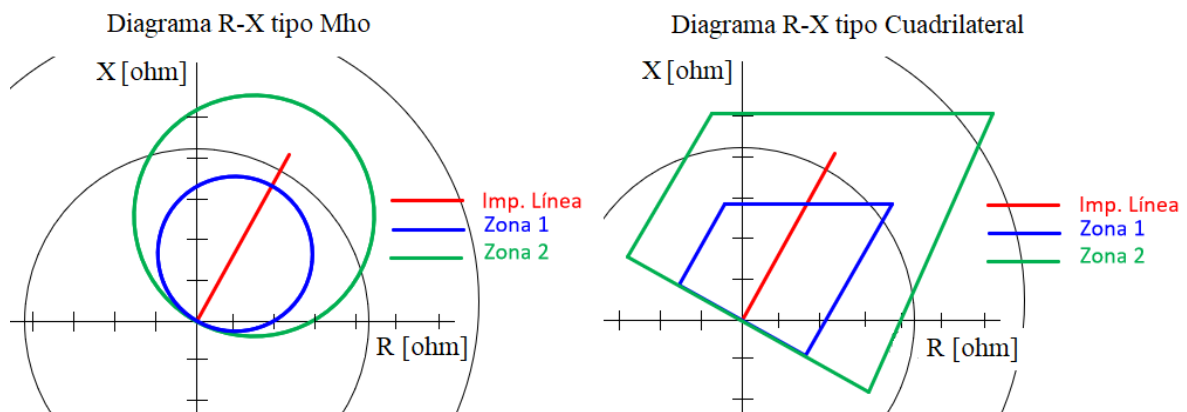


Figura 2.3: Tipos de Diagramas R-X.

En la Figura 2.3, los ejes coordenados corresponden a valores de resistencia y reactancia, por lo tanto, todo el plano es el universo de posibles impedancias de línea que podrían registrarse, sin embargo, la protección de distancia sólo detectará impedancias que caen dentro de las “zonas de operación”. De esta manera, si la protección obtiene un valor de

impedancia que cae fuera de las zonas de operación, entonces, hay una condición de operación normal en la red. Por el contrario, si hay una condición de falla, la protección de distancia medirá valores de tensión y corriente que resultarán en una impedancia que cae dentro de una de las zonas de operación de la protección.

Con respecto a las zonas de protección, éstas se ajustan para que protejan tramos específicos de la línea. Por ejemplo, la zona 1 se ajusta para proteger el 80% de la línea en la mayoría de los casos, la zona 2 se ajusta para proteger desde el 80% de la línea hasta parte de la línea siguiente y así sucesivamente dependiendo del número de zonas que tenga la protección. Lo importante es que cada zona actúa como una protección de respaldo de la zona anterior, siendo la zona 1 la que opera de manera instantánea y el resto, de manera retardada respetando los tiempos de paso o coordinación.

2.2.2.2. Tipos de funciones de protección de distancia

Existen protecciones de distancia de fase-fase o 21 (código ANSI) y protecciones de distancia fase-tierra o 21N (código ANSI). Para que cualquier elemento de distancia opere, además de que la impedancia medida deba caer dentro de una de las zonas de operación de la protección de distancia, también se debe alcanzar una corriente pickup llamada “corriente de supervisión”.

- **Protecciones de distancia fase-fase (21):** está orientada a proteger la línea de fallas que ocurren entre fases. La magnitud de la corriente de línea determina si se cumple la corriente de supervisión. Las zonas de protección pueden ser cuadrilaterales o tipo mho.
- **Protecciones de distancia fase-tierra (21N):** está orientada a proteger la línea de fallas a tierra. Para este tipo de protecciones existe una corriente de supervisión de fase y otra residual. Se suelen emplear zonas de protección de tipo cuadrilateral.

2.2.2.3. Ecuaciones de *loops* para el cálculo de impedancia de las funciones 21/21N.

Para que la protección estime de manera correcta la impedancia que hay en la línea desde el punto de medición hasta el punto de falla, el elemento de medida de la protección debe recibir las tensiones y corrientes indicadas en la *Tabla 2* [3]. Por ejemplo, en caso de ocurrir una falla bifásica entre las fases A-B, el *loop* dado por la ecuación (9) estimará de manera

correcta la impedancia existente en la línea hasta el punto de falla. Si este valor de impedancia, dado por el *loop* correspondiente, cae dentro de alguna zona de operación del diagrama R-X y, simultáneamente, se alcanzó la corriente de supervisión, la protección operará.

<i>Loops fase – fase</i>	<i>Loops fase – tierra</i>
$A - T : \frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} \quad (9)$	$A - T : \frac{V_a}{I_a + k_0 \cdot 3I_0} \quad (10)$
$B - C : \frac{V_b - V_c}{I_b - I_c} \quad (11)$	$B - T : \frac{V_b}{I_b + k_0 \cdot 3I_0} \quad (12)$
$C - A : \frac{V_c - V_a}{I_c - I_a} \quad (13)$	$C - T : \frac{V_c}{I_c + k_0 \cdot 3I_0} \quad (14)$

Tabla 2: Loops fase-fase y fase-tierra.

El factor “ k_0 ” se conoce como el factor de compensación residual [3] y se obtiene como se indica en la ecuación

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3 \cdot Z_1} \quad (15)$$

En donde “ Z_0 ” es la impedancia de secuencia cero y “ Z_1 ” es la impedancia de secuencia positiva de la línea. Este factor considera la influencia de la corriente residual que circula por la red al producirse una falla a tierra.

3. Diseño y construcción del paño eléctrico a escala

En este capítulo se presenta el diseño del paño eléctrico a escala, que consiste en un gabinete de piso o rack, equipado con transformadores de medida (corriente y potencial) y con elementos que cumplen la función de interruptores y desconectores. El diseño es modular y permite su conexión a una red eléctrica reducida para realizar pruebas de funcionamiento a cualquier protección digital, la cual puede ser incorporada al equipo. También, en este capítulo, se exponen aspectos constructivos del proyecto como la disposición de los componentes en el paño eléctrico a escala, los diagramas circuitales y las distintas partes y piezas que lo integran. Finalmente, se detallan los costos asociados a la adquisición de los materiales y componentes utilizados en la construcción del proyecto.

3.1. Consideraciones previas

En esta sección se describen los aspectos que se tuvieron en cuenta antes de comenzar el diseño del equipo.

3.1.1. Requisitos de diseño

Se requería que el paño eléctrico a escala cumpliera con las siguientes características:

- 1) Ser de fácil traslado. Poder desplazarse fácilmente de un lugar a otro.
- 2) Estar equipado con los elementos esenciales de un paño eléctrico, es decir, transformadores de potencial, transformadores de corriente, interruptores y desconectores.
- 3) Permitir la conexión e incorporación de una protección eléctrica digital al equipo.
- 4) Poder conectarse a una red eléctrica externa, armada en laboratorio.
- 5) Ser de fácil uso.
- 6) Permitir la conexión de una maleta de pruebas.

3.1.2. Lugar de uso y restricciones

El paño eléctrico a escala se ocupará en instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María, sede Casa Central, específicamente en el Laboratorio de Máquinas y en el Laboratorio de Metrología.

Las tensiones y corrientes máximas que se obtienen de los tableros de cada laboratorio se indican en la *Tabla 3*. Estos niveles de tensión y corriente se tomaron en cuenta al momento de escoger los componentes del paño eléctrico a escala y al diseñar el circuito de pruebas.

<i>Laboratorio</i>	<i>Corriente Máxima</i>	<i>Tensión fase – neutro</i>
<i>Máquinas</i>	35 [A_{RMS}]	220 [V_{RMS}]
<i>Metrología</i>	10 [A_{RMS}]	220 [V_{RMS}]

Tabla 3: Valores de corriente y tensión de cada laboratorio.

3.2. Diseño del rack

En la *Figura 3.1* se muestra el diseño final del panel frontal del paño eléctrico a escala y se indican sus componentes.

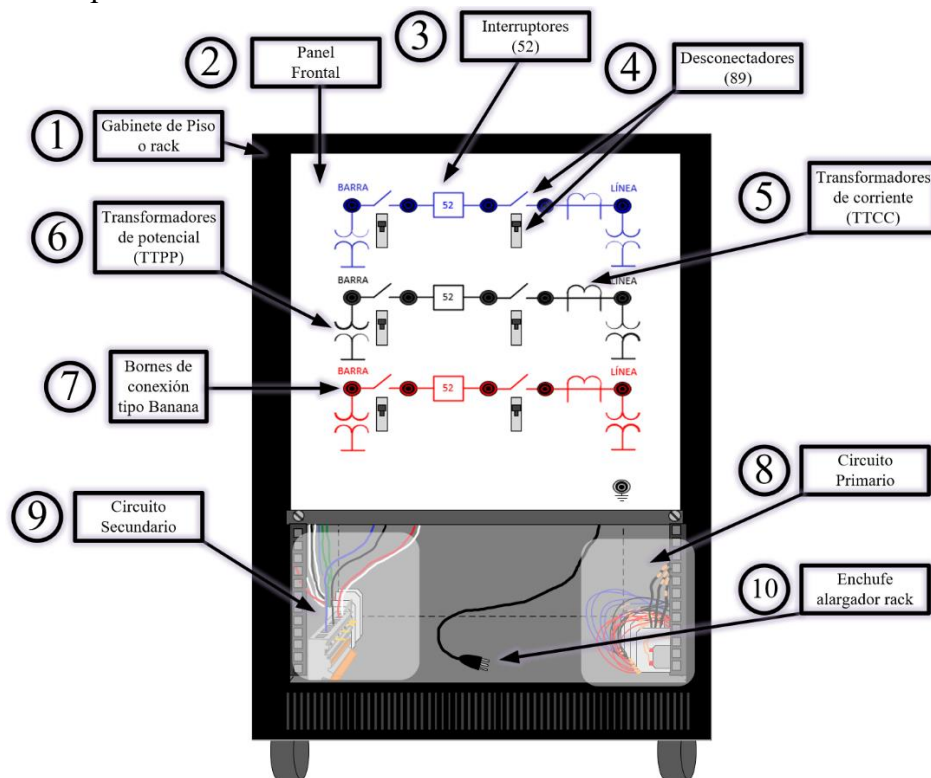


Figura 3.1: Vista del diseño final del Panel Frontal del Paño Eléctrico a escala.

Por otro lado, la vista posterior del paño eléctrico a escala se muestra en la *Figura 3.2*. Esta imagen es referencial y en ella se puede observar la ubicación de los componentes señalados anteriormente en la *Figura 3.1*, pero no sus conexiones ni distribución espacial detallada.

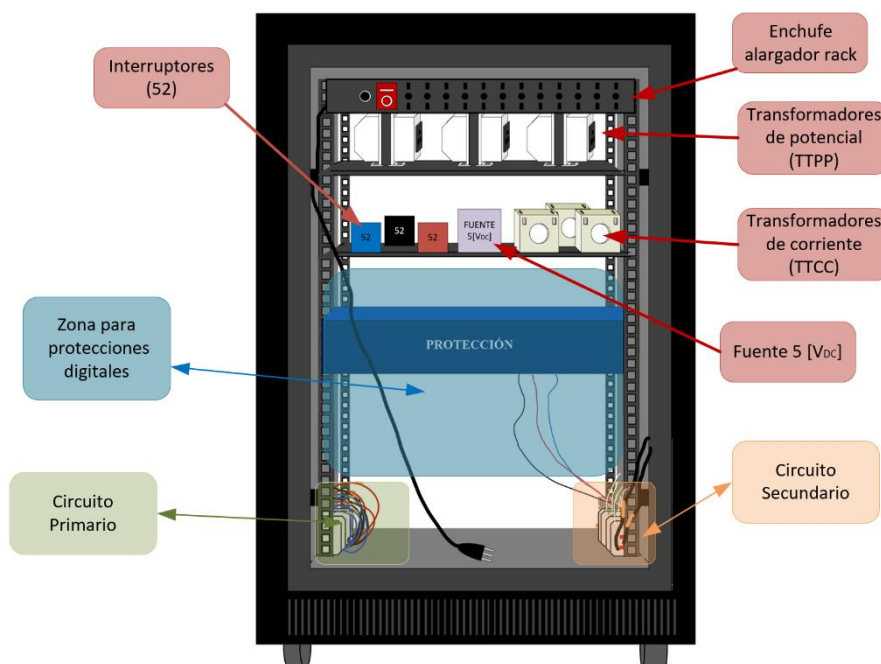


Figura 3.2: Vista posterior del paño eléctrico a escala.

3.2.1. Aspectos generales del diseño

3.2.1.1. Distribución espacial del equipo

En la *Figura 3.2* se puede observar que el espacio del rack se distribuyó en cuatro zonas: 1) zona de componentes, comprendida por los equipos que se encuentran sobre las bandejas y que corresponden a los circuitos primario y/o secundario; 2) zona para conexión de protecciones digitales, lugar que se destinó para conectar e integrar al equipo distintas protecciones digitales; 3) circuito primario, corresponde a las borneras que unen el cableado de los equipos que se conectan a la red de manera directa a través de los conectores “Barra” y “Línea” presentes en el panel frontal del rack, y 4) circuito secundario, el cual corresponde a las borneras que unen el cableado de los equipos que reducen la magnitud de las variables eléctricas del circuito primario para que puedan ser leídas por la protección digital. En el circuito secundario también se incluye el circuito de control de los interruptores (52).

3.2.1.2. Medidas del paño eléctrico a escala

0.6 [m]

1.05 [m]

0.8 [m]

0.48 [m]

1U

1U

2U

Cada zona del rack descrita anteriormente quedó con las siguientes medidas (ver *Figura 3.2*):

- NOTA:** las bandejas de la zona de componentes tienen dimensiones de 47x35x1.5 [cm].

3.2.2. Diagramas Circuitales

3.2.2.1. Circuitos Primario y Secundario

El diagrama circuitual del equipo corresponde al mostrado en la *Figura 3.4*, el cual, a diferencia del diagrama circuitual presente en el panel frontal del rack (ver *Figura 3.1*), muestra más detalles de las conexiones existentes en los transformadores de medida del paño eléctrico a escala.

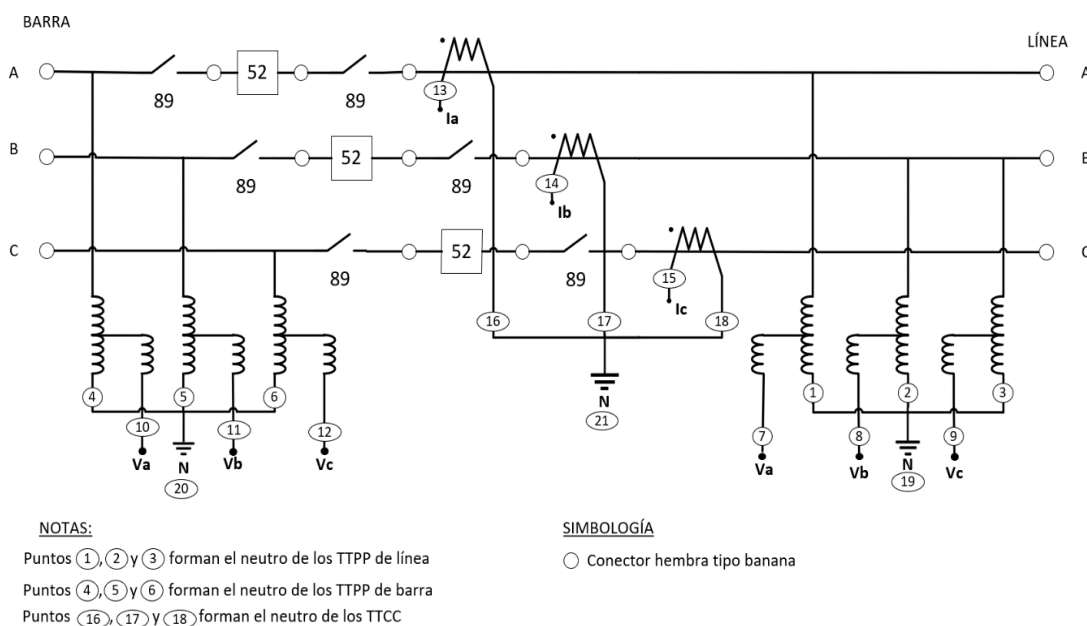


Figura 3.4: Diagrama circuitual del paño eléctrico a escala.

El circuito primario lo conforman todos los elementos de las fases más los devanados primarios de los transformadores de medida., en cambio, el circuito secundario se compone de los devanados secundarios de los transformadores de medida. En la *Figura 3.4* se rotularon con números los distintos terminales de cada elemento del equipo para poder indicar con mayor detalle las distintas conexiones existentes con otras partes y piezas del paño eléctrico a escala que aún no se han descrito. Por ejemplo, los terminales de los transformadores de medida (TTCC y TTPP) se conectan a unas borneras específicas antes de unirse y formar el neutro, así como también antes de conectarse a la protección.

3.2.2.2. Circuito de control de los interruptores

En el paño eléctrico a escala se utilizaron relés de estado sólido para que cumplieran la función de interruptores. Estos, a diferencia de un interruptor normal, necesitan ser energizados con una tensión entre los 3 a 30 [V] entre sus bornes de control para poder conducir. En la *Figura 3.5* se muestra el esquema de control del disparo de los

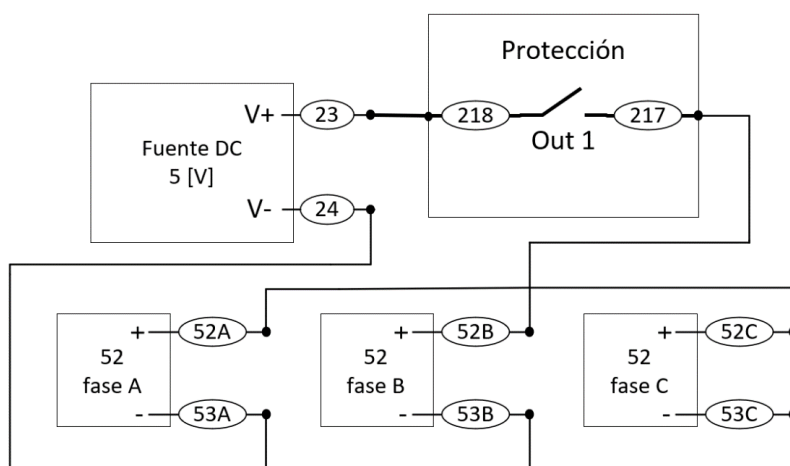


Figura 3.5: Circuito de control del disparo de los interruptores (52).

interruptores. El circuito consiste en una fuente continua de 5 [V] conectada a los bornes de control de los interruptores mediante la protección digital, la cual se encargará de discriminar en base al cumplimiento de ciertas condiciones programadas previamente, de permitir o no permitir que la tensión suministrada por la fuente continua de tensión alimente a los interruptores. Si la señal de tensión de 5 [V] alimenta a los interruptores, entonces éstos conducirán y permitirán el funcionamiento normal del sistema, en caso contrario, al no ser alimentados por la fuente de tensión de 5[V], los interruptores no conducen e interrumpen la circulación de corriente por la red. En la *Figura 3.5* se rotularon con números los distintos terminales de cada elemento del circuito de control de los interruptores para poder indicar con mayor detalle las distintas conexiones existentes con otras partes y piezas del paño eléctrico a escala que aún no se han descrito, pero que se encuentran, más adelante, en la *Figura 3.36*.

3.3.3. Partes y Piezas

En esta subsección se describe cada elemento que forma parte del paño eléctrico a escala y se describe de manera concisa los detalles necesarios para entender la función que

cumple cada elemento en el equipo. Esto permitirá describir con mayor detalle las conexiones presentes en el equipo en la subsección 3.3.4.

3.3.3.1. Gabinete de piso o rack



Figura 3.6:
Gabinete de
piso.

Se ocupó un gabinete de piso como el mostrado en la *Figura 3.6*. Es el elemento que contiene todos los componentes y partes que conforman el paño eléctrico a escala. Brinda protección y movilidad al equipo y, tal como se describió en la subsección 3.2.1.2., posee medidas externas de 0.6 x 0.6 x 1.05 [m] (ancho x largo x alto) y medidas internas útiles de 0.8 x 0.48 x 0.48 [m]. Posee dos puertas principales y dos accesos laterales que cuentan con cerraduras y llaves. Una de las dos puertas principales es de vidrio y se definió arbitrariamente como la ubicada en la parte posterior del rack que da acceso a la vista mostrada en la *Figura 3.2*. Todas las puertas, con la excepción de la puerta posterior de vidrio, tienen la misma cerradura y se abren con una misma llave.

3.3.3.2. Bandeja Rack 19'' para gabinete de piso fondo 60 [cm]

El rack cuenta con 2 bandejas como la mostrada en la *Figura 3.7*, de dimensiones 47x35x1.5 [cm]. Sobre ellas se encuentran sujetos distintos componentes como los TTCC, TTPP, interruptores y fuente de tensión continua.



Figura 3.7: Bandeja
rack.

3.3.3.3. Riel Din ranurado zincado



Figura 3.8: Riel Din
ranurado.

Se ocuparon 2 tiras de 50 [cm] de riel DIN ranurado como la mostrada en la *Figura 3.8*. Se ubicaron en la parte inferior, una a cada lado del interior del rack, para sujetar los bornes de conexión correspondientes a los circuitos primario y secundario del paño eléctrico a escala.

3.3.3.4. PDU Zapatilla eléctrica 19'' de 12 módulos

Se ocupó un enchufe alargador específico para un rack de 19'', como el que se muestra en la *Figura 3.9*. Sus dimensiones son de 4.44 x 48.26 x 4.5 [cm] (ancho x largo x alto). Su capacidad



Figura 3.9:
Zapatilla eléctrica.

máxima es de 10 [A] a 250 [V_{AC}]. Cuenta con un switch luminoso de “encendido/apagado”, un cable de alimentación y una protección de sobretensión. En este enchufe alargador o zapatilla eléctrica se conecta el extractor del rack, la protección digital incorporada al paño eléctrico a escala, la fuente de tensión continua que controla la apertura de los interruptores y un enchufe que, al conectarse a esta zapatilla eléctrica, une todas las tierras de protección de los equipos y/o componentes del rack a la tierra de la red.

3.3.3.5 Cable libre de halógenos de 2.5 y 6 [mm²] H07Z1



Figura 3.10:
Cable 6mm².

Se ocuparon dos calibres de cable como el mostrado en la *Figura 3.10*: de 2.5 [mm²] y de 6 [mm²]. El cable de calibre 2.5 [mm²] tiene una capacidad de 20 [A], 750 [V] y se ocupó para la conexión de los elementos pertenecientes al circuito secundario y al circuito de control de los interruptores que pertenecen al rack. Esto incluye las conexiones entre los devanados secundarios de los TTCC y TTPP con sus borneras respectivas y la conexión entre la fuente DC y la parte de control de los interruptores (52). Los cables con los que la protección digital se conecta a los bornes correspondientes pueden variar según la protección, pero deben ser de máximo 2.5 [mm²].

Por otro lado, el cable de calibre 6 [mm²] se ocupó para unir los distintos elementos que conforman el circuito primario. Se ocuparon los colores azul, negro, rojo y blanco para identificar las fases A, B, C y Neutro respectivamente. Tiene una capacidad de 33 [A], 750 [V].

3.3.3.6. Placa de acrílico de 50 x 50 [cm] y 3 [mm] de espesor



Figura 3.11:
Placa de acrílico

Para el panel frontal del rack se ocupó una placa de acrílico como la mostrada en la *Figura 3.11*, de dimensiones 50x50 [cm] y 3 [mm] de espesor. En ella se pegó un adhesivo que muestra de manera sencilla el diagrama circuital por fase del paño eléctrico a escala. Además, cumple la función de soporte para los desconectores (interruptores automáticos) y permite la conexión de conectores hembra tipo banana al circuito primario del equipo para pruebas y mediciones.

3.3.3.7. Lámina adhesiva 50 x 50 [cm]

Se imprimió el diagrama circuital del paño eléctrico a escala en una lámina adhesiva o sticker, como la mostrada en la *Figura 3.12*. Este adhesivo se pegó a la placa de acrílico antes mencionada y, en conjunto, forman el panel frontal del rack.



Figura 3.12:
Lámina adhesiva

3.3.3.8. Conectores hembra tipo banana



Se ocuparon conectores hembra tipo banana como los mostrados en la *Figura 3.13*. Se utilizaron 5 de estos conectores por fase y uno para el terminal neutro, los cuales están dispuestos en el diagrama circuital presente en el panel frontal del rack. Su capacidad es de 32 [A] y su sección interna es para un conector macho de 4 [mm²]. Este tipo de

Figura 3.13: Conectores hembra tipo banana, en su otro extremo, tienen un terminal tipo paleta macho, los cuales deben conectarse a un terminal tipo paleta hembra.

3.3.3.9. Terminales tipo paleta y tipo punta.

En la *Figura 3.14* se muestran los terminales ocupados en el paño eléctrico a escala. Se ocuparon 15 terminales tipo paleta hembra de calibre 10-12 AWG (color amarillo) para conectar distintos elementos del circuito primario a los conectores tipo banana ubicados en el panel frontal del rack. También se utilizaron terminales tipo punta de calibre 10-12 AWG (color amarillo) para conectar los terminales de cada elemento del circuito primario a las borneras de conexión y terminales de punta calibre 14-16 AWG (color azul) para el circuito secundario.



Figura 3.14:
Terminales tipo punta y tipo paleta.

3.3.3.10. Disyuntor monopolar Legrand RX3 C40 (89)



Se ocuparon 6 interruptores termomagnéticos (2 por fase) como los de la *Figura 3.15*. Su capacidad es de 40 [A] y se utilizaron para cumplir la función de desconectadores (89). Se escogieron con curva C40 con el fin de que no interfieran con la función de los interruptores (52), evitando la posibilidad de que operen antes que ellos.

Figura 3.15: Disyuntor monopolar.

3.3.3.11. Calota de 1 puesto riel DIN

Este elemento se muestra en la *Figura 3.16*. La calota corresponde a un módulo que sirve de soporte para un interruptor automático, permite fijarlo a ella al igual que se fija el interruptor automático a un riel DIN. Las tapas de las calotas no se ocuparon ya que sólo se requirió la base para atornillar y fijar los interruptores termomagnéticos (89) a la placa de acrílico que forma el panel frontal del rack.



Figura 3.16: Calota riel DIN.

3.3.3.12. Relé de estado sólido (52) Metaltex, TZC-80^a



Figura 3.17: Relé estado sólido.

Se ocuparon 3 relés de estado sólido (uno por fase) como los mostrados en la *Figura 3.17* para cumplir la función de interruptores (52). Estos relés son normalmente abiertos (NA), poseen una capacidad nominal de 80 [A] y se accionan con una tensión continua entre los 4-32 [V_{DC}]. Como se observa en la *Figura 3.17*, los relés de estado sólido poseen 4 terminales, dos en la parte superior (sobre la marca “Metaltex”) y en los cuales se conecta el circuito de potencia; y dos terminales inferiores que son para controlar la apertura o cierre de los interruptores mediante una señal de control correspondiente a una tensión continua dentro del rango antes indicado.

3.3.3.13. Transformador de corriente de medida SACI TU-20, 50/5 [A]

Se ocuparon 3 transformadores de corriente (TTCC) como el que se muestra en la *Figura 3.18*. Poseen una razón de transformación de 10 (50/5[A]) y no poseen una conexión directa o física entre el circuito de poder y su devanado primario ya que el conductor correspondiente al circuito primario se pasa por la ranura redondeada que se encuentra al centro del elemento de manera que la corriente primaria circule entrando a la cara “P₁/K” del transformador de corriente (TC) y salga por la cara “P₂/L”. De esa forma, en los terminales del devanado secundario del TC se tendrá que la corriente secundaria sale por el terminal “S₁/K” hacia la protección y el retorno es por el terminal “S₂/L”.



Figura 3.18:
Transformador de corriente de medida (TC).

3.3.3.14. Transformadores de potencial (Autotransformadores) Macrotel de 220/110 [V], 100 [W].



Figura 3.19:
Transformador de potencial (TP).

Para el paño eléctrico a escala, se ocuparon 6 autotransformadores como el mostrado en la *Figura 3.19*. Estos cumplen la función de transformadores de potencial (TTPP). Tres de ellos se conectaron a los terminales del paño orientados a la barra (TTPP de color negro) y los otros tres se conectaron a los terminales de línea del paño (TTPP de color blanco), tal como se indicó en la *Figura 3.4*. Su razón de transformación es de 2 (220/110 [V]), siendo el lado del devanado secundario el que tiene terminales de enchufe hembra tipo B. Para instalar los TTPP en el paño eléctrico a escala fue necesario cortar los enchufes del devanado primario que venían de fábrica y exponer los cables para dejar terminales tipo punta. En cuanto al devanado secundario, se utilizaron enchufes macho tipo B para poder conectarlos en el terminal que se muestra en la *Figura 3.19*. El otro extremo del enchufe que se conectó al devanado secundario también se dejó con terminales tipo punta.

3.3.3.15. Fuente de tensión continua 5 [V] (V_{DC})

La *Figura 3.20* muestra la fuente de tensión continua (V_{DC}) utilizada como señal de control de los relés de estado sólido. Su tensión es de 5 [V] y permite controlar la conducción o no conducción de los interruptores.

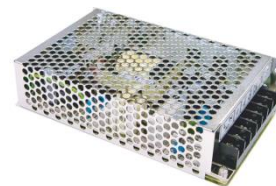


Figura 3.20: Fuente de tensión continua.

3.3.3.16. Repartidor tetrapolar de 7 puntos, 125 [A]



Figura 3.21:
Repartidor
tetrapolar de 7
puntos.

La *Figura 3.21* muestra un repartidor tetrapolar de 7 polos. Se ocuparon dos de estos elementos para realizar conexiones en el circuito primario del paño eléctrico a escala. Uno está instalado en el punto de conexión a la barra y el otro en el punto de conexión a la línea. Se destinó un nodo a cada fase y el cuarto nodo a las conexiones de neutro de los transformadores de medida.

3.3.3.17. Repartidor tetrapolar de 11 polos, 125 [A]

La *Figura 3.22* muestra un repartidor tetrapolar de 11 polos. Se ocupó sólo uno principalmente para realizar conexiones en el circuito secundario del equipo. Sus dos primeros nodos se ocuparon para brindar puntos de conexión extras a la fuente de tensión continua, su tercer nodo se utilizó como punto de tierra común a todas las tierras protección de las carcasas de los distintos componentes del paño eléctrico a escala; y su cuarto nodo se ocupó como punto de conexión al neutro del equipo para los devanados secundarios de los transformadores de medida.



Figura 3.22:
Repartidor
tetrapolar de 11
puntos.

3.3.3.18. Bornes de paso Phoenix Contact ST 6 y ST 2.5



Figura 3.23:
Bornera de paso
de libre
mantención

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.23* para unir los distintos elementos que conforman el circuito primario. Su capacidad es de 1000 [V] y 41 [A] respectivamente [4], su tipo de conexión es por resorte (libre mantención) y aceptan conductores de hasta 6 [mm²]. Estos bornes de paso cumplen la misma función que una regleta de conexión,

pero tienen la ventaja de poder fijarse a un riel DIN. Se ocuparon 6 por fase.

3.3.3.19. Bornes de paso Phoenix Contact ST 2.5

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.24* para unir tierras de protección de los devanados de los TTPP. Su capacidad es de 800 [V] y 24 [A] respectivamente [5], su tipo de conexión es por resorte (libre mantención) y aceptan conductores de hasta 2.5 [mm²].



Figura 3.24:
Bornera ST 2.5.

3.3.3.20. Borne interrumpible Phoenix Contact ST 4-MT



Figura 3.25:
Borne conexión
ST 4-MT.

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.25* para conectar la salida OUT de la protección con la fuente V_{DC} . Su capacidad es de 400 [V] y 20 [A] respectivamente [6]. Son bornes interrumpibles por cuchilla y su tipo de conexión es por resorte (libre mantención). Acepta conexiones con cables de 4 [mm²] de sección.

3.3.3.21. Bornera Phoenix Contact UTRK S-BEN10

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.26* para conectar los devanados secundarios de los TTPP de línea con los terminales de tensión de la protección digital. Su capacidad es de 500 [V] y 57 [A] respectivamente [7], su tipo de conexión es por tornillo y acepta conductores de hasta 10 [mm²]. Cuenta con dos conectores hembra para terminales de prueba y con la opción de interrumpir la conexión entre sus terminales al desplazar hacia un lado la pieza naranja que se aprecia en la *Figura 3.26*. Requiere mantención periódica (1 vez por año) para verificar el apriete de los tornillos.



Figura 3.26: Borne
URTK S-BEN10.

3.3.3.22. Bornera Phoenix Contact UTRK/S

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.27* para conectar los devanados secundarios de los TTPP de barra con los terminales de tensión de la protección digital. Su capacidad es de 400 [V] y 41 [A] respectivamente [8], su tipo de conexión es por tornillo y acepta conductores de hasta 6 [mm²]. Al igual que el borne URTK-S BEN10, cuenta con dos conectores hembra para terminales de prueba y con la opción de interrumpir la conexión entre sus terminales.



Figura 3.27:
Bornera UTRK/S.

3.3.3.23. Bornera UTME 6

Se utilizaron las borneras mostradas en la *Figura 3.28* para conectar los devanados secundarios de los TTCC. Su capacidad es de 500 [V] y 30 [A] respectivamente [9], poseen un tipo de conexión por tornillo y aceptan conductores de hasta 6 [mm²]. Este tipo de bornera es interrumpible y tiene un par de accesorios que permiten cortocircuitar y abrir los devanados secundarios de los TTCC, como los eslabones puenteadores descritos a continuación.



Figura 3.28:
Bornera UTME 6.

3.3.3.24. Eslabón puenteador SB-ME-2-8



Figura 3.29:
Eslabón puenteador
SB-ME-2-8.

Este componente, mostrado en la *Figura 3.29*, es un accesorio de la bornera UTME 6, el cual se monta por encaje. Su capacidad es de 30 [A] [10] y se utiliza para cortocircuitar dos puntos de la bornera UTME 6 al mover de posición la lengüeta anaranjada que se muestra en la imagen.

3.3.3.25. Topes y tapas de borneras.

Se ocuparon tapas en algunos bornes para aislar su zona energizada de la intemperie y se utilizaron topes (ver *Figura 3.30*) o soportes que se fijan a presión en el riel DIN. Estos topes evitan que las



Figura 3.30: Tope
para riel DIN.

borneras se desplacen dentro del riel DIN al momento de manipularlas.

3.3.3.26. Peines de unión



Se utilizaron peines de unión, como el mostrado en la *Figura 3.31*, para unir dos puntos de bornes adyacentes. Están diseñados para conectarse directamente a un borne de conexión (como los bornes de paso vistos anteriormente) para cortocircuitar dos puntos sin la necesidad de cableado extra, lo que brinda mayor

Figura 3.31: Peine de unión para bornera.

3.3.3.27. Adaptador de prueba PAI-4-FIX- YE

La *Figura 3.32* muestra un adaptador de prueba para clavijas de prueba de 4 [mm²]. Se conectó como accesorio a la bornera UTME 6 para permitir la conexión de una maleta de pruebas. Puede conectarse a bornes de paso de sección de hasta 8.2 [mm²].



Figura 3.32: Adaptador de prueba.

3.3.3.28. Cinta adhesiva para rotulación y etiquetado marca Brady



Se ocupó una cinta de impresión para etiquetadora de mano, como la mostrada en la *Figura 3.33*, para rotular el cableado del equipo.

Figura 3.33: Cinta adhesiva de etiquetado.

3.3.4. Conexiones

En esta subsección se mostrarán las conexiones entre los distintos elementos descritos en la subsección 3.3.3 para llevar a cabo los diagramas circuitales mostrados en la *Figura 3.4* y en la *Figura 3.5*.

3.3.4.1. Conexiones circuito primario

Las conexiones hechas en el circuito primario se muestran en la Figura 3.34 solamente para la fase A, sin embargo, para el resto de las fases se hicieron exactamente las mismas conexiones y se ocuparon los mismos elementos. La única diferencia yace en el nodo del repartidor tetrapolar que se ocupó para cada fase, lo cual también se indica en la *Figura*

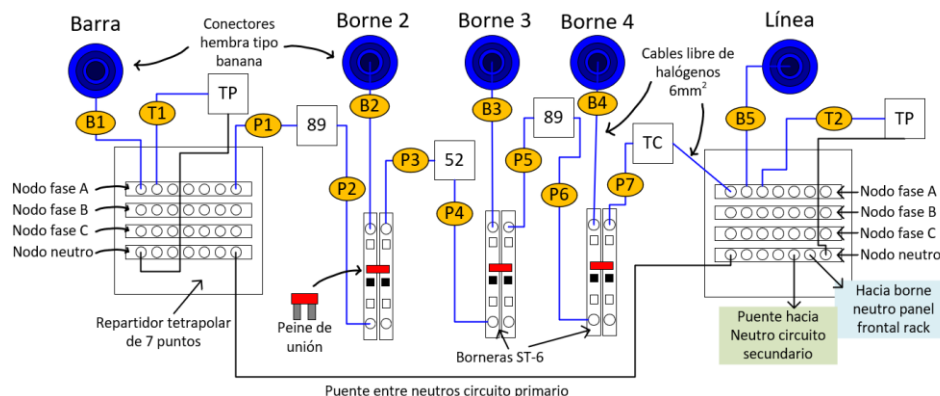


Figura 3.34: Diseño de las conexiones del circuito primario.

