

Guía de pruebas para el esquema de protección de distancia usando relés SEL-321

Juan Pablo Galvis Perez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electricista

Director

Gilberto Carrillo Caicedo

Dr. en Ingeniería Industrial

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga

Dr. en Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

### **Dedicatoria**

A Dios, a mi padre Rodolfo Galvis por su aporte de conocimiento, ayuda y guía frente a las adversidades, a mi madre Clara Ines Perez por su amor y dedicación incondicional.

### **Agradecimientos**

Agradecimientos principalmente a Dios todopoderoso, dador de la vida y amor para con nosotros, a mi familia que ha sido sinónimo de cariño y fortaleza, a todo el cuerpo docente de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos una enseñanza de calidad.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco Teórico .....	17
2.1 Líneas de transmisión.....	17
2.2 Protecciones eléctricas .....	19
2.2.1 Requisitos para las protecciones .....	19
2.2.2 Equipos utilizados para las protecciones.....	20
2.3 Protección de distancia.....	21
2.3.1 Relé de distancia .....	22
2.3.2 Zonas de protección .....	22
2.3.3 Teleprotección para esquema de distancia .....	23
2.3.4 Características de impedancia de la protección.....	24
2.4 Relé SEL-321 .....	25
2.5 Pruebas a ejecutar al esquema de protección de distancia .....	26
2.6 Requerimientos para la construcción del gabinete .....	28
3. Construcción del gabinete para el esquema de protección.....	29
3.1 Alimentación externa .....	32
3.2 Tensión y corriente .....	34
3.3 Contactos de entrada y salida .....	35
3.4 Circuito de 12 Vdc.....	36
3.5 Teleprotección .....	39
4. Equipos asociados.....	40
4.1 Relé SEL-321 .....	40
4.1.1 Conexión del PC al relé.....	41
4.1.2 Ajuste del Mirrored Bits.....	43
4.1.3 Parámetros eléctricos del esquema de protección .....	45
4.1.4 Esquema de protección para estados de carga.....	49
4.2 Omicron CMC 356 .....	51
4.2.1 Test Universe 4.00 .....	52

4.2.2	Conexión del PC al Omicron.....	53
4.2.3	Configuración del Test Universe .....	55
5.	Plan de pruebas, ejecución y resultados.....	58
5.1	Cálculo de magnitudes de tensión y corriente de falla para las pruebas .....	59
5.1.1	Fallas monofásicas .....	59
5.1.2	Fallas bifásicas.....	64
5.2	Tensiones y corrientes a inyectar al esquema de distancia .....	69
5.3	Elaboración de pruebas en el módulo State Sequencer.....	70
5.3.1	Falla monofásica al inicio de la línea.....	71
5.3.2	Falla monofásica a la mitad de la línea .....	77
5.3.3	Falla monofásica al final de la línea .....	79
5.3.4	Falla monofásica en la línea adyacente cerca de la barra.....	81
5.3.5	Falla monofásica en la siguiente línea cerca de la barra .....	84
5.3.6	Falla bifásica a la mitad de la línea .....	86
5.3.7	Falla monofásica de alta impedancia al inicio de la línea .....	87
5.3.8	Falla monofásica de alta impedancia al final de la línea.....	89
5.3.9	Falla bifásica al inicio de la línea .....	91
5.3.10	Falla bifásica al final de la línea .....	93
5.4	Ejecución de las fallas al esquema de protección .....	95
5.5	Resultado de las pruebas .....	100
5.5.1	Falla monofásica al inicio de la línea.....	101
5.5.2	Falla monofásica a la mitad de la línea .....	102
5.5.3	Falla monofásica al final de la línea .....	102
5.5.4	Falla monofásica en la línea adyacente cerca de la barra.....	103
5.5.5	Falla monofásica en la siguiente línea cerca de la barra .....	104
5.5.6	Falla bifásica a la mitad de la línea .....	104
5.5.7	Falla monofásica de alta impedancia al inicio de la línea .....	105
5.5.8	Falla monofásica de alta impedancia al final de la línea.....	106
5.5.9	Falla bifásica al inicio de la línea .....	106
5.5.10	Falla bifásica al final de la línea .....	107
5.6	Tiempos de operacion .....	108
5.7	Resumen de los casos.....	110

6. Conclusiones .....112

Referencias Bibliográficas.....113

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Porcentaje de Ocurrencia por Tipo de Fallas en LT .....	18
Tabla 2. Pruebas Escogidas para este Trabajo de Grado.....	27
Tabla 3. Niveles del Relé SEL-321 .....	42
Tabla 4. Valores de la Línea del Esquema a Proteger.....	46
Tabla 5. Alcance y Tiempo de Operación de las Zonas de los Relés .....	47
Tabla 6. Ajustes de los Relés SEL-321 .....	48
Tabla 7. Valores Máximos de Tensión y Corriente del Equipo Omicron CMC 356.....	52
Tabla 8. Datos a Inyectar para una Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	63
Tabla 9. Datos a Inyectar para una Falla Bifásica en la Mitad de la Línea .....	68
Tabla 10. Valores Secundarios en los Escenarios de Falla .....	69
Tabla 11. Variables para el Estado de Prefalla .....	73
Tabla 12. Variables para el Estado de Falla .....	75
Tabla 13. Variables para el Estado de Postfalla .....	76
Tabla 14. Variables de Ejecución para Falla Monofásica a la Mitad de la Línea .....	78
Tabla 15. Parámetros Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Final de la Línea.....	80
Tabla 16. Variables de Ejecución para Falla Monofásica en la Línea Adyacente.....	83
Tabla 17. Variables de Ejecución para Falla Monofásica en la Siguiete línea.....	85
Tabla 18. Variables de Ejecución para Falla Bifásica a la Mitad de la Línea .....	87
Tabla 19. Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	88
Tabla 20. Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Final de la Línea .....	90
Tabla 21. Variables de Ejecución para Falla Bifásica al Inicio de la Línea.....	92
Tabla 22. Variables de Ejecución para Falla Bifásica al Final de la Línea .....	94
Tabla 23. Tiempo de Actuación del Esquema de Protección .....	109
Tabla 24. Resumen de resultados de las pruebas ejecutadas al esquema de protección .....	110

### Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de Fallas Monofásicas (a) y Bifásicas (b).....	19
Figura 2. Esquema de Protección de Distancia .....	21
Figura 3. Esquema de Teleprotección de la Línea .....	24
Figura 4. Zonas de Protección para Característica Tipo Mho y Cuadrilateral .....	25
Figura 5. Relé SEL-321.....	26
Figura 6. Representación del Gabinete con Dos Relés SEL-321 .....	29
Figura 7. Dimensiones del Gabinete en Centímetros.....	30
Figura 8. Dimensiones de la Parte Frontal del Gabinete en Centímetros .....	30
Figura 9. Carcasa del Gabinete .....	31
Figura 10. Relé SEL-321 Parte Frontal y Posterior Respectivamente .....	31
Figura 11. Relés Instalados en el Gabinete .....	32
Figura 12. Cable de Conexión de Tomacorriente a Bornera .....	33
Figura 13. Bornera de Conexión.....	33
Figura 14. Alimentación de 120 Vac de la Bornera de Conexión al Relé .....	34
Figura 15. Conexionado de Tensión y Corriente Respectivamente.....	34
Figura 16. Conexionado de los Contactos de Entrada y Salida Respectivamente.....	35
Figura 17. Conexión de Borneras Frontales con los Contactos del Relé .....	35
Figura 18. Estudiante realizando la conexión de los relés .....	36
Figura 19. Fuente SW 12 Vdc 5 A S-60-12 Metálica.....	37
Figura 20. Circuito de 12 Vdc Parte Frontal y Posterior Respectivamente .....	37
Figura 21. Conexionado Interno del Gabinete.....	38
Figura 22. Parte Frontal del Gabinete .....	38
Figura 23. Cable Serial DB9 Conectado al Puerto del Relé.....	40
Figura 24. Representación de la Conexión Entre el Pc y el Relé .....	41
Figura 25. Cable de Conexión Rs232 Serie a USB .....	42
Figura 26. Conexión entre Relé y PC.....	43
Figura 27. Esquema de Teleprotección de la Línea .....	43
Figura 28. Lógica de Actuación del Relé SEL .....	44
Figura 29. Línea en el Diagrama de Impedancia .....	46
Figura 30. Alcance de Protección en la Línea desde el Relé 1 .....	48

Figura 31. Alcance de Protección de la Línea Usando los Dos Relés .....	48
Figura 32. Zonas de Protección Tipo Mho y Cuadrilateral Respectivamente.....	49
Figura 33. Impedancias de Carga Detectadas por el Relé.....	50
Figura 34. Equipo de Pruebas Omicron CMC 356.....	51
Figura 35. Ventana Principal del Módulo de Pruebas .....	53
Figura 36. Representación de la Conexión entre el PC y el Omicron .....	54
Figura 37. Cable LAN UTP Categoría 6 para Conexión del Equipo Omicron al PC.....	54
Figura 38. Equipo Omicron conectado al PC .....	55
Figura 39. Ventana Principal del Programa Test Universe 4.00 .....	56
Figura 40. Configuración de los Ajustes del Sistema .....	57
Figura 41. Configuración de Salidas de Tensión y Corriente en el Módulo de Pruebas .....	58
Figura 42. Variables ante Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	59
Figura 43. Detección de Falla desde el Relé 1.....	61
Figura 44. Detección de Falla desde el Relé 2.....	62
Figura 45. Esquema ante Falla Monofásica al Inicio de la Línea.....	63
Figura 46. Variables ante Falla Bifásica a la Mitad de la Línea.....	64
Figura 47. Detección de Falla desde el Relé 1.....	66
Figura 48. Detección de Falla desde el Relé 2.....	67
Figura 49. Esquema ante Falla Bifásica a la Mitad de la Línea .....	68
Figura 50. Tabla de Variables en Cero de Tensión y Corrientes para Prefalla, Falla y Postfalla .	71
Figura 51. Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	71
Figura 52. Alcance de los Relés para Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	72
Figura 53. Estado de Prefalla para el Primer Escenario.....	73
Figura 54. Estado de Falla para el Primer Escenario .....	74
Figura 55. Estado de Postfalla para el Primer Escenario .....	76
Figura 56. Valores en el Módulo para la Ejecución del Primer Escenario .....	77
Figura 57. Falla Monofásica a la Mitad de la Línea .....	78
Figura 58. Alcance de los Relés para Falla Monofásica a la mitad de la Línea .....	78
Figura 59. Valores en el Módulo para la Ejecución del Segundo Escenario .....	79
Figura 60. Falla Monofásica al Final de la Línea .....	80
Figura 61. Alcance de los Relés para Falla Monofásica al final de la Línea .....	80

Figura 62. Valores en el Módulo para la Ejecución del Tercer Escenario .....	81
Figura 63. Falla Monofásica en la Línea Adyacente .....	82
Figura 64. Alcance de los Relés para Falla Monofásica en la Línea Adyacente .....	82
Figura 65. Valores en el Módulo para la Ejecución del Cuarto Escenario .....	83
Figura 66. Falla Monofásica en la Línea Siguiente .....	84
Figura 67. Alcance de los Relés para Falla Monofásica en la Línea Siguiente.....	84
Figura 68. Valores en el Módulo para la Ejecución del Quinto Escenario .....	85
Figura 69. Falla Bifásica a la Mitad de la Línea .....	86
Figura 70. Alcance de los Relés para Falla Bifásica en la mitad de la Línea .....	86
Figura 71. Valores en el Módulo para la Ejecución del Sexto Escenario .....	87
Figura 72. Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	88
Figura 73. Alcance de los Relés para Falla Monofásica al inicio de la Línea.....	88
Figura 74. Valores en el Módulo para la Ejecución del Séptimo Escenario .....	89
Figura 75. Falla Monofásica al Final de la Línea .....	90
Figura 76. Alcance de los Relés para Falla Monofásica al Final de la Línea.....	90
Figura 77. Valores en el Módulo para la Ejecución del Octavo Escenario .....	91
Figura 78. Falla Bifásica al Inicio de la Línea.....	92
Figura 79. Alcance de los Relés para Falla Bifásica al Inicio de la Línea .....	92
Figura 80. Valores en el Módulo para la Ejecución del Noveno Escenario .....	93
Figura 81. Falla Bifásica al Final de la Línea .....	93
Figura 82. Alcance de los Relés para Falla Bifásica al Final de la Línea .....	94
Figura 83. Valores en el Módulo para la Ejecución del Décimo Escenario.....	95
Figura 84. Esquema de Conexión del PC al Omicron y al Gabinete .....	96
Figura 85. Parte Frontal del Omicron .....	96
Figura 86. Estudiante realizando la conexión del Omicron .....	97
Figura 87. Conexionado del Omicron al Gabinete .....	98
Figura 88. Estudiante ejecutando pruebas Utilizando el Omicron .....	98
Figura 89. Barra de Herramientas de Pruebas .....	99
Figura 90. Parte Frontal del Relé 1 .....	100
Figura 92. Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	101
Figura 93. Falla Monofásica a la Mitad de la Línea .....	102

Figura 94. Falla Monofásica al Final de la Línea .....	103
Figura 95. Falla Monofásica en la Línea Adyacente .....	103
Figura 96. Falla Monofásica en la Siguiete Línea .....	104
Figura 97. Falla Bifásica a la Mitad de la Línea .....	105
Figura 98. Falla Monofásica al Inicio de la Línea .....	105
Figura 99. Falla Monofásica al Final de la Línea .....	106
Figura 100. Falla Bifásica al Inicio de la Línea .....	107
Figura 101. Falla Monofásica al Final de la Línea .....	107
Figura 102. Tiempo de Orden de Disparo para un Escenario .....	108

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Pruebas estipuladas por ISA para esquemas de distancia .....	115
Apéndice B. Planos eléctricos del esquema de protección.....	117
Apéndice C. Comandos del relé SEL-321 según nivel de acceso .....	120