3.3.4. Notar que hay un puente entre el neutro de los circuitos primario y secundario. Esto se hizo para enfatizar el hecho de que los TTPP en realidad son autotransformadores y que el neutro de sus devanados primario y secundario son el mismo punto.

El cableado que se indica en la *Figura 3.34* y que se rotuló con círculos amarillos (B1, T1, P1, B2, T2, P2, etc.) en realidad se guió por el costado lateral del rack y se etiquetó con otros nombres, tal como se muestra en la *Figura 3.35*.



Figura 3.35: Disposición y rotulación real del cableado del circuito primario en el rack.

Se elaboró la Tabla 4 con el fin de relacionar correctamente las rotulaciones de la Figura 3.34 con la Figura 3.35. Todas las fases tienen la misma rotulación, pero distinto color de cable.

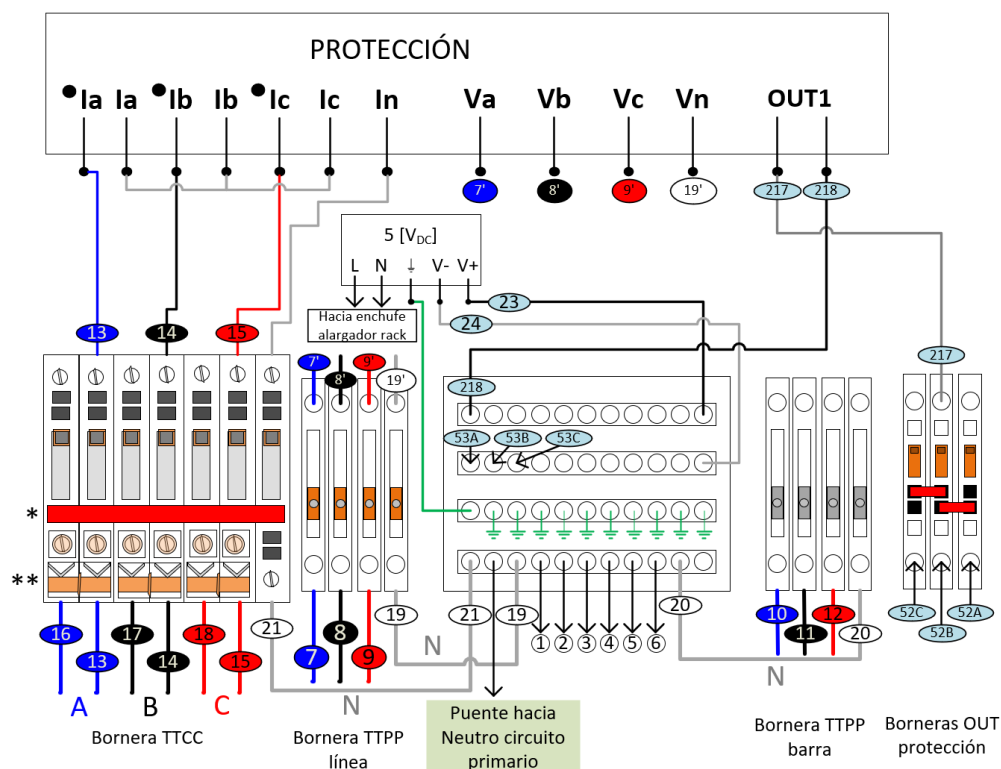
<i>Nombre rotulado en Figura 3.34</i>	<i>Nombre rotulado en el rack</i>
<i>B1</i>	<i>BARRA</i>
<i>B2</i>	<i>BORNE 2</i>
<i>B3</i>	<i>BORNE 3</i>
<i>B4</i>	<i>BORNE 4</i>
<i>B5</i>	<i>LÍNEA</i>
<i>T1</i>	<i>BARRA TP PRI</i>
<i>T2</i>	<i>LÍNEA TP PRI</i>
<i>P1</i>	<i>89 – 1 IN</i>
<i>P2</i>	<i>89 – 1 OUT</i>
<i>P3</i>	<i>52 IN</i>
<i>P4</i>	<i>52 OUT</i>
<i>P5</i>	<i>89 – 2 IN</i>
<i>P6</i>	<i>89 – 2 OUT</i>
<i>P7</i>	<i>TC PRI</i>

Tabla 4: Equivalencia de rotulaciones en cableado del circuito secundario

3.3.4.2. Conexiones del Circuito Secundario y del Circuito de control de los interruptores.

Para entender de mejor manera las conexiones hechas en el circuito secundario, es necesario tener en cuenta las rotulaciones indicadas en la *Figura 3.4* para los terminales secundarios de los transformadores de medida y las rotulaciones indicadas en la *Figura 3.5* del circuito de control del disparo de los interruptores.

Las conexiones en las borneras del circuito secundario se muestran en la *Figura 3.36*. Por temas de claridad, en todas las figuras, los neutros de los TTCC y TTPP se indicaron inicialmente con rótulos diferentes, pero en realidad todos ellos llegan al mismo nodo neutro del repartidor tetrapolar, por lo que son el mismo punto. Los detalles de las



NOTAS:

- *Peine de unión
- **Eslabones puentesadores SB-ME-2-8
- Puntos (13), (14) y (15) corresponden a los terminales S_1/K de los TTCC
- Puntos (16), (17) y (18) corresponden a los terminales S_2/L de los TTCC
- El peine de unión está cortocircuitando los puntos (16), (17) y (18) con el punto (21)
- ⏏ Este símbolo representa una conexión de tierra protección de la carcasa de un equipo

Figura 3.36: Diseño de las conexiones en el circuito secundario.

conexiones de tierra protección en el repartidor tetrapolar no se incluyeron en la *Figura 3.36* para priorizar el orden y evitar el exceso de información. Sin embargo, estas conexiones corresponden a la tierra protección del gabinete de piso y las tierras de las carcasas de los devanados secundarios de los TTPP. El último punto del nodo “tierra” del repartidor tetrapolar (el ubicado más a la derecha del diagrama), se utilizó para un enchufe que va conectado a la zapatilla eléctrica del rack. Ésta, a su vez, se conecta a la red y, por lo tanto, a la tierra eléctrica de la misma.

3.3.4.3. Conexiones borne Phoenix Contact UTME 6 con sus accesorios

Estos bornes son de especial utilidad al momento de querer modificar la carga conectada a los devanados secundarios de los TTCC. En la *Figura 3.37* se muestran los accesorios que se utilizaron en esta bornera y donde se conectan. El accesorio número 1 corresponde a un peine de unión de 4 pines que cortocircuita los terminales “S₂/L” de cada TTCC con el neutro. El accesorio 2 permite conectar a la bornera un terminal de pruebas tipo banana, como ocurre al conectar una maleta de pruebas. El accesorio 3, es el eslabón puenteador SB-ME 2-8 y cortocircuita los terminales secundarios de un mismo TC, es decir, une los terminales “S₁/K” y “S₂/L” de un mismo devanado secundario. Para realizar el cortocircuito, el eslabón puenteador se desliza como se

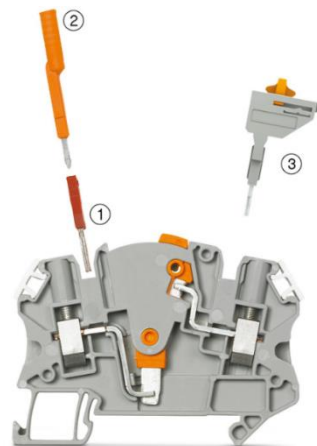


Figura 3.37: Accesorios borne UTME6.



Figura 3.38:
Eslabón
Puenteador.

muestra en la *Figura 3.38*. Lo anterior permite cortocircuitar los devanados secundarios de cada fase de los TTCC para, posteriormente y mediante las cuchillas, aislar la zona de modificación de carga de los TTCC. Se destaca el hecho de que el peine de unión permite que haya una referencia a tierra cuando se cortocircuitan los devanados secundarios y que, al separar ambas zonas de la bornera mediante las cuchillas, se podrá modificar las cargas de los TTCC de manera segura y aislada. Esto permitirá conectar al rack una maleta de pruebas para la inyección de corrientes hacia la protección sin intervenir el circuito de pruebas que esté conectado en ese momento.

3.3.5. Fotos del paño eléctrico a escala

En esta subsección se muestran algunas fotos del paño eléctrico a escala terminado. En la *Figura 3.39* se observa el panel frontal del equipo, en la *Figura 3.40* se ve su parte posterior y la *Figura 3.41* ofrece una vista lateral del equipo.

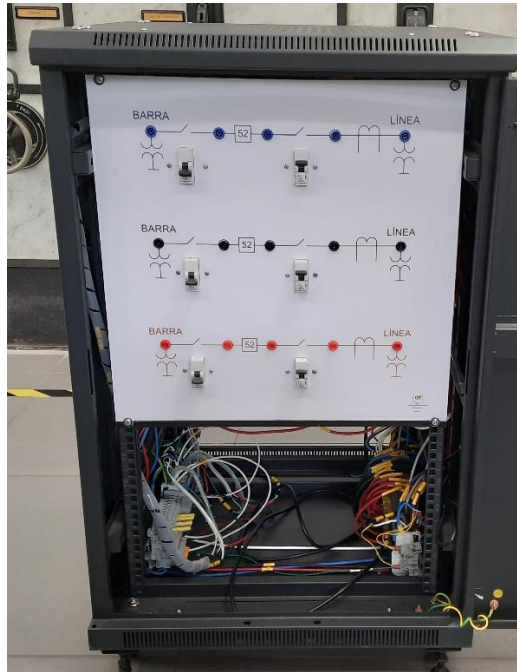


Figura 3.39: Vista frontal del paño eléctrico a escala.

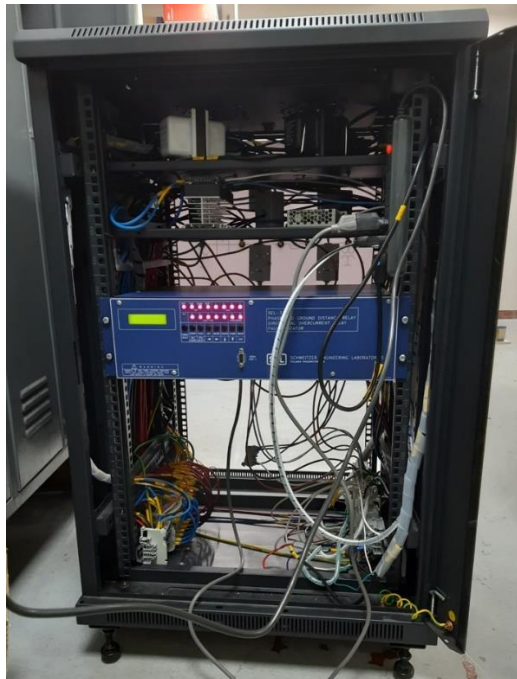


Figura 3.40: Vista posterior del paño eléctrico a escala.



Figura 3.41: Vista lateral del paño eléctrico a escala.

3.3. Diseño del generador de fallas

Como parte del diseño del rack se consideró construir un elemento que permitiera hacer distintos cortocircuitos, pero que no formara parte del paño eléctrico a escala. A este elemento se le llamó “Generador de fallas” y consiste en una caja estanca con bornes de entrada y salida para las fases y tierra, tres interruptores tipo balancín y un interruptor automático trifásico, como se muestra en la *Figura 3.42*.

El generador de fallas permite armar la falla sin activarla mediante los interruptores tipo balancín que cortocircuitan las fases entre sí. Luego, para activar la falla, se cierra el interruptor automático y se realiza el cortocircuito. Los bornes de salida permiten conectar una resistencia de falla.

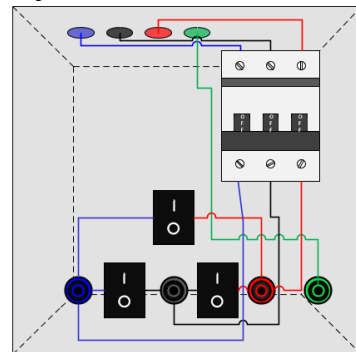


Figura 3.42: Diseño del generador de fallas.

3.3.1. Elementos del generador de fallas

A continuación, se describen los elementos que se utilizaron para su construcción.

3.3.1.1. Interruptor termomagnético tripolar Mitsubishi Electric BHW-T10 C63

Se ocupó el interruptor termomagnético de 63[A] mostrado en la *Figura 3.43* para activar o desactivar las fallas. Se escogió un valor de corriente elevado para este interruptor para que no opere ante cualquier corriente de cortocircuito realizada en un ensayo.



Figura 3.43: Interruptor automático 3P.

3.3.1.2. Cables THHN 10 AWG



Figura 3.44: Cable THHN.

El cable mostrado en la *Figura 3.44* se escogió de un calibre AWG 10. Su capacidad es de 40 [A] y 600[V]. Se utilizó para el generador de fallas por soportar mayor corriente que el cable libre de halógenos H07Z1 y por ser más duro, lo que permite fijar la disposición de los cables en la caja estanca sin que se muevan.

3.3.1.3. Caja estanca transparente genérica

Se utilizó un caja estanca como la de la *Figura 3.45.*, de dimensiones 20x20x13 [cm] y con tapa transparente. Su función es contener el cableado, los bornes e interruptores, formando, en su conjunto, el generador de fallas. La caja vino sin orificios por lo que se requirió de trabajo manual para adecuarla y poder incorporar los elementos antes mencionados.



Caja estanca

3.3.1.4. Interruptor tipo balancín genérico de 4 polos, 16 [A] nominal



Figura 3.46:
Interruptor
balancín.

Este tipo de interruptores, mostrado en la *Figura 3.46*, soportan 2×10 [A] a 250 [V_{AC}] y 2×20 [A] a 150 [V_{DC}]. En el generador de fallas, cada interruptor balancín tiene sus polos conectados en paralelo (2×2) para soportar mayor corriente. Se corroboró en laboratorio (con un interruptor balancín de prueba) que éste soportó una circulación de corriente de 20 [A] durante 1 [min] entre sus 2 polos, probándose también el otro par de polos.

3.3.1.5. Lámina Adhesiva 20x20 [cm]

Al igual que para el rack, se mandó a imprimir una lámina adhesiva con el conexionado interno del fallador. El diagrama circuital que se aprecia en la *Figura 3.42* (mostrada anteriormente) corresponde al dibujo impreso en la lámina adhesiva que se pegó a la tapa de la caja estanca.

3.4. Costos de equipos, materiales y construcción

En esta sección se muestra el resumen de los costos asociados al proyecto de construcción del paño eléctrico. La *Tabla 5* muestra el costo total de construcción del paño eléctrico a escala y del generador de fallas, además, muestra el costo de una protección SEL32111]. El detalle de los costos del proyecto, tanto del paño eléctrico a escala como del generador de fallas, se desglosa en el Anexo A.

<i>Equipo</i>	<i>Costo</i>
<i>Paño eléctrico a escala</i>	\$1,091,123
<i>Generador de fallas</i>	\$62,767
<i>SUBTOTAL</i>	\$1,153,890
<i>Protección SEL321 – 5</i>	\$8,773,595
<i>TOTAL</i>	\$9,927,485

Tabla 5: Resumen de los costos totales del proyecto.

4. Diseño del circuito de pruebas

En este capítulo se muestra el circuito de pruebas utilizado para probar los ajustes configurados en la protección digital SEL-321-5 y el desempeño del paño eléctrico a escala.

4.1. Aspectos considerados

Se quiso armar un circuito de pruebas ficticio, pero que representara de la mejor manera posible a un circuito real. Por lo anterior es que se consideró el siguiente escalamiento:

$$1[V] \equiv 1[kV] \quad (16)$$

$$1[A] \equiv 1[kA] \quad (17)$$

De manera que si en el laboratorio se tienen tensiones de 220 [V_{LL}] en una parte del circuito, se está representando a un sistema de tensión línea a línea de 220 [kV].

4.1.1. Funciones de protección a ajustar

En primer lugar, se tomó en cuenta las funciones de protección que se deseaban ajustar. Dado que el dispositivo de protección correspondía a un relé SEL-321-5 con funciones de protección de distancia y sobrecorriente, se quería armar un circuito que representara una situación real en donde se ocuparan tales funciones de protección.

4.1.2. Restricciones de sensibilidad de la protección

Cada función de protección de la protección SEL 321-5 tiene rangos límite de corriente que puede registrar. Éstos son:

- I_{pkp} funciones de protección 51 y 51N: 0.1-3.2 [A_{sec}]
- Corriente de supervisión (O/C) función de protección 21: 0.2-34 [A_{sec}]
- Corriente de supervisión (O/C) función de protección 21N: 0.1-20 [A_{sec}]

Por lo que el circuito de pruebas en situación de falla no debía tener valores de I_{falla} bajo los límites de detección de corriente de cada función de protección.

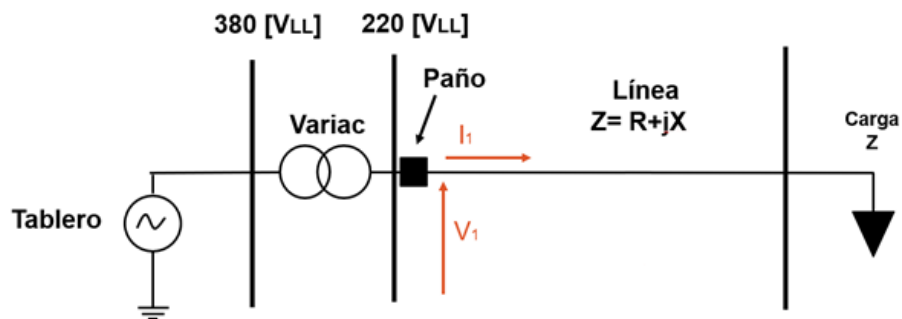


Figura 4.1: Circuito de un sistema de transmisión radial.

4.1.3. Tipo de circuito a realizar

En tercer lugar, se consideró el tipo de circuito de prueba que permitiría probar las funciones de protección deseadas considerando Para esto, se decidió construir un circuito que representara un sistema de transmisión radial como de la *Figura 4.1*.

4.1.4. Restricciones de laboratorio y elementos disponibles

Se tomaron en cuenta las restricciones del lugar de trabajo, que corresponde al laboratorio de máquinas de la UTFSM, sede Casa Central. Tal como se mencionó en la sección 3.1.2. , los valores de tensión y corriente disponibles en los tableros del laboratorio son los indicados en la *Tabla 3* correspondientes a una tensión de fase de 220 [V] y una corriente de 35 [A].

Luego, se revisaron los elementos disponibles en laboratorio y sus capacidades para poder armar el circuito de la *Figura 4.1*.

4.1.4.1. Inductancias

Las inductancias disponibles en laboratorio son de 140 [mH] y 5 [A] de capacidad. Tienen 7 terminales que permiten escoger un porcentaje del valor de la inductancia total, tal como se muestra en la *Figura 4.2*.

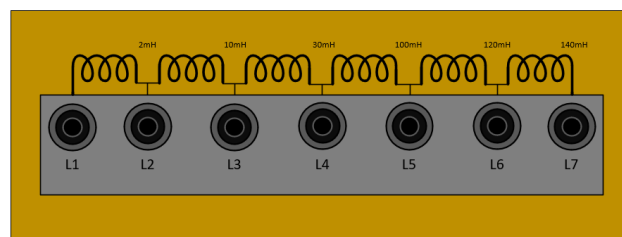


Figura 4.2: Inductancia disponible en laboratorio.

4.1.4.2. Resistencias

Se seleccionaron resistencias de tipo alambre enrollado, de distintos valores y capacidades de corriente. Consisten en dos piernas cilíndricas conectadas entre sí por un cursor o mando movable, tal como se muestra en la *Figura 4.3*. Las piernas pueden conectarse en serie o en paralelo y así obtener más resistencia o mayor capacidad de corriente respectivamente

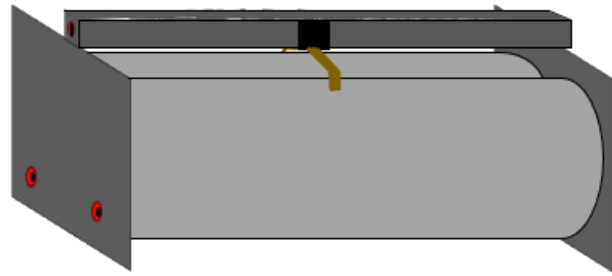


Figura 4.3: Resistencia de alambre enrollado.

4.1.4.3. Bornera

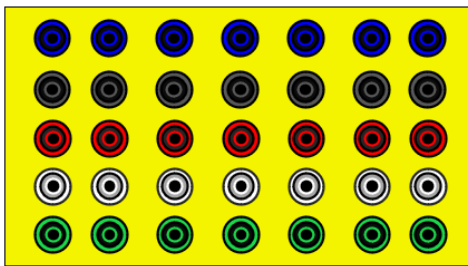


Figura 4.4: Bornera.

Permite obtener bornes extras para un mismo nodo, facilitando la conexión de distintos elementos del circuito y la incorporación de elementos de prueba como osciloscopios y multímetros. Se ocupó una bornera de 7 bornes por fase, con capacidad de 35 [A] como la de la *Figura 4.4*.

4.1.4.4. Interruptor trifásico

Elemento como el que se muestra en la *Figura 4.5*. Permite conectar o desconectar, de manera trifásica, partes del circuito. Se utilizó para efectuar fallas monofásicas a tierra.

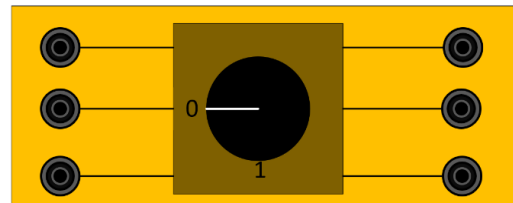


Figura 4.5: Interruptor trifásico.

4.1.4.5. Chroma 61704



Figura 4.6: Chroma.

Es una fuente de tensión alterna programable que provee señales puras, sin armónicos (ver *Figura 4.6*). Permite ajustar con precisión, entre otras cosas, la frecuencia, amplitud y fase de la señal.

4.2. Diseño del circuito de pruebas.

4.2.1. Nivel de tensión escogido

Teniendo como referencia la *Figura 4.1*, se consideró que la tensión de la primera barra estaba impuesta por los tableros del laboratorio, la que corresponde a 220 [V_{F-N}] o 380 [V_{LL}]. Por lo tanto, sólo se podía elegir la tensión en el lado secundario del Variac, la cual, arbitrariamente, se eligió igual a 127 [V_{F-N}] o 220 [V_{LL}].

4.2.2. Elección de los parámetros de líneas de secuencia positiva

Se recurrió a la página de Infotécnica del Coordinador Eléctrico Nacional [12] para consultar los datos de líneas del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y poder obtener valores referenciales que escoger. Para hacer esto, se utilizaron dos criterios:

1. Criterio de longitud.
2. Criterio de tensión

Estos dos criterios serán detallados en las siguientes dos subsecciones.

4.2.2.1. Criterio de longitud

Para este criterio se analizaron las líneas del SEN y se ordenaron por longitud de manera creciente, separándose en grupos para observar sus parámetros. La *Tabla 6* muestra los promedios de cada intervalo.

<i>Longitud línea (LL) en [km]</i>	$r_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$\frac{x_1}{r_1}$
0 – 1	0.1508	0.3520	2.3342
1 – 5	0.1724	0.3736	2.1670
5 – 10	0.1851	0.3820	2.0634
10 – 20	0.1913	0.3915	2.0467
20 – 50	0.1741	0.3936	2.2610
50 – 80	0.1179	0.3938	3.3401

Tabla 6: Valores promedio de parámetros de línea de secuencia positiva según tramo.

En la *Tabla 6* se observó que la resistencia es siempre más pequeña que la reactancia y, a medida que la línea va siendo de mayor longitud, la proporción entre x_1/r_1 crece.

Arbitrariamente se decidió el rango de longitud de línea como el comprendido entre los 80-120 [km]. En base a este criterio, los valores escogidos para los parámetros de línea fueron:

$$r_1^{longitud} = 0.0610 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (18)$$

$$x_1^{longitud} = 0.3527 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (19)$$

4.2.2.2. Criterio de tensión

Para este criterio se escogieron sólo líneas de 220 [kV] que se encontraban en la base de datos de DIGSILENT 2015 y se obtuvieron los parámetros de línea promedio mostrados en la *Tabla 7*. Para más detalles de los datos utilizados, ver el Anexo B.1.

<i>Longitud línea [km]</i>	$r_1^{tension} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_1^{tension} \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$\frac{X_1}{R_1}$
105	0.07848	0.3747	4.77

Tabla 7: Valores promedio parámetros de línea según criterio tensión (DIGSILENT 2015).

4.2.2.3. Valores escogidos

Se tomó el promedio de los valores escogidos entre $(r_1^{longitud}, r_1^{tension})$ y $(x_1^{longitud}, x_1^{tension})$ y se obtuvo:

$$x_1^{promedio} = 0.3637 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (20)$$

$$r_1^{promedio} = 0.0697 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (21)$$

De esta reactancia promedio, dada por (20), se obtuvo la inductancia promedio

$$L_1^{promedio} = 1.158 \left[\frac{mH}{km} \right] \quad (22)$$

Dado que en el laboratorio se tienen inductancias de L_{total} igual a 140 [mH], se escogió el largo de línea “LL” de manera que la inductancia total de ella fueran los 140 [mH]. Para esto, se realizó la operación mostrada por la ecuación (23):

$$LL = \frac{140[mH]}{L_1^{promedio}} \quad (23)$$

$$LL = 120.93 [km] \approx 120[km] \quad (24)$$

El valor del largo de línea resultante en (24) se redondeó arbitrariamente a 120 [km]. Al modificar levemente LL, la inductancia de la línea ya no viene dada por $L_1^{promedio}$ dada en (22) sino que por la ecuación (25):

$$L_1 = \frac{L_{total}}{LL} = \frac{140 [mH]}{120 [km]} \quad (25)$$

Resultando en:

$$L_1 = 1.167 \frac{[mH]}{[km]} \quad (26)$$

El valor de la resistencia que se ocupó para la línea sí se obtuvo de (21). Al tener definida la resistencia, inductancia y largo de la línea, todos los parámetros de la línea quedan definidos. La *Tabla 8* muestra esta información.

<i>Parámetros línea de LL = 120 [km]</i>					
<i>Resistencia</i>		<i>Inductancia</i>		<i>Reactancia</i>	
0.0697 $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$	8.4 [Ω]	1.167 $\left[\frac{mH}{km} \right]$	140 [mH]	0.367 $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$	44 [Ω]

Tabla 8: Parámetros de línea.

Finalmente, la impedancia de secuencia positiva de la línea, en su forma cartesiana y polar, se indican en (27):

$$Z_L = R_1 + jX_1 = 8.4 + j44 [\Omega] \equiv 44.83 \angle 79.20^\circ [\Omega] \quad (27)$$

4.2.3. Obtención de parámetros de secuencia cero y conductor neutro

Al armar un circuito con parámetros concentrados en laboratorio, se encontró la problemática de asociarle valores de impedancia de secuencia cero. La solución encontrada fue agregar un conductor neutro al circuito trifásico de prueba, tal como se muestra en la *Figura 4.7*.

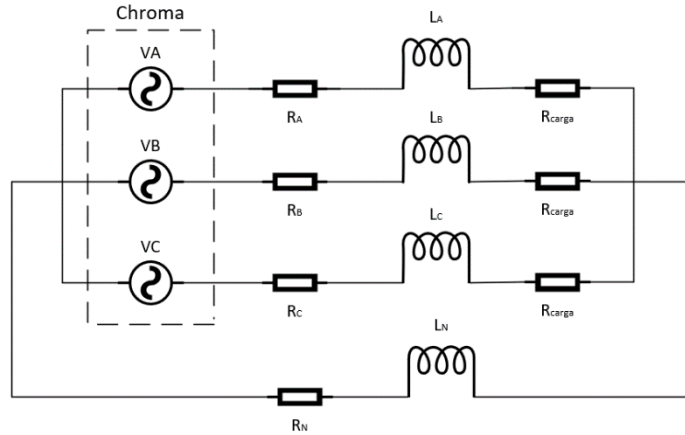


Figura 4.7: Circuito de prueba con conductor neutro.

El conductor neutro permite simular los parámetros de secuencia cero mediante la relación (28):

$$Z_0 = 3Z_N + Z_1 \Rightarrow Z_N = \frac{[Z_0 - Z_1]}{3} \quad (28)$$

Como ya se tiene el parámetro Z_1 , basta fijar el valor de Z_0 en (28) para despejar el valor de Z_N que permite reproducir los efectos de la secuencia cero en el circuito de pruebas. Lo anterior implica que las fallas que se hagan a tierra, en realidad, serán fallas al conductor neutro.

Para evitar escoger un valor de parámetros de secuencia cero que no guarde ningún sentido con los parámetros de secuencia positiva, se obtuvo el valor promedio de los parámetros de secuencia cero de las líneas vistas con el criterio de tensión mediante DIGSILENT 2015 (ver *Tabla 35* del Anexo B.1)

$$r_0^{tension} = 0.2532 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (29)$$

$$x_0^{tension} = 1.2551 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (30)$$

Luego se obtuvo la proporción que hay entre los valores promedio de secuencia positiva y de secuencia cero:

$$\frac{r_0^{tension}}{r_1^{tension}} = 3.23 ; \text{ con } r_1^{tension} = 0.07848[\Omega] \quad (31)$$

$$\frac{x_0^{tension}}{x_1^{tension}} = 3.35 ; \text{ con } x_1^{tension} = 0.3747[\Omega] \quad (32)$$

De modo que al tener $Z_L = R_1 + jX_1$ dado por (27), y las proporciones dadas por (31) y por (32), se puede estimar que una impedancia de secuencia cero razonable para la línea es

$$Z_0 = R_o + jX_0 = (3.23 \cdot R_1) + j(3.35 \cdot X_0) \quad (33)$$

Obteniéndose:

$$Z_0 = 0.2261 + j1.2294 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (34)$$

Teniendo los valores de Z_1 y de Z_0 y reemplazándolos en la ecuación (28), se obtuvo que:

$$Z_N = 0.0520 + j0.2875 \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (35)$$

La impedancia obtenida para Z_N implica que la inductancia del conductor neutro es de

$$L_N = 0.91514 \left[\frac{mH}{km} \right] \quad (36)$$

Que al multiplicarla por la longitud de la línea de 120 [km] queda en

$$L_N = 110 [mH] \quad (37)$$

4.2.4. Elección de la carga

Se quiso que el circuito de pruebas diseñado representara de la mejor manera un sistema real. Debido a esto, en vez de simplemente inventar los valores de parámetros de línea, se buscaron valores reales de la red y se hizo un promedio de ellos. Se quiso hacer lo mismo con la carga, pero se presentaron los siguientes problemas:

1. La carga del circuito debe ser de una impedancia mucho mayor que la línea, pero el consumo determina en gran manera la corriente de carga por el circuito. Si $Z_{carga} \gg Z_{Línea}$ entonces se tiene I_{carga} muy pequeña.

2. La corriente de carga no debe ser tan pequeña para que la protección la detecte, entonces la carga no debe ser tan grande, no cumpliéndose que $Z_{carga} \gg Z_{línea}$.
3. La caída de tensión que habrá en la línea depende de la carga elegida y si no se cumple que $Z_{carga} \gg Z_{línea}$, hay una caída de tensión considerable en la línea.
4. Las corrientes de cortocircuito en el circuito de prueba no pueden superar los 16 [A] para evitar el daño de equipos del laboratorio.
5. En base a datos de alrededor de 30 líneas de la base de datos de DIGSILENT 2015 (ver Anexo B.2), se obtuvo que la corriente de carga promedio en líneas de 220 [kV] es alrededor de 0.3 [kA] mientras que las corrientes de cortocircuito daban un promedio de 6.5 [kA], existiendo una razón $I_{coci}/I_{carga}=37$.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, no fue posible escoger un valor de carga que cumpliera con todas esas restricciones por lo que se escogió un valor de carga que permitiera tener valores de I_{coci} bajo los 16 [A] e I_{carga} detectable por la protección. Los puntos 1, 3 y 5 se tuvieron que dejar de lado para priorizar el verdadero objetivo de esta sección que es proveer de un circuito de pruebas para el paño eléctrico.

Finalmente se escogió un valor de carga resistivo de 125 [Ω].

4.2.5. Valores escogidos

A modo de resumen, los valores escogidos para los parámetros de línea se muestran en la *Tabla 9*.

Z	$r + jX_L \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$R + jX_L [\Omega]$	$L \left[\frac{mH}{km} \right]$	$L[mH]$	$Z \angle \theta [\Omega]$
Z_1	$0.07 + j0.367$	$8.4 + j44$	1.167	140	$44.83 \angle 79.20^\circ$
Z_N	$0.052 + j0.288$	$6.24 + j34.5$	0.91514	110	$35.06 \angle 79.74^\circ$
Z_0	$0.226 + j1.23$	$27.132 + j147.53$	2.261	271.32	$150 \angle 79.58^\circ$

Tabla 9: Resumen parámetros de línea.

Y el circuito de pruebas diseñado es el que se muestra en la *Figura 4.8*.

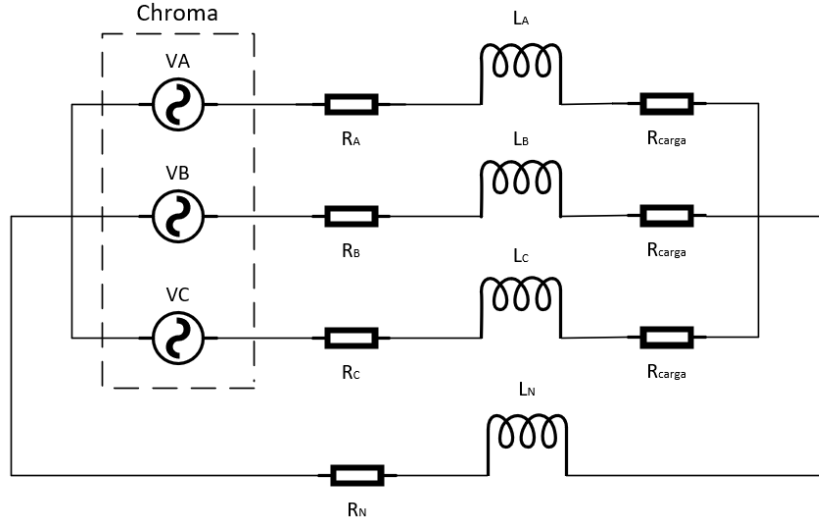


Figura 4.8: Circuito de pruebas diseñado.

En donde:

- $Longitud\ línea = 120\ [km]$
- $R_A = R_B = R_C = 8.4[\Omega]$
- $L_A = L_B = L_C = 140[mH]$
- $R_{carga} = 125[\Omega]$
- $R_N = 6.24[\Omega]$
- $L_N = 110[mH]$

4.3. Corriente de carga y niveles de cortocircuito

Se simuló el circuito de la *Figura 4.8* mediante el software DIgSILENT para obtener sus niveles de corriente. En régimen estacionario se obtuvo que $I_{carga} = 0.9\ [A_{rms}]$. Por otro lado, los niveles de cortocircuito (NCC) para distintas fallas se muestran en la *Tabla 10*. En el siguiente apartado se explica el motivo de escoger esas ubicaciones de cortocircuito.

<i>Ubicación línea</i>	$3\phi[A]$	$2\phi[A]$	2ϕ $- T[A]$	$1\phi[A]$	$1\phi[A]R_f$ $= 10[\Omega]$	$1\phi[A]R_f$ $= 30[\Omega]$
100%	3	2	2	2	1	1
85.71%	3	3	3	2	2	1
57.14%	5	4	5	3	2	2

Tabla 10: NCC del circuito de pruebas para distintas fallas simuladas con DIgSILENT.

4.3.1. Ubicaciones seleccionadas para los cortocircuitos en la línea

Las ubicaciones de los cortocircuitos a lo largo de la línea se escogieron en base a los bornes de las inductancias. Como se aprecia en la *Figura 4.9*, el 100% de la línea equivale a 140 [mH] (la totalidad de la reactancia de la línea) y el resto de sus bornes equivale a un porcentaje de ésta. De esta manera, si se conecta la inductancia entre los bornes L1- L7 se tiene el 100% de reactancia de la línea, si se

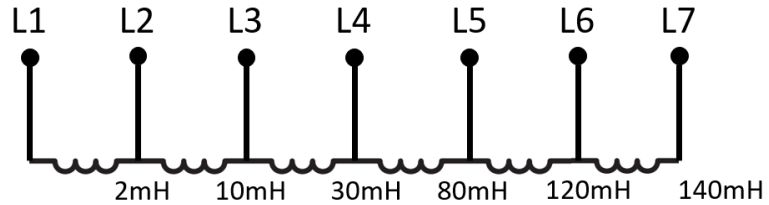


Figura 4.9: Bornes de las inductancias presentes en laboratorio.

conecta entre L1- L6 se tiene el 85.71% de la reactancia de la línea y entre los bornes L1- L5 corresponde al 57.14% de la reactancia de la línea. Esta información se resume en la *Tabla 11*.