## Resumen

**Título:** Guía de pruebas para el esquema de protección de distancia usando relés SEL-321\*

**Autor:** Juan Pablo Galvis Perez.\*\*

**Palabras Clave:** Líneas de transmisión, Protecciones eléctricas, Relé de distancia, Esquema de protección.

**Descripción:** En las líneas de transmisión de alta tensión se requiere proteger el sistema de potencia ante fallas que puedan comprometer su estabilidad y los equipos asociados. La función distancia 21 tiene como propósito principal el despeje de las fallas ocurridas en las líneas de transmisión en tiempos cortos, operando coordinadamente con los interruptores ubicados en las subestaciones eléctricas. En este trabajo de grado se desea crear un gabinete didáctico valiéndose de dos relés SEL-321, la elaboración de un esquema de protección de distancia cuyo valor de impedancia corresponde a una línea de transmisión de 100 km a 230 kV. Se utilizará un equipo de inyección secundaria para ejecutar fallas llamado Omicron CMC 356 en conjunto con el programa Test Universe para ejecutar las pruebas. El esquema de protección se verificará con algunas pruebas utilizando un canal de comunicación que representa la teleprotección para la coordinación de los disparos de los relés en caso de detención de falla. Este trabajo de grado muestra la elaboración del gabinete en el cual están instalados los dos relés SEL-321, también el procedimiento para realizar el plan de pruebas en el programa Test Universe 4.00 y la ejecución de las pruebas usando un equipo de inyección secundaria Omicron.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Gilberto Carrillo Caicedo PhD. en Ingeniería Industrial, Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga PhD.  
en Tecnología.

### Abstract

**Title:** Test guide for distance protection scheme using SEL-321 relays. \*

**Author:** Juan Pablo Galvis Perez. \*\*

**Key Words:** Transmissions lines, Electrical protection, Distance relays, Protection scheme.

**Descripción:** In high voltage transmission lines, it is necessary to protect the power system against failures that could compromise its stability and the associated equipment. The distance function 21 has as its main purpose the clearing of the faults that occur in the transmission lines in short times, operating in coordination with the switches located in the electrical substations. In the present Bachelor Thesis, we want to create a didactic cabinet using two SEL-321 relays (function 21), the development of a distance protection scheme whose impedance value corresponds to a transmission line of 100 km at 230 kV. A secondary injection equipment will be used to execute faults called Omicron CMC 356 will be used in conjunction with the Test Universe program to plan the tests to be executed. The protection scheme will be verified with some test using a communication channel that represents the teleprotection for the coordination of the trips of the relays in fault cases. This Bachelor Thesis shows the construction of the cabinet in which the two SEL-321 relays are installed, also the procedure to carry out the test plan in the Test Universe 4.00 program and the execution of the tests using a secondary injection equipment Omicron.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Gilberto Carrillo Caicedo PhD. in Industrial Engineering, Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga PhD. in Technology.

## **Introducción**

En un sistema eléctrico se debe garantizar la estabilidad mediante la aplicación de sistemas de control, equipos de compensación y elementos de protección. Dicha estabilidad se encuentra amenazada por la presencia eventual de condiciones indeseadas en la red eléctrica, siendo las líneas de transmisión el punto más vulnerable del sistema de potencia, ya que están expuestas a la naturaleza. Las líneas de transmisión a menudo se protegen con relés de distancia, que son de equipos que detectan fallas bajo el principio de subimpedancia y que operan conjuntamente con los interruptores de potencia para despejar las fallas, evitando su propagación y posible desestabilización del sistema de potencia (Mashakbeh, 2019).

Es importante que un esquema de protección sea confiable y seguro, aplicando un correcto protocolo de pruebas y puesta en servicio. La empresa ISA ejecuta pruebas específicas (Pruebas SAT: Sistema de Control y Protección, ISA) para verificar el buen funcionamiento de los relés de distancia, que consta de dieciséis pruebas para ejecutar las fallas más comunes en las líneas de transmisión. Estas pruebas se realizan utilizando un equipo de inyección secundaria llamado Omicron, apropiado para ejecutar fallas a los relés de protección.

En este contexto, se propondrá en primer lugar elaborar un esquema de protección usando dos relés SEL-321 que se complementa con un canal de comunicación llamado teleprotección para la transmisión y recepción de señales de disparo por parte de los relés al detectar fallas, en segundo lugar, elaborar una guía de diez pruebas a ejecutar en el esquema de protección de distancia, en tercer lugar, se ejecutará el plan de pruebas usando un equipo

de inyección secundaria Omicron CMC 356 y cuarto lugar se anexarán los resultados de dichas pruebas.

Este documento se encuentra dividido en seis capítulos: el primer capítulo, muestra los objetivos a alcanzar; en el segundo capítulo, se presenta el marco teórico en el cual se fundamenta el presente trabajo de grado; en el tercer capítulo, se muestra la elaboración del gabinete donde se instalan los relés; el cuarto capítulo trata sobre el esquema de protección, el relé SEL-321 y el equipo Omicron CMC 356; el quinto capítulo es la elaboración de las diez pruebas, su ejecución y análisis de resultados y finalmente el sexto capítulo presenta las conclusiones del trabajo de grado.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Elaborar una guía para la ejecución de pruebas del esquema de protección de distancia en líneas de transmisión usando dos relés SEL-321 instalados en un gabinete didáctico usando un equipo de prueba Omicron CMC 356.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Elaborar el plan de las diez pruebas a ejecutar al esquema de protección usando el programa Test Universe 4.00.
- Construir un gabinete para el esquema de protección que consta de dos relés de distancia SEL-321.
- Ejecutar el plan de pruebas al esquema de protección usando un equipo de inyección Omicron CMC 356.

## **2. Marco Teórico**

En este capítulo se explorarán los conceptos generales que se requieren para la comprensión de este trabajo de grado.

### **2.1 Líneas de transmisión**

Una línea de transmisión es el medio físico en el cual se transporta la energía eléctrica a niveles de tensiones superiores a los 34 kV. Ésta hace la unión entre las plantas generadoras y las redes de distribución, siendo constituida por conductores, estructuras de soporte y aisladores.

### Fallas en líneas de transmisión

Las fallas son todas aquellas anomalías indeseadas en el sistema de potencia, donde el flujo normal de corriente es afectado por cortocircuitos, sobrecargas, descargas atmosféricas, sobretensiones por maniobras, calentamiento y desbalances, provocando alteraciones en el sistema eléctrico. Las fallas más comunes en las líneas de transmisión son los cortocircuitos producidos por la vegetación, animales, pérdida de aislamiento de los elementos o fenómenos naturales. En la Tabla 1 se observan los tipos de fallas más comunes en las líneas.

**Tabla 1.**

*Porcentaje de Ocurrencia por Tipo de Fallas en LT*

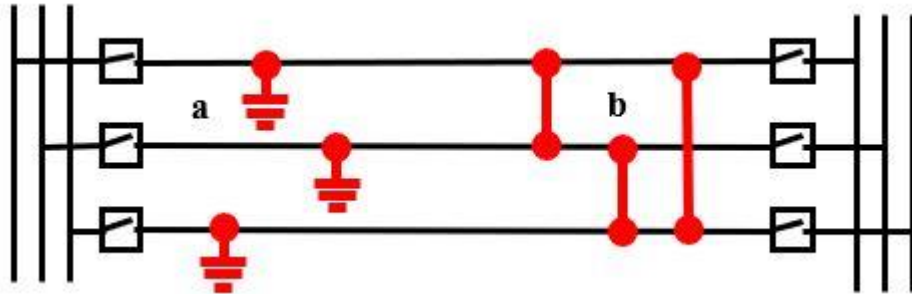
<b>Tipo de Falla</b>	<b>Porcentaje de Ocurrencia</b>
Monofásica	70% - 80%
Bifásica a tierra	10% - 17%
Bifásica	8% - 10%
Trifásica	2% - 3%

Nota: Adaptado de L. J. Blackburn. Protective Relaying: Principles and Applications, Marcel Dekker, 1998).

Para este trabajo de grado se optó por aplicar las fallas que mayor porcentaje de ocurrencia tiene en las líneas, siendo las fallas monofásicas (una fase en corto a tierra) y bifásicas aisladas (dos fases en corto) las seleccionadas. La Figura 1 ilustra las posibles fallas monofásicas y bifásicas aisladas en una línea de transmisión.

**Figura 1.**

*Ejemplo de Fallas Monofásicas (a) y Bifásicas (b)*

**2.2 Protecciones eléctricas**

En ingeniería eléctrica, las protecciones del sistema de potencia se emplean para evitar la destrucción de instalaciones o de equipos debido a eventos indeseados, las fallas se pueden iniciar de manera simple y después extenderse descontroladamente provocando daños al sistema de potencia. La función de los sistemas de protección es despejar la falla en el menor tiempo posible, cortando la alimentación energética a la falla con el fin de que la red eléctrica no tenga una afectación crítica. Las protecciones eléctricas son de vital importancia para evitar desestabilizar la red eléctrica, evitar daños en equipos y minimizar el riesgo en las personas ante cualquier falla.

Un sistema de protección es un conjunto de dispositivos conectados de manera coordinada para detectar condiciones intolerables o indeseadas en el sistema eléctrico. Un sistema eléctrico por sencillo y elemental que se considere debe ser protegido en caso de presencia de fallas.

**2.2.1 Requisitos para las protecciones**

- **Confiabilidad:** Ante una falla, las protecciones eléctricas siempre deben operar en el tiempo garantizado y nunca deben omitir el disparo.

- **Rapidez:** (Carrillo, 2019) las protecciones deben actuar tan pronto como sea posible, es decir, operar antes que las magnitudes de falla desestabilicen y produzcan daños en el sistema (p. 61).

- **Selectividad:** Las protecciones solamente deben aislar la parte de la instalación afectada por la falla, evitando así la actuación en zonas indeseadas.

- **Seguridad:** Las protecciones nunca deben operar ante una falla fuera de su zona de protección o ante la ausencia de falla.

### **2.2.2 Equipos utilizados para las protecciones**

- **Relé de protección:** Equipo eléctrico capaz de detectar condiciones indeseadas dentro de un área asignada y diseñado para ejecutar una acción tendiente a mantener la integridad del sistema. Estos equipos pueden iniciar o permitir una apertura de interruptores y/o generar alarmas y señalizaciones.

- **Transformadores de Corriente:** Estos equipos generalmente encontrados en las subestaciones eléctricas disminuyen la corriente del circuito primario en valores escalares con el objetivo de tener una baja corriente secundaria reflejo de la primaria.

- **Transformadores de Potencial:** Equipos que disminuyen la alta tensión a una baja tensión normalizada. Los TP's reducen la tensión a valores límites seguros para instrumentos de medición, control y protección.

- **Interruptor de Potencia:** Es un dispositivo electromecánico cuya función es abrir y cerrar el circuito de alta potencia en las líneas de transmisión y distribución. Estos equipos deben tener la capacidad de soportar las corrientes de corto circuito y ser capaces de abrir ante una falla.

- **Sistema de Teleprotección:** Es el encargado de transmitir los parámetros de protección a través de equipos de telecomunicación (Villarrubia y Romero, 2009, p.43). Con el fin de buscar una protección unitaria, estos equipos facilitan la comunicación entre subestaciones y aceleran la protección de la línea.

### 2.3 Protección de distancia

Esta función está basada en la detección de una reducción de la impedancia debido a una falla para generar el despeje de la misma. La protección de distancia siempre está midiendo la impedancia de la carga conectada al sistema y en caso de falla la impedancia medida por la protección distancia es la impedancia desde la barra 1 hasta el punto donde ocurrió la falla. En la Figura 2 se muestran dos esquemas de protección que estarían protegiendo la línea desde cada subestación.

**Figura 2.**

*Esquema de Protección de Distancia*



### **2.3.1 Relé de distancia**

Los relés de protección de distancia son aquellos cuya acción depende de la distancia del punto de ubicación del relé a la falla presentada. (Carrillo, 2019) En los relés de distancia hay un balance entre corriente y voltaje, cuya relación se expresa en términos de impedancia. Cuando se protege una línea contra cortocircuitos, la proporción entre voltaje en el lugar de ubicación del relé y la corriente que fluye al corto corresponde a una impedancia, la cual es proporcional a la distancia física desde el relé hasta el cortocircuito (p. 61).

### **2.3.2 Zonas de protección**

Las zonas de protección son los diferentes alcances que tienen los relés de distancia, difieren en zonas de cobertura y tiempos de operación.

- **Zona 1, protección principal:** Puede proteger el 85% de la línea y su actuación es instantánea.

- **Zona 2, protección principal y respaldo:** Esta zona protege el 100% de la línea protegida y aproximadamente un 20% de la línea adyacente, su operación es temporizada y/o condicionada.

- **Zona 3, protección de respaldo:** Esta zona protege hasta el 100% de la línea que se respalda y va hasta un 80% de la siguiente línea a la respaldada. Como esta zona no tiene la función de ser protección principal (proteger la línea en análisis), no se va a considerar de ahora en adelante en este proyecto. Se utilizará como protección reversa de la línea (normalmente utilizada como zona 4), operando el relé en caso de falla en la barra. El alcance es corto de 5% de línea y opera

de forma temporizada. El objetivo de la zona reversa en este trabajo de grado es proteger la línea frente a fallas cercanas a las barras.

Para el presente proyecto se utilizarán dos zonas que protegen adelante de la línea y una zona reversa, con el objetivo de centrar el análisis en las dos primeras zonas de la función distancia que protegen la línea en cuestión. Para proteger una línea de transmisión es necesario fijar al menos dos zonas de protección primarias hacia adelante, siendo la zona 1 con actuación instantánea y la zona 2 con retardo o temporizada (Domin & Blackburn, 2006, p. 440).