Porcentaje "X _L " de línea	Valor Inductancia [mH]	Bornes inductancia	Z _L en [Ω] hasta el punto de falla
100%	140	L ₁ – L ₇	8.4 + j44
85.71%	120	L ₁ – L ₆	7.2 + j37.7
57.14%	80	L ₁ – L ₅	4.8 + j25.14

Tabla 11: Ubicaciones de falla a lo largo de la línea e impedancia correspondiente de la línea hasta el punto de falla.

Lo anterior impone una restricción para el conductor neutro, ya que sus valores deben estar sujetos a los mismos porcentajes escogidos anteriormente para la línea, en otras palabras, al simular una falla al 85.71% de la línea que involucre al conductor neutro, éste también debe cortocircuitarse al 85.71% de su valor, pero como sus parámetros no son iguales a los de la línea, este valor no se logra cortocircuitando los mismos bornes de inductancia que la línea. Además, el conductor neutro debe cortocircuitarse rápidamente y pasar del 100% de su valor al valor de falla. Esto implicó el uso de 3 inductancias para representar la reactancia del conductor neutro para los casos de falla al 85.71% y 57.14% con el objetivo de lograr en

estado estacionario los 110 [mH] y después pasar al valor indicado entre paréntesis en la *Tabla 12*. Más detalles en el Anexo C.

<i>Porcentaje “X_L” de conductor neutro</i>	<i>Valor Inductancia [mH]</i>	<i>Bornes inductancia neutro</i>	<i>Z_N en [Ω] hasta el punto de falla</i>
100%	110	$L_3 - L_6$	$6.2 + j34.5$
85.71%	110 (94)	$L_4 - L_6 + L_1 - L_{3(2)}$ $+ L_1 - L_3$	$5.4 + j29.6$
57.14%	110 (63)	$L_5 - L_7 + L_1 - L_{4(2)}$ $+ L_3 - L_4$	$3.6 + j19.7$

Tabla 12: Ubicaciones de falla a lo largo del conductor neutro e impedancia correspondiente del conductor neutro hasta el punto de falla.

4.4. Elementos circuitales escogidos para el circuito de prueba.

Para armar el circuito mostrado en la *Figura 4.8*, se escogieron resistencias variables de alambre enrollado e inductancias como las mostradas en el apartado 4.1.4. El detalle del número de inductancias escogidas por fase se muestra en la *Tabla 13*.

<i>Inductancias</i>	<i>Cantidad</i>
<i>Fase A</i>	1
<i>Fase B</i>	1
<i>Fase C</i>	1
<i>Neutro</i>	3
<i>Totales</i>	6

Tabla 13: Número de inductancias por fase.

Todas las inductancias escogidas tienen una capacidad de 5 [A].

Por otro lado, el número de resistencias variables de alambre enrollado a ocupar se muestra en la *Tabla 14*.

<i>Resistencias</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Nombre de "R"</i>
<i>Fase A</i>	3	<i>R21, R87, R14</i>
<i>Fase B</i>	3	<i>R22, R85, R10</i>
<i>Fase C</i>	3	<i>R18, R86, R28</i>
<i>Neutro</i>	2	<i>R43, R84</i>
<i>Totales</i>	11	-----

Tabla 14: Resistencias variables a ocupar en los ensayos.

Cada resistencia tiene una capacidad distinta de corriente, que se detalla en la *Tabla 15*. Aquellas que tienen dos alambres enrollados, se describen como “2 x corriente de una pierna”, ya que éstas se pueden conectar en serie o en paralelo.

<i>Nombre de "R"</i>	<i>Resistencia [Ω]</i>	<i>Corriente[A]</i>
<i>R21, R22</i>	60	<i>2x6</i>
<i>R18</i>	80	<i>2x5</i>
<i>R43, R84, R85, R86, R87</i>	11	6.5
<i>R28</i>	400	<i>2x1.6</i>
<i>R14</i>	230	<i>2x3</i>
<i>R10</i>	420	<i>2x2</i>

Tabla 15: Detalle de las resistencias variables seleccionadas.

Se escogieron todos estos elementos porque durante los ensayos se debía poder cortocircuitar un porcentaje de la línea, pero mantener la porción restante de ella conectada. Finalmente, el circuito de pruebas es como el mostrado en la *Figura 4.10* en donde:

- R14, R10 y R28 son cargas
- R43, R84, L_{N1} , L_{N2} y L_{N3} corresponden al conductor neutro
- El resto de los elementos corresponden a las líneas.

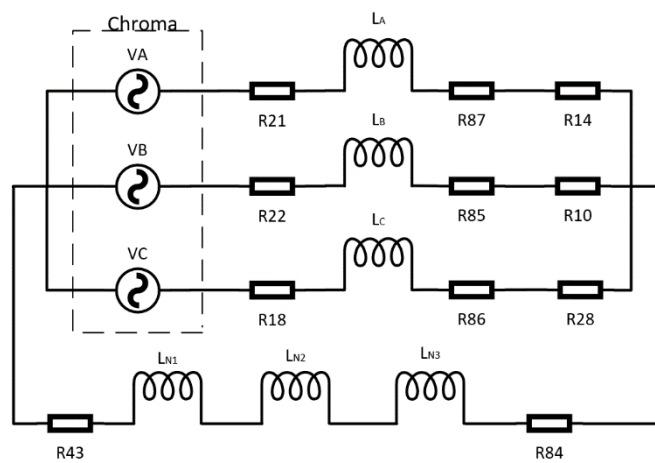


Figura 4.10 : Circuito de prueba con los elementos seleccionados.

5. Configuración y uso de la protección digital SEL 321-5

En este capítulo se trata el tema de los ajustes escogidos para la protección que permiten despejar correctamente las fallas reproducidas en los ensayos y se comparten aspectos prácticos del uso de la protección SEL 321-5 y su software AcSELerator QuickSET. Toda la información aquí presentada sobre la protección digital y su software pretende ser una guía práctica de uso del dispositivo y se basó en el manual del relé [2].

5.1. Ajustes de las funciones de protección

Se decidió implementar en la protección SEL 321-5 las funciones de protección de sobrecorriente y de distancia. Los aspectos relevantes definidos hasta el momento son los siguientes:

1) Transformadores de medida del paño eléctrico a escala:

$$TTPP \text{ de } 220/110 [V] \Rightarrow \text{Razón de transformación: } PTR = 2 \quad (38)$$

$$TTCC \text{ de } 50/5 [A] \Rightarrow \text{Razón de transformación: } CTR = 10 \quad (39)$$

2) Parámetros de línea (ver Tabla 9)

$$Z_1 = 0.07 + j0.367 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

$$Z_0 = 0.2261 + j0.123 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

3) Restricciones de sensibilidad de la protección

- Corrientes mínimas que detecta la protección para cada función de protección.
Ver el apartado 4.1.2.

Además, se definieron dos cosas:

- La función de protección de sobrecorriente actúa como respaldo de la función de protección de distancia.
- Se buscó proteger sólo los elementos de la línea. Se asumió que las resistencias correspondientes a las cargas están protegidas por un sistema de protección aguas abajo por lo que las resistencias R10, R14 y R28 están protegidas (ver *Figura 4.10*).

5.3.6.1. A modo de resumen, en la *Figura 5.1* se muestran los ajustes primarios tipo *output* que se ocuparon en la protección (ver sección 5.3.8.2 Ajustes utilizados del grupo L1 y lógicas de disparo.

5.3.6.2. Ajustes utilizados del grupo L1 y lógicas de disparo.

5.3.6.3. Ajustes utilizados del grupo L1 y lógicas de disparo.

5.3.6.4. Ajustes utilizados del grupo L1 y lógicas de disparo.

), los que se resaltaron en amarillo.

TAR	Elements							
2	Z4G	Z3G	Z2G	Z1G	M4P	M3P	M2P	M1P
3	Z4GT	Z3GT	Z2GT	LOP	M4PT	M3PT	M2PT	OPA
4	67Q4	67Q3	67Q2	67Q1	67N4	67N3	67N2	67N1
5	67Q4T	67Q3T	67Q2T	OST	67N4T	67N3T	67N2T	OSB
6	PD1	3P27	27L	50H	50MF	51NT	51QT	51PT
7	ZLOAD	SOTFE	TCM	CC	3PO	SPO	REJO	PD2
8	3P50R	51NP	51QP	51PP	50G	50PP	50M	50L
9	50Q4	50Q3	50Q2	50Q1	50N4	50N3	50N2	50N1
10	50ABC	X6ABC	X5ABC	3PT	TPC	TPB	TPA	32QF
11	3P59	59L	59N	59PR	59PB	59NL	59PL	50Q
12	BTX	GDS	STOP	START	FIDEN	FSC	FSB	FSA
13	32QR	KEY3	KEY1	EKEY	Z3RB	ATB	ECTT	KEY
14	XAG4	XAG3	XAG2	XAG1	MAG4	MAG3	MAG2	MAG1
15	XBG4	XBG3	XBG2	XBG1	MBG4	MBG3	MBG2	MBG1
16	XCG4	XCG3	XCG2	XCG1	MCG4	MCG3	MCG2	MCG1
17	MBC4	MBC3	MBC2	MBC1	MAB4	MAB3	MAB2	MAB1
18	SPOC	SPOB	SPOA	*	MCA4	MCA3	MCA2	MCA1
19	50HH	OSTI	50CA	50BC	50AB	*	*	*
20	Z1X	27C	27B	27A	UBOSB	ROK	3PSOTF	TOP

* Reserved for future use

Figura 5.1: Resumen de ajustes primarios que se ocuparon en la protección.

5.1.1. Ajustes función de protección de sobrecorriente

Se utilizaron funciones de protección 51 y 51N. La función 51 se destinó a proteger los elementos de línea de corrientes de falla entre fases, pero la función 51N se ajustó para que detectara corrientes de falla a tierra igual o menor que la corriente de carga del circuito de prueba. Es importante mencionar que todos los ajustes en la protección SEL-321-5 se ingresan en Ampere secundarios.

5.1.1.1. Función 51

El elemento serie más restrictivo y que forma parte de la línea son las inductancias de cada fase, que soportan una corriente de 5 [A], por lo tanto, se fijó la corriente I_{pkp} igual a 5 [A]. En cuanto al Time Dial, se fijó al mínimo del rango de la protección, que es 0.05, ya que esto no implicaría una descoordinación con el sistema de protección supuesto aguas abajo si se alcanzara la corriente pickup de la función 51.

El resumen de los ajustes se muestra en la *Tabla 16*.

<i>Ajuste</i>	<i>Valor</i>
<i>Pickup (I_{pkp})</i>	$0.5[A_{sec}] / 5[A_{pri}]$
<i>Familia de curva (U.S o IEC)</i>	<i>C1 – IEC Clase A (inversa estándar)</i>
<i>Time Dial</i>	0.05
<i>Dirección de disparo</i>	<i>Ninguna</i>

Tabla 16: Ajustes función 51

5.1.1.2. Función 51N

Se fijó la corriente pickup de esta función de protección en el límite mínimo de la protección, que es 1 [A_{pri}] debido a que la *Tabla 10* muestra que al hacer fallas monofásicas al 100% de la línea con R_f se obtienen corrientes de 1 [A], muy cercanas a la corriente de carga. El Time Dial también se fijó al límite mínimo que da la protección debido a que el sistema es radial y se asume que no hay descoordinación con aguas abajo debido a que una falla en el sector de la carga provocaría corrientes aún más bajas que no alcanzarían la I_{pkp} de ninguna protección de sobrecorriente analizada en este trabajo.

El resumen de los ajustes se muestra en la *Tabla 17*.

<i>Ajuste</i>	<i>Valor</i>
<i>Pickup (I_{pkp})</i>	$0.1[A_{sec}] / 1[A_{pri}]$
<i>Familia de curva (U.S o IEC)</i>	<i>C1 – IEC Clase A (inversa estándar)</i>
<i>Time Dial</i>	0.05
<i>Dirección de disparo</i>	<i>Ninguna</i>

Tabla 17: Ajustes función 51N.

5.1.2. Ajustes función de protección de distancia (21/21N)

Se ajustaron las funciones 21 y 21N. Todos los ajustes de esta función de protección se ingresaron en ohms secundarios según la ecuación (40).

$$[\Omega_{sec}] = [\Omega_{pri}] \times \frac{CTR}{PTR} \quad (40)$$

En donde $CTR = 10$ y $PTR = 2$, llegando a la expresión(41).

$$[\Omega_{sec}] = [\Omega_{pri}] \times 5 \quad (41)$$

5.1.2.1. Definición de zonas

Se ajustaron sólo dos zonas. La zona 1 (Z1) consideró hasta el 80% de la línea y la zona 2 (Z2) hasta el 120% de su valor. Los porcentajes de impedancia de línea, en $[\Omega_{pri}]$, se muestran a continuación:

$$80\% Z_{Línea} = 6.72 + j35.2 [\Omega_{pri}] \equiv 35.84 \angle 79.20^\circ [\Omega_{pri}] \quad (42)$$

$$100\% Z_{Línea} = 8.4 + j44 [\Omega_{pri}] \equiv 44.83 \angle 79.20^\circ [\Omega_{pri}] \quad (43)$$

$$120\% Z_{Línea} = 10.1 + j53 [\Omega_{pri}] \equiv 53.80 \angle 79.20^\circ [\Omega_{pri}] \quad (44)$$

Los mismos porcentajes de impedancia de línea, pero esta vez en $[\Omega_{sec}]$, se muestran a continuación:

$$1. \quad 80\% Z_{Línea} = 33.6 + j176.2 [\Omega_{sec}] \equiv 179.34 \angle 79.20^\circ [\Omega_{sec}] \quad (45)$$

$$2. \quad 100\% Z_{Línea} = 42 + j220.2 [\Omega_{sec}] \equiv 224.17 \angle 79.20^\circ [\Omega_{sec}] \quad (46)$$

$$3. \quad 120\% Z_{Línea} = 50.4 + j264.2 [\Omega_{sec}] \equiv 269.00 \angle 79.20^\circ [\Omega_{sec}] \quad (47)$$

Por otro lado, se tiene que la impedancia de secuencia cero de la línea en $[\Omega_{pri}]$ es

$$Z_0 = 150 \angle 79.58^\circ [\Omega_{pri}]$$

Lo que implica que en $[\Omega_{sec}]$ es

$$Z_0 = 750 \angle 79.58^\circ [\Omega_{sec}] \quad (48)$$

5.1.2.2. Ajuste función 21

Esta función de protección en la protección SEL-321-5 está disponible sólo con característica tipo Mho por lo que se ajusta ingresando su magnitud en $[\Omega_{sec}]$. Los ajustes ingresados son los que se muestran en la *Tabla 18*.

<i>Zona</i>	<i>Alcance línea</i>	<i>Magnitud $[\Omega_{sec}]$</i>	<i>Tiempo operación</i>
1	80%	179.34	<i>Instantáneo</i>
2	120%	269.00	0.3 [s]

Tabla 18: Ajustes función 21.

5.1.2.2. Ajuste función 21N

Se ocupó la característica cuadrilateral para ajustar la protección SEL-321-5. El ajuste “RG” se refiere a la resistencia y el ajuste “XG” se refiere a la reactancia. Los ajustes ingresados son los que se muestran en la *Tabla 19* y el factor “ k_0 ” mostrado en (49).

<i>Zona</i>	<i>Alcance línea</i>	<i>RG $[\Omega_{sec}]$</i>	<i>XG $[\Omega_{sec}]$</i>	<i>Tiempo operación</i>
1	80%	150	180	<i>Instantáneo</i>
2	120%	205	265	0.3 [s]

Tabla 19: Ajustes función 21N

Por la ecuación (15) del marco teórico:

$$k_0 = 0.782 \angle 0.54^\circ \quad (49)$$

5.2. Dispositivo de protección SEL321-5

El relé SEL321-1, mostrado en la *Figura 5.2.*, es una protección de la marca SEL (Schweitzer Engineering Laboratories) con funciones de protección de distancia (21/21N) y de sobrecorriente (50/50N/51/51N/67/67N).

Esta protección cuenta con 3 puertos de comunicación del tipo serial (RS-232), una en el panel frontal y dos en su parte posterior, que también cuenta con 8 entradas “IN” asignables y 15 salidas programables “OUT”. En la



Figura 5.2: Protección SEL321-5.

Figura 5.3 se muestra su panel frontal y en la *Figura 5.4* su panel posterior.

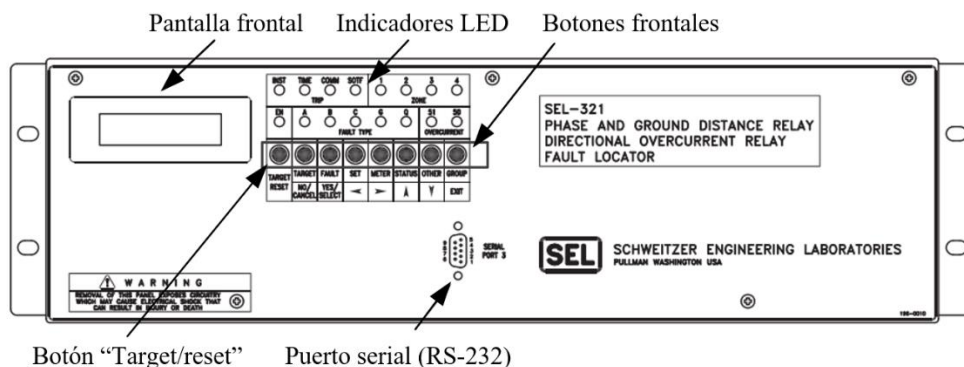


Figura 5.3: Panel frontal de la protección SEL321-5.

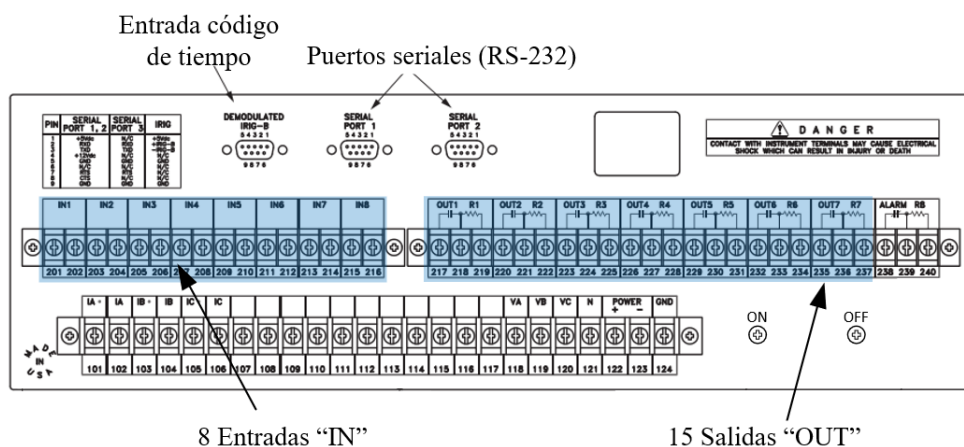


Figura 5.4: Panel posterior de la protección SEL321-5.

Los terminales de conexión en su parte trasera están identificados con números que facilitan su referencia. Por ejemplo, los terminales secundarios de los TTCC se conectan entrando en los terminales 101, 102 y 103. Los terminales 104, 105 y 106 se conectan en estrella y se llevan al neutro, tal como se mostró en la *Figura 3.36* de la sección 3.3.4.2.

En este trabajo no se ocuparon los terminales de entrada “IN” de la protección, pero sí se utilizó la salida “OUT1”, conectando sus terminales 217 y 218 al circuito de control de los interruptores como se indica en la sección 3.2.2.2. y en la *Figura 3.36* de la sección 3.3.4.2.

Los terminales 122, 123 y 124 mostrados en la *Figura 5.4*, están unidos a un enchufe que permite conectar la protección a un tomacorriente, en este caso, a la zapatilla eléctrica del paño eléctrico a escala.

5.2.1. Especificaciones generales SEL321-5

- **Alimentación:** la protección puede alimentarse tanto a una fuente continua como alterna dentro de los siguientes rangos: 85-350 [V_{DC}] (15 [W] máximo) o 85-264 [V_{AC}].
- **Entradas de tensión (TTPP):** se puede conectar cualquier tensión en el rango 0-150 [V_{AC}].
- **Entradas de corriente (TTCC):** 3 [A] de manera permanente, 100 [A] durante 1 [s]. 250 [A] por un ciclo. Burden: 0.27 [VA] a 5 [A], 2.51[VA] a 15 [A.]
- **Salidas OUT:** 6 [A] de manera permanente, 100 [A] por 1 [s]. Tiempo de apertura menor a 5 [ms.]

5.3. Uso del software AcSELerator QuickSET

AcSELerator QuickSET es la herramienta que ocupa la marca Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) para el manejo y configuración de todos sus dispositivos de protección. Con ella se puede conectar el computador al dispositivo de protección para lectura, configuración y carga o envío de ajustes.

5.3.1. Descarga del software

El software AcSELerator QuickSET se puede descargar de manera gratuita en la página de selinc.com mediante el siguiente enlace: <https://selinc.com/products/5030/>. Se descargará un

instalador, seleccionarlo y seguir las instrucciones de instalación del asistente del software. Cuando se desplieguen ventanas emergentes de los “drivers” y “plugins” del software, seleccionarlos todos para su instalación.

Se recomienda crear una cuenta de usuario para poder tener acceso a documentación del sitio web de SEL como manuales de instrucción o estudios de publicaciones. Para esto, puede solicitar acceso a estos documentos si pulsa en la opción “Contact Us” en la página del enlace de descarga, debajo del botón donde se descarga el software. Luego de unos días llegará un correo de respuesta en donde se ve cada situación particular.

5.3.2. Interfaz de usuario del software AcSELerator QuickSET

En la *Figura 5.5* se muestra la interfaz del software que permite programar la protección.

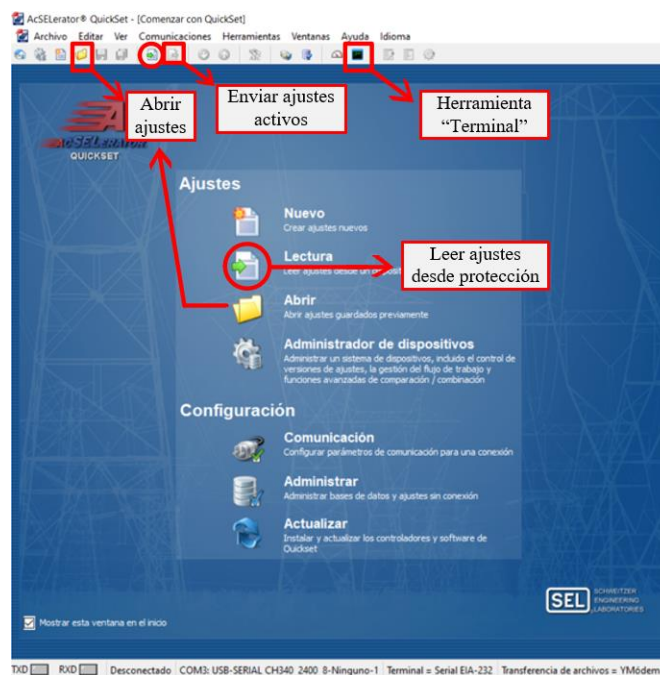


Figura 5.5: Interfaz del software AcSELerator QuickSET.

En la interfaz de usuario se ven claramente dos secciones: 1) Sección de Ajustes y 2) Sección de Configuración. En la sección de ajustes las opciones más relevantes son la de “Abrir” un documento de ajustes ya existente y la de “Lectura” de ajustes desde el dispositivo de protección conectado. Por otro lado, de la sección “Configuración”, la única opción utilizada fue la de “Comunicación”, que permite establecer comunicación entre el computador y el dispositivo de protección, que es el primer paso que debe realizarse. En la *Figura 5.5* también

se destacó la herramienta “Terminal”, que permite comunicarse con la protección a través de comandos desde el computador. De lo contrario, se debería navegar por el panel frontal de la protección para solicitar alguna acción, lo que es, sin duda, más lento.

5.3.3. Estableciendo comunicación con la protección

Este es el primer paso que se debe realizar al trabajar con la protección. Para esto, se debe tener un cable tipo usb-serial (RS232) que permita conectarse desde su computador a algún puerto de entrada de la protección (puerto 1, puerto 2 o puerto F).

IMPORTANTE: El cable serial que utiliza la protección SEL321-5 es cruzado, no directo. Si no se encuentra un adaptador usb-serial cruzado a algún accesorio para adaptarlo, no podrá establecer comunicación con el dispositivo. La serie de pasos para establecer comunicación con la protección se describe a continuación:

1. Encienda la protección y conéctela al computador mediante el cable USB/RS232
2. Ingrese a AcSELeRator QuickSET y seleccione el icono “Comunicación” de la interfaz de usuario mostrada en la *Figura 5.5*.
3. Se abrirá una ventana emergente como la *Figura 5.6* En “Tipo de conexión activa”, seleccione “Serial”
4. En “Dispositivo”, seleccione el puerto usb de su computador desde donde se origina la conexión. Ejemplo. “COM3”, “COM7”, etc.
5. Seleccione las mismas opciones que se muestran en la *Figura 5.6* de parámetros de comunicación y presione “Aceptar”

En la parte inferior de la interfaz de usuario del software, ahora debiera decir “Conectado”.

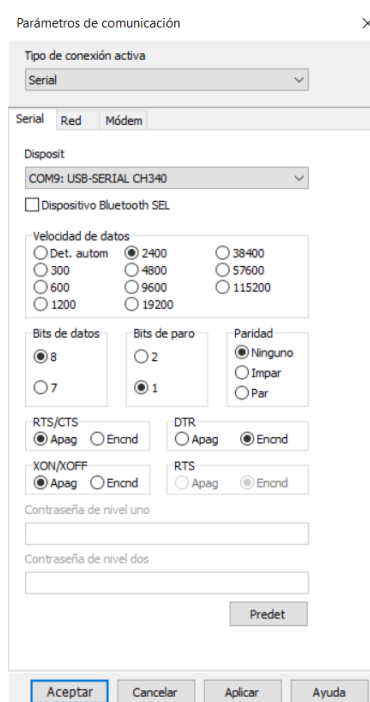


Figura 5.6: Parámetros de comunicación.

5.3.4. Claves de acceso de la protección SEL321-5

La protección tiene 3 niveles: nivel 1, nivel B y nivel 2. El nivel 1 es el nivel de acceso y permite ver todos los ajustes de la protección, pero no editarlos; el nivel B permite utilizar dos comandos específicos para probar el desempeño de las salidas OUT de la protección; y el nivel 2 permite ver y modificar todos los ajustes. Para entrar a cada nivel se puede hacer desde el panel frontal de la protección o utilizando la herramienta “Terminal” desde la interfaz de usuario del programa (ver *Figura 5.5*). Esta última opción fue la que se utilizó y es la que se abordará en este documento.

Para entrar a cada nivel, primero debe abrir la ventana “Terminal” y escribir el comando que corresponda según la *Tabla 20*, luego se le solicitará la contraseña correspondiente.

<i>Comando de entrada</i>	<i>Nivel</i>	<i>Clave de acceso</i>
<i>ACCESS</i>	<i>Nivel 1</i>	<i>OTTER</i>
<i>BRE</i>	<i>Nivel B</i>	<i>EDITH</i>
<i>2AC</i>	<i>Nivel 2</i>	<i>TAIL</i>

Tabla 20: Claves de acceso para cada nivel de la protección SEL321-5.

IMPORTANTE: cuando se entra a la ventana “Terminal”, siempre se debe ingresar primero al nivel 1 mediante la clave “ACCESS” (este comando permite el ingreso en minúsculas, el resto no). Se solicitará la contraseña “OTTER”. Desde ese momento, se puede ingresar directamente al nivel 2 mediante el comando “2AC” e ingresando la contraseña “TAIL” cuando se solicite.

5.3.5. Ingresando la fecha y hora a la protección y por qué es importante

Antes de realizar algún ajuste a la protección o cualquier prueba, se recomienda ingresar la fecha y hora a la protección a través de la ventana “Terminal” ya que no es posible extraer oscilografías de la protección sin haber ingresado la fecha actual, derivando en mensajes de error.

Para ingresar la fecha y hora a la protección SEL321-5 debe utilizar los comandos “DATE” y “TIME” respectivamente e ingresarlos en el formato siguiente:

⇒DATE mes/día/año (50)

⇒TIME hora: minutos: segundos (51)

La *Figura 5.7* muestra como ingresar la fecha y hora a la protección a través de la herramienta “Terminal”. Note como primero se tuvo que acceder al nivel 1 mediante el comando “access” y luego se escribió el comando “DATE 01/02/2024” indicándole al programa que ingresara la fecha “2 de febrero del 2024” a la protección.

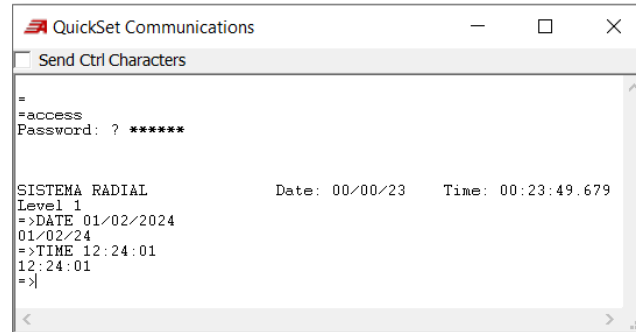


Figura 5.7: Ingresando fecha y hora en la protección.

Cada vez que la protección se apaga, ésta pierde la fecha y hora ingresadas, por lo que hay que repetir este proceso nuevamente.

5.3.7. Abrir y cargar ajustes

Para esta acción, es necesario que tenga a mano las claves de acceso mencionadas en la *Tabla 20* y el “Part Number” de la protección. Este código se indica en (52) y está pegado en un sticker en la parte posterior de la protección.

Part Number ⇒ 321514215HNB5X4 (52)

Se debe diferenciar entre abrir ajustes desde la protección, denominado “Lectura de ajustes”, y abrir ajustes almacenados en el computador y que no necesariamente se encuentran cargados en la protección.

5.3.7.1. Abrir ajustes ya existentes

Se pueden abrir archivos de ajustes aún con la protección desconectada. Los ajustes de la protección se guardan en archivos con extensión “.rdb”. Para abrir uno de estos archivos, debe ingresar al software AcSELerator QuickSET y seleccionar la opción “Abrir” indicada en la *Figura 5.5*. Al hacerlo, aparecerá una ventana para examinar la ubicación del

documento. En el ejemplo mostrado en la *Figura 5.8* se observan dos archivos con extensión “.rdb”.

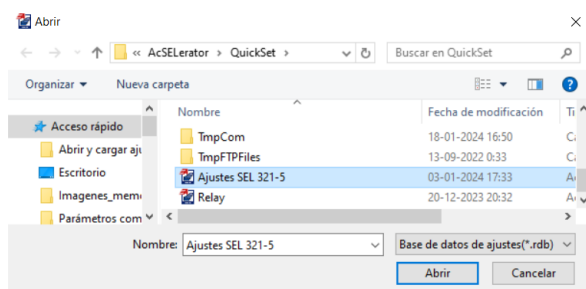


Figura 5.8: Archivos de ajustes con extensión “.rdb”.

Cada archivo de este tipo puede almacenar varios ajustes. Por ejemplo, al seleccionar el archivo “Ajustes SEL 321-5”, se abrió una ventana como la mostrada en la *Figura 5.9*, que muestra dos ajustes diferentes: 1) “Ajustes SEL 321-5.rdb” y 2) “Relay.rdb”. Al seleccionar “Aceptar” se abrirá una planilla de ajustes como la mostrada en la *Figura 5.11*.

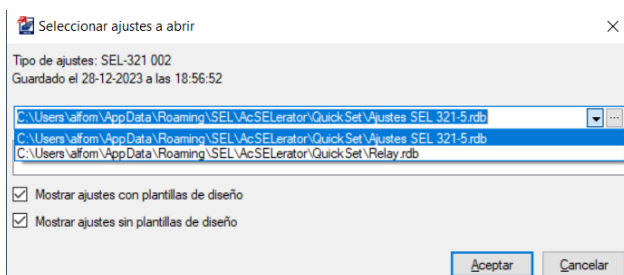


Figura 5.9: Distintos ajustes guardados en un solo archivo de extensión “.rdb”.

5.3.7.2. Lectura de ajustes o abrir ajustes almacenados en la protección

Para realizar esta acción debe tener la protección conectada y encontrarse en la interfaz de usuario del software AcSElerator QuickSET (ver *Figura 5.5*). Luego, seleccionar la opción “Lectura” que se encuentra en dos ubicaciones: en la barra de herramientas y en la zona de “Ajustes” (ambas encerradas con un círculo en la *Figura 5.5*). Se abrirá una ventana como la mostrada en la *Figura 5.10*.

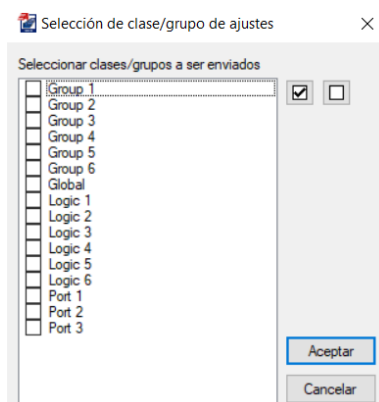


Figura 5.10: Grupos de ajustes existentes en la protección.

Se puede seleccionar desde un solo grupo a todos los grupos de ajustes. Entre más grupos se seleccionen, más se demorará en cargar la información.

Una vez cargada la información, se desplegará una planilla con todos los ajustes activos de la protección, similar a una planilla Excel, tal como se muestra en la Figura 5.11.

ACSElator® QuickSet - [Editor de ajustes - Ajustes Preliminares(guardado) (SEL-321-5 002 v7.2.0.0)]

Archivo Editar Ver Comunicaciones Herramientas Ventanas Ayuda Idioma

Enviar ajustes activos

Analice un encabezado de columna

Group	Setting	Value	Range
1	REUID	SEL-321	17 characters
1	TRMID	Sistema radial	39 characters
1	Z1MAG	224.17	5A: 0.05-255 ohms sec 1A: 0.25-1275 ohms sec
1	Z1MAG	79.20	40° to 90°
1	Z2MAG	79.0	5A: 0.05-255 ohms sec 1A: 0.25-1275 ohms sec
1	Z2MAG	79.58	40° to 90°
1	LODAT	R	Y,R,N
1	LL	120	0.1-999 unaltes
1	CTR	10	1-6000
1	PTR	2	1-10000
1	PMH02	2	N,1,2,3,4
1	GMH02	N	N,1,2,3,4
1	QUAD2	2	N,1,2,3,4
1	DIR1	F	F,R
1	DIR2	F	F,R
1	DIR3	R	F,R
1	DIR4	F	F,R
1	Z1P	179.34	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z2P	269.00	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z3P	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z4P	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	50PP1	0.2	5A: 1-170 amp sec 1A: 0.2-34 amp sec
1	50PP2	0.2	5A: 1-170 amp sec 1A: 0.2-34 amp sec
1	50PP3	OFF	5A: 1-170 amp sec 1A: 0.2-34 amp sec
1	50PP4	OFF	5A: 1-170 amp sec 1A: 0.2-34 amp sec
1	Z1MG	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z2MG	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z3MG	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	Z4MG	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	XG1	180	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	XG2	265	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	XG3	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	XG4	OFF	5A: 0.05-64 ohms sec 1A: 0.25-320 ohms sec
1	RG1	150	5A: 0.05-50 ohms sec 1A: 0.25-250 ohms sec

Num de parte: 321514215HNBSX4

TXD RXD Abrir Conectado COM9: USB-SERIAL CH340 2400 8-Ninguno-1 Terminal = Serial EIA-232 Transferencia de archivos = YModem

Figura 5.11: Planilla de ajustes de la protección.

La planilla de ajustes cuenta con 4 columnas: la primera columna indica el grupo al que pertenece el ajuste; la segunda columna indica la nomenclatura del ajuste (que se puede

encontrar en el manual del relé); la tercera columna es el valor del ajuste; y la cuarta columna es una breve descripción de los valores permitidos para ese ajuste.

5.3.7.3. Cargar ajustes a la protección

Para cargar ajustes a la protección, ésta, necesariamente, debe estar conectada al computador. Sin embargo, se pueden modificar los ajustes desde una planilla de ajustes ya existente y guardarlos para posteriormente cargarlos a la protección. Para guardar un ajuste, utilice el ícono utilizado ampliamente en distintos programas para guardar un documento, que es la figura con un diskette que se muestra en la barra de herramientas en la *Figura 5.11*. Una vez hecho esto, abra la planilla de ajustes que desee cargar y, desde ahí, seleccione el ícono “Enviar ajustes activos”, tal como se muestra en la *Figura 5.11*. Se solicitará la clave de acceso a nivel 1, “OTTER”, y se abrirá una ventana como la de la *Figura 5.10*, en donde se deberán seleccionar los grupos de ajustes que se deseen enviar, puede ser uno solo o todos. Saldrá un mensaje de advertencia al cuál se debe presionar “Aceptar” y se le solicitará la clave del nivel 2, “TAIL”.

IMPORTANTE: al terminar la carga de ajustes, es posible que aparezca un mensaje de error, como el mostrado en la *Figura 5.12*. Este mensaje puede indicar que algunos o todos los ajustes que se seleccionaron para cargar, no se transmitieron a la protección. Sin embargo, puede que esto no sea cierto.

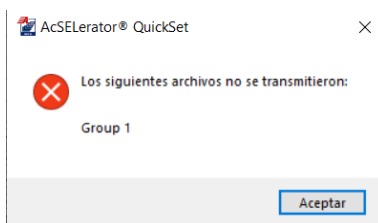


Figura 5.12: Mensaje de error que indica que el “Grupo 1” de ajustes no se transmitió.

Para verificar si los ajustes se transmitieron o no a la protección, debe abrir la herramienta “Terminal” y ver si aparece un mensaje de error o si aparece que los ajustes se guardaron, tal como se muestra en la *Figura 5.13*.

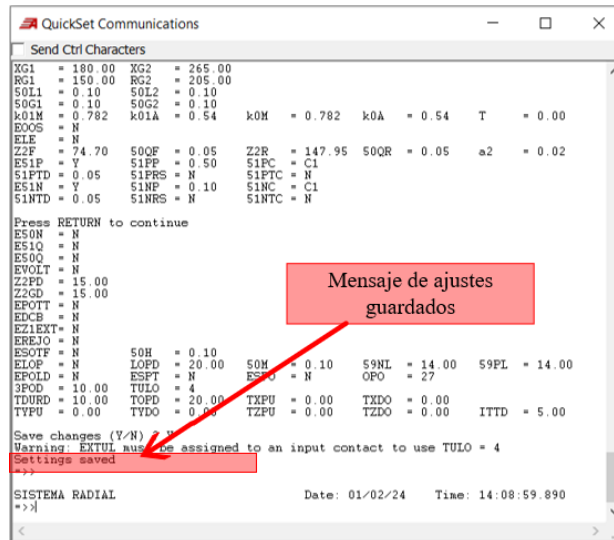


Figura 5.13: Ventana de terminal: ajustes transmitidos exitosamente.

5.3.8. Tipos de Grupos, ajustes y comandos.

La protección SEL321-5 tiene 4 tipos de grupos:

- **Grupos de ajustes:** van desde el Grupo 1 al Grupo 6. En la planilla de ajustes, el número que aparece en la columna de la izquierda indica el grupo al que pertenecen dichos ajustes. Que haya varios grupos de ajustes permite a la protección hacer frente a cambios topológicos u operativos de la red.
- **Grupos de ajustes lógicos de salidas:** en la planilla de ajustes se identifican con una L y van desde el Grupo L1 al Grupo L6. Establecen la lógica de operación para las salidas “OUT” de la protección, como los interruptores. Los ajustes lógicos se relacionan con los grupos de ajustes respectivos, es decir, la lógica ajustada en el grupo L1 actuará de esa manera para el grupo 1 de ajustes. La lógica ajustada en el grupo L2 actuará de esa manera para el grupo 2 de ajustes y así sucesivamente.
- **Grupo de ajuste de entradas:** existe un solo grupo de este tipo, por lo que en la planilla de ajustes se identifica con la letra G. Se utiliza para determinar la manera en que operarán las entradas “IN” de la protección.
- **Grupo de ajustes de comunicación:** existen tres grupos de este tipo. En la planilla de ajustes se indican con la letra P y van desde el Grupo P1 al Grupo P3 debido a que la protección sólo tiene 3 puertos de comunicación. Este tipo de ajustes no se modificó

ya que tienen relación con los parámetros de comunicación del dispositivo como los indicados en la *Figura 5.6*.

5.3.8.1. Ajustes utilizados del Grupo 1

Se ocuparon ajustes de los Grupos 1, L1 y G. En particular, pertenecen al Grupo 1 los ajustes de protección de distancia fase-fase y fase-tierra; y de sobrecorriente de fase y residual. A continuación, se enumeran los principales ajustes primarios que se utilizaron:

- Z1P, Z2P $\Rightarrow$ para ajustar las zonas de la función 21 mostradas en la *Tabla 18*.
- 50PP1 y 50PP2 $\Rightarrow$ O/C para la Z1P y Z2P respectivamente.
- XG1, RG1 y XG2, RG2 $\Rightarrow$ para ajustar las zonas de la función 21N de la *Tabla 19*.
- 50L1, 50G1 y 50L2, 50G2 $\Rightarrow$ O/C para 21/21N de XG y RG.
- 51PP y 51NP $\Rightarrow$ Corrientes I_{pkp} para función 51 y 51N respectivamente
- 51PC y 51NC $\Rightarrow$ Curva de sobrecorriente para función 51 y 51N respectivamente.

Para más detalles de cada ajuste, consultar el manual de la protección [2], en el capítulo 2 de Especificaciones.

5.3.8.2. Ajustes utilizados del grupo L1 y lógicas de disparo.

Corresponden a las ecuaciones lógicas de la protección que permiten indicar las condiciones que deben cumplirse para que un contacto de salida de la protección se cierre o se abra. En este grupo hay 5 variables de ajustes importantes: MER, MTO, MTU, MTCS y el tratamiento de las salidas OUT.

Las variables lógicas “MTO” y “MTCS” no se ocuparon ya que tienen relación con aplicaciones fuera del alcance de este trabajo, pero sí se ocuparon las variables lógicas MER y MTU. La primera tiene relación a qué ajustes, cuando se activan, generan un reporte de eventos y, la segunda, con los ajustes que, al operar, activan la lógica de disparo de los interruptores. A continuación, se muestran los ajustes utilizados.

$$MTU = M1P + Z1G + M2PT + Z2GT + 51PT + 51NT \quad (53)$$

$$MER = M1P + Z1G + M2PT + Z2GT + 51PP + 51NP \quad (54)$$

$$OUT1 = !3PT \quad (55)$$

IMPORTANTE: Antes de explicar las ecuaciones (53) y (54), se debe entender que un mismo ajuste tiene distintos nombres de variables para la protección según sea su función. Por ejemplo, la función de distancia fase-fase con característica Mho, tiene sus **variables primarias** como Z1P y Z2P para la zona 1 y zona 2 respectivamente. Se les llama “variables primarias” porque almacenan un valor, en este caso, de impedancia. Sin embargo, esta misma función de protección tiene asociada otras variables para usos lógicos, llamadas **outputs**, las cuales son M1P y M2PT y sólo pueden ser un cero o un uno lógico. Las ecuaciones (53), (54) y (55) sólo utilizan variables del tipo “output”.

Se debe notar que la variable lógica para la zona 2, M2PT, tiene una “T” extra debido a que hace alusión a una zona que opera retardada en el tiempo y no de manera instantánea como la zona 1, que no lleva T y es sólo M1P. De la misma manera, la función de distancia fase-tierra tiene las variables primarias XG1, RG1 y XG2, RG2 y las variables del tipo output Z1G y Z2GT para zona 1 y zona 2 respectivamente.

Se puede ver que la ecuación (53) está compuesta sólo de operadores lógicos “OR”, por lo tanto, si cualquier función de protección de distancia o de corriente opera, la variable MTU se cumple y manda una orden de disparo a los interruptores. De igual manera ocurre con la ecuación (54), sólo que, en vez de emitirse una orden de disparo de los interruptores, se emite una orden para elaborar un reporte de eventos en la protección.

La ecuación (55) relaciona el esquema de disparo de la protección con la salida OUT1 a la que están conectados los interruptores y su explicación se dejó para el siguiente apartado.

5.3.8.3. Lógica de disparo de los interruptores y “latch trip”.

Hay dos esquemas de disparo: monopolar (PT) y tripolar (3PT). Para el esquema monopolar se deberían utilizar tres salidas “OUT” diferentes, una asignada a cada interruptor, ya que éstos tendrían la posibilidad de operar de manera separada. Sin embargo, en este trabajo se ocupó el esquema tripolar “3PT”, es decir, una sola señal de disparo para mandar a abrir los tres interruptores (52). Por lo anterior, se ocupó una sola salida OUT para mandar el disparo a los 52. De esta manera, al haber una falla y operar una función de protección, la variable lógica MTU se cumple y activa el esquema de disparo 3PT, provocando que la salida OUT asignada en (55), pase de tener un “0 lógico” a un “1 lógico” y emitir una señal de disparo a los 52. El signo “!” delante del comando “3PT” quiere decir “negado” y se ocupó debido a

que los relés de estado sólido utilizados como 52, son normalmente abiertos (NA) y requieren una señal de tensión constante para conducir, al contrario de la mayoría de los interruptores que son normalmente cerrados (NC) y sólo se les manda una señal de tensión para operar y abrir sus extremos.

Se configuró la protección para que, una vez despejada la falla, no se volvieran a cerrar los interruptores, condición conocida como “latch trip”. Para esto se deshabilitó el esquema lógico de “unlatch trip” que tenía la protección y que provocaba el recierre de los 52 apenas esta detectaba que la condición de falla había desaparecido. El ajuste TULO (cuyas opciones de ajuste disponibles son: N, 1, 2, 3, 4) es el que controla esta lógica de “unlatch trip” y fue ajustado en la opción 4, la que requiere la utilización de una entrada “IN” de la protección (Grupo G de ajustes) para asignarla a la función EXTUL. Al tener configurado el ajuste TULO en 4, pero no asignarle la función EXTUL a una entrada de la protección, el esquema lógico de “unlatch trip” de la protección se deshabilita.

Para volver a cerrar los 52 se debe ir al panel frontal de la protección y presionar el botón “TARGET/RESET”.

5.3.7.4. Ajustes utilizados del Grupo G

Este grupo de ajustes no se utilizó ya que no se conectó nada a ninguna entrada “IN” de la protección. No obstante, es importante mencionar que estas entradas sirven para entregar información del sistema a la protección, por ejemplo, el estado de un interruptor (abierto o cerrado) o de un sensor de temperatura. De manera que la protección tiene una respuesta específica dependiendo de la información que le sea transmitida por esa entrada en particular.

5.3.7.5. Comandos útiles

Con la herramienta “Terminal” mencionada en secciones anteriores, se puede tener una comunicación directa con la protección. A través de ella, es posible utilizar comandos que indican acciones específicas a realizar por parte de la protección. A continuación, se mencionan los comandos que se hallaron de mayor utilidad.

- **ACCESS:** permite ingresar al nivel 1 de la protección para comenzar la comunicación con la protección a través de la herramienta “Terminal” (ver sección

5.3.4). Es el primer comando que siempre se debe ingresar. Una contraseña, fijada en “OTTER” será solicitada.

- **DATE:** despliega la fecha almacenada en la protección. Si desea fijar una nueva fecha, debe ingresar el comando “DATE mes/día/año”, tal como se indicó en la sección 5.3.5.
- **TIME:** permite ver la hora almacenada en el relé. Para fijar una nueva hora, escriba el comando “TIME” junto a la hora que desea ingresar en el formato “hora:min:seg”, tal como se indica en la sección 5.3.5.
- **SHOWSET:** permite ver el grupo de ajustes activos, pero no modificarlos.
- **GROUP n:** especifica cuál grupo de ajustes será el grupo activo. “n” está en el rango de 1 a 6. En el ejemplo de abajo, se seleccionó al Grupo 2 como el grupo de ajustes activos.

GROUP 2 < ENTER >

- **PULSE n t:** permite cerrar un contacto de salida “OUT” de la protección durante un rango que va desde los 0.125-1 [s]. Debe ejecutarse estando en el nivel 2 de acceso (ver sección 5.3.4) en donde “n” es el número de contacto que se desea cerrar y “t” es el tiempo en [s]. Se utiliza por motivos de testeo y control. En el ejemplo mostrado abajo, se cierra el contacto “OUT3” por 0.5 [s].

⇒ PULSE 3 0.5 < Enter >

- **OPEN:** permite abrir los interruptores. Para esto, debe estar en el nivel 2 de acceso y tener una salida OUT asociada a la lógica de disparo de los interruptores (en este trabajo, 3PT). Se preguntará dos veces si se desea confirmar la acción, tal como se muestra en la *Figura 5.14*. Los interruptores permanecerán abiertos hasta que se cumpla una condición de “trip unlatch” o recierre o hasta que se pulse el botón de “Target/Reset” ubicado en el panel frontal de la protección.

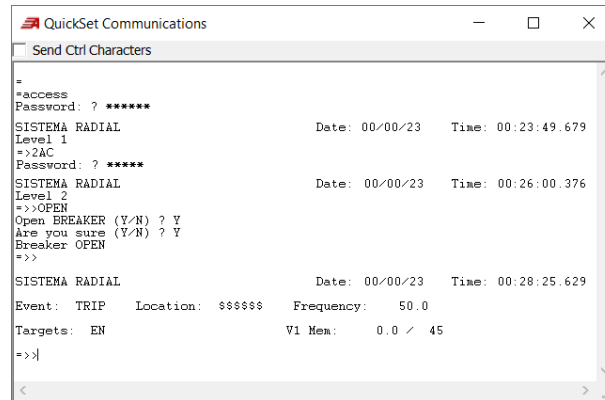


Figura 5.14: Comando OPEN.

- **METER:** despliega las variables de corriente y tensión que está registrando la protección, tanto en valores fase-neutro como fase-fase. Si se desea, por ejemplo, que el relé muestre 8 lecturas consecutivas, escriba el comando “METER 8” y presione <Enter>.

5.4. Reporte de eventos y obtención de oscilografías

Al descargar el software de SEL (ver sección 5.3.1), AcSELerator Quickset, también se descarga el software que permite ver las oscilografías registradas por la protección, llamado SynchroWAVE Event. Para obtener las oscilografías es importante que la protección ya tenga ingresadas la fecha y hora en sus ajustes, tal como se indicó en la sección 5.3.5., además, que la protección no haya sido desenergizada desde el momento en que se registró el reporte de eventos (cuando se realizó el ensayo de cortocircuito) hasta el momento en que se generó la oscilografía.

Para obtener un registro oscilográfico, debe estar la protección conectada y desde el menú principal del software AcSELerator QuickSET, se debe ir a “Herramientas → Eventos → Obtener archivos de eventos”, tal como se muestra en la *Figura 5.15*.

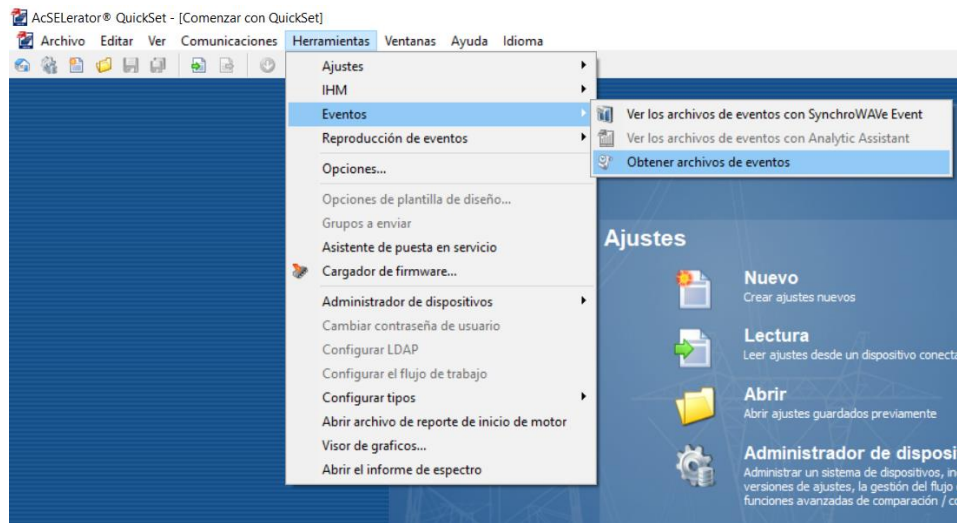


Figura 5.15: Obtener archivo de eventos.

Luego aparecerá la página “Historial de Eventos” del software. En caso de no haber ningún evento registrado, aparecerá un mensaje notificando que no hay reportes de eventos almacenados, de lo contrario, se podrá observar un listado con todos los eventos almacenados en la protección, su número de identificación, la fecha y hora del evento y el tipo de evento registrado, tal como se muestra en la Figura 5.16. Se destaca el hecho de que cuando se ocupa el comando “OPEN” para abrir los interruptores, el evento se denomina “TRIP” en la página de historial, en cambio, si corresponde a una falla, el tipo de evento indica el tipo de falla que detectó la protección. Por ejemplo, “AG”, señala que ocurrió una falla monofásica a tierra en la fase A y, el evento “ABC”, indica una falla trifásica.

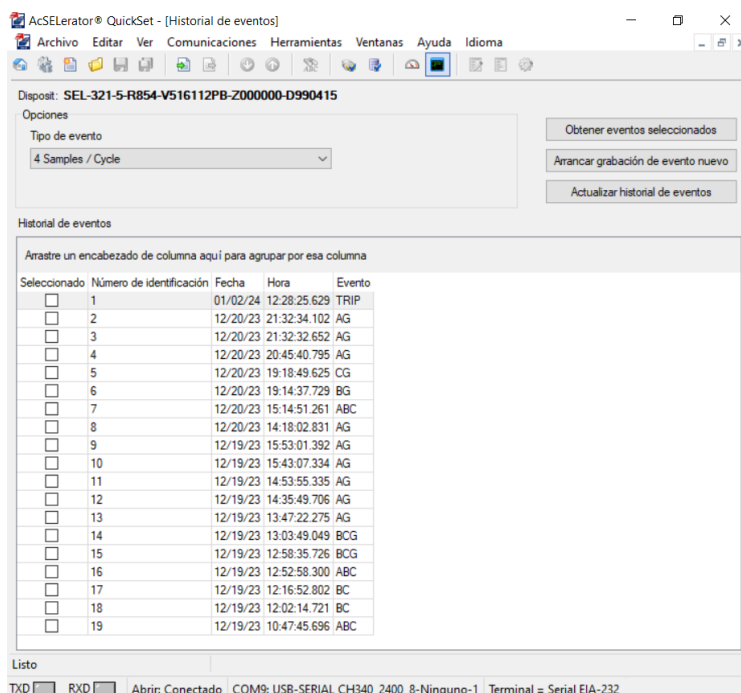


Figura 5.16: Historial de eventos.

Para obtener la oscilografía correspondiente al evento, primero, debe seleccionarse desde el historial, luego se debe ir a donde dice “Opciones → Tipo de evento”. La Tabla 21 muestra los tipos de formatos que se pueden solicitar y el comando con el que se identifican en la herramienta “Terminal” una vez que se está generando la oscilografía. La letra “n” en los comandos hace referencia al número de identificación del evento.

<i>Tipo de evento</i>	<i>Comando</i>	<i>Descripción</i>
4 muestras/ciclo	EVE n	Reporte por defecto
16 muestras/ciclo	EVE L n	Reporte largo, filtrado
16muestras/ciclo (RAW)	EVE R n	Reporte largo, sin filtrar
16 muestras/ciclo(computer)	EVE C n	Reporte SynchroWAVE
16muestras/ciclo(unfiltered)	EVE U n	Reporte SynchroWAVE, no filtrado

Tabla 21: Tipos de reportes de eventos.

Una vez escogido el tipo de evento (4 muestras por ciclo, 16 muestras por ciclo/Unfiltered/RAW/Computer, etc.), se debe seleccionar la opción “Obtener eventos seleccionados”. Se abrirá una ventana que contiene la ubicación en donde se almacenará el archivo y en la cual se puede indicar el formato de nombre del mismo. Finalmente se debe presionar “Guardar”.

Para abrir el archivo que contiene la oscilografía, se debe ir a “Herramientas → Eventos → Ver los archivos de eventos con SynchroWAVE Event”, tal como se puede apreciar en la *Figura 5.15*.

NOTA: La hora indicada en el historial de eventos (*Figura 5.16*) se guarda al milisegundo más cercano y permite identificar cuando se generan dos reportes de eventos para una misma falla. Esto ocurre para fallas de larga duración debido a que cada reporte de eventos sólo muestra un intervalo de tiempo de 11 ciclos.

Finalmente, en la *Figura 5.17* se muestran oscilografías de corriente y tensión para un reporte de eventos por defecto, de 4 muestras/ciclo. En la parte inferior del reporte, se pueden ver los estados lógicos de los ajustes involucrados en el evento.

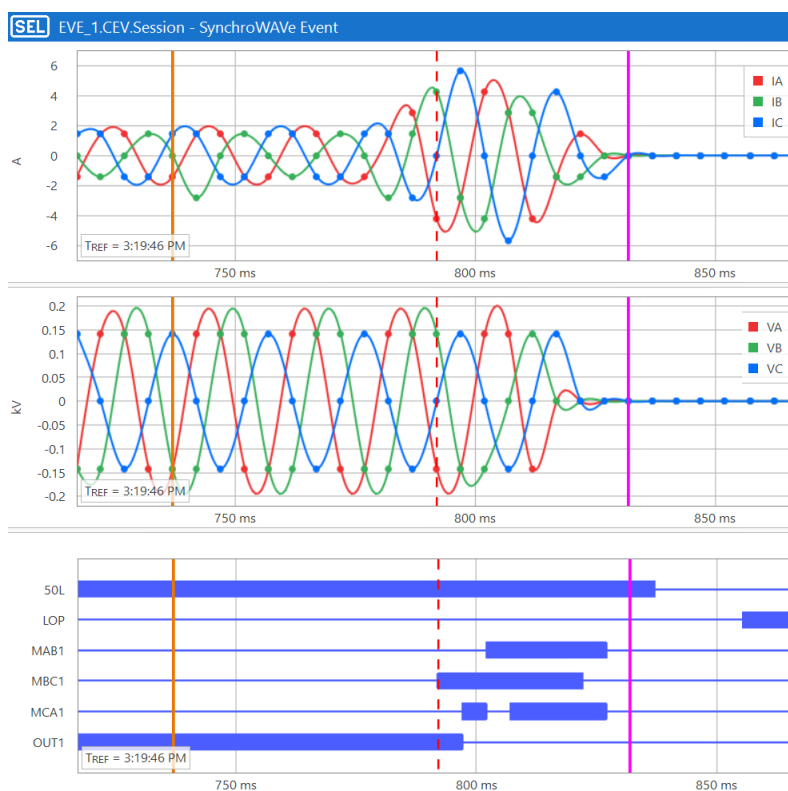


Figura 5.17: Oscilografía de 4 muestras por ciclo vista mediante el software SynchroWAVE Event.

Por otro lado, el relé SEL-321-5 ofrece también oscilografías generadas con 16 muestras por ciclo, las que se ven como la mostrada en la *Figura 5.18*. Estas no se recomiendan ya que se ven distorsionadas y no proporcionan la claridad suficiente para inspeccionar las señales.

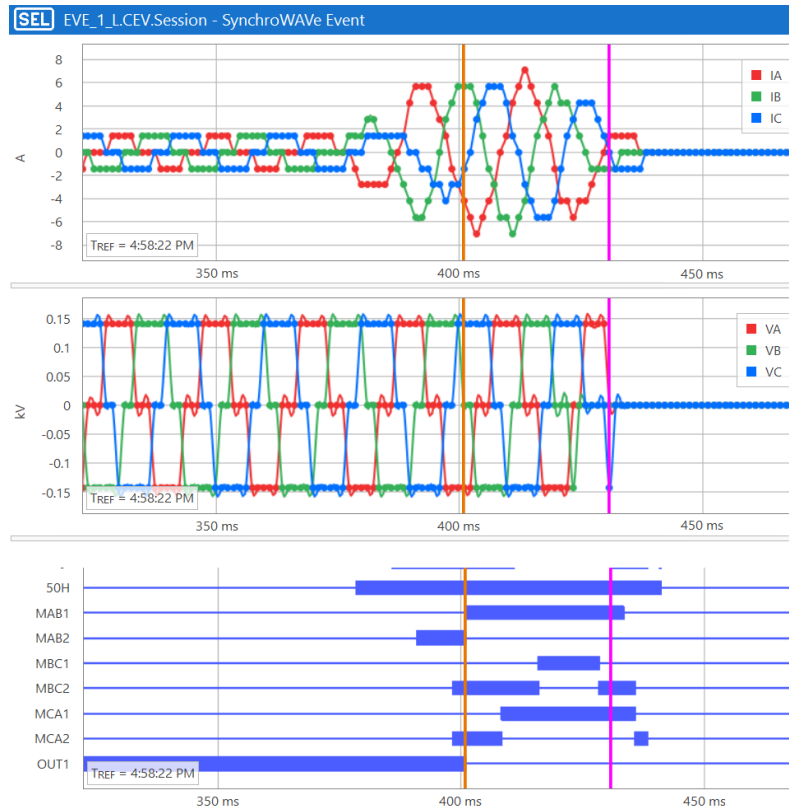


Figura 5.18: Oscilografía de 16 muestras por ciclo vista mediante el software SynchroWAVE Event.

6. Pruebas y discusión de resultados

En este capítulo se detallan dos tipos de pruebas realizadas: 1) pruebas destinadas a evaluar el funcionamiento de los transformadores de medida, relés de estado sólido y la protección, y 2) los ensayos de cortocircuito realizados mediante el circuito de pruebas diseñado en el capítulo 4 de este trabajo.

6.1. Procedimiento experimental

A continuación, se describen los pasos que se realizaron cada vez que se hicieron pruebas experimentales en laboratorio.

- 1) Energizar el tablero de laboratorio y los enchufes para poder conectar el computador y encender la protección.
- 2) Ingresar al software AcSELerator QuickSet y establecer comunicación con la protección. Ingresar valores de fecha y hora al dispositivo de protección.
- 3) Revisar conexiones del circuito montado en laboratorio. Verificar terminales e interruptores. Por seguridad, inicialmente los desconectores deben estar abiertos.
- 4) Revisar el generador de fallas. Que este armada la falla que se quiere, pero no activada.
- 5) Encender osciloscopios, ajustar sus parámetros y señal de disparo (trigger). Revisar estado de puntas de corriente y tensión.
- 6) Encender la fuente de tensión programable, Chroma, y ajustarla en el modo de 150 [V] además del resto de parámetros que correspondan. Dejarla inicialmente sin output y con tensión inicial de 0 [V]. Este paso no es necesario en caso de ocupar un Variac.
- 7) Cerrar desconectores y aplicar tensión lentamente hasta el valor deseado mientras se van verificando las señales de tensión y corriente en los osciloscopios. En caso de ocupar la Chroma, se debe presionar el botón “output” para que comience a generar tensión.
- 8) Una vez llegado al estado de prefalla, ajustar la señal de disparo en los osciloscopios para que registren el momento de la falla.

- 9) Ejecutar la falla armada previamente en el generador de fallas. Accionar el interruptor.
- 10) Una vez ejecutada la falla, despejar la falla inmediatamente abriendo el interruptor del generador de fallas.
- 11) Apagar la señal de tensión de la fuente y abrir desconectores.
- 12) Verificar señales en los osciloscopios y guardarlas en un pendrive.
- 13) Obtener reportes de eventos de la protección.
- 14) Para otro ensayo, repetir los pasos desde el punto 3) al 13).

6.2. Pruebas para evaluar el funcionamiento de los transformadores de medida, de los relés de estado sólido y de la protección

Estas pruebas tuvieron como objetivo poder evaluar los transformadores de medida, la influencia de los relés de estado sólido en las señales de tensión y corriente y la calidad del registro oscilográfico de la protección.

6.2.1. Pruebas con Variac

Para esto, primeramente, se armó un circuito resistivo simple con un Variac como fuente de tensión y resistencias de 2 [ohm] y 31 [A] de capacidad.

Se hicieron 2 casos de estudio:

- **Caso 1:** sin relés de estado sólido conectados
- **Caso 2:** con relés de estado sólido conectados.

La *Figura 6.1* muestra el montaje utilizado para el caso 1. Allí se aprecia como los relés de estado sólido (52) se excluyeron del circuito al conectarse la fuente de tensión al terminal correspondiente de los TTCC, además, por precaución, se abrieron los desconectores de cada fase. En la *Figura 6.1* se indicaron los puntos de medición de corriente y tensión con circunferencias numeradas, por ejemplo, la corriente y tensión primaria de la fase A se midió con puntas de corriente y tensión en el punto “1” y, en el punto “1_{sec}”, se midió su corriente

y tensión secundaria. Todas las tensiones se midieron con respecto al punto neutro, marcado con una “N”. Por simplicidad en el dibujo, sólo se indicó un cable secundario, aunque en realidad hay un cable para tensión y otro para la corriente, que son los que llevan las variables en magnitudes secundarias a la protección. Lo mismo se hizo en todas las fases, siendo el punto 2 para la fase B y el punto 3 para la fase C.

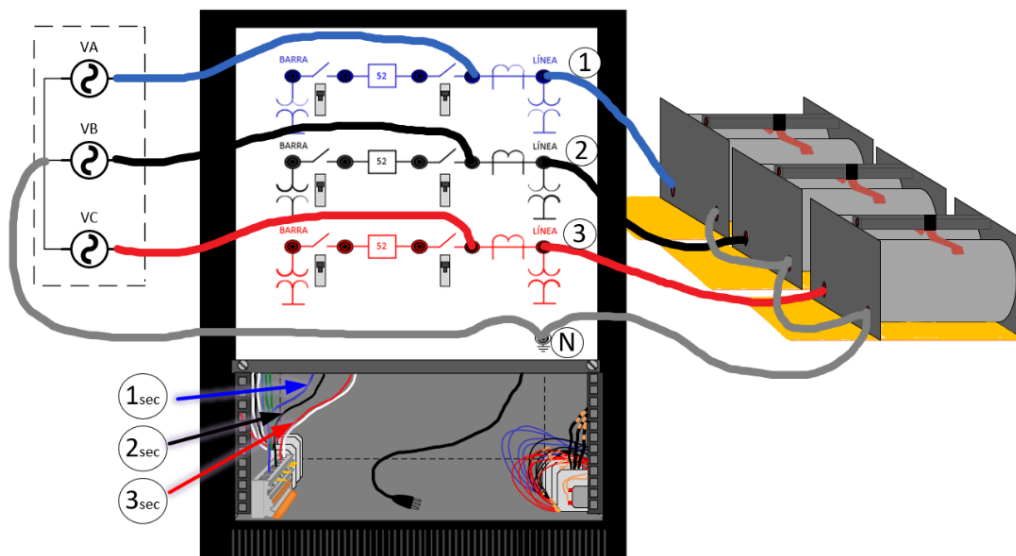


Figura 6.1: Conexiones para el caso 1, sin 52 conectados.

Para el caso 2, las conexiones se muestran en la *Figura 6.2*. Se repiten las mismas mediciones descritas anteriormente, pero esta vez, la fuente de tensión se conectó directamente al terminal “BARRA” de cada fase, incluyendo a los relés de estado sólido en el circuito.

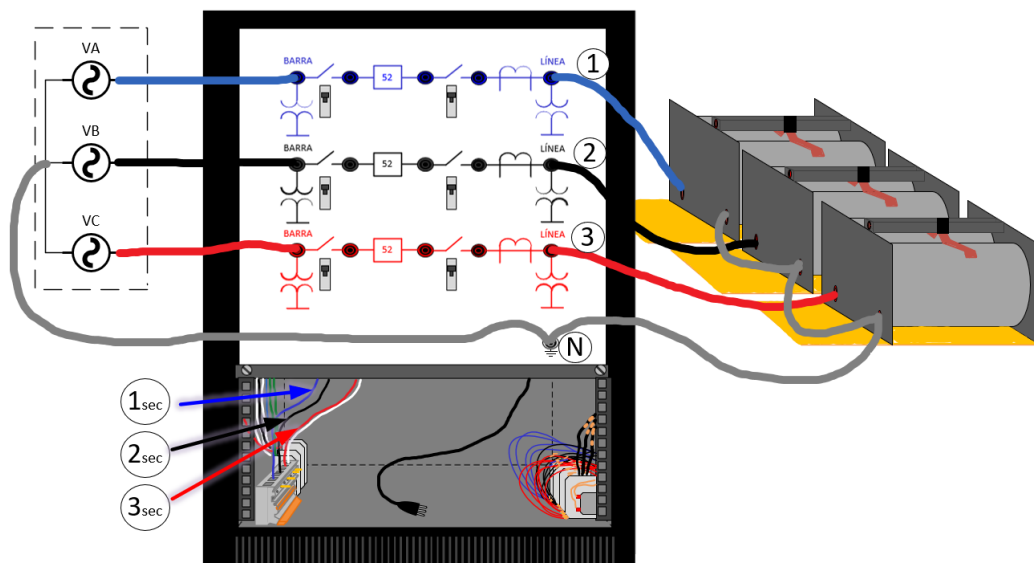


Figura 6.2: Conexiones para el caso 2, con 52 conectados.

6.2.1.1. Resultados caso 1: sin relés de estado sólido conectados

Para este caso, se alimentó con 2 [V] de tensión con el objetivo de hacer circular por la red una corriente baja, de 1 [A], dado que hay 2 [Ω] de carga por fase. De esta manera, se puso a prueba los elementos de medida. La Figura 6.3 muestra las tensiones primarias y secundarias registradas por los transformadores de potencial (220/110 [V]) del paño eléctrico a escala.

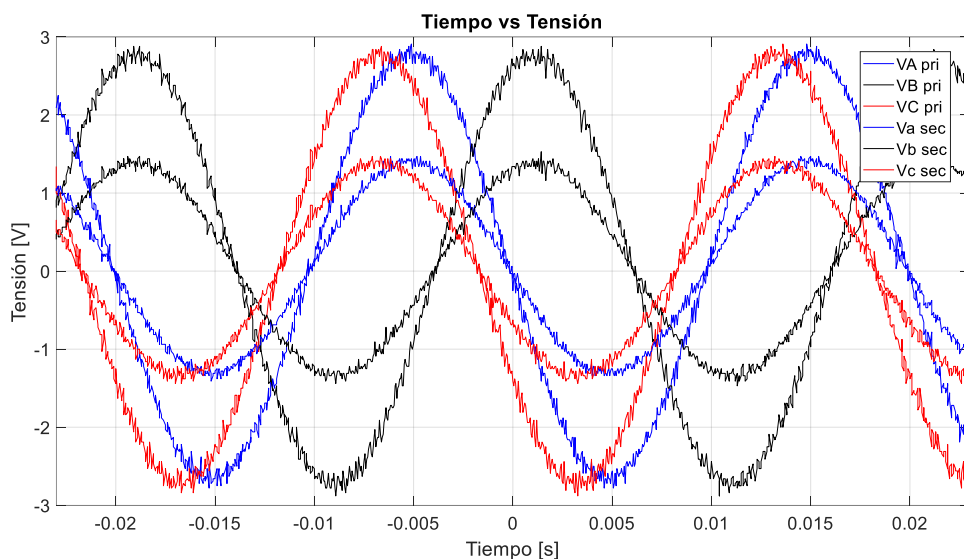


Figura 6.3: Tensiones primarias y secundarias de cada fase para el caso 1.

Las tensiones desbalanceadas que se aprecian en la *Figura 6.3* se deben a un desbalance en la red o a un desajuste en el variac, pero no a los transformadores de potencial utilizados.

Por otro lado, en la *Figura 6.4* se muestran las corrientes primarias y secundarias registradas por los TTCC (50/5 [A]) para cada fase.

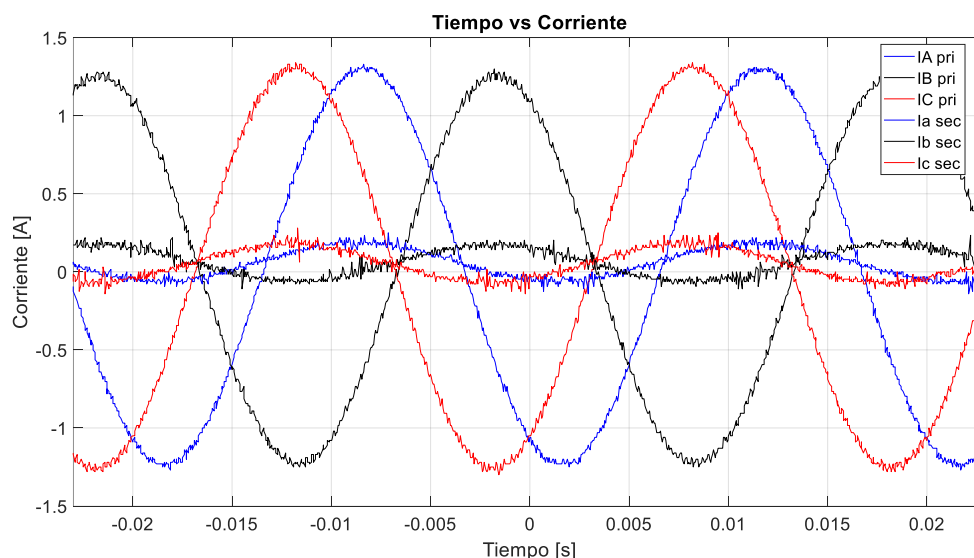


Figura 6.4: Corrientes primarias y secundarias de cada fase para el caso 1.

En ambas figuras se observó que los transformadores de medida lograron registrar correctamente las señales de los devanados primarios, aún para tensiones y corrientes pequeñas, que es cuando mayor error se presenta.

6.2.1.2. Resultados caso 2: efecto de los relés de estado sólido

Debido a que las pruebas del caso 1 ya dejaron en claro que la razón de transformación de los transformadores de medida se cumple, estas pruebas se realizaron para observar el efecto de la incorporación de los relés de estado sólido al circuito. Los relés de estado sólido poseen una tensión interna de 4[V], por lo que, al repetir la prueba anterior y alimentar con 2 [V] al circuito resistivo, no hubo circulación de corriente. Esta situación se mantiene hasta los 3.9 [V] y es idéntica en todas las fases. En la *Figura 6.5* se muestra la tensión aplicada a la fase A y su corriente circulante.