### ***2.3.3 Teleprotección para esquema de distancia***

La teleprotección en un sistema de protección es un canal de comunicación entre dos relés ubicados en los extremos de la línea de transmisión a través del cual los dos relés intercambian información de arranque con el objetivo de complementar el sistema de protección (normalmente denominada protección piloto), acelerando los tiempos de operación para el despeje de fallas que ocurren en los extremos de las líneas. Para proteger una línea de transmisión se puede emplear protección de sobrecorriente o de distancia, en este proyecto se utiliza la protección de distancia que actuaría de forma no unitaria, pero al emplear un canal de comunicación o teleprotección se convierte en una protección unitaria y coordinada ante fallas. La Resolución 025 de 1995 exige a las empresas transportadoras de energía con líneas de transmisión mayores a 220 kV el uso de sistema de teledisparo mediante canales de teleprotección apropiados (CREG. Resolución 025. 13 de julio de 1995, Colombia). La idea expuesta anteriormente muestra la necesidad de utilizar equipos de comunicación, asegurando un disparo más selectivo en el sistema de protección en caso de fallas. A continuación, la Figura 3 muestra el esquema de teleprotección de la línea.

**Figura 3.***Esquema de Teleprotección de la Línea*

Para este trabajo de grado se empleará un esquema asistido PUTT (Permissive Underreaching Transfer Trip) que en caso de detección de una falla en la zona 1 del relé de la barra 1, se envía una señal al relé de la barra 2, el cual acelerará el disparo en caso de que este último haya detectado la falla fuera de la zona 1 y dentro de la zona 2.

#### 2.3.4 Características de impedancia de la protección

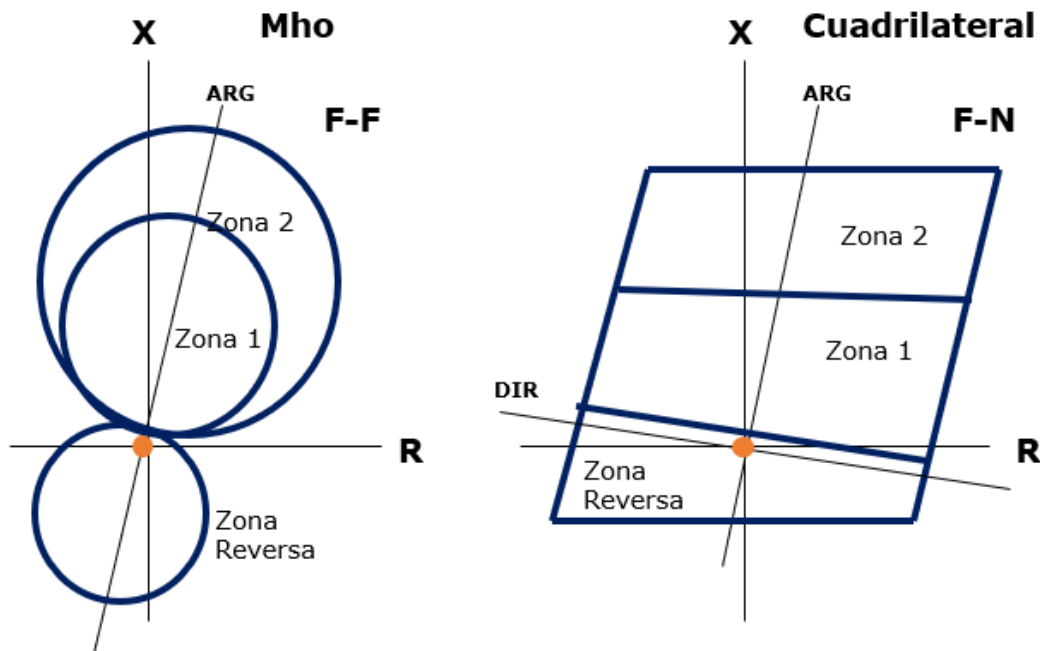
- **Tipo Mho:** Conocido como relé de admitancia, es un relé cuyo alcance de protección es el área de la circunferencia cuyo diámetro representa el alcance del relé, y se debe asociar a la impedancia de la línea. Relés direccionales, es decir, detecta fallas hacia delante de la línea a proteger. El relé opera si la impedancia medida se encuentra dentro de la zona a proteger. Esta característica se utilizará para detectar las fallas bifásicas.

- **Tipo Cuadrilateral:** La característica cuadrilateral tiene la posibilidad de ajustar los valores de resistencia e impedancia de manera independiente, permitiendo cubrir las zonas con mayor exactitud, esta característica se utilizará para detectar las fallas monofásicas.

En la Figura 4 se muestra las zonas de protección para característica de impedancia Mho y Cuadrilateral.

**Figura 4.**

*Zonas de Protección para Característica Tipo Mho y Cuadrilateral*



## 2.4 Relé SEL-321

Relé de distancia de fase y tierra aplicado a la protección de la línea cuenta con disparo mono o tripolar. La página web de la empresa (SEL/Productos/321) especifica que el relé cuenta con cuatro zonas de elementos de fase con característica Mho y cuatro más de elementos cuadrilaterales a tierra. Cada zona es reversible y temporizada.

**Figura 5.***Relé SEL-321*

Nota: Adaptado de SEL-321 Data Sheet, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pag 1.

### **Teleprotección del relé SEL-321**

El equipo SEL-321 puede usar comunicaciones por Mirrored Bits, siendo un envío de señales digitales por los puertos de los relés. Para este trabajo de grado se usará la comunicación por Mirrored Bits que ofrece alta velocidad y seguridad ya que los dos relés representan las protecciones de los extremos, pero en realidad, en este proyecto están en el mismo gabinete (SEL/Productos/321).

### **2.5 Pruebas a ejecutar al esquema de protección de distancia**

Para este trabajo de grado se desea realizar pruebas a un esquema de protección de distancia y se tomarán como base algunas pruebas “SAT” que ISA emplea para garantizar el buen funcionamiento de los esquemas de distancia. Siendo ISA, la empresa de transmisión con mayor cobertura en líneas de transmisión en Colombia, se decide emplear las pruebas que realizan a los esquemas de distancia para el esquema de protección del presente trabajo de grado. Las Pruebas

de Aceptación en Sitio (SAT, por sus siglas en inglés *Site Acceptance Test*) aseguran el buen funcionamiento del esquema de protección antes de la puesta en servicio de los relés en la subestación (ISA, 2017). En el apéndice A se puede observar las dieciséis pruebas SAT.

Estas pruebas se realizan al esquema de protección variando la distancia de la falla en la línea, variando el tipo de falla, las fases falladas y la resistencia de falla. En el presente trabajo de grado el estudiante escogió diez casos, con el fin de evitar la repetición de cálculos para fallas en distancias similares. En la Tabla 2 se observan los diez casos escogidos por el estudiante, donde se especifica la distancia de falla en la línea, las fases falladas, la resistencia de falla y una breve descripción de la misma. La palabra “Inst” significa la operación instantánea del relé en zona 1, “Acel” representa la operación acelerada en zona 2 debido a la teleprotección y “Temp” significa la operación en zona 2 temporizada.

**Tabla 2.**

*Pruebas Escogidas para este Trabajo de Grado*

Caso	Distancia (%)	Fases Falladas	R Falla ( $\Omega$ )	Descripción de la Falla	Operación Esperada cada Uno	Operación Esperada con Teleprotección
1	5	AT	5	Falla monofásica (A-Tierra) al 1% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z2 Temp	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z2 Acel
2	50	BT	5	Falla monofásica (B-Tierra) al 50% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst
3	95	CT	5	Falla monofásica (C-Tierra) al 99% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z2 Temp Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1 Inst
4	-5	AT	1	Falla monofásica sólida (A-Tierra) reversa al 1% de la línea con resistencia de falla de $1 \Omega$	Relé 1: No Opera Relé 2: Z2 Temp	Relé 1: No Opera Relé 2: Z2 Temp
5	105	CT	1		Relé 1: Z2 Temp	Relé 1: Z2 Temp

				Falla monofásica sólida (C-Tierra) al 101% de la línea con resistencia de falla de $1 \Omega$	Relé 2: No Opera	Relé 2: No Opera
6	50	AB	5	Falla bifásica (A-B) al 50% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst
7	5	AT	50	Falla monofásica (A-Tierra) al 1% de la línea con alta resistencia de falla de $50 \Omega$	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z2 Temp	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z2 Acel
8	95	CT	50	Falla monofásica (C-Tierra) al 99% de la línea con alta resistencia de falla de $50 \Omega$	Relé 1: Z2 Temp Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1 Inst
9	5	BC	5	Falla bifásica (B-C) al 1% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z1 Inst Relé 2: Z1 Inst
10	95	AB	5	Falla bifásica (A-B) al 99% de la línea con resistencia de falla de $5 \Omega$	Relé 1: Z2 Temp Relé 2: Z1 Inst	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1 Inst

Estas pruebas se usan en un esquema de protección que se muestra en el tercer capítulo, y las pruebas se evidenciarán en el quinto capítulo.

## 2.6 Requerimientos para la construcción del gabinete

Para la construcción del gabinete se emplearán diferentes como:

-Dos relés SEL-321, los cuales representarán los relés de distancia en los extremos de una línea de transmisión.

-Una carcasa hecha en lámina para montar los equipos de protección.

-Cable de conexión de tomacorriente, para alimentar los dos relés.

-Interruptor, para proteger el circuito interno.

-Borneras, para distribuir la energía de alimentación a los distintos circuitos.

-Elementos de electrónica básica, como cable #18, pinza ponchadora, destornillador, bananas hembra, LEDS, resistencias, dos baquetas y cinta para etiquetar.

A continuación, se presenta la construcción del gabinete al cual se elaborarán y ejecutarán pruebas para verificar su funcionamiento ante fallas.

### 3. Construcción del gabinete para el esquema de protección

En este capítulo se encuentra la construcción del gabinete para el esquema de protección, donde se instalan dos relés SEL-321 al gabinete, y se realiza la conexión de los contactos de los relés a unas borneras en la parte frontal del gabinete, para luego conectar un equipo de inyección secundaria al gabinete y realizar las fallas. Se diseña un esquema del gabinete con sus dimensiones.

#### Figura 6.

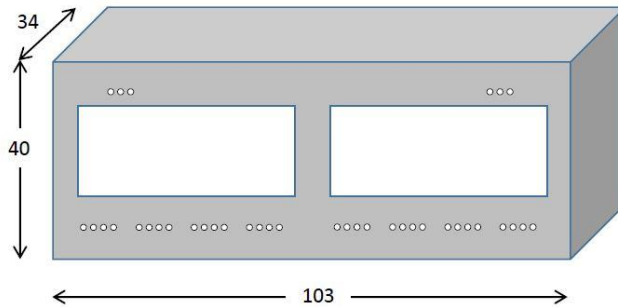
*Representación del Gabinete con Dos Relés SEL-321*



En la Figura 7 se observan las dimensiones de altura, profundidad y ancho del gabinete.

**Figura 7.**

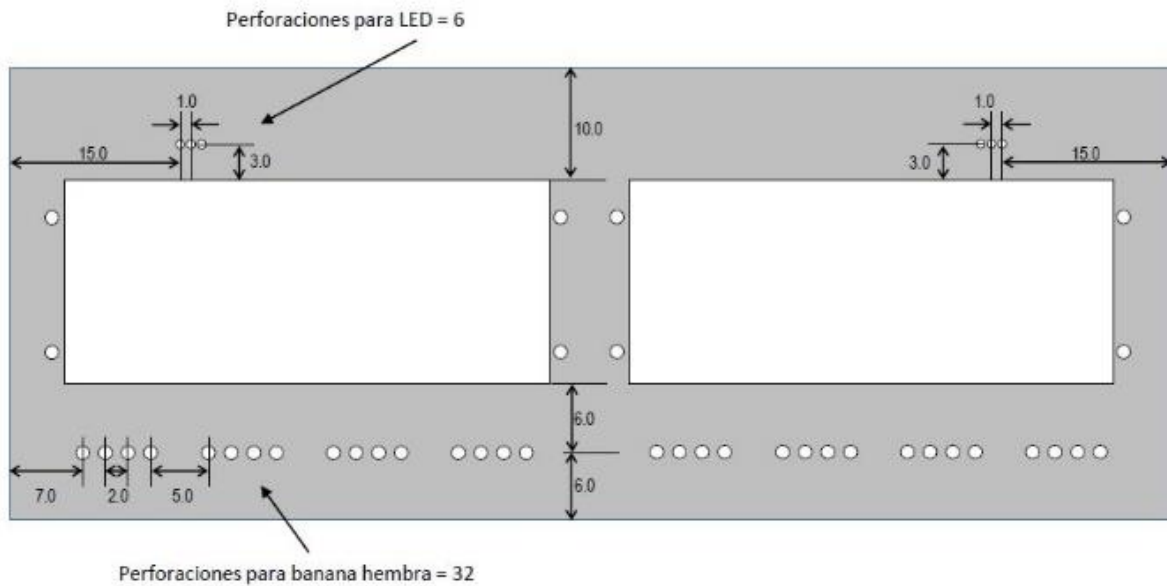
*Dimensiones del Gabinete en Centímetros*



Dimensión de los orificios para las borneras hembras, relés de distancia, LEDS y tornillos para sostener los relés en el gabinete.

**Figura 8.**

*Dimensiones de la Parte Frontal del Gabinete en Centímetros*



La carcasa del gabinete fue elaborada en un taller de metalmecánica de acuerdo con las especificaciones del diseño, esta carcasa es de lámina metálica calibre 16. Cuenta con una cubierta trasera que se puede retirar para observar el conexionado interno del gabinete.

**Figura 9.**

*Carcasa del Gabinete*



Se emplearon dos relés SEL-321 en el esquema de protección y se instalaron en el gabinete.

**Figura 10.**

*Relé SEL-321 Parte Frontal y Posterior Respectivamente*



Se instalaron los relés a la parte frontal del gabinete como lo muestra la Figura 11.

### **Figura 11.**

*Relés Instalados en el Gabinete*



Se instaló un riel eléctrico para la ubicación de borneras tipo universal para la distribución de los diferentes circuitos, un interruptor bipolar Merlin Gerin de 60 A, borneras, frenos y separadores. La fuente de poder se obtiene de una clavija a un tomacorriente a 120 Vac para energizar el gabinete con los dos relés.