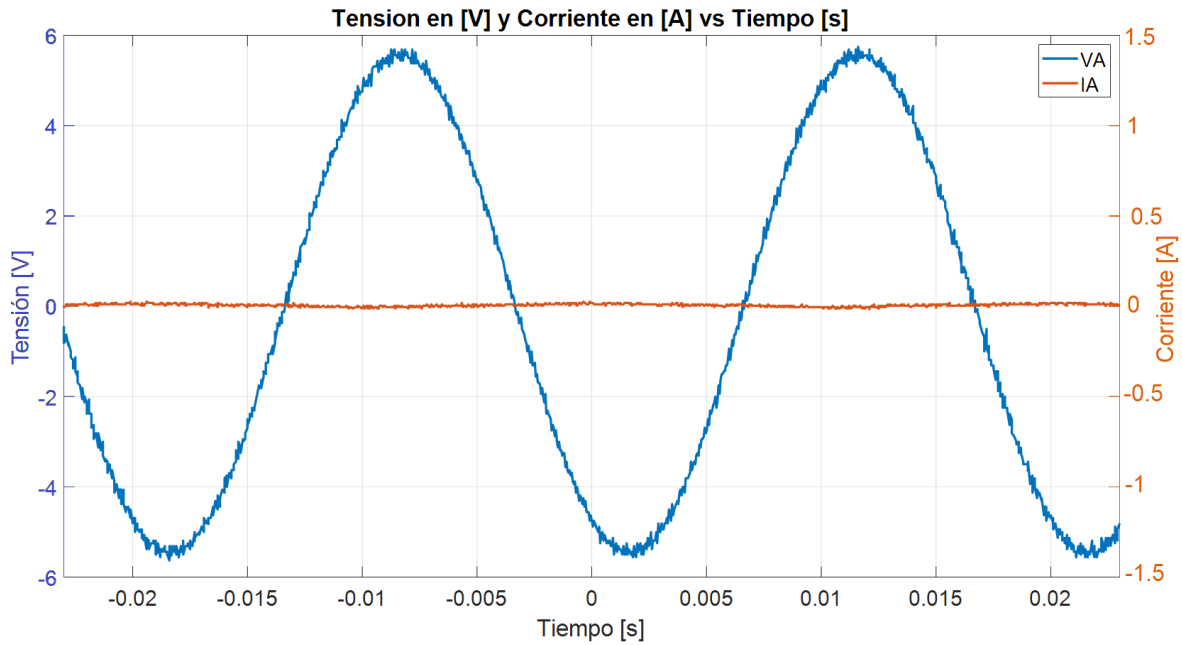


Figura 6.5: Corriente en la fase A para el caso 2, con 3.9 [V] de alimentación.

Al elevar la tensión a 4 [V], se supera la tensión interna de los relés de estado sólido y hay circulación de corriente en el circuito: de haber 0 [A] con 3.9 [V], pasa a circular 1 [A] de corriente. En la *Figura 6.6* se muestran las señales de tensión secundaria y corriente primaria de la fase A cuando la tensión en la fuente es de 4 [V]. En ella también se aprecia que el relé de estado sólido introduce armónicos en las señales de tensión y corriente, aunque se observó que esto está limitado a condiciones de baja tensión y alta corriente ya que el valor nominal de los relés es de 80 [A]. En otras palabras, cuando el relé trabaja en circuitos con mayor tensión que corriente, como el diseñado en el capítulo 4 de este trabajo, los armónicos introducidos por los relés de estado sólido no se aprecian.

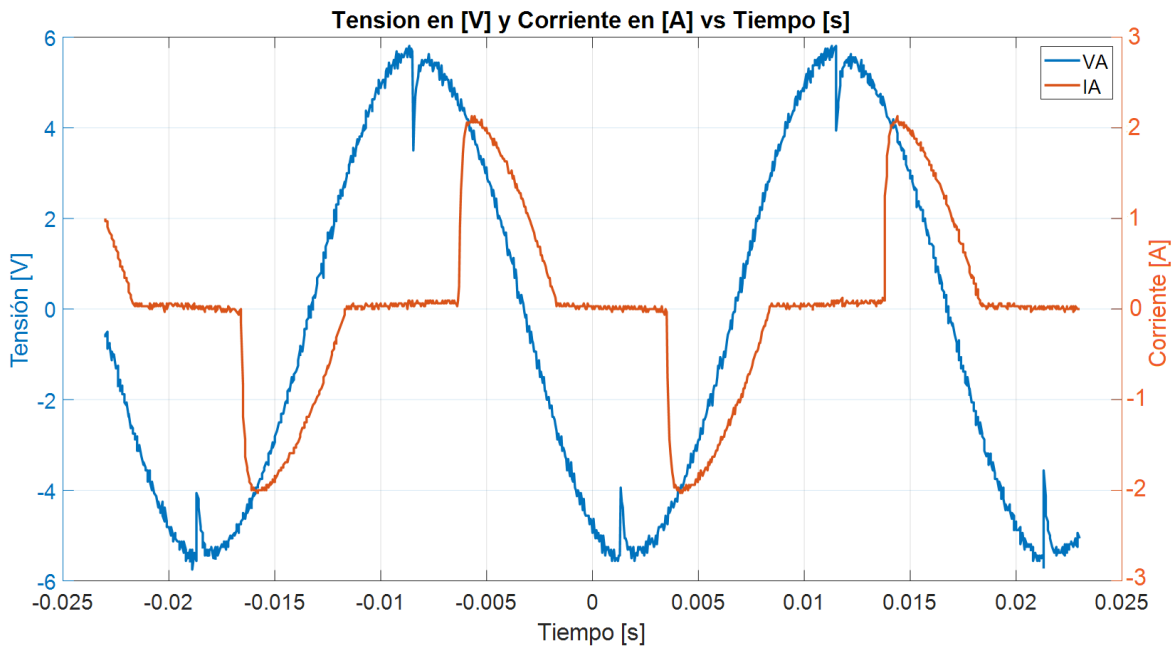


Figura 6.6: Caso 2. Corriente y tensión en la fase A una vez que se supera la tensión interna de los relés de estado sólido.

La Figura 6.6 parece indicar un efecto inductivo entre las señales de tensión y corriente, pero esto es debido a que ambas señales se tomaron con osciloscopios diferentes y no sincronizados. Para aclarar este hecho, en la subsección siguiente, se muestran pruebas realizadas con una fuente de tensión alterna programable (Chroma) en las que se registraron ambas señales en un tiempo común usando un solo osciloscopio.

6.2.2. Pruebas con la fuente alterna de tensión programable, Chroma.

Debido a que el Variac que se utilizó en estas pruebas mostró desbalances en las tensiones, se decidió ocupar la fuente alterna de tensión programable, Chroma, un equipo que permite controlar la tensión de alimentación, evitando transferir posibles desbalances de la red o contenido armónico al circuito de pruebas para obtener señales de tensión limpias y balanceadas. Como el principal objetivo era descartar efectos capacitivos y/o inductivos en el paño eléctrico a escala, se utilizó un sólo osciloscopio para obtener la señal de tensión y corriente de la fase A y así aportar un tiempo común a ambas señales. Además, se registraron las señales secundarias de tensión que recibía la protección digital SEL-321-5.

Para estas pruebas se ocupó un circuito trifásico con carga resistiva de $30\ [\Omega]$ por fase mediante dos resistencias en serie de $15\ [\Omega]$ y $8\ [A]$ de capacidad cada una, tal como se muestra en la *Figura 6.7*. La tensión de alimentación aplicada se midió entre fase y neutro y se modificó dependiendo del caso.

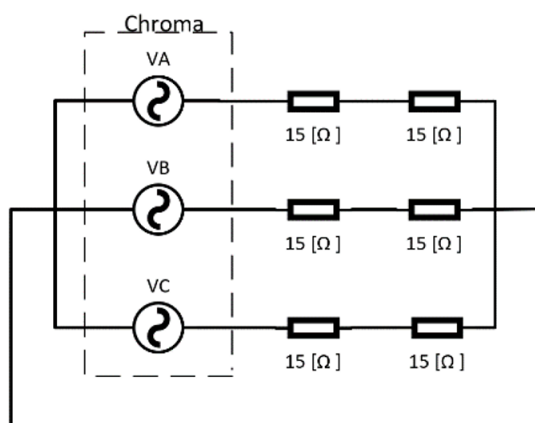


Figura 6.7: Circuito de pruebas con la Chroma.

6.2.2.1. Caso sin 52 conectados

Se aplicó una tensión en la fuente de $120\ [V]$ y se registraron las señales de tensión secundaria y corriente primaria en la fase A. Al ser un circuito resistivo, las señales están en fase, tal como se muestran en la *Figura 6.8*, y no se aprecia ningún efecto capacitivo o inductivo.

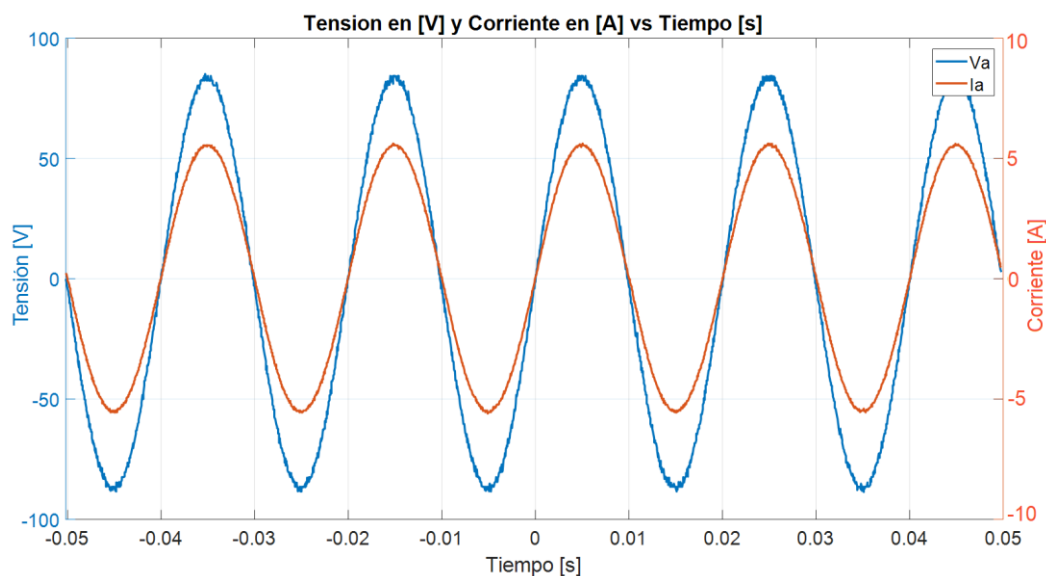


Figura 6.8: Tensión y corriente de la fase A, caso sin 52 conectados para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

6.2.2.2. Caso con 52 conectados

Para mostrar el efecto de los relés de estado sólido, se tomaron registros de la tensión secundaria y de la corriente primaria de la fase A para valores de tensión en la fuente (Chroma) de 10 [V], 60 [V] y 120 [V], los que se muestran a continuación.

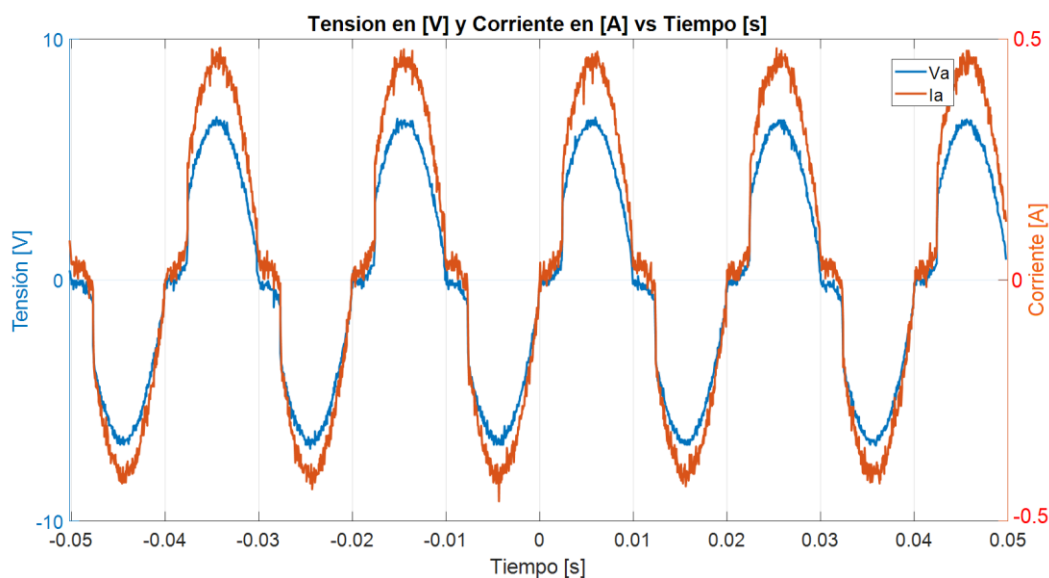


Figura 6.9: Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 10 [V] en la fuente para la red mostrada en la Figura 6.7.

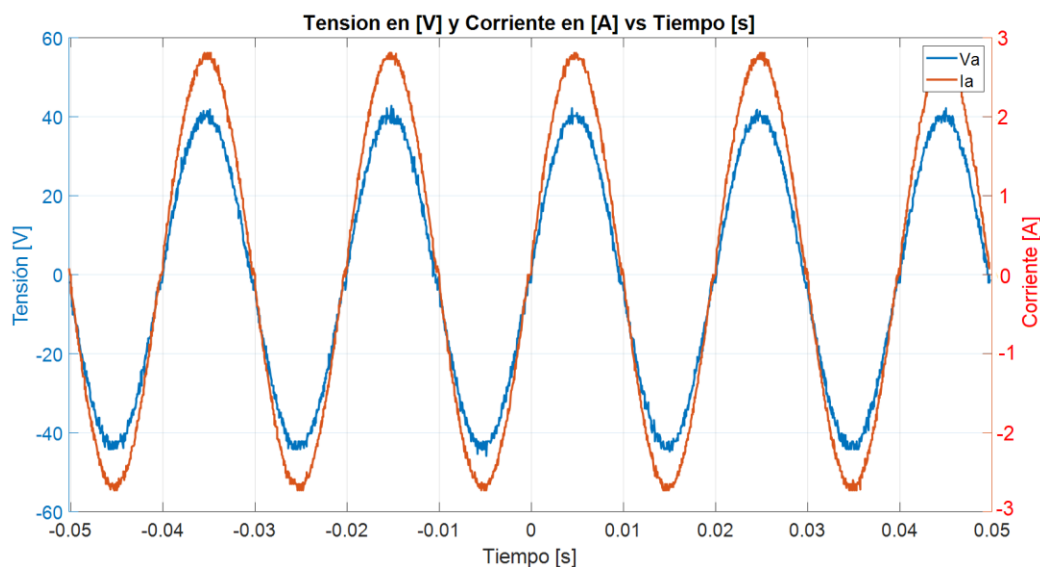


Figura 6.10: Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 60 [V] en la fuente para la red mostrada en la Figura 6.7.

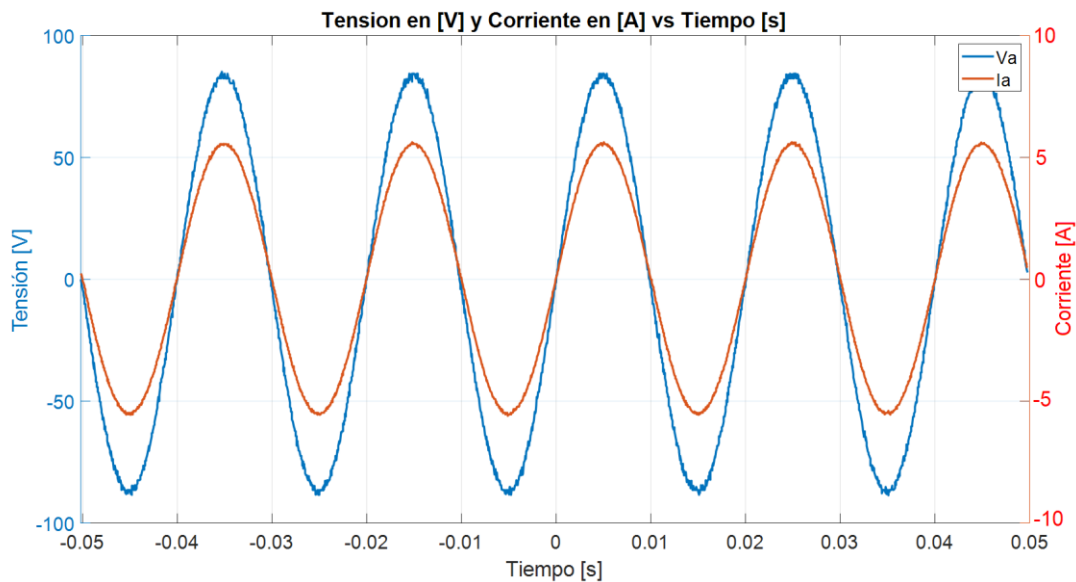


Figura 6.11: Corriente y tensión en la fase A, caso 52 conectados y 120 [V] en la fuente para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

Al observar la *Figura 6.9*, la *Figura 6.10* y la *Figura 6.11*, se comprueba que los relés de estado sólido no introducen ningún tipo de efecto, capacitivo o inductivo, al circuito. Además, los armónicos introducidos son cada vez más despreciables a medida que la tensión interna de los relés de estado sólido es más insignificante comparada a la tensión aplicada en la fuente.

6.2.2.3. Tensiones secundarias en los TTPP y corrientes primarias.

Se registraron con un osciloscopio las tensiones secundarias de los TTPP de línea y de barra, para las tres fases, para una tensión en la fuente (Chroma) de 120 [V]. Ambos registros oscilográficos resultaron iguales a los de la *Figura 6.12*. En ella se observa que las señales de tensión que recibe la protección están bien escaladas por la razón de transformación de los TTPP y que son señales balanceadas, tanto en ángulo como en magnitud.

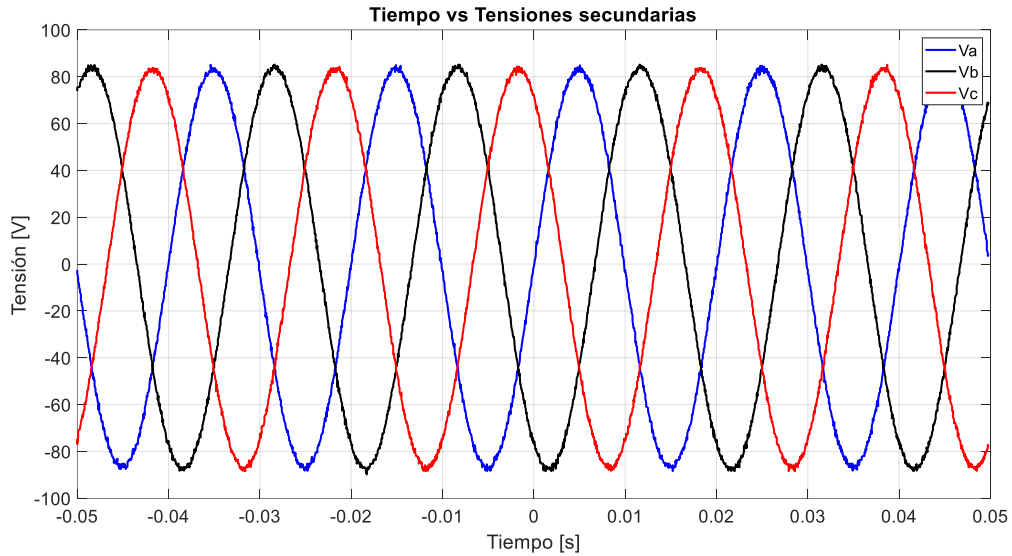


Figura 6.12: Tensiones secundarias en los TTPP de línea y de barra cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

Por otro lado, se registraron las corrientes primarias del circuito, las que se muestran en la *Figura 6.13*, en donde también se observan señales de corriente balanceadas.

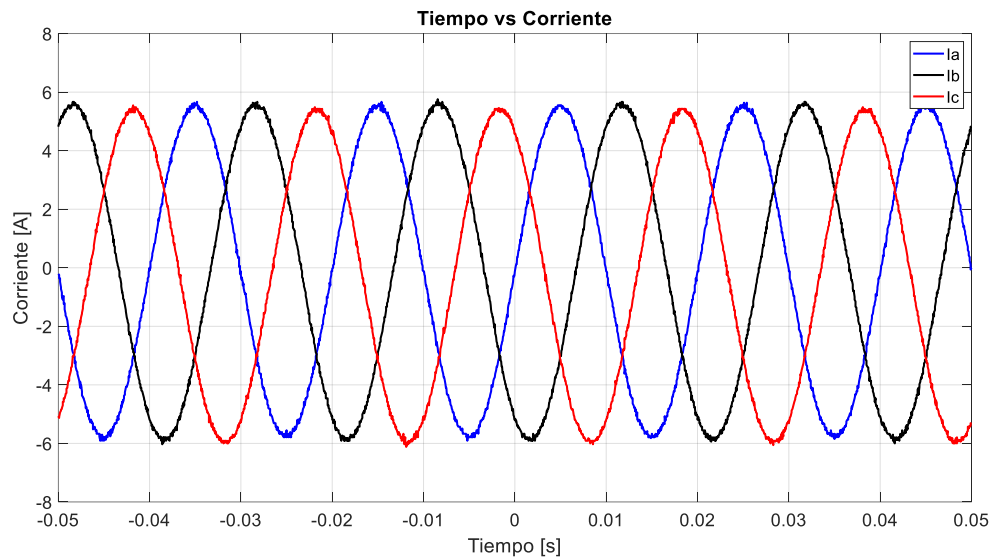


Figura 6.13: Corrientes primarias de la red cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

6.2.2.4. Registros oscilográficos de la protección SEL-321-5

Se obtuvieron los registros oscilográficos de la protección SEL-321-5 para compararlos con las señales de tensión y corriente mostradas en la *Figura 6.12* y en la *Figura 6.13*

respectivamente. Se generaron 3 oscilografías diferentes para el mismo caso de estudio (120 [V] en la fuente). Los resultados se muestran en la *Figura 6.14*, *Figura 6.15* y *Figura 6.16*.

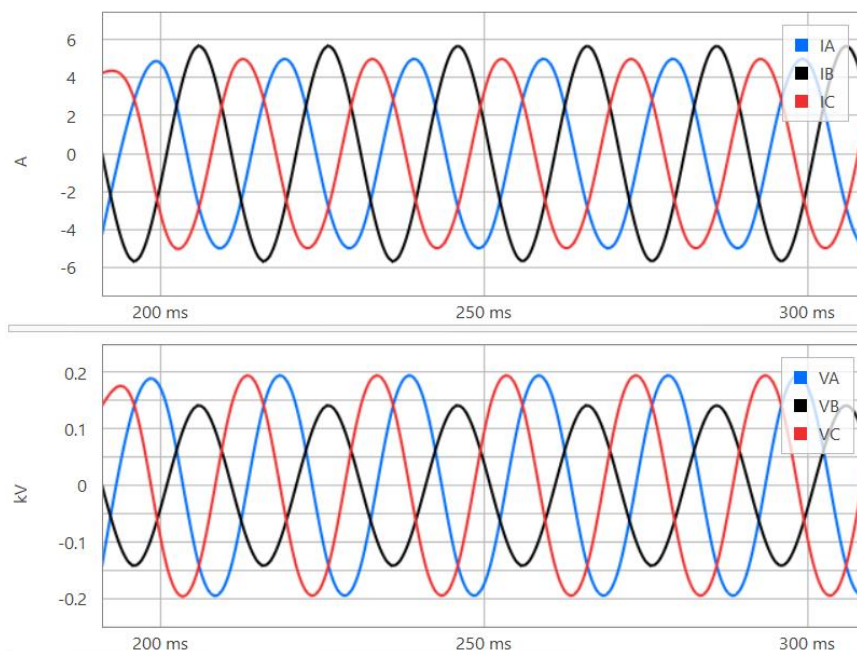


Figura 6.14: Primera oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

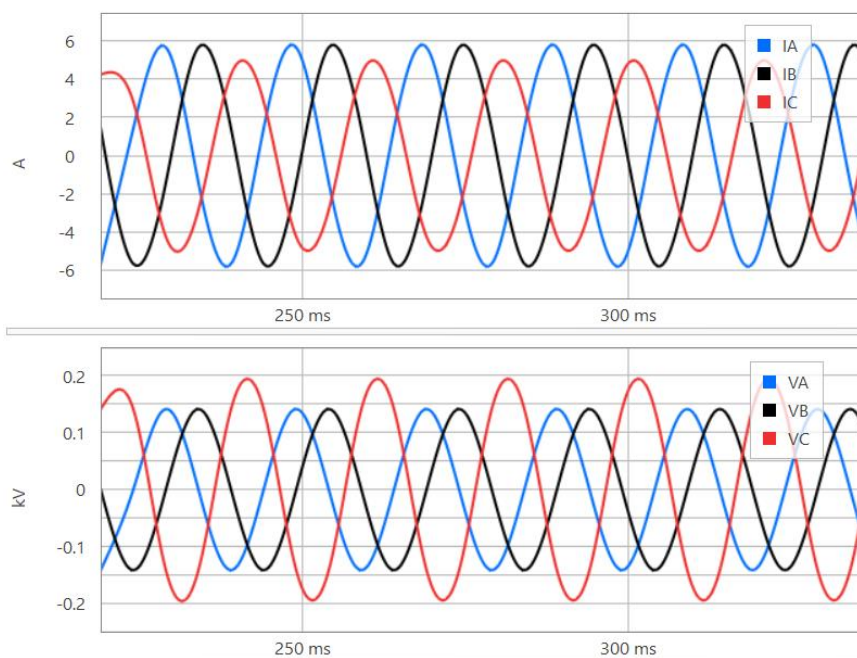


Figura 6.15: Segunda oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la *Figura 6.7*.

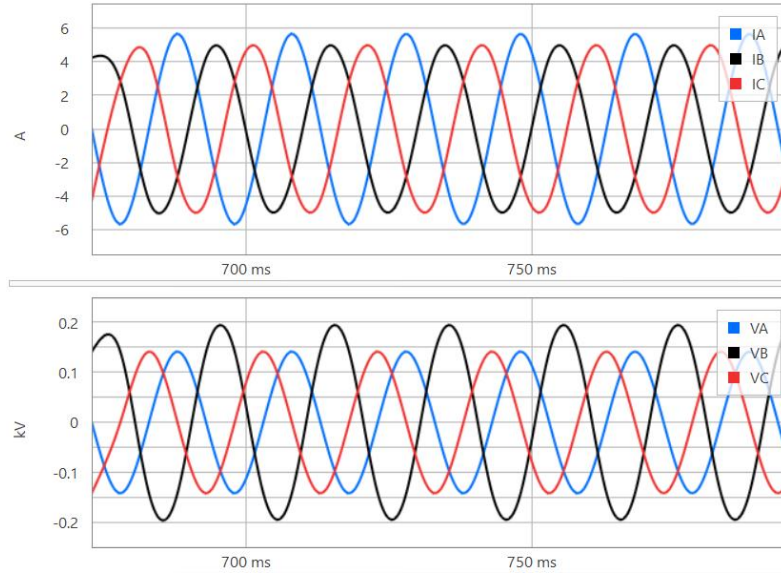


Figura 6.16: Tercera oscilografía obtenida con el relé SEL-321-5 cuando la tensión en la fuente es de 120 [V] para la red mostrada en la Figura 6.7.

Se observó que las oscilografías generadas por la protección no son iguales, cuando deberían serlo. Estas muestran siempre un desbalance en magnitud de una o dos fases, esto, tanto en corriente como en tensión. Además, la fase que presenta una mayor tensión presenta una menor corriente, cuando debería ocurrir lo contrario. Estos hechos evidencian un error interno de medición del relé SEL-321-5.

6.3. Ensayos de cortocircuito realizados

Se decidió realizar los cortocircuitos que se indican en la *Tabla 22* para cada ubicación de falla. Se escogió este tipo de cortocircuitos porque permiten evaluar bastante bien el desempeño de los ajustes de fase y los residuales. Al incluir la resistencia de falla, se obtienen valores de corriente (ver *Tabla 10*) que están en los límites inferiores de la corriente de supervisión de la protección como se indicó en la sección 4.1.2.

<i>Ubicación línea</i>	<i>Cortocircuitos a realizar</i>
100%	$3\phi, 2\phi, 2\phi - T, 1\phi - T, 1\phi - T$ con $R_f=30[\Omega]$
85.71%	$3\phi, 1\phi - T, 1\phi - T$ con $R_f=30[\Omega]$
57.14%	$3\phi, 1\phi - T, 1\phi - T$ con $R_f=30[\Omega]$

Tabla 22: Tipos de cortocircuitos a realizar para cada ubicación de falla en la línea.

El circuito utilizado para realizar los cortocircuitos es el que se indicó en la *Figura 4.8*, aunque el montaje experimental es el que se muestra a continuación, en la *Figura 6.17*.

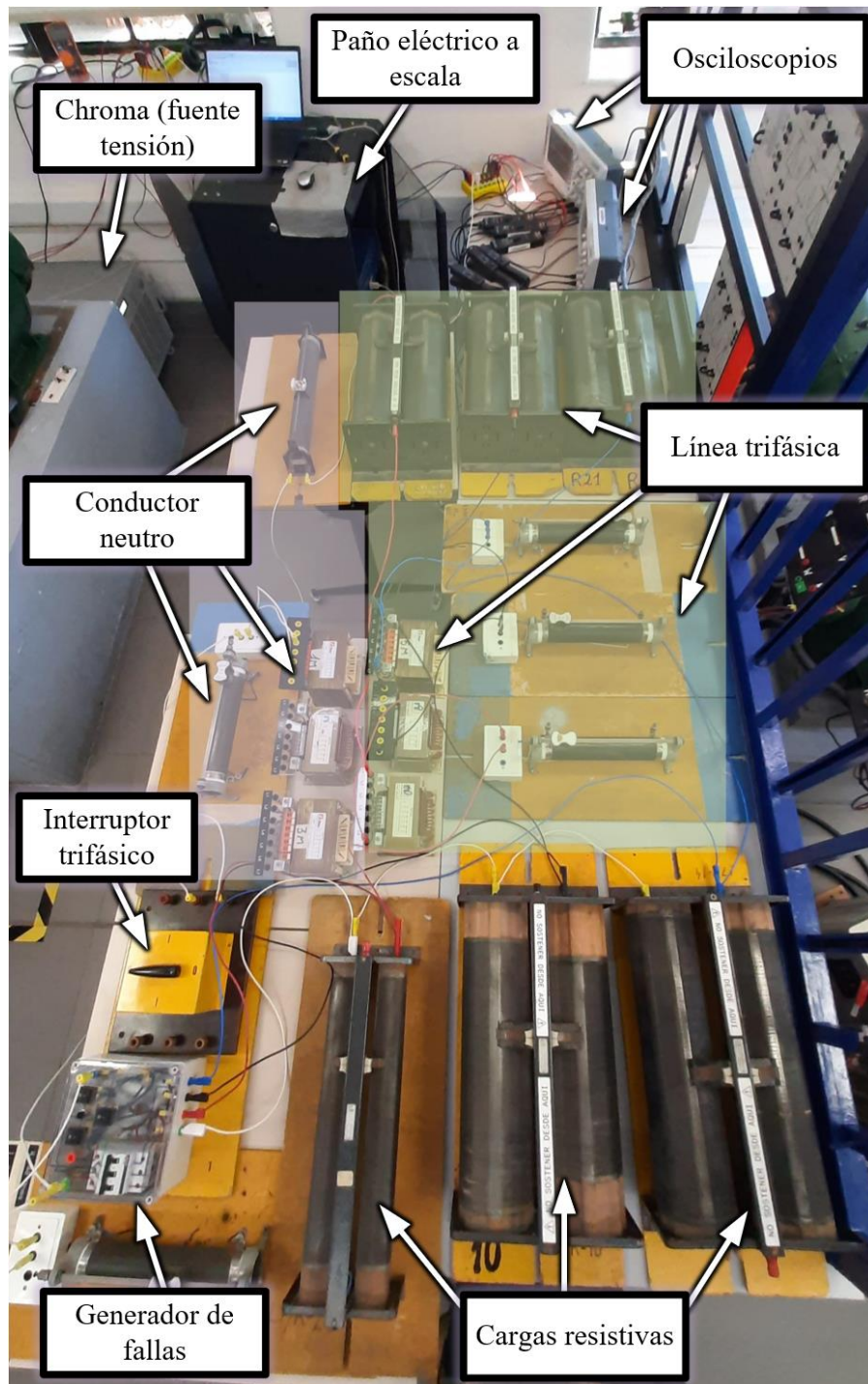


Figura 6.17: Montaje experimental del circuito de pruebas diseñado en el capítulo 4.

Para más detalles sobre el montaje experimental utilizado para cada ensayo, revise el Anexo C.

6.4. Resultados de los ensayos de cortocircuito

En esta sección se exponen los resultados de los ensayos realizados para fallas al 57%, 85% y 100% de la línea. La información se presentó mediante tablas que indican el tipo de cortocircuito realizado, el tiempo que demoró la protección en despejar la falla, el *loop* de la función de distancia que debía operar (resultado esperado) y el *loop* de distancia que finalmente operó. Si el *loop* que operó coincide con el esperado, la celda de la tabla se rellenó de color verde, de lo contrario, se rellenó de color rojo. La nomenclatura utilizada es, por ejemplo, ABC1, para indicar que operaron los *loops* AB, BC y CA en zona 1. En caso de indicar el *loop* AG2, significa que operó el *loop* fase-tierra de la fase A, en zona 2. Los gráficos de tensión y corriente de cada caso se encuentran adjuntos en el Anexo D.

6.4.1. Cortocircuitos al 100% de la línea

En la *Tabla 23* y en la *Tabla 24* se muestra el resumen de los resultados para este caso. Se puede ver que los ajustes respondieron satisfactoriamente, aunque sólo para la falla trifásica la ubicación de falla detectada por la protección es casi exacta. En el Anexo D.1 se muestran los registros oscilográficos capturados por el osciloscopio de las corrientes y tensiones para este caso.

<i>Fallas al 100% de la línea</i>	<i>Tiempo despeje falla</i>	<i>Loop que debió operar</i>	<i>Loop que operó</i>
3ϕ aislada	0.34 [s]	ABC2	ABC2
$1\phi - T$ (fase A)	0.34 [s]	AG2	AG2
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	0.35 [s]	AG2	AG2
2ϕ aislada (fases B, C)	0.33 [s]	BC2	BC2
$2\phi - T$ (fases B, C)	0.35 [s]	BC2	BC2

Tabla 23: Resultados de ensayos de cortocircuitos al 100 %.

<i>Fallas al 100% de la línea</i>	<i>Ubicación falla vista por la protección</i>
3ϕ aislada	119.1 [km]
$1\phi - T$ (fase A)	122.8 [km]
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	173.6 [km]
2ϕ aislada (fases B, C)	124.9 [km]
$2\phi - T$ (fases B, C)	125.8 [km]

Tabla 24: Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 100% de la línea.

Todas las fallas se realizaron al 100% de la línea, es decir, a una ubicación de 120 [km] de la protección, sin embargo, la zona 2 de la protección fue ajustada a una impedancia un 20% mayor que la de la línea, lo que implica que ésta debiera detectar fallas hasta los 144 [km]. Teniendo en cuenta lo anterior, llamó la atención que la protección haya visto que la falla monofásica con R_f ocurrió a los 173.6 [km] e, igualmente, haya operado mediante función de distancia.

6.4.2. Cortocircuitos al 85% de la línea

Para estos ensayos de cortocircuito, los resultados se muestran en la *Tabla 25*. Se observó que la falla trifásica volvió a operar bien, sin embargo, las fallas monofásicas presentaron problemas. En el Anexo D.2 se muestran los registros oscilográficos capturados por el osciloscopio de las corrientes y tensiones para este caso.

<i>Fallas al 85% de la línea</i>	<i>Tiempo despeje falla</i>	<i>Loop que debió operar</i>	<i>Loop que operó</i>
3ϕ aislada	0.352 [s]	ABC2	ABC2
$1\phi - T$ (fase A)	0.045 [s]	AG2	AG1
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	1.53[s]	AG2	Ninguno (51N)

Tabla 25: Resultados de ensayos de cortocircuito al 85%.

Al ver la Tabla 26, se aprecia que al haber fallas monofásicas, la protección no detecta correctamente la ubicación de la falla. Las fallas al 85% de la línea corresponden a una distancia de 102 [km] desde la protección, pero para el caso de falla monofásica a tierra, ésta la detectó en zona 1, particularmente, a 90.57 [km], lo que provocó que operara en el loop AG1 y no en el AG2.

<i>Fallas al 85% de la línea</i>	<i>Ubicación falla vista por la protección</i>
3ϕ aislada	100.8 [km]
$1\phi - T$ (fase A)	90.57 [km]
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	137 [km]

Tabla 26: Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 85% de la línea.

Finalmente, la falla monofásica con R_f fue detectada correctamente en zona 2, pero el loop ZAG2 se activaba y desactivaba repetidamente, sin alcanzar a mantenerse activo los 0.3 [s] que necesitaba para operar. Debido a esto, la falla fue despejada por la función 51N, tal como se muestra en la Figura 6.18

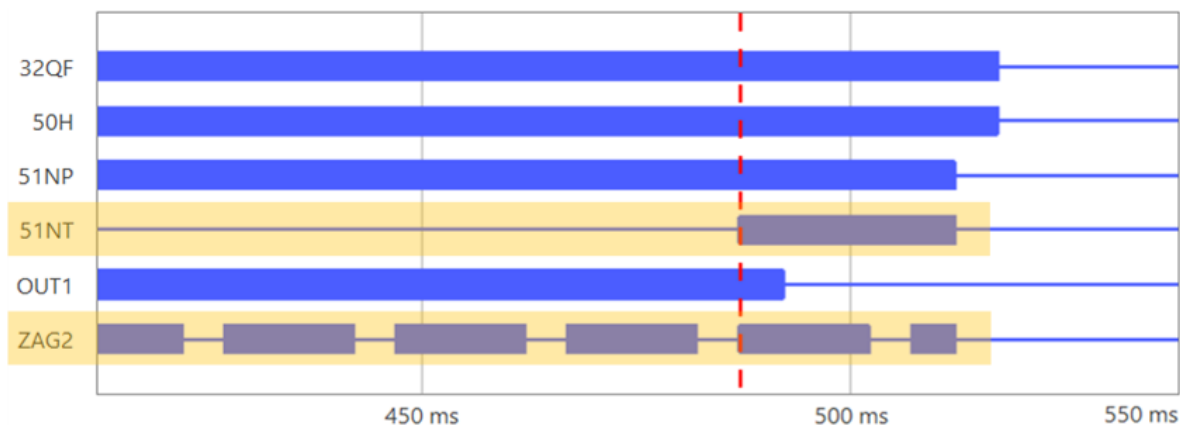


Figura 6.18: Salidas lógicas de la protección SEL-321-5 durante la falla monofásica a tierra con R_f al 85% de la línea.

6.4.3. Cortocircuitos al 57% de la línea

Los resultados para este caso se muestran en la *Tabla 27* y en la *Tabla 28*. Por otro lado, las corrientes y tensiones registradas por el osciloscopio se muestran en el Anexo D.3.

<i>Fallas al 57% de la línea</i>	<i>Tiempo despeje falla</i>	<i>Loop que debió operar</i>	<i>Loop que operó</i>
3ϕ aislada	0.055 [s]	ABC1	ABC1
$1\phi - T$ (fase A)	0.042 [s]	AG1	AG1
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	0.334[s]	AG1	AG2

Tabla 27: Resultados de ensayos de cortocircuito al 57%.

<i>Fallas al 57% de la línea</i>	<i>Ubicación falla vista por la protección</i>
3ϕ aislada	66.8 [km]
$1\phi - T$ (fase A)	51.4 [km]
$1\phi - T$ (fase A); $R_f=30[\Omega]$	79.98 [km]

Tabla 28: Ubicación de falla vista por la protección para los ensayos de cortocircuito al 57% de la línea.

Nuevamente, la falla trifásica es la que es localizada con mayor exactitud por parte de la protección, esto, teniendo en cuenta que el 57% de la línea corresponde a un tramo de 68.4 [km]. Por otro lado, la fallas monofásicas, con y sin resistencia de falla, no logran ser bien ubicadas por parte de la protección, lo que provoca que a veces haya errores en los tiempos de despeje.

6.5. Análisis de resultados

En esta subsección se analizan los resultados obtenidos para los casos de falla trifásica y monofásica con resistencia de falla al 57% de la línea. En primer lugar, se muestran las oscilografías obtenidas por la protección y las registradas por los osciloscopios. Se

sincronizaron manualmente en el tiempo para establecer una señal de referencia en un instante de tiempo específico y así, obtener los fasores de las señales. Finalmente, utilizando las ecuaciones mostradas en la *Tabla 2* del capítulo del Marco Teórico, se calcularon los *loops* que obtuvo la protección y los *loops* resultantes de las mediciones con los osciloscopios.

6.5.1. Cálculo de *loops* para cortocircuito trifásico al 57% de la línea.

La *Figura 6.19* muestra las señales de tensión y corriente obtenidas por los osciloscopios y por la protección. La línea vertical de color rojo indica el instante de tiempo que se utilizó como referencia para obtener los fasores de corriente y tensión. En Matlab, el tiempo “cero” corresponde al instante en que se generó la falla

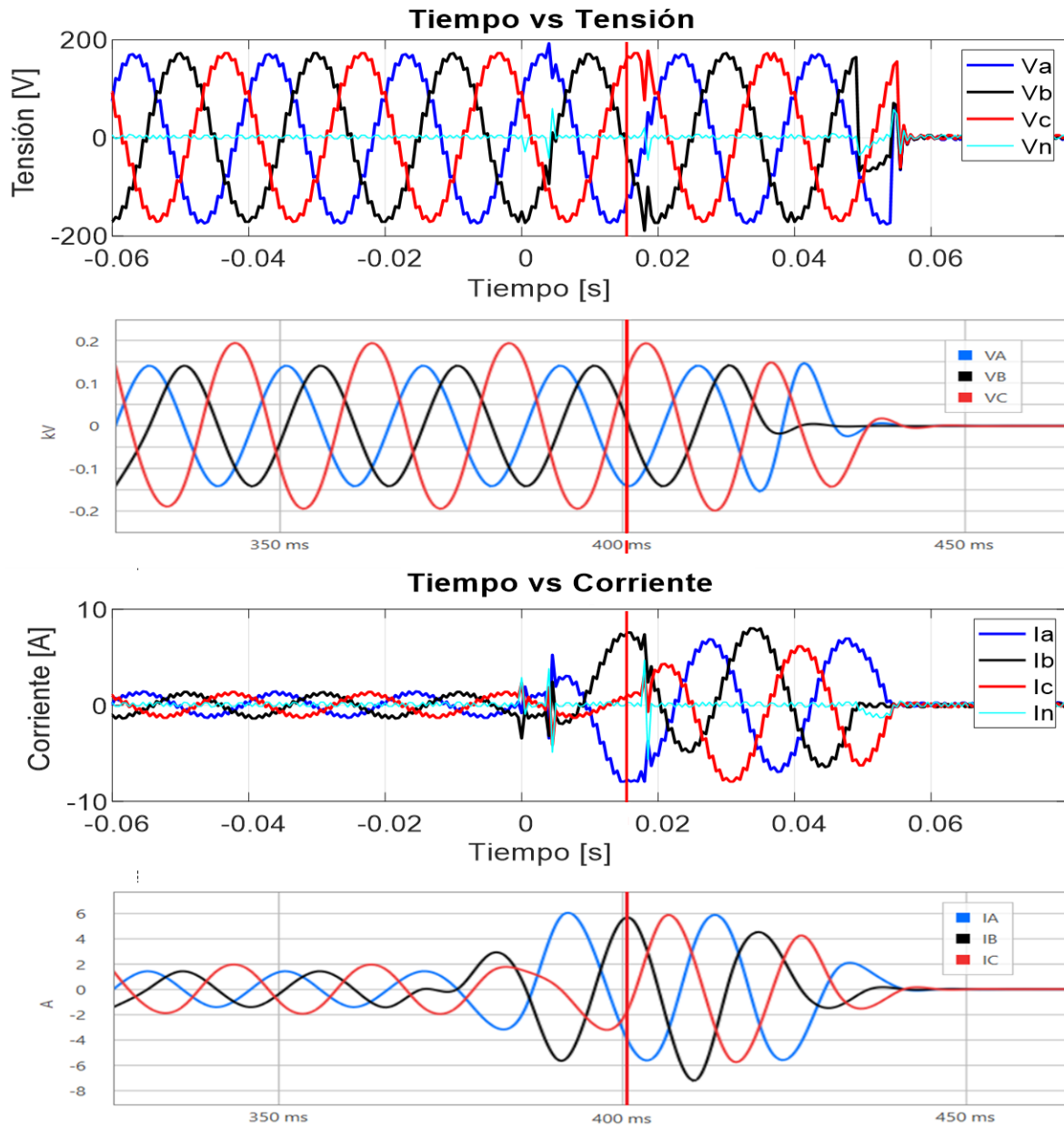


Figura 6.19: Oscilografías registradas por los osciloscopios (primer y tercer gráfico) y por la protección (segundo y cuarto gráfico) para la falla trifásica al 57% de la línea.

Para este caso se tomó como **referencia la tensión de la fase “A” en su valor peak negativo**. Se registraron las magnitudes de todas las variables en ese instante de tiempo y también se midieron los desfases relativos del resto de variables con la tensión de la fase “A”. Los fasores obtenidos de cada medición se muestran en la *Tabla 29*, así como el **error relativo de magnitud** entre ellos considerando como referencia los resultados registrados por los osciloscopios. Los *loops* resultantes se muestran en la *Tabla 30*.

<i>Falla 3ϕ al 57% de la línea</i>			
<i>Medición</i>	<i>SEL – 321 – 5</i>	<i>Osciloscopio</i>	<i>Error relativo</i>
V_a	$141.4\angle 0^\circ$	$152\angle 0^\circ$	7%
V_b	0	$9.4\angle -112.1^\circ$	100%
V_c	$141.4\angle 134.6^\circ$	$143\angle 121.5^\circ$	1%
I_a	$4.2\angle -47.5^\circ$	$7.9\angle -1.8^\circ$	47%
I_b	$5.7\angle -170^\circ$	$7.2\angle -171^\circ$	21%
I_c	$1.4\angle 58.7^\circ$	$0.6\angle 72^\circ$	133%

Tabla 29: Fasores obtenidos de las oscilografías mostradas en la *Figura 6.19*.

<i>Falla 3ϕ al 57% de la línea</i>		
<i>Loops</i>	<i>SEL – 321 – 5</i>	<i>Osciloscopio</i>
<i>AB</i>	$16.2\angle 14.3^\circ$	$10.6\angle 8.4^\circ$
<i>BC</i>	$21.2\angle 115.6^\circ$	$19.9\angle 105.3^\circ$
<i>CA</i>	$54.0\angle 41.9^\circ$	$32.3\angle -5.8^\circ$
<i>AG</i>	$25.4\angle 76.1^\circ$	$16.2\angle 30.6^\circ$
<i>BG</i>	0	$1.3\angle 40.2^\circ$
<i>CG</i>	$106.0\angle -98.9^\circ$	$76.2\angle -171^\circ$

Tabla 30: *Loops* obtenidos por la protección vs los calculados según mediciones para el caso de falla trifásica al 57% de la línea.

Se ubicaron estos *loops* en el diagrama R-X que tiene la protección SEL-321-5 en sus ajustes. Los resultados se muestran en la *Figura 6.20*.

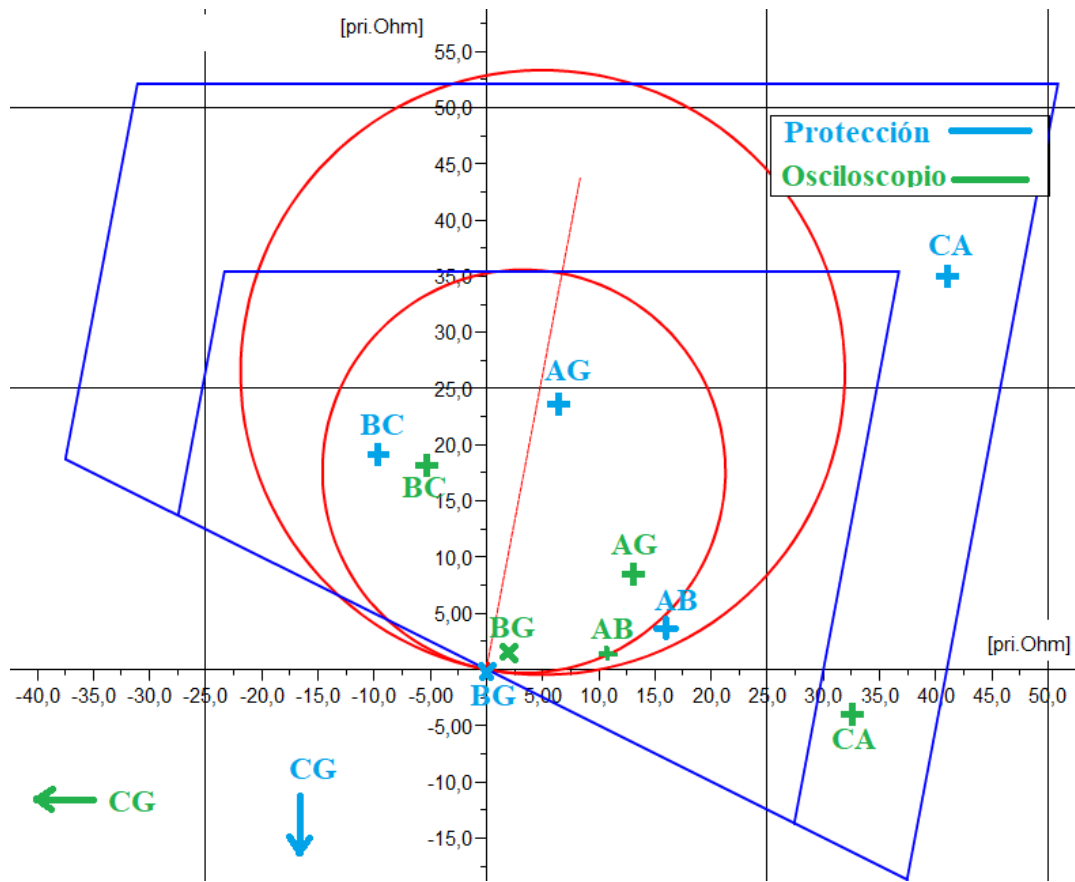


Figura 6.20: Ubicación de los *loops* en el diagrama R-X de la protección durante un cortocircuito trifásico al 57% de la línea.

En este caso, la protección operó correctamente en Zona 1 debido a que casi todos los *loops* cayeron dentro de esta zona. Sin embargo, los *loops* deberían haber caído en el mismo lugar debido a que se trata de una falla trifásica, que es una falla equilibrada.

6.5.2. Cálculo de *loops* para cortocircuito monofásico con resistencia de falla de 30 $[\Omega]$ al 57% de la línea.

Se repitió el mismo procedimiento anterior, pero esta vez se tomó como **referencia el instante de tiempo en que la tensión de la fase “A” tiene su máximo valor positivo**, lo que se indicó con la línea vertical roja. Se debe mencionar que como la falla tardó en despejarse, la protección generó dos oscilografías para el mismo evento, existiendo un “tiempo muerto” entre ambos reportes. La Figura 6.21 muestra esto, en donde se sincronizaron los dos reportes generados por la protección para que coincidan en el tiempo con las oscilografías generadas por los osciloscopios.

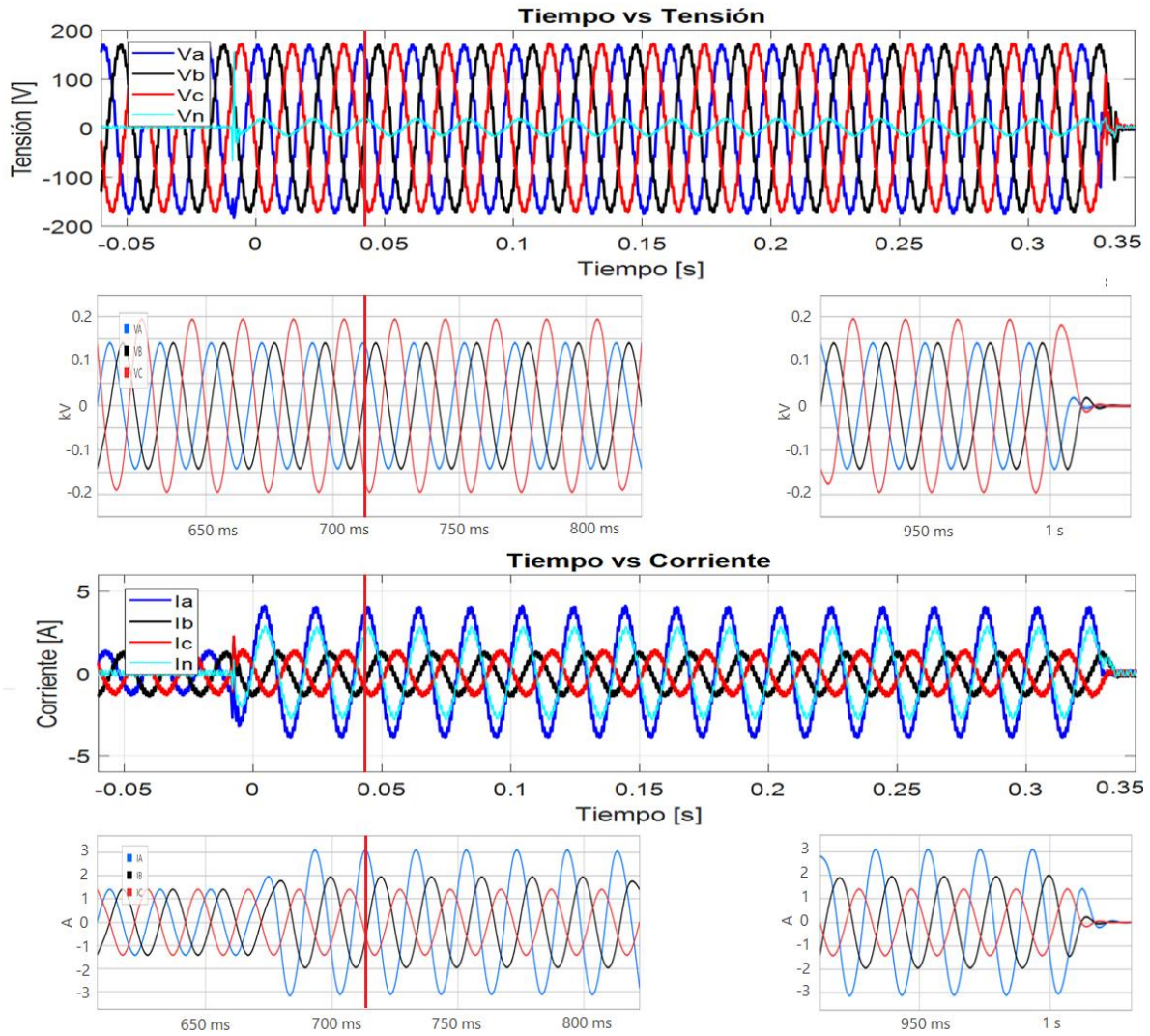


Figura 6.21: Oscilografías registradas por los osciloscopios (primer y tercer gráfico) y por la protección (segundo y cuarto gráfico) para la falla monofásica con $R_f=30[\Omega]$ al 57% de la línea.

Al igual que antes, se obtuvieron los fasores de tensión y corriente para este caso, los que se muestran en la *Tabla 31*. Además, la *Tabla 31* también muestra el error relativo entre los datos registrados por el relé SEL-321-5 y el osciloscopio, **tomando en cuenta sólo la magnitud** y considerando como referencia los datos tomados por el osciloscopio. Luego, la *Tabla 32*, muestra los *loops* calculados para este nuevo caso.

<i>Falla 1ϕ con $R_f = 30 [\Omega]$ al 57% de la línea</i>			
<i>Medición</i>	<i>SEL – 321 – 5</i>	<i>Osciloscopio</i>	<i>Error relativo</i>
V_a	141.4 $\angle$ 0°	159 $\angle$ 0°	11%
V_b	0	37.5 $\angle$ – 117°	100%
V_c	141.4 $\angle$ 135°	122 $\angle$ 126°	16%
I_a	2.8 $\angle$ – 23.4°	2.9 $\angle$ – 63°	3.5%
I_b	1.4 $\angle$ – 135°	0.8 $\angle$ – 153°	75%
I_c	0	0.4 $\angle$ 99°	100%

Tabla 31: Fasores obtenidos de las oscilografías mostradas en la Figura 6.21.

<i>Falla 1ϕ con $R_f = 30 [\Omega]$ al 57% de la línea</i>		
<i>Loops</i>	<i>SEL – 321 – 5</i>	<i>Osciloscopio</i>
<i>AB</i>	39.3 $\angle$ 2.0°	59.9 $\angle$ 58.0°
<i>BC</i>	100.3 $\angle$ 90°	143.7 $\angle$ 64.5°
<i>CA</i>	92.3 $\angle$ 0.9°	77.5 $\angle$ 41.9°
<i>AG</i>	29.7 $\angle$ 35.6°	32.5 $\angle$ 69.2°
<i>BG</i>	0	14.8 $\angle$ – 5.3°
<i>CG</i>	68.1 $\angle$ – 172.6°	72.9 $\angle$ – 156.8°

Tabla 32: Loops obtenidos por la protección vs los calculados según mediciones para el caso de falla monofásica con $R_f=30 [\Omega]$ al 57% de la línea.

Finalmente se ubicaron los *loops* en el diagrama R-X que se ingresó a la protección como ajuste. La *Figura 6.22* muestra el resultado.

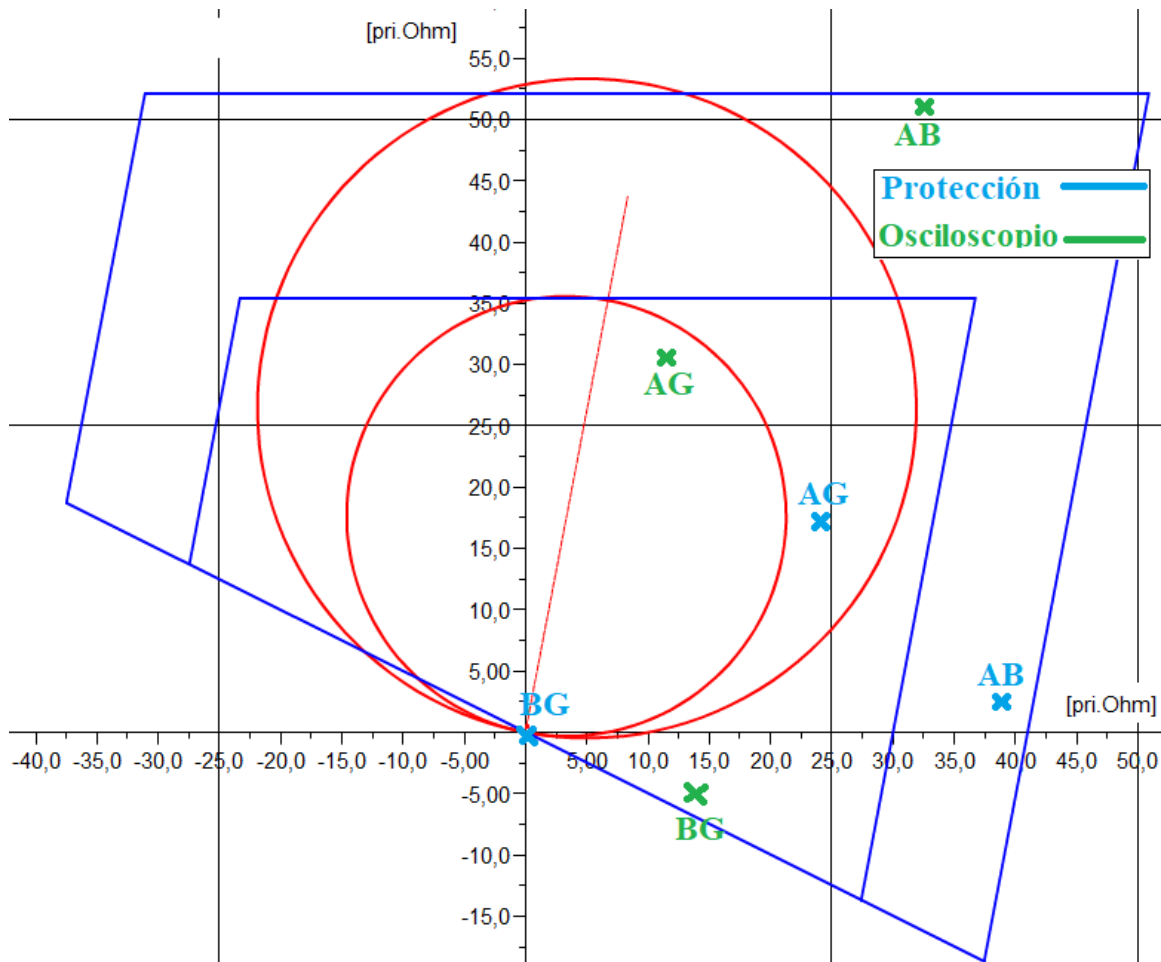


Figura 6.22: Ubicación de los loops en el diagrama R-X de la protección durante un cortocircuito monofásico con $R_f=30 \text{ } [\Omega]$ al 57% de la línea.

Se observó que los loops AG obtenidos tanto con los datos de la protección como con los datos de los osciloscopios, cayeron dentro de la Zona 1 de la función fase-tierra (diagrama cuadrilateral), por lo que la protección debió haber operado en Zona 1, sin embargo, para este cortocircuito la protección operó en Zona 2.

6.5.3. Discusión de resultados

En esta subsección se discuten los resultados de las pruebas mencionadas en este capítulo, las que corresponden a las realizadas para determinar la calidad de medición de los transformadores de medida, la influencia de los relés de estado sólido en el paño eléctrico a escala, la calidad de los registros oscilográficos de la protección y, finalmente, los ensayos de cortocircuito.

6.5.3.1 Transformadores de medida

En primer lugar, la *Figura 6.3* muestra que la relación de transformación entre las tensiones primarias y secundarias se cumple aún para tensiones primarias de 2 [V], valor muy por debajo de los valores nominales (220/110 [V]) de los TTPP. Las señales son de carácter sinusoidal, pero se ven un poco distorsionadas producto del error que conlleva medir magnitudes muy por debajo de los valores nominales de los TTPP, sin embargo, la *Figura 6.12* muestra las tensiones secundarias de los TTPP cuando la tensión primaria es de 120 [V] y allí las señales no presentan esta distorsión al estar midiendo valores de tensión más cercanos a los valores nominales de los TTPP. Análogamente, ocurre lo mismo con las corrientes. En la *Figura 6.4* se observa que la relación de transformación de los TTCC, correspondiente a 10, se cumple aún para una corriente pequeña en el devanado primario de 1 [A]. Nuevamente, las señales son de carácter sinusoidal con leves distorsiones producto del error al medir señales tan bajas comparadas a los valores nominales de los TTCC (50/5 [A]). Al observar la *Figura 6.13*, las señales de corriente ya no tienen estas ondulaciones al estar midiendo valores de corriente más cercanos a los nominales.

6.5.3.2. Efectos de los relés de estado sólido

La *Figura 6.5* demuestra que hay una tensión interna en los relés de estado sólido que debe ser superada para que haya conducción. La *Figura 6.6* muestra la tensión mínima que debe haber para que los relés de estado sólido conduzcan, la cual corresponde a 4 [V]. Esta tensión interna introduce armónicos en la red siempre y cuando no sea despreciable comparada a la tensión de la fuente. La *Figura 6.9*, la *Figura 6.10* y la *Figura 6.11* muestran cómo, a medida que se aumenta la tensión en la fuente para un mismo circuito, la tensión interna de los relés de estado sólido se hace cada vez más despreciable y la corriente de la red va teniendo cada vez menos armónicos.

6.5.3.3. Registros oscilográficos de la protección

Las figuras mostradas en la subsección 6.2.2.4 corresponden a registros oscilográficos de la protección generados para un mismo evento, por lo tanto, debían ser iguales. Sin embargo, las oscilografías presentaron dos problemas: 1) no resultaron ser todas iguales y, 2) no concuerdan con lo registrado por los osciloscopios, los que poseen mayor grado de precisión.

Por ejemplo, en la *Figura 6.14* se observa una mayor magnitud en la corriente de la fase B, en la *Figura 6.15* se observa que la fase A y la fase B tienen una mayor corriente que la fase C y en la *Figura 6.16* solo la fase A tiene una mayor corriente. Estos desbalances en magnitud no son reales, ya que la oscilografía tomada por el osciloscopio para las corrientes primarias se muestra en la *Figura 6.13* y allí todas las corrientes poseen la misma magnitud. Además, se comprobó que la relación de transformación es la misma en todos los TTCC por lo que se puede asegurar que los devanados secundarios de los TTCC registraron las corrientes secundarias sin desbalances en magnitud. Por otro lado, ocurre lo mismo para las tensiones.

Un problema mayor es que no se cumple la relación entre la tensión y la corriente dada por la ley de ohm. El circuito de pruebas que se utilizó para generar esas oscilografías tenía una carga trifásica resistiva balanceada, por lo tanto, si una fase tiene una magnitud de corriente mayor al resto de fases, es porque la tensión en esa fase debe ser mayor. Tomando como ejemplo la oscilografía de la *Figura 6.14*, si la corriente en la fase B resultó ser mayor que el resto de las fases, la tensión en la fase B debiera ser mayor que el resto de las fases, sin embargo, la oscilografía mostrada por la protección arrojó que la tensión en la fase B es menor al resto de fases. Este error ocurrió en todas las oscilografías y evidencia un problema interno de medición por parte de la protección.

6.5.3.4. Ensayos de cortocircuito

Observando los resultados de la *Tabla 29* a la *Tabla 32*, se aprecia que jamás coincidieron en un mismo valor los *loops* obtenidos por la protección con los calculados desde los registros oscilográficos de los osciloscopios. Las pruebas realizadas a los transformadores de medida (ver subsección 6.2.1) descartan problemas de medición por parte de los transformadores de potencial y de corriente, por lo que éstas diferencias se atribuyen a la baja capacidad de muestreo de la protección, correspondiente a 4 muestras por ciclo, y a los problemas internos de medición que tiene la protección y que se expusieron en el apartado anterior. A pesar de estos problemas, la protección operó correctamente para la mayoría de los casos (ver *Tabla 23*, *Tabla 25* y *Tabla 27*).

Se analizó un caso en donde la protección operó bien y otro en donde operó mal. Para el caso en el que la protección operó bien, se analizó la falla trifásica al 57% de la línea. Para este caso, la protección identificó correctamente la ubicación de la falla, localizándola a los 66.8

[km], lo que corresponde al 56% de la línea. En la *Figura 6.20* se observa que los loops cayeron en lugares diferentes cuando deberían haber caído exactamente en el mismo punto. Esto implica que el circuito montado en laboratorio tiene ciertos grados de desbalance y que las distintas fases no están totalmente equilibradas, sin embargo, la mayoría de los loops cayeron relativamente cerca. Para esta falla, los loops AG, BG y BC cayeron en Zona 1 de fase-fase y el loop AB cayó en Zona 2, casi en Zona 1, por lo tanto, la protección operó bien. Los loops que implicaban a la fase C se alejaron bastante de las zonas de protección de fase-fase, razón por la que se cree que los parámetros de línea de esta fase no quedaron tan bien ajustados como el resto de las fases.

Por otro lado, se observó que los errores de la protección ocurrieron en fallas monofásicas, que involucran corrientes de secuencia cero. Para el caso en el cual la protección no operó bien, se escogió analizar el cortocircuito monofásico con $R_f=30[\Omega]$ al 57% de la línea. La falla fue en la fase “A” y el *loop* “AG” obtenido por la protección resultó bastante cercano al calculado con los registros oscilográficos (ver *Figura 6.22*). Ambos *loops* cayeron dentro de la Zona 1 de la característica cuadrilateral de fase-tierra, pero la protección, en su reporte, indicó que el loop AG operó en Zona 2. Esta operación por parte de la protección puede indicar un error interno por parte del dispositivo o un error en algún ajuste de la función de protección de fase-tierra, ya que la misma protección identificó la falla al 67% de la línea (equivalente a 79.98 [km], ver *Tabla 28*) y los errores de medición comentados anteriormente no explicarían porque la protección operó en Zona 2 siendo que la falla se identificó en un tramo correspondiente a Zona 1.

6.6. Conclusiones

6.6.1. Conclusiones generales

- Las pruebas realizadas a los transformadores de medida y los resultados obtenidos permiten concluir que éstos se encuentran en buen estado y que son capaces de realizar mediciones precisas de tensión y corriente dentro de los rangos nominales de operación e incluso para valores bajo el rango nominal. Lo anterior, mientras se cumple la razón de transformación existente entre devanados primarios y secundarios de los transformadores de medida.

- Los relés de estado sólido, que cumplen la función de interruptores (52), introducen armónicos en la red cuando su tensión interna no es despreciable comparada a la tensión de la red.
- La protección SEL-321-5 presenta problemas en las oscilografías generadas, siendo éstas poco precisas e introduciendo desbalances en magnitud que no existen entre las variables. Las oscilografías de 16 muestras por ciclo presentan aún más problemas, como mayor contenido armónico y saturación de las señales. Se recomienda ocupar las oscilografías de 4 muestras por ciclo.
- A pesar de los problemas de medición por parte de la protección, ésta operó correctamente para la mayoría de los casos. Este hecho permite afirmar que los ajustes implementados en la protección fueron, en su mayoría, correctos y que el circuito montado experimentalmente se comportó según los resultados expuestos en el capítulo 4 de este trabajo.
- Debido a que se trabajó con valores de corriente y tensión reducidos, y a que el circuito de pruebas se alimentó desde la red, las pruebas no lograron replicar correctamente el comportamiento de la variable eléctrica de tensión durante las fallas. La red se comportó como una barra infinita, capaz de entregar toda la potencia que el circuito requería durante los cortocircuitos, por lo que la tensión del sistema nunca disminuyó y sólo se obtuvo los aumentos de corriente esperados. A pesar de esto, el circuito de pruebas cumplió su función y permitió probar el desempeño de los ajustes de la protección.
- Cualquiera sea el diseño del circuito de pruebas que se utilice, debe contemplar al menos dos aspectos: 1) las restricciones en capacidad de los elementos del paño eléctrico y 2) las restricciones de rango del dispositivo de protección que se desea integrar al equipo.
- El paño eléctrico a escala construido admitió la integración de la protección digital SEL-321-5 de manera exitosa, permitiendo que ésta hiciera uso de los elementos de medida incluidos en el equipo para el monitoreo de la red de prueba. Además, durante los ensayos de cortocircuito, se verificó que la protección anexada al equipo pudo controlar la apertura de los 52 presentes en el paño para interrumpir las corrientes de falla. Lo anterior indica que los distintos elementos presentes en el paño eléctrico a

escala se encuentran bien conectados, según los diseños de los circuitos mostrados en la *Figura 3.4* y *Figura 3.5*, y que, cada uno de ellos, cumple su función correctamente. De esta manera, se puede asegurar que el equipo construido permitirá la integración de otras protecciones digitales que se conecten a él, al otorgarles los elementos necesarios que éstas requieren para su operación.

- El paño eléctrico a escala como equipo en sí, es decir, sin la protección, requiere del usuario el estudio de la *Figura 3.4* y de la *Figura 3.36*, correspondientes al circuito eléctrico del paño y a las conexiones realizadas en las borneras y repartidor tetrapolar del circuito secundario. Lo anterior es necesario ya que el usuario, al momento de querer integrar una protección al equipo, debe asegurarse de instalarla correctamente y para esto, debe conocer la función de cada elemento presente en el circuito secundario. Además, sus borneras tienen funciones extras que permitirían instalar una maleta de pruebas sin necesidad de modificar el circuito secundario directamente, sino que trabajando a través de las borneras. En cambio, el circuito primario del paño eléctrico a escala no necesita ser modificado al conectar o desconectar un nuevo dispositivo de protección ni tampoco al integrar el equipo a una red eléctrica de pruebas. El circuito primario requiere la mínima interacción con el usuario y sólo cuando éste desee modificar su diseño o desconectar algún elemento que lo conforma. Para todos los efectos prácticos, el usuario debe utilizar sólo el panel frontal del rack para realizar conexiones que involucren al circuito primario.
- En su implementación, el equipo demostró acoplarse bien al circuito de pruebas y a la protección, permitiendo que ésta operara. El resultado final es un equipo de fácil uso, en el que una vez incorporada la protección, sólo requiere pulsarse un botón de “encendido/apagado” y de interactuar con el panel frontal del rack para realizar las conexiones con el circuito de pruebas. Por otro lado, los componentes del paño se encuentran dispuestos sobre bandejas, las cuales pueden ser fácilmente modificadas en altura en caso de ser necesario, pero impiden el acceso inmediato a los componentes y entregan una ayuda visual para identificar claramente la zona disponible en el equipo para ubicar las protecciones. Todo lo anterior, se traduce en un equipo intuitivo para el usuario y que posibilita la opción de que en un futuro pueda ser ocupado con fines didácticos. Periódicamente (2 veces al año) se

recomienda revisar las conexiones del equipo por si es necesario un apriete de terminales ya que éstos, con el uso y el tiempo, tienden a soltarse.

6.6.2. Cumplimiento de objetivos

El primer objetivo específico, relativo a diseñar los componentes de un paño de una subestación eléctrica y de un sistema reducido a escala se dieron cumplimiento en los capítulos 3 y 4 respectivamente. Para ello primero se determinaron los componentes esenciales de un paño de una subestación y luego se diseñó un circuito de pruebas que representara una línea de transmisión radial, ambas actividades considerando el lugar de trabajo y sus restricciones para el correcto dimensionamiento de los equipos y el circuito de pruebas. El segundo objetivo específico, que trata sobre diseñar el rack y su construcción se detalla en el capítulo 3 de este trabajo. Implicó una fase de diseño, otra de compra de productos y finalmente de construcción y pruebas. Al término se logró implementar un equipo que sirve de paño eléctrico a escala y que permite integrar a él tanto un circuito de pruebas como una protección eléctrica digital. El tercer objetivo específico implicó la lectura completa del manual del dispositivo de protección, ayuda de terceros y simulaciones de resultados en softwares como DIgSILENT y PLECS para ajustar correctamente la protección según los resultados esperados de las variables eléctricas de la red. Finalmente, el último objetivo específico se cumplió mediante ensayos de laboratorio con la red de pruebas diseñada en el capítulo 4 de este trabajo. Se efectuaban distintos tipos de cortocircuito y se veía cómo respondía la protección. Si era necesario, se corregían algunos ajustes para luego repetir las pruebas hasta lograr resultados satisfactorios. De esta manera se pudo dar por cumplido el objetivo general de este trabajo.