### **3.1 Alimentación externa**

Se conectó el esquema de protección a la alimentación de la red.

**Figura 12.**

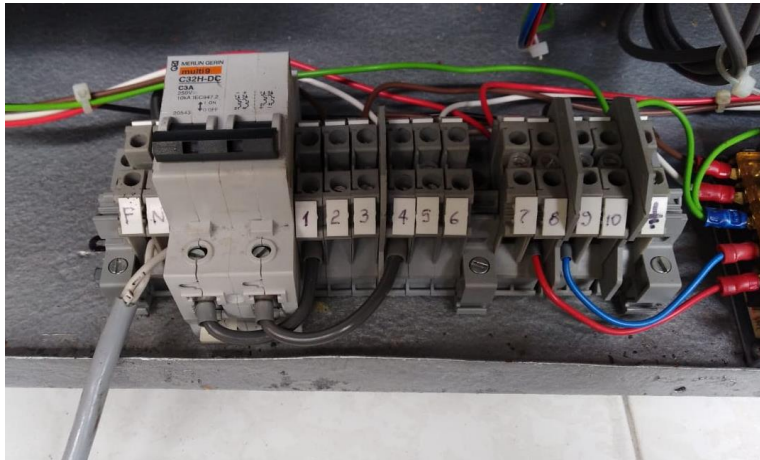
*Cable de Conexión de Tomacorriente a Bornera*



Se conectó la alimentación de energía al riel de conexiones.

**Figura 13.**

*Bornera de Conexión*



Se diseñó un plano eléctrico de la conexión de los relés a los conectores tipo banana hembra de la carcasa frontal del gabinete, para la conexión externa del equipo de inyección. El plano del circuito de alimentación se encuentra en el apéndice B, plano 1.

**Figura 14.**

*Alimentación de 120 Vac de la Bornera de Conexión al Relé*

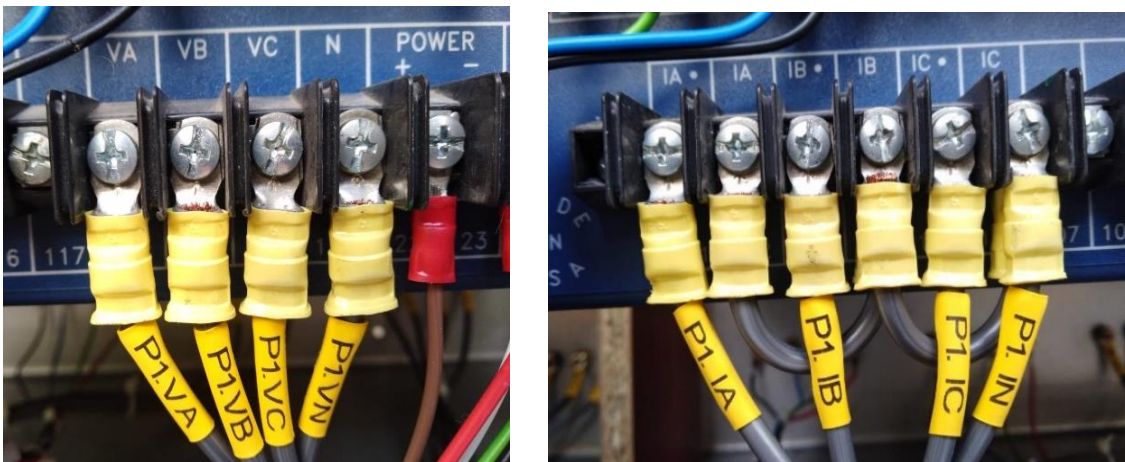


### 3.2 Tensión y corriente

Se realiza la conexión de los contactos de alimentación de tensión y corriente desde la parte posterior del relé a la parte frontal del gabinete. El plano eléctrico se encuentra en el apéndice B, plano 2.

**Figura 15.**

*Conexión de Tensión y Corriente Respectivamente*

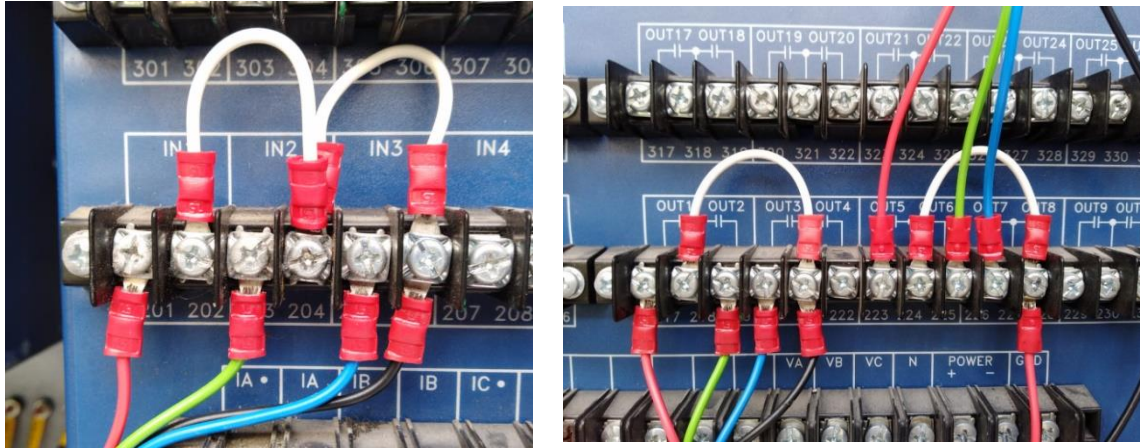


### 3.3 Contactos de entrada y salida

Se realizó la conexión de los contactos de entrada y salida.

**Figura 16.**

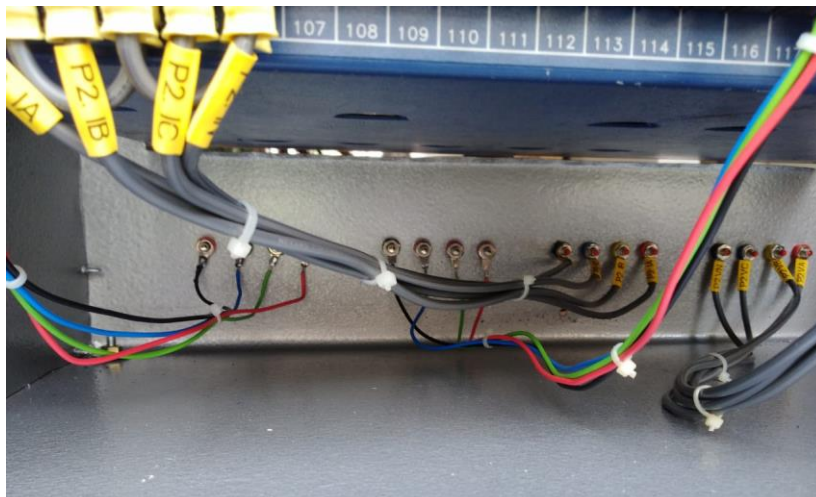
*Conexión de los Contactos de Entrada y Salida Respectivamente*



Se realiza la conexión de los contactos de salida para la parte frontal del gabinete para ser conectado al equipo de inyección y otros contactos de salida para el circuito de 12 Vdc.