6.6.3. Trabajo futuro

Se espera que el equipo construido pueda ser incorporado en actividades didácticas de laboratorio para ramos de protecciones eléctricas con el objetivo de que los estudiantes puedan interactuar con estos dispositivos de manera práctica. Para lo anterior sería necesario planificar las actividades que el alumno podría realizar con este equipo de modo que hubiera un plan de trabajo enfocado al aprendizaje de estos dispositivos de protección.

Otros aspectos que pueden trabajarse en el futuro es implementar más elementos y prestaciones al equipo. En este trabajo no se utilizó ninguna entrada “IN” de la protección integrada al paño eléctrico a escala, pero en algunas aplicaciones, es necesario hacer uso de estas entradas lógicas de la protección. Para esto sería necesario que se incluyera una fuente continua variable en el equipo, dado que, dependiendo de la protección, las entradas lógicas “IN” pueden activarse con tensiones de 24, 48 o 125 [V_{DC}]. Si la aplicación corresponde a la apertura monopolar de interruptores con reconexión automática, dependiendo de la protección y las prestaciones que tenga, podría ser necesario o no que el paño eléctrico a escala tenga que ser equipado con una configuración de relés biestables que permitan indicar el estado de los interruptores (abierto o cerrado) a la protección. Otra opción sería adquirir interruptores que tengan incorporadas salidas lógicas que indican el estado de sus contactos.

Por otro lado, los transformadores de potencial ocupados son autotransformadores y, superando cierto nivel de tensión (alrededor de los 110 [V_{f-n}]), comienzan a sonar. Este hecho no se logró investigar y faltó determinar su causa y si es un solo transformador o si son varios los que emiten este sonido. Dependiendo del resultado, podría evaluarse reemplazar los autotransformadores por “transformadores de control” (palabra clave) de la misma u otra razón de transformación.

Finalmente se menciona el hecho de haber observado un efecto capacitivo en las mediciones de tensión y corriente durante las pruebas del rack con un circuito resistivo para el caso sin 52 conectados. Por el contrario, para el caso con 52 conectados, se observó un efecto inductivo. Este hecho no se estudió en más detalle, por lo que no se sabe si fue un resultado puntual del ensayo realizado en ese momento o es una característica intrínseca del paño eléctrico a escala.

Referencias

- [1] C. N. d. Energía, «Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio,» Santiago de Chile, 2020.
- [2] Schweitzer engineering laboratories, «Instruction Manual SEL-321-5 Relay,» SEL, 2021.
- [3] Areva, Protecciones de distancia. Guía de aplicación., Madrid: Areva T&D Ibérica S.A, 2005.
- [4] Phoenix Contact, «Phoenix Contact,» [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-de-paso-st-6-3031487>.
- [5] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-de-paso-st-25-3031212>.
- [6] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-seccionable-st-4-mt-3038875>.
- [7] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-interrumpible-urtps-ben-10-0309109>.
- [8] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-interrumpible-urtps-0311087>.
- [9] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/borne-interrumpible-utme-6-3047400>.
- [10] Phoenix Contact, [En línea]. Available: <https://www.phoenixcontact.com/es-cl/productos/puente-de-conmutacion-sb-me-2-8-3034468>.
- [11] S. E. Laboratories, «Selinc,» [En línea]. Available: <https://selinc.com/es/products/321/>.

- [12] Coordinador Eléctrico Nacional, «Infotécnica del Coordinador Eléctrico Nacional,» [En línea]. Available: <https://infotecnica.coordinador.cl/instalaciones/secciones-tramos>. [Último acceso: Abril 2024].

Anexos

Anexo A: Detalle del costo de equipos y materiales

En este anexo se describe en detalle los costos de los materiales y componentes que conforman el paño eléctrico a escala y el generador de fallas. Ambos equipos implicaron gastos extras que no fueron expuestos aquí y que correspondieron a errores en la fabricación de partes o cambios en el diseño que implicaron nueva compra de materiales y/o la puesta en desuso de otros comprados previamente. Por otro lado, hubo partes y piezas que fueron donadas, como los bornes UTME 6, los bornes UTRK S-BEN10 y la caja estanca para el fallador. Aunque estos componentes no tuvieron un costo asociado a su adquisición, sí son elementos de valor que forman parte del equipo final respectivo y se consideró su costo de mercado igualmente. Por lo tanto, se consideraron los costos de los componentes y materiales que finalmente quedaron en el paño eléctrico a escala y en el generador de fallas con el objetivo de valorizar el costo total de los equipos.

A.1. Costos del rack y componentes asociados al paño eléctrico a escala

La *Tabla 33* muestra los costos de cada componente del rack. Los elementos de la tabla que en la columna “Lugar de compra” no estén rellenos, significa que fueron donados u obtenidos del pañol de electricidad.

<i>Elemento</i>	<i>Lugar compra</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Envío</i>	<i>IVA (19%)</i>	<i>TOTAL</i>
Gabinete de piso	Comdiel	\$185,714	1	\$185,714	\$38,142	\$46,045	\$288,389
Bandeja rack 19’’		\$9,244	2	\$18,488			
Riel Din ranurado, 1[m]	Dartel	\$2,184	1	\$2,184	----	\$415	\$2,599
PDU zapatilla eléctrica	Comdiel	\$27,059	1	\$27,059	5,546	\$6,195	\$38,800
1 [m] Cable H07Z1, 2.5 [mm ²] azul	Extraelec	\$360	4	\$1,440	----	\$274	\$1,714

<i>Elemento</i>	<i>Lugar compra</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Envío</i>	<i>IVA (19%)</i>	<i>TOTAL</i>
1 [m] Cable H07Z1 2.5 [mm ²], negro	Extralec	\$360	4	\$1,440	----	\$274	\$1,714
1 [m] Cable H07Z1, 2.5 [mm ²] rojo	Extralec	\$360	4	\$1,440	----	\$274	\$1,714
1 [m] Cable H07Z1, 2.5 [mm ²] blanco	Extralec	\$360	4	\$1,440	----	\$274	\$1,714
1 [m] Cable H07Z1, 6 [mm ²] azul	Extralec	\$890	20	\$17,800	----	3,382	\$21,182
1 [m] Cable H07Z1, 6 [mm ²] negro	Extralec	\$890	20	\$17,800	----	3,382	\$21,182
1 [m] Cable H07Z1, 6 [mm ²] rojo	Extralec	\$890	20	\$17,800	----	3,382	\$21,182
1 [m] Cable H07Z1, 6 [mm ²] blanco	Extralec	\$900	3	\$2,700	----	\$513	\$3,213
1 [m] Cable H07Z1, 6 [mm ²] verde/amarillo	Extralec	\$890	2	\$1,780	----	\$338	\$2,118
Lámina Adhesiva 50x50 [cm]	PdMedios	\$5,500	1	\$5,500	----	\$1,045	\$6,545
Placa acrílica 50x50 [cm]	Formacril	\$24,500	1	\$24,500	----	\$4,655	\$29,155
Conector hembra tipo banana	----	\$550	16	\$8,800	----	\$1,672	\$10,472
Disyuntor monopolar Legrand RX3 C40	Gobantes	\$2,291	6	\$13,745	----	\$2,610	\$16,355
Relé estado sólido Metaltex, TZC 80ª	Zona Industrial	\$28,770	3	\$86,310	\$6.500	\$17,632	\$110,444

<i>Elemento</i>	<i>Lugar compra</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Envío</i>	<i>IVA (19%)</i>	<i>TOTAL</i>
Transformador de corriente SACI TU-20, 50/5 [A]	Rhona	\$13,568	3	\$40,704	----	\$7,734	\$48,438
Autotransf. Macrorel 220/110 [V], 100[W]	Sodimac	\$12,899	6	\$77,395	----	\$14,705	\$92,100
Borne de paso Phoenix Contact ST-6	Dartel	\$1,817	18	\$32,706	---	\$6,214	\$38,920
Bolsa 100 unidades terminales tipo punta	Dartel	\$11,384	2	\$22,768	----	\$4,326	\$27,094
Fuente tensión continua 5[V]	----	\$18,990	1	\$18,990	----	----	\$18,990
Peine de unión	Dartel	\$512	9	\$4607	----	\$1,081	\$5,688
Borne interrumpible Phoenix Contact ST 4-MT	RS Group	\$3,626	3	\$10,878	----	\$2,067	\$12,945
Borne Phoenix Contact URTK S-BEN10	----	\$5,251	4	\$21,004	----		\$21,004
Bornera Phoenix Contact URTK/S	Dartel	\$2,488	4	\$9,952	----	\$1,891	\$11,843
Repartidor tetrapolar de 7 puntos	Dartel	\$13,509	2	\$27,018	----	\$5,133	\$32,151
Repartidor tetrapolar de 11 puntos	Dartel	\$8,162	1	\$8,162	----	\$1,551	\$9,713
Borne UTME 6	----	\$6,697	7	\$46,879	----		\$46,879

<i>Elemento</i>	<i>Lugar compra</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Envío</i>	<i>IVA (19%)</i>	<i>TOTAL</i>
Eslabón puenteador SB-ME-2-8	----	\$3,331	3	\$9,993	----		\$9,993
Cinta adhesiva Brady	----	\$51,328	2	\$102,656	----		\$102,656
Adaptador de prueba PAI-4-FIX-YE	RS Group	\$1,857	4	\$7,428	----	\$1,411	\$8,839
Tope de borne	Dartel	\$914	4 unid.	\$3,656	----	\$695	\$4,351
Calota de 1 puesto riel DIN	Sodimac	\$2,395	6	\$14,370	----	\$2,730	\$17,100
Borne de paso Phoenix Contact ST-2.5	Dartel	\$550	6	\$3,300	----	\$627	\$3,927
TOTAL						\$1,091,123	

Tabla 33: Costos de los materiales y componentes del paño eléctrico a escala.

A.2. Costos del generador de fallas

La *Tabla 34* muestra el detalle de los costos del generador de fallas.

<i>Elemento</i>	<i>Lugar compra</i>	<i>Precio unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Subtotal</i>	<i>IVA</i>	<i>Total</i>
Caja estanca 20x20x13 [cm]	----	\$20,071	1	\$20,071	----	\$23,885
1 [m] Cable THHN 10AWG, blanco	Sodimac	\$832	1	\$832	\$158	\$990
1 [m] Cable THHN 10AWG, negro	Sodimac	\$832	1	\$832	\$158	\$990
1 [m] Cable THHN 10AWG, rojo	Sodimac	\$832	1	\$832	\$158	\$990
Cinta aislante color azul	Sodimac	\$1,924	1	\$1,924	\$366	\$2,290
Interruptor Automático tripolar, 63 [A]	Rhona	\$15,986	1	\$15,986	\$3,750	\$19,736
Interruptor basculante	Electrónica Villanelo	\$1,008	3	\$3,025	\$275	\$3,300
Lámina adhesiva 20x20 [cm]	PdMedios	\$4,496	1	\$4,496	\$854	\$5,350
Conector hembra tipo banana	----	\$550	8	\$4,400	\$836	\$5,236
TOTAL						\$62,767

Tabla 34: Costos del generador de fallas.

Anexo B: Datos de líneas de 220 [kV] utilizados

Los datos mostrados en la *Tabla 35* y *Tabla 36* corresponden a tramos de líneas de 220 [kV] obtenidos mediante la base de datos de DIgSILENT 2015.

B.1. Parámetros de secuencia positiva y secuencia cero

La *Tabla 35* muestra los parámetros de resistencia y reactancia, tanto de secuencia positiva como de secuencia cero, para tramos de líneas de 220 [kV]. En la última fila de la *Tabla 35* se incluye el promedio obtenido para cada parámetro.

<i>Nombre tramo líneas 220 [kV]</i>	<i>LL [km]</i>	$r_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$r_0 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_0 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$
Colbun - La Candelaria L1	214.4	0.036	0.309	0.279	1.073
Quillota - Los Piuquenes L1	178.0	0.100	0.400	0.250	1.410
Temuco - Duqueco	156.4	0.077	0.396	0.221	1.356
Cautín - Valdivia	149.8	0.101	0.397	0.244	1.371
Charrúa - Ralco L2	141.0	0.027	0.281	0.244	1.002
Charrúa- Zona Caída	140.7	0.027	0.281	0.244	1.002
Maitencillo -Cardones	132.7	0.010	0.398	0.244	1.323
Punta Colorada - La Mesa	125.0	0.066	0.454	0.323	0.945
Cautín - Los Ciruelos	115.2	0.118	0.404	0.261	1.373
Melipulli - Chiloé	110.6	0.094	0.394	0.234	1.377
Valdivia - Rahue	110.3	0.101	0.398	0.244	1.370
Valdivia - Pichirrahue	110.1	0.155	0.415	0.298	1.387
Punta Colorada - Maitencillo	109.2	0.098	0.391	0.235	1.311
Barro Blanco - Puerto Montt	106.0	0.101	0.401	0.244	1.364
Pangue - Cholguan	105.0	0.041	0.381	0.258	1.235
Nogales - Los Vilos	97.1	0.099	0.394	0.239	1.316
Puerto Montt - Pichirrahue	96.9	0.157	0.420	0.301	1.379
Pague - Trupan	88.3	0.042	0.382	0.276	1.209
Pan de azúcar-Punta colorada	88.0	0.098	0.391	0.235	1.311
Cerro Negro Norte - Totoralillo	85.0	0.095	0.408	0.323	1.145
Charrúa - Hualpén	83.7	0.078	0.398	0.226	1.353
Charrúa - Lagunillas	80.0	0.071	0.410	0.309	1.102
Carrera Pinto - La Coipa	78.0	0.080	0.392	0.225	1.321
Charrúa - Santa María	74.3	0.024	0.286	0.205	0.977
Nogales - Polpaico	73.5	0.013	0.192	0.155	1.234
Carrera Pinto - Diego de Almagro	72.2	0.010	0.393	0.244	1.323
Charrúa - Concepción	71.8	0.010	0.387	0.245	1.344
Charrúa - Mulchén	68.7	0.045	0.288	0.186	1.282

<i>Nombre tramo líneas 220 [kV]</i>	<i>LL [km]</i>	$r_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_1 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$r_0 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$	$x_0 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$
Polpaico - Los Maquis	67.8	0.100	0.410	0.290	1.300
Antuco - Charrúa	67.5	0.042	0.382	0.276	1.209
Ancoa - Itahue	65.0	0.050	0.384	0.297	1.205
PROMEDIO	105.2	0.078	0.375	0.253	1.255

Tabla 35: Datos de líneas de 220 [kV] mediante DIgSILENT2015.

B.2. Niveles de corriente de carga y cortocircuito en líneas de 220 [kV]

La Tabla 36 muestra los niveles de corriente, tanto de carga como de cortocircuito, para tramos de líneas de 220 [kV]. En la última fila de la Tabla 36 se incluye el promedio obtenido para cada columna.

<i>Nombre tramo líneas 220 [kV]</i>	<i>LL [km]</i>	I_{nom} [kA]	I_{carga} [kA]	I_{coci} [kA]	$\frac{I_{coci}}{I_{carga}}$
Colbun - La Candelaria L1	214.4	0.86	1.02	18.37	18.06
Quillota - Los Piuquenes L1	178.0	0.51	2.02	3.86	1.91
Temuco - Duqueco	156.4	0.69	0.15	4.69	30.47
Cautín - Valdivia	149.8	0.39	0.18	3.94	22.25
Charrúa - Ralco L2	141.0	1.78	0.56	8.74	15.52
Charrúa- Zona Caída	140.7	1.78	0.55	8.77	16.00
Maitencillo -Cardones	132.7	0.52	0.25	3.60	14.29
Punta Colorada - La Mesa	125.0	0.20	0.05	2.28	42.20
Cautín - Los Ciruelos	115.2	0.39	0.16	4.28	27.07
Melipulli - Chiloé	110.6	0.61	0.15	2.06	13.99
Valdivia - Rahue	110.3	0.51	0.15	3.23	21.22
Valdivia - Pichirrahue	110.1	0.39	0.08	3.09	40.61
Punta Colorada - Maitencillo	109.2	0.86	0.21	4.28	20.17
Barro Blanco - Puerto Montt	106.0	0.51	0.07	2.75	38.75
Pangue - Cholguan	105.0	1.34	0.49	6.85	13.94
Nogales - Los Vilos	97.1	0.86	0.14	6.79	48.13
Puerto Montt - Pichirrahue	96.9	0.39	0.17	2.74	16.39
Pague - Trupan	88.3	1.34	0.42	7.63	18.21
Pan de azúcar-Punta colorada	88.0	0.86	0.21	3.64	17.75
Cerro Negro Norte - Totoralillo	85.0	0.47	0.01	1.62	231.29
Charrúa - Hualpén	83.7	0.60	0.24	8.74	36.56
Charrúa - Lagunillas	80.0	0.63	0.23	8.81	38.81
Carrera Pinto - La Coipa	78.0	0.60	0.03	1.60	57.25
Charrúa - Santa María	74.3	1.36	0.36	12.43	34.14

<i>Nombre tramo líneas 220 [kV]</i>	<i>LL [km]</i>	<i>I_{nom} [kA]</i>	<i>I_{carga} [kA]</i>	<i>I_{coci} [kA]</i>	<i>$\frac{I_{coci}}{I_{carga}}$</i>
Nogales - Polpaico	73.5	3.93	0.26	15.94	61.76
Carrera Pinto - Diego de Almagro	72.2	0.52	0.26	1.63	6.36
Charrúa - Concepción	71.8	0.68	0.32	8.95	27.72
Charrúa - Mulchén	68.7	1.31	0.12	13.02	107.64
Polpaico - Los Maquis	67.8	0.84	0.16	8.89	56.96
Antuco - Charrúa	67.5	1.36	0.43	11.83	27.32
Ancoa - Itahue	65.0	1.24	0.35	11.50	32.94
<i>PROMEDIO</i>	105.2	0.91	0.32	6.66	37.28

Tabla 36: Niveles de corriente de carga y cortocircuito en líneas de 220 [kV].

Anexo C: Montaje experimental

En este anexo se muestra el montaje experimental de los elementos escogidos en la sección 4.4 para armar el circuito mostrado en la *Figura 4.10* y se mencionan algunos detalles que debieron modificarse para llevar a cabo los ensayos de cortocircuito.

C.1. Montaje experimental para ensayos de cortocircuito al 100% de la línea

Al realizar los ensayos de cortocircuito al 100% de la línea, no fue necesario cortocircuitar ningún tramo del conductor neutro, lo que permitió realizar todos los tipos de falla utilizando el generador de fallas, el cual tiene un interruptor automático tripolar dedicado a interrumpir las fases. Lo anterior implica que los terminales de tierra del generador de fallas corresponden a un cable y estos bornes se utilizan sólo con fines de limpieza circuital. Sin embargo, para los cortocircuitos ubicados al 100% de la línea esto no representó un problema porque el conductor neutro nunca se cortocircuitó, pudiéndose conectar el fallador entre la estrella formada por las cargas y la resistencia e inductancia que representan al conductor neutro.

Con respecto a la inductancia del conductor neutro, se necesitaban 110 [mH], los que se lograban con una sola inductancia, conectándola entre sus terminales L1-L6, tal como se indicó en la *Tabla 12* de la sección 4.3.1. El resto de los elementos se conectó tal como se indicó en la *Figura 4.10* de la sección 4.4. La *Figura C.0.1* muestra las conexiones hechas en el laboratorio y la disposición de los elementos utilizados.

El procedimiento siempre fue, dependiendo del tipo de cortocircuito, armar la falla mediante los interruptores basculantes del generador de fallas mientras el interruptor automático estaba abierto, luego energizar y efectuar el cortocircuito cerrando el interruptor automático del generador de fallas por unos breves momentos.

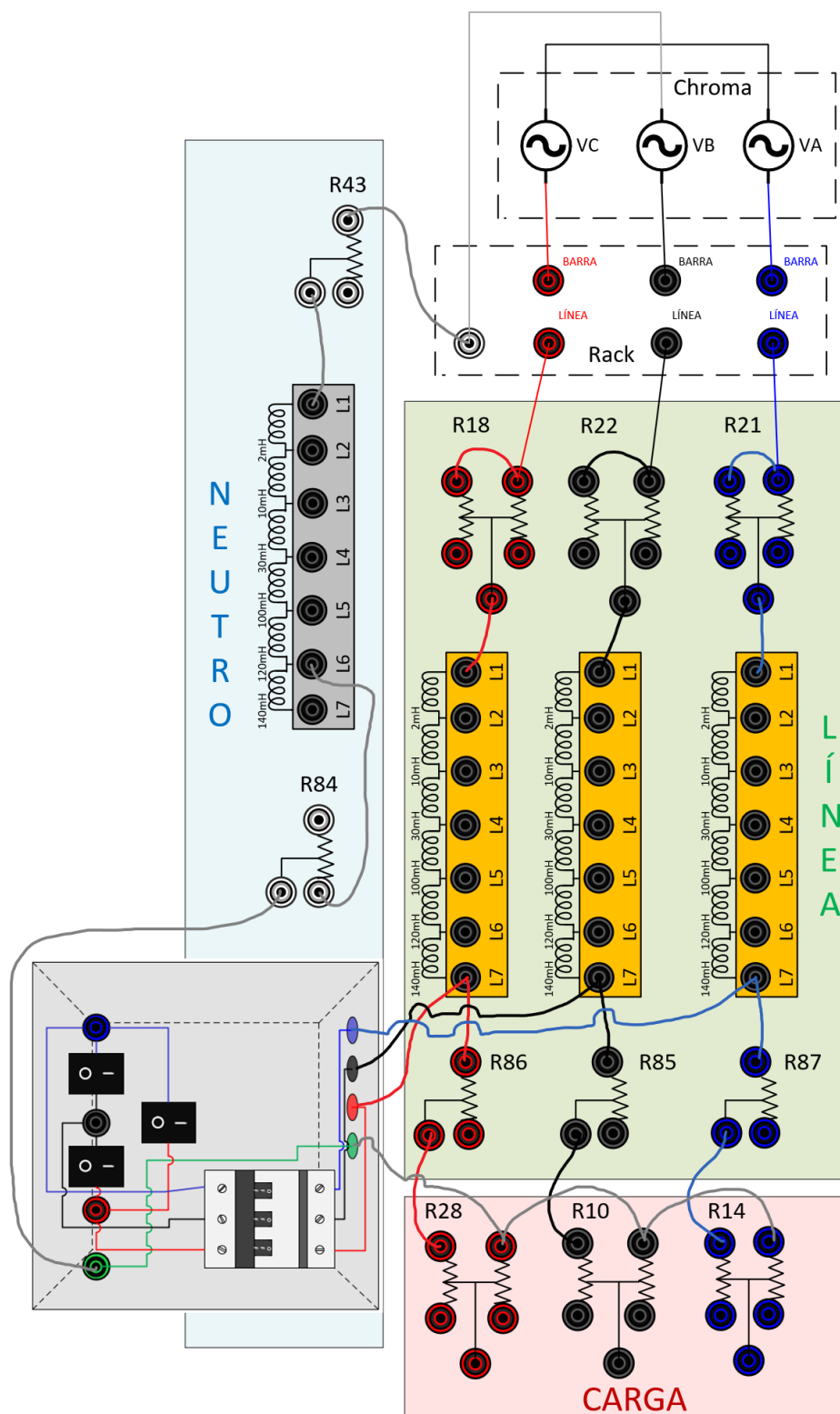


Figura C.0.1: Montaje experimental para cortocircuitos al 100% de la línea.

C.2. Montaje experimental para el resto de los ensayos de cortocircuito (85% y 57% de la línea).

Para estos casos de ensayo, en donde los cortocircuitos se efectuaban al 85% o 57% de la línea e involucraban fallas a tierra, también se requería cortocircuitar el mismo porcentaje del conductor neutro por lo que fue necesario ocupar un interruptor trifásico. Lo anterior, debido a que el interruptor automático del generador de fallas no es tetrapolar y se requiere un elemento extra para cortocircuitar el tramo correspondiente del conductor neutro de un momento a otro. Por ejemplo, para el caso de una falla monofásica al 85%, la inductancia del conductor neutro debe pasar de 110 [mH] en estado estacionario (bornes L4-L6+L1-L3+L1-L3) a 94 [mH] en falla (en la práctica se lograron 92 [mH] entre bornes L4-L6+L1-L2). Esto se indicó en la *Tabla 12* de la sección 4.3.1.

En la *Figura C.0.2.* se indicó el montaje experimental y las conexiones correspondientes para el caso de una falla monofásica en la fase A, al 85% de la línea. Se debe mencionar que el generador de fallas tiene su interruptor automático cerrado y sólo se ocupó para dar orden al circuito, no obstante, el interruptor trifásico es el que ejecuta su función, estando inicialmente en posición “0” o “abierto”. Cuando el interruptor trifásico se cierra (posición 1), se ejecuta el cortocircuito al poner en paralelo un cable a los bornes de inductancia L2-L3+L1-L3 junto a R84, cortocircuitándose el 15% del conductor neutro.

Para el caso de falla al 57% de la línea, la idea es la misma, pero cambian las conexiones en las inductancias de fase, realizando el cortocircuito en los bornes L5 en vez de L6 (ver *Tabla 11* de sección 4.3.1); y en las inductancias del conductor neutro como se indicó en la *Tabla 12* de la sección 4.3.1. Sin embargo, el montaje experimental es el mismo mostrado en la *Figura C.0.2.*

Finalmente, en la *Figura 6.17* se muestra el montaje experimental en el laboratorio de máquinas de la universidad.

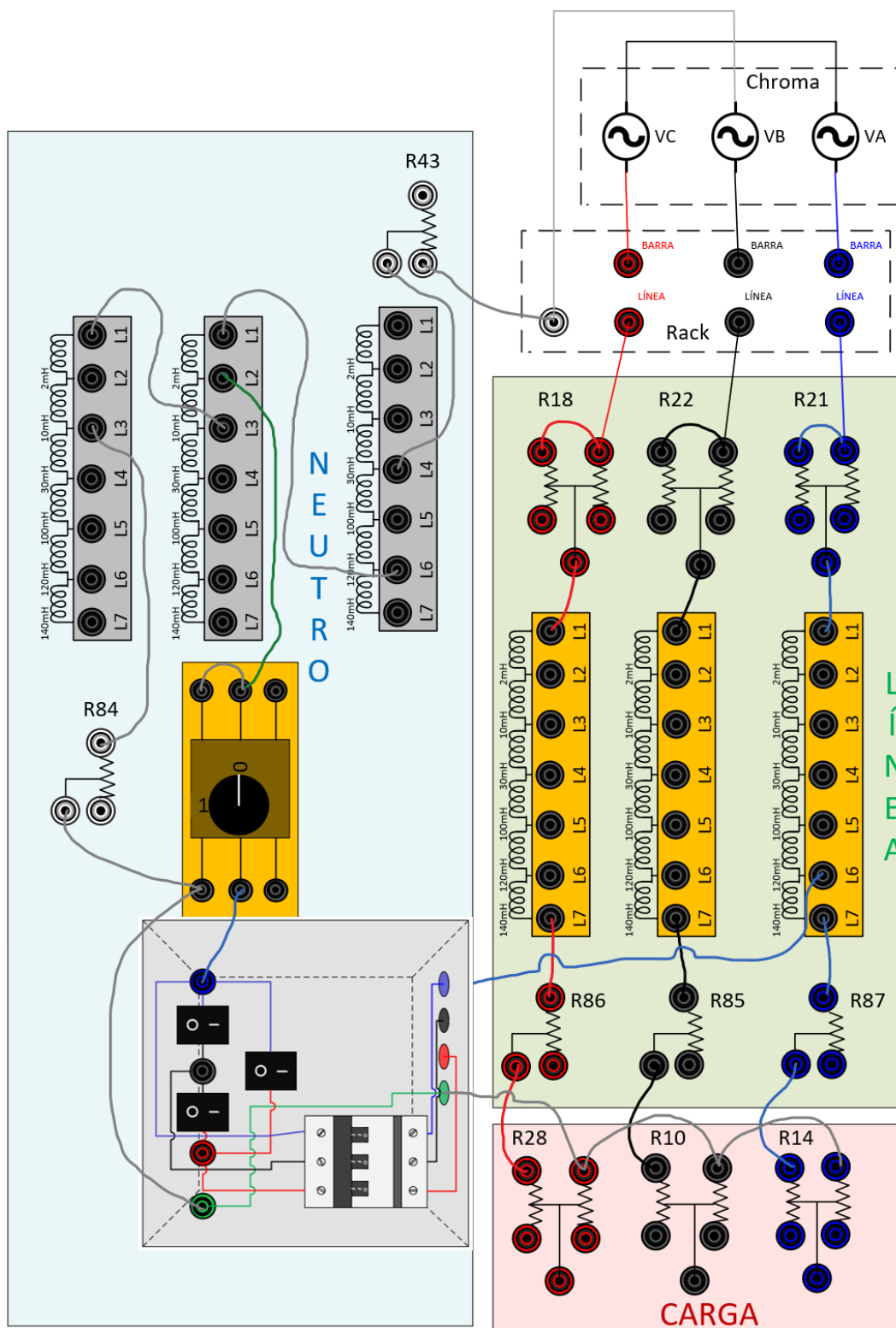


Figura C.0.2: Montaje experimental para cortocircuitos a tierra al 85% y 57% de la línea.

Anexo D: Gráficos de tensión y corriente de los ensayos de cortocircuito.

En este anexo se adjuntan los gráficos de tensión y corriente que fueron registrados con el osciloscopio durante cada ensayo de cortocircuito.

D.1. Fallas al 100% de la línea

D.1.1. Cortocircuito trifásico aislado

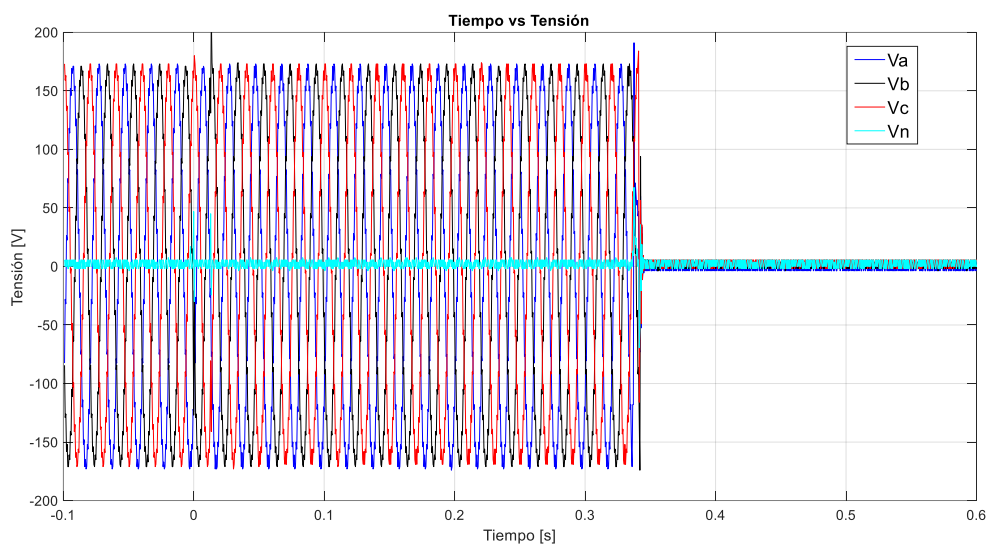


Figura D.0.3: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 100% de la línea.

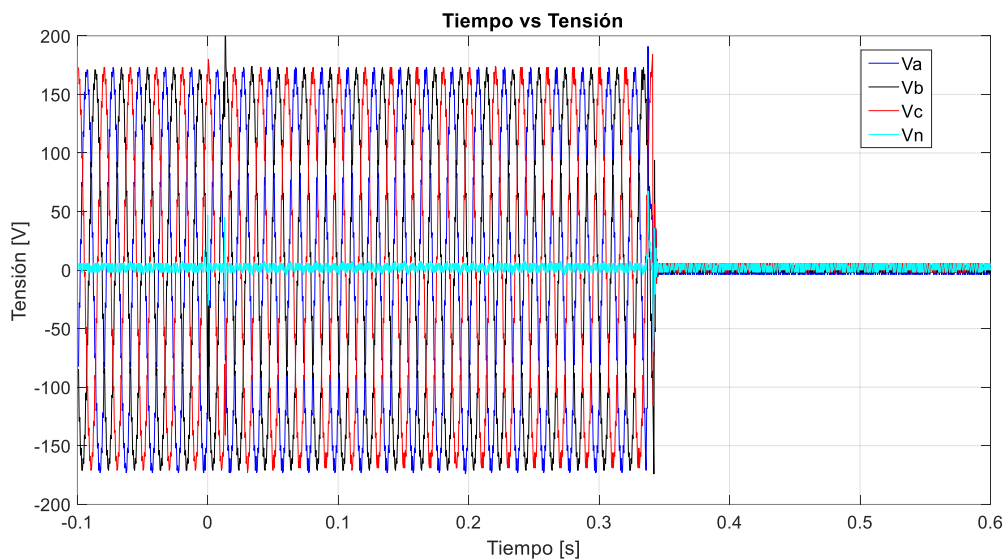


Figura D.0.4: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 100% de la línea.

D.1.2. Cortocircuito bifásico aislado, fases b y c

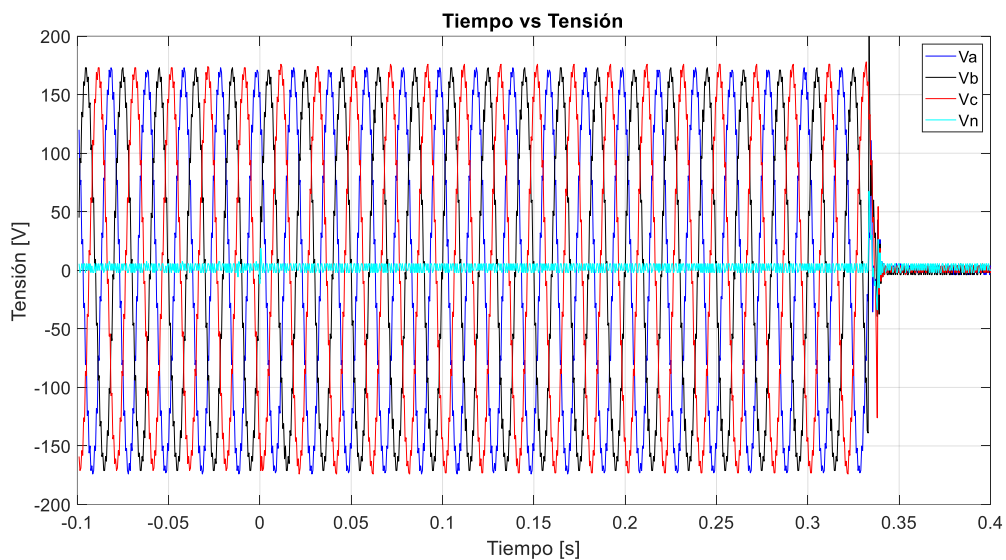


Figura D.0.5: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico aislado, fases b y c, al 100% de la línea.

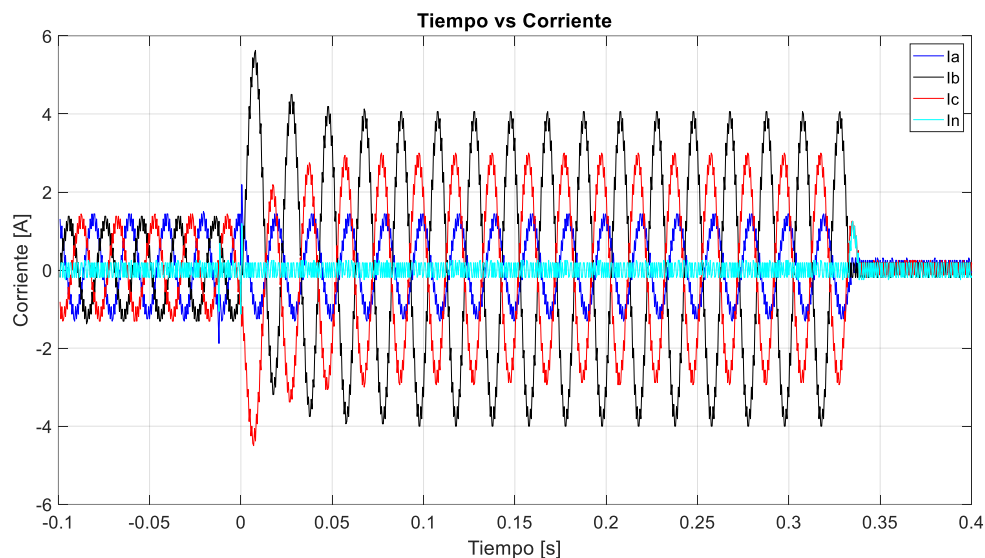


Figura D.0.6: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircito bifásico aislado, fases b y c, al 100% de la línea.

D.1.3. Cortocircito bifásico a tierra, fases b y c

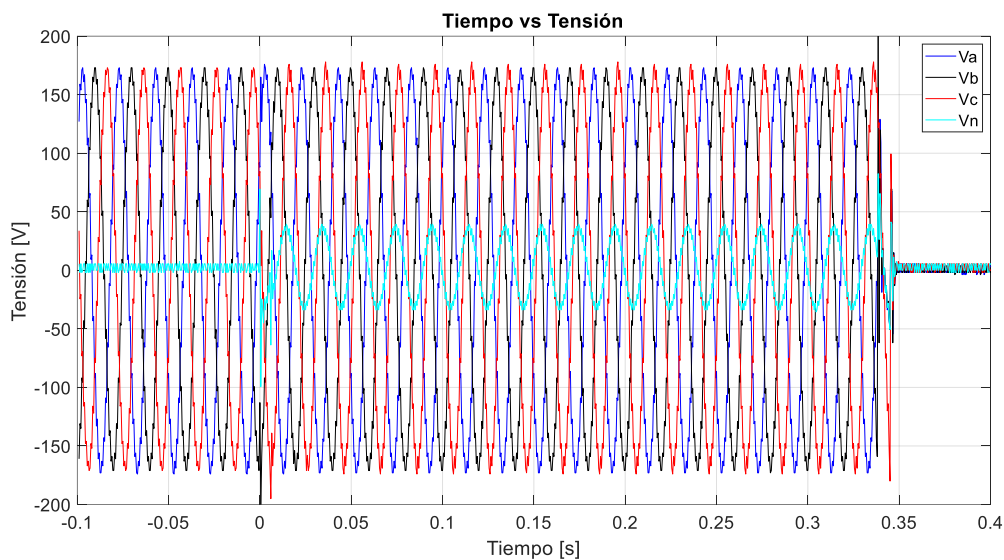


Figura D.0.7: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircito bifásico a tierra, fases b y c, al 100% de la línea.

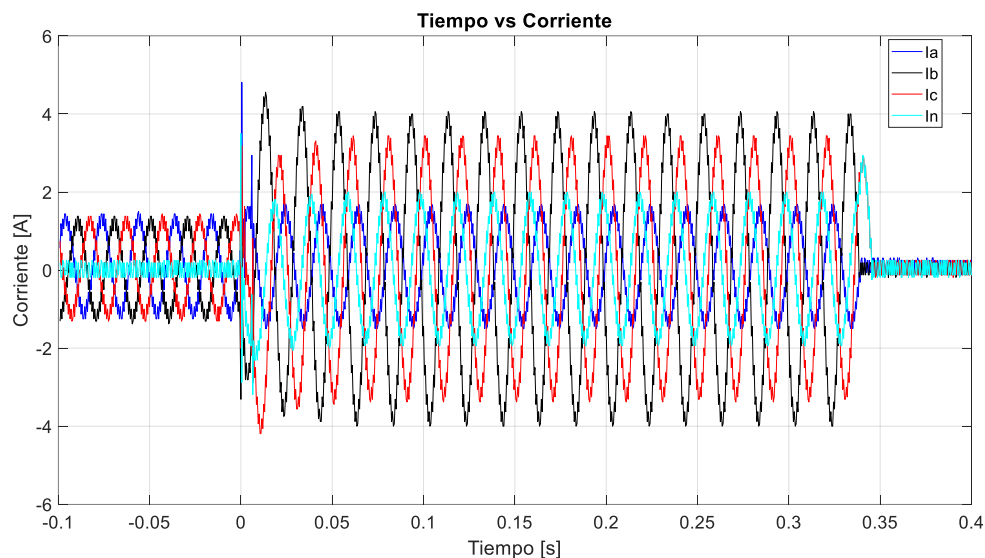


Figura D.0.8: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito bifásico a tierra, fases b y c, al 100% de la línea.

D.1.4. Cortocircuito monofásico a tierra, fase a

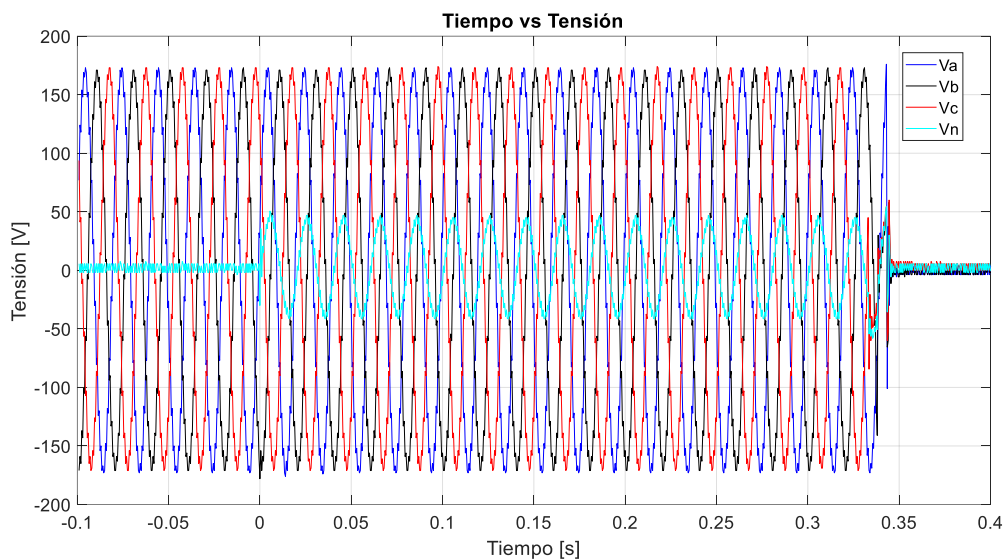


Figura D.0.9: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 100% de la línea.

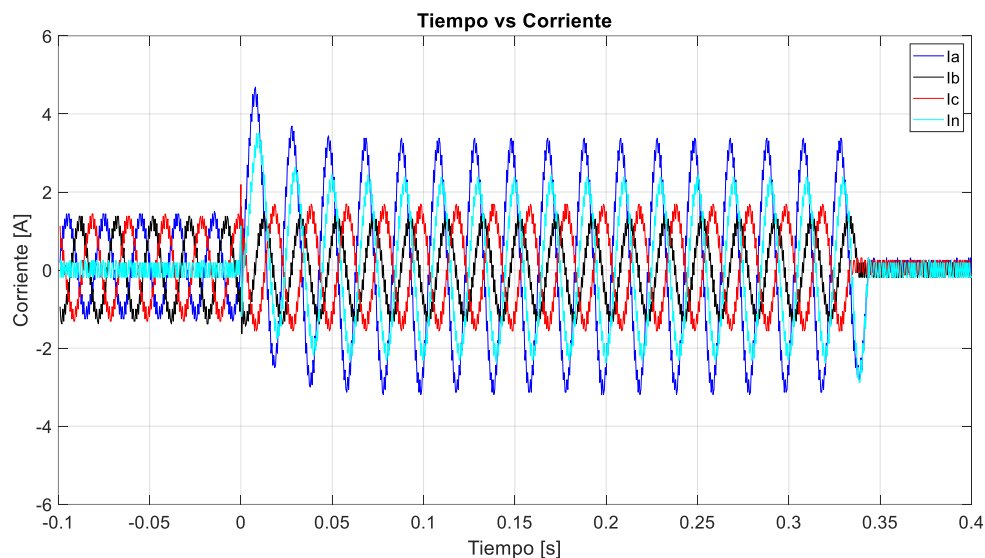


Figura D.0.10: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 100% de la línea.

D.1.5. Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a

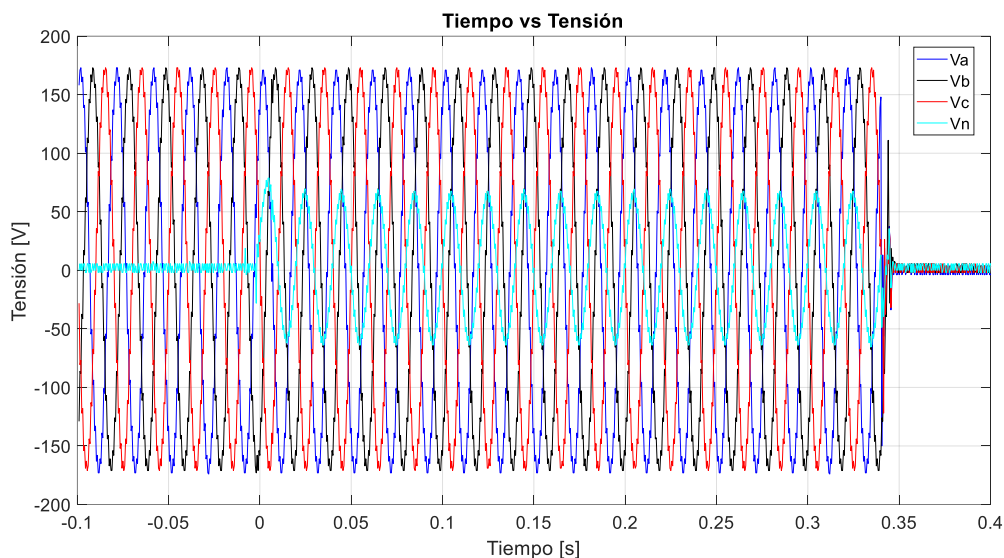


Figura D.0.11: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 [\Omega]$ al 100% de la línea.

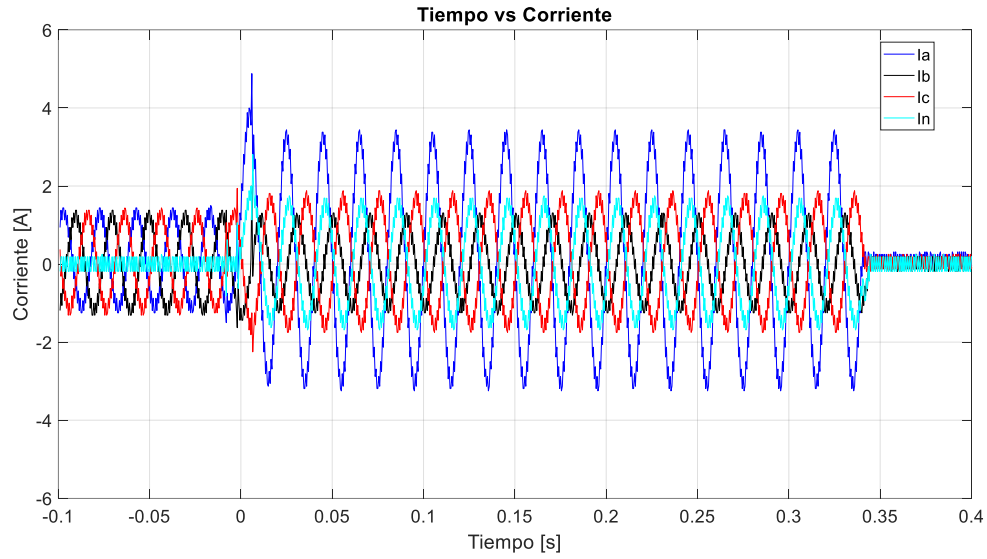


Figura D.0.12: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \, [\Omega]$ al 100% de la línea.

D.2. Fallas al 85% de la línea

D.2.1. Cortocircuito trifásico aislado

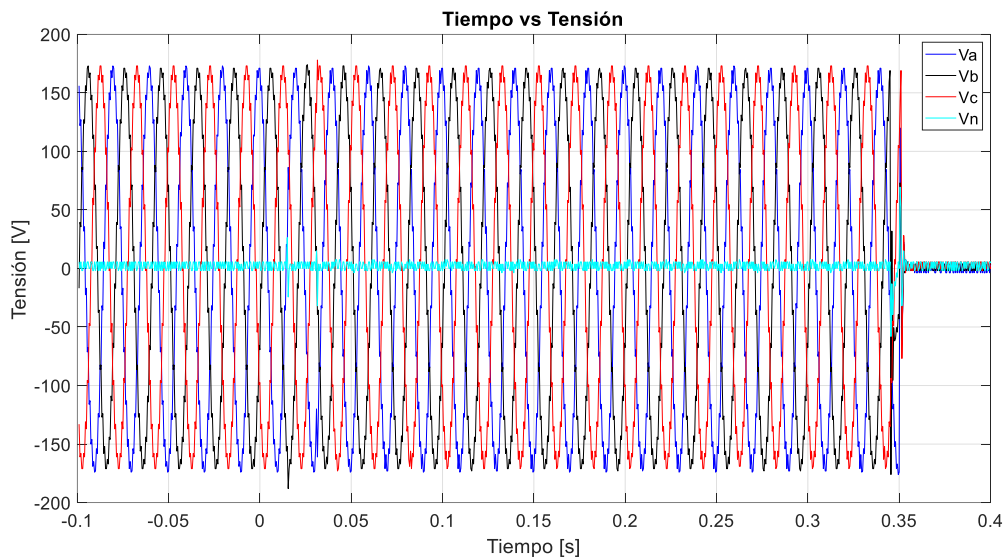


Figura D.0.13: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito trifásico aislado al 85% de la línea.

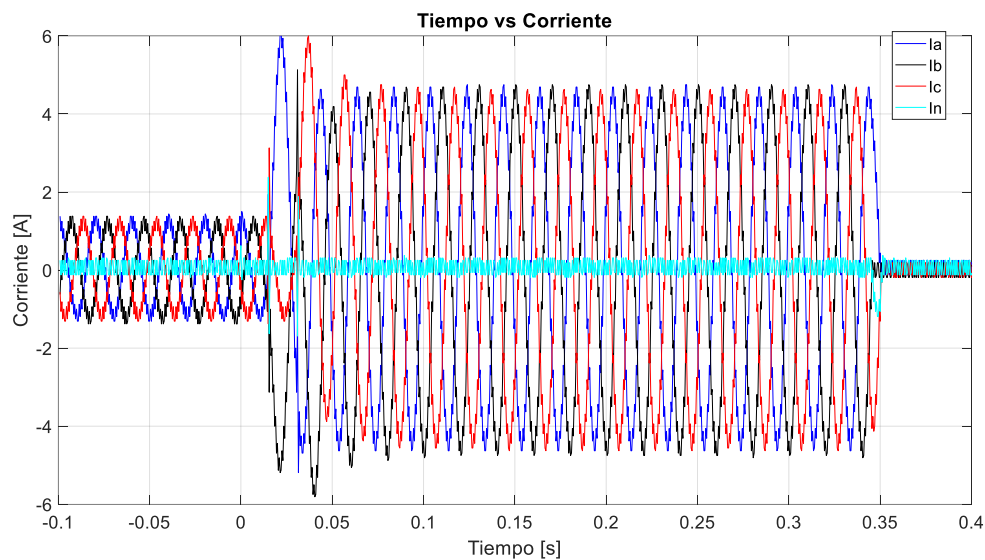


Figura D.0.14: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircito trifásico aislado al 85% de la línea.

D.2.2. Cortocircito monofásico a tierra, fase a

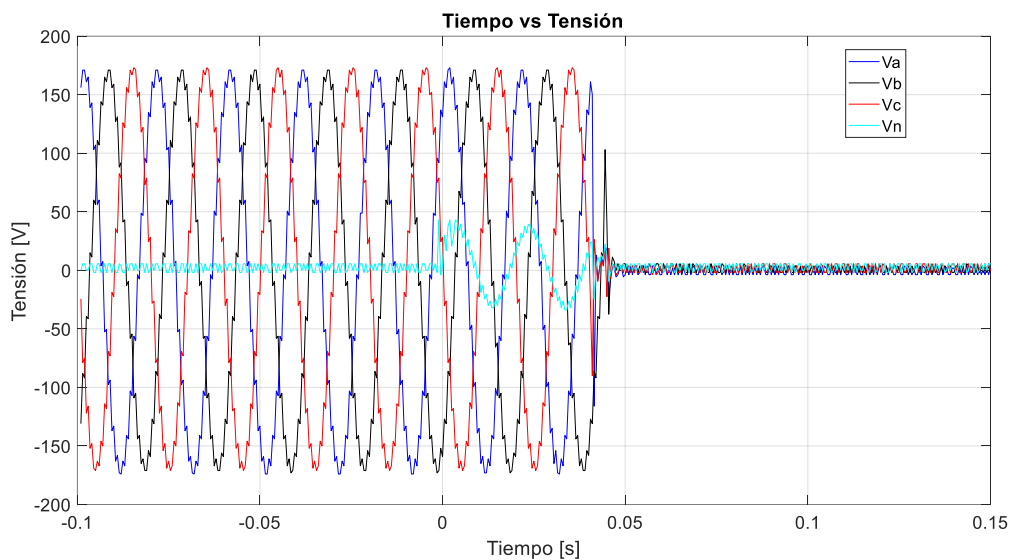


Figura D.0.15: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircito monofásico a tierra de la fase A, al 85% de la línea.

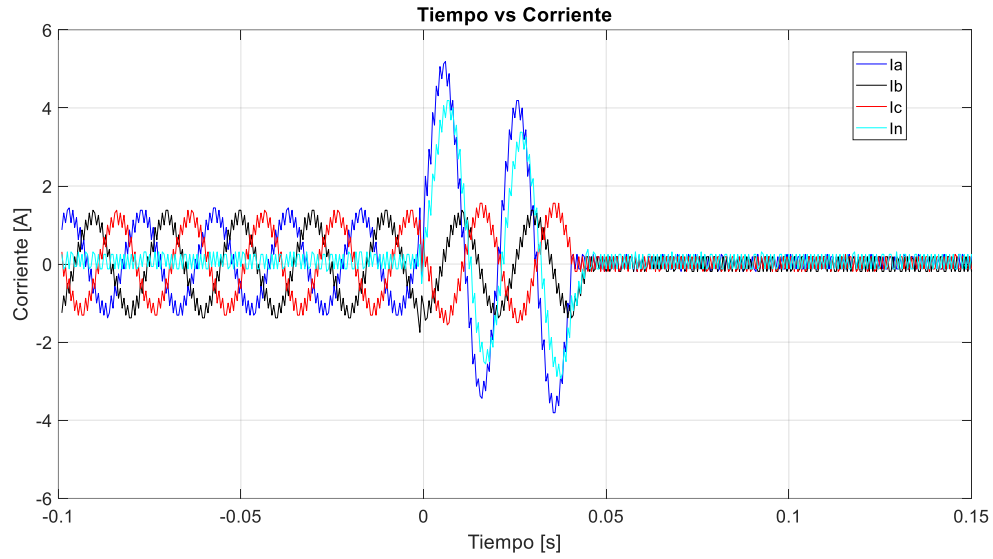


Figura D.0.16: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, al 85% de la línea.

D.2.3. Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a

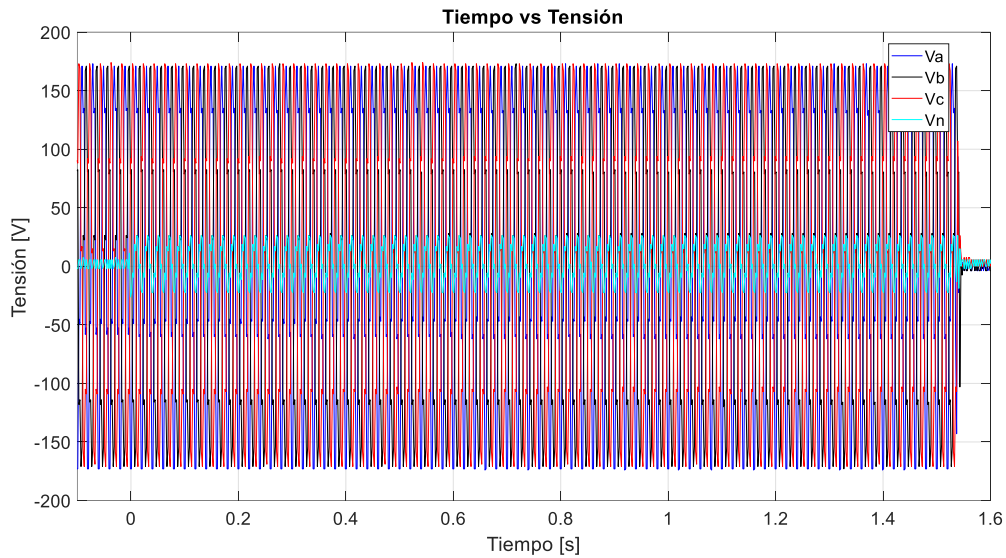


Figura D.0.17: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 [\Omega]$ al 85% de la línea.

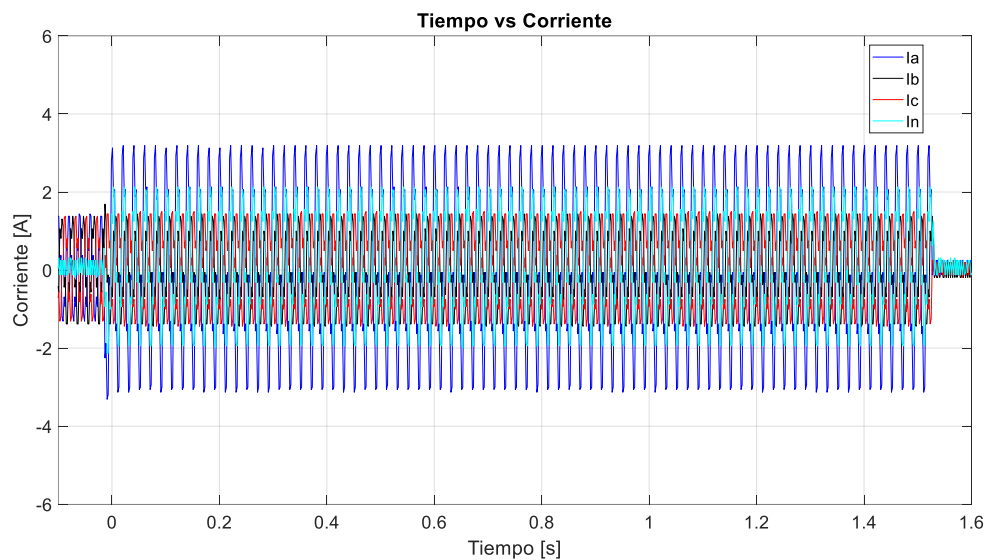


Figura D.0.18: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \, [\Omega]$ al 85% de la línea.

D.3. Fallas al 57% de la línea

D.3.1 Cortocircuito trifásico aislado

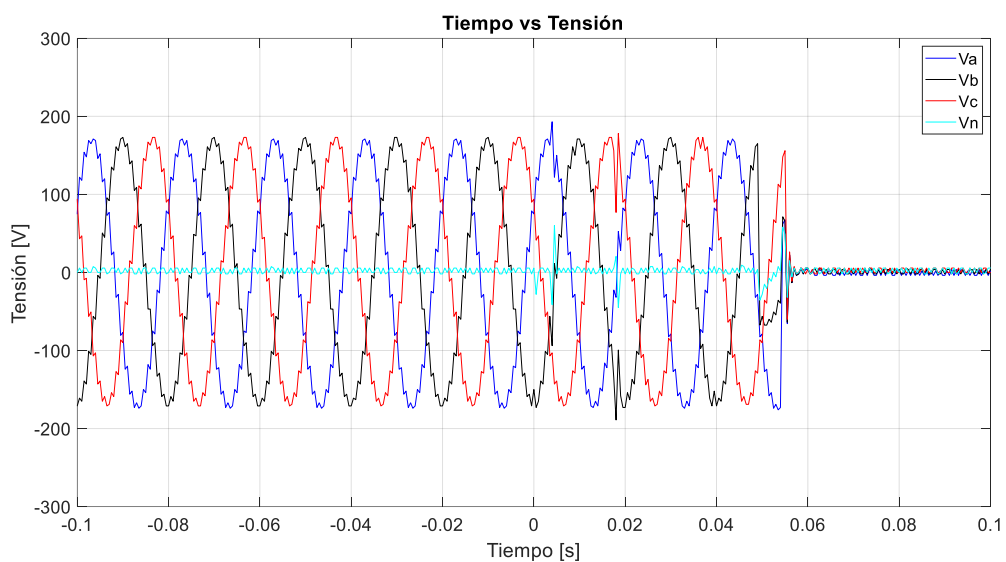


Figura D.0.19: Tensiones trifásicas y de neutro para para cortocircuito trifásico aislado al 57% de la línea.

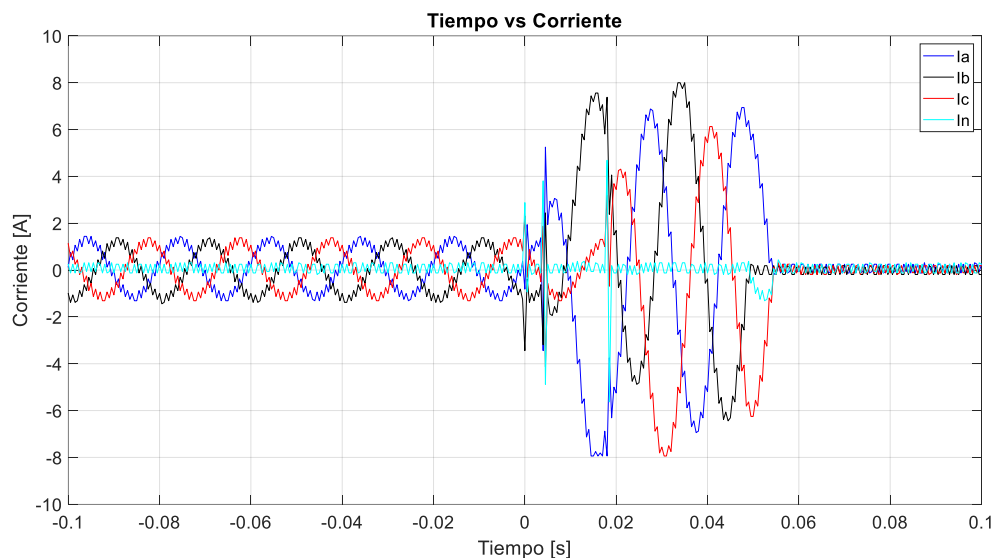


Figura D.0.20: Corrientes trifásicas y de neutro para para cortocircuito trifásico aislado al 57% de la línea.

D.3.2. Cortocircuito monofásico a tierra, fase a

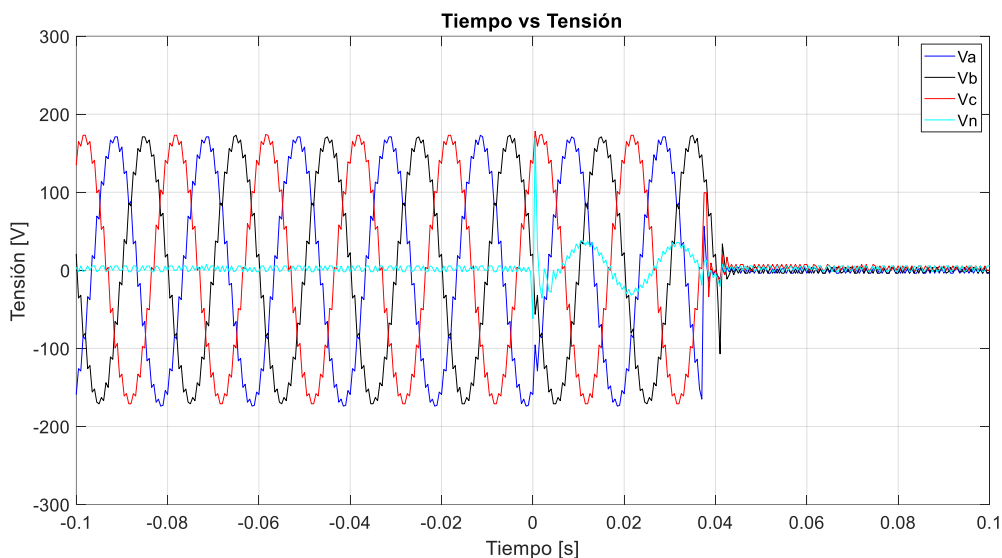


Figura D.0.21: Tensiones trifásicas y de neutro para para cortocircuito monofásico en la fase A, al 57% de la línea.

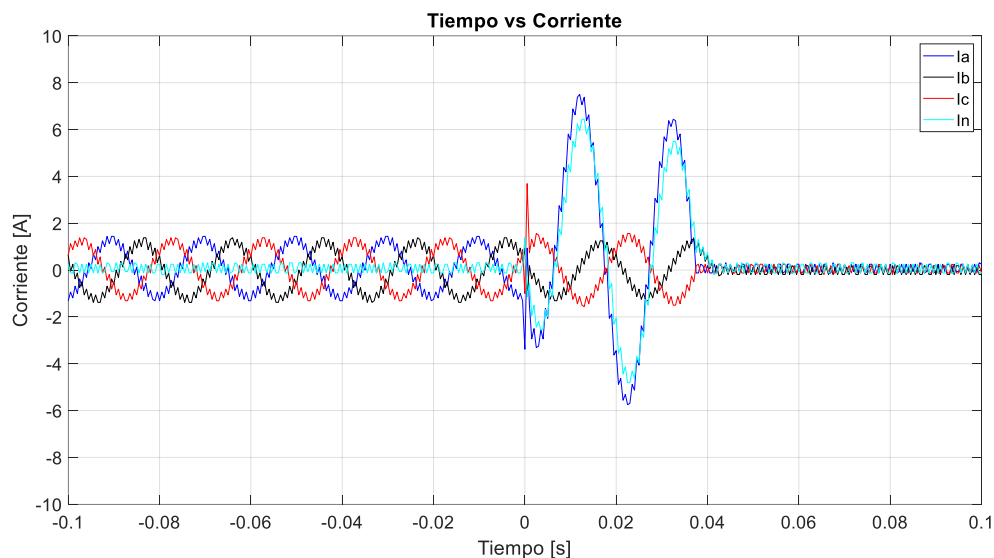


Figura D.0.22: Corrientes trifásicas y de neutro para para cortocircuito monofásico en la fase A, al 57% de la línea.

D.3.3 Cortocircuito monofásico a tierra con $R_f = 30[\Omega]$, fase a

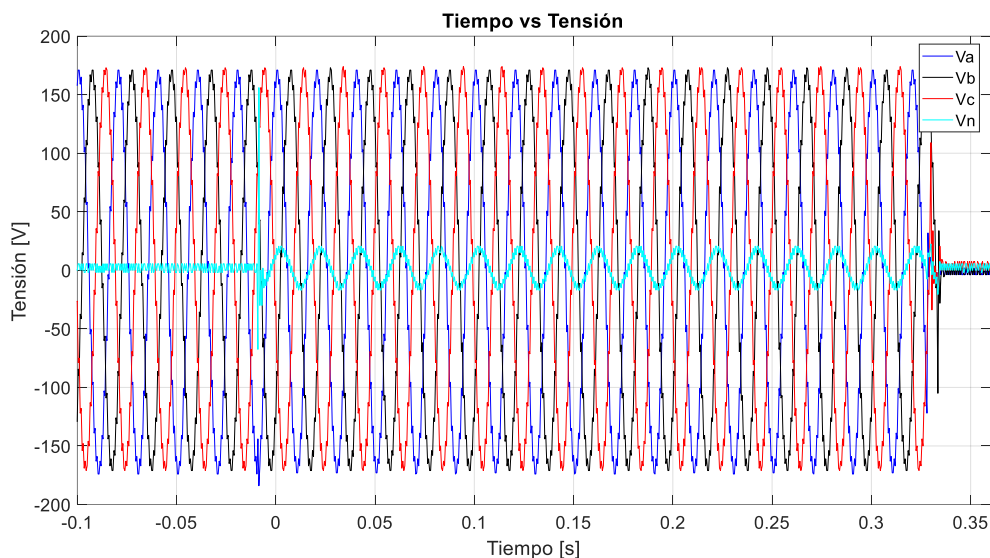


Figura D.0.23: Tensiones trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 [\Omega]$ al 57% de la línea.

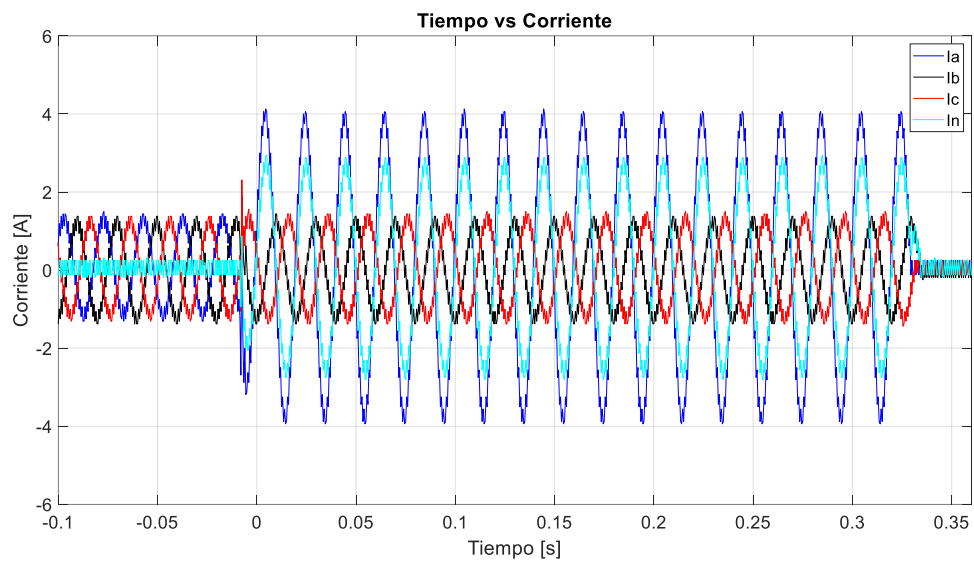


Figura D.0.24: Corrientes trifásicas y de neutro para cortocircuito monofásico a tierra de la fase A, con $R_f = 30 \text{ } [\Omega]$ al 57% de la línea.

Anexo E: Hoja de datos del paño eléctrico a escala

En la *Figura E.0.25* se muestran los principales componentes del paño eléctrico a escala, lo que se encuentran referenciados en la *Tabla 37*

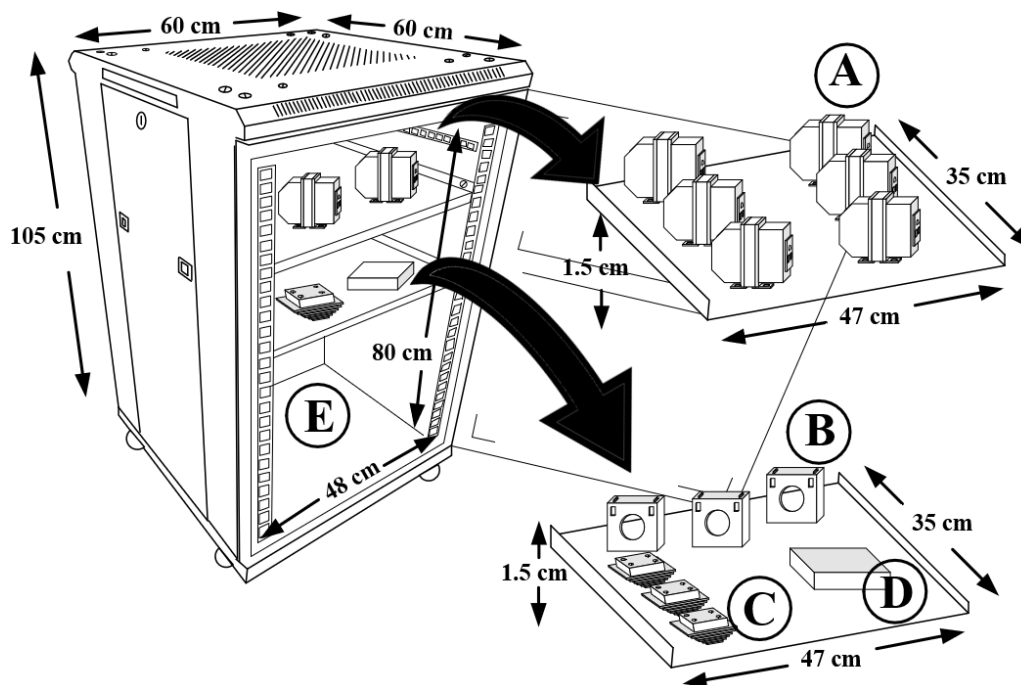


Figura E.0.25: Principales componentes del paño eléctrico a escala

LETRA	ELEMENTO	Especificación
A	TTPP	220/110 [V]; 100 [W]
B	TTCC	50/5 [A], 1 [VA], Clase 3
C	Relés de estado sólido	Entrada: 4-32 [V _{DC}] ; Salida: 48~530 [V _{AC}], 80 [A]
D	Fuente V _{DC}	Entrada: 100-240 [V]~ 1 [A]; Salida: 5 [V _{DC}] – 10 [A]
E	Zona de Protección eléctrica	*Depende del dispositivo de protección

Tabla 37: Especificaciones de los principales componentes del paño eléctrico a escala.

*Actualmente el paño eléctrico a escala está implementado con una protección digital SEL-321-5. Sus especificaciones se detallan en la sección 5.2.1.

Para las conexiones se utilizaron cables libres de halógeno H07Z1 de 6 [mm²] y 2.5 [mm²], cuya capacidad es de 33 y 20 [A] respectivamente, ambos toleran tensiones de hasta 750 [V]. Los conectores hembra tipo banana ubicados en el panel frontal tienen 32 [A] de capacidad.