**Figura 17.**

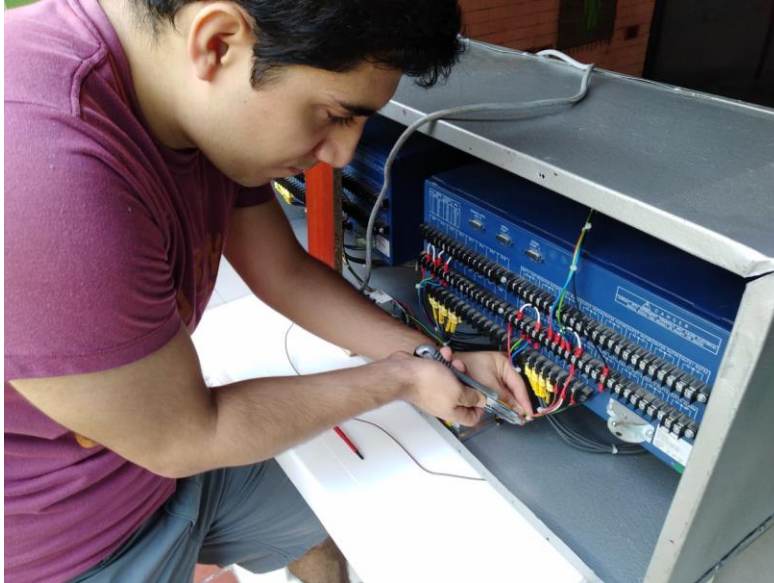
*Conexión de Borneras Frontales con los Contactos del Relé*



En la Figura 18 se observa al estudiante autor del trabajo de grado realizando el conexionado interno del gabinete.

**Figura 18.**

*Estudiante realizando la conexión de los relés*



### 3.4 Circuito de 12 Vdc

Se utilizó un convertidor de 110 Vac a 12 Vdc para alimentar un circuito de LEDs que se encienden cuando el esquema de protección detecta alguna falla.

**Figura 19.**

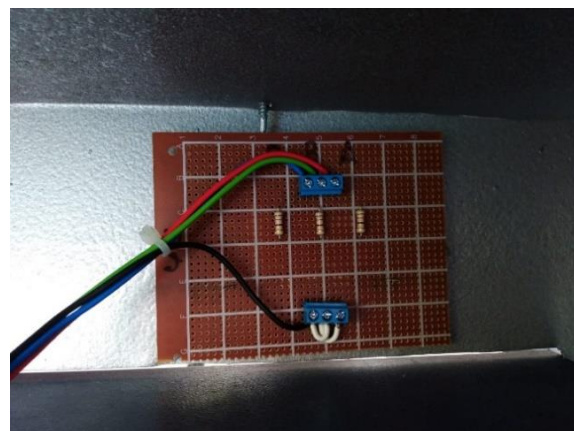
*Fuente SW 12 Vdc 5 A S-60-12 Metálica*



El circuito cuya alimentación es de 12 Vdc permite energizar los LEDS cuando un contacto de salida del relé se cierre, representando la operación de los relés en caso de detección de falla. En el plano 3 del apéndice B se observa el diseño del circuito de 12 Vdc, que consta de resistencias de 820 ohm y LEDS de 2.1 Vdc conectadas en serie a los contactos de salida del relé.

**Figura 20.**

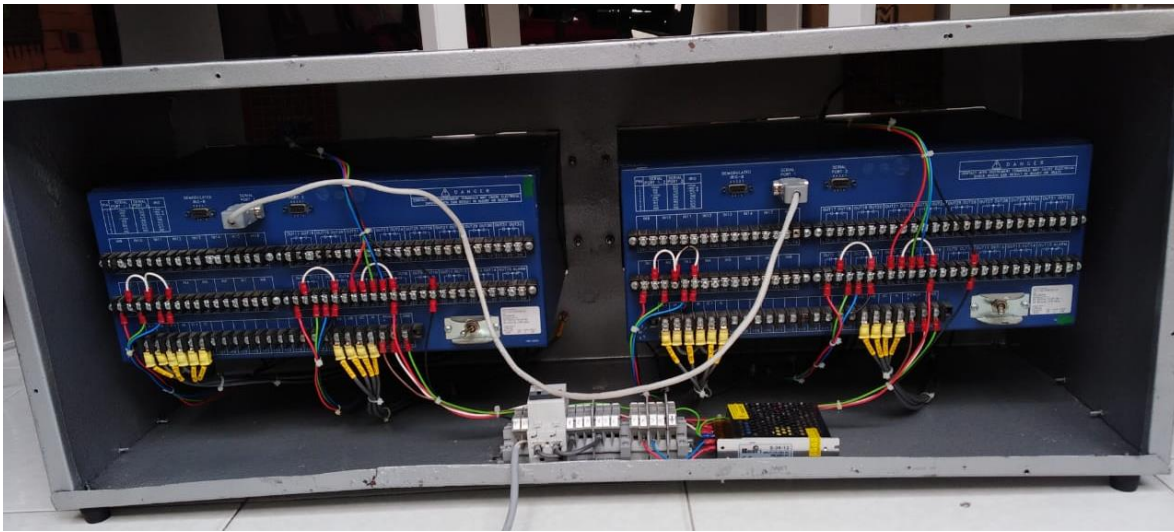
*Circuito de 12 Vdc Parte Frontal y Posterior Respectivamente*



Se instaló el circuito de 12 Vdc a los contactos de salida de los relés. En la Figura 21 se observa el conexionado interno de los dos relés en el gabinete.

**Figura 21.**

*Conexionado Interno del Gabinete*



En la parte frontal del gabinete se instalaron bananas hembra de conexión para la alimentación de tensión, corriente, contactos de entrada y salida para ambos relés. También se identificaron con etiquetas.

**Figura 22.**

*Parte Frontal del Gabinete*



La elaboración de un gabinete que consta de dos relés de distancia y su conexionado, permite al estudiante tener un esquema de protección al cual poder ejecutar pruebas, teniendo en cuenta que esto no es posible en las líneas de transmisión, ya que los relés de protección se encuentran en las subestaciones de los extremos de las líneas.

### 3.5 Teleprotección

El objetivo de la teleprotección en un esquema de protección es permitir la comunicación entre relés, se requiere que un relé envíe la señal al otro relé cuando detecte una falla, con el objetivo de operar aceleradamente para despejar la falla en la línea rápidamente. Se utilizó el protocolo Mirrored Bits de comunicación digital "Relé a relé", el cual permite el intercambio de información de manera inmediata y segura. El relé SEL-321 presenta la opción Mirrored Bits la cual consiste en una palabra digital de ocho bits bidireccionales que se transmite mediante un cable de comunicación serial DB9 Macho-Macho. En la Figura 23 se observa el cable de comunicación conectado a un puerto del relé.

**Figura 23.**

*Cable Serial DB9 Conectado al Puerto del Relé*



En el siguiente capítulo se da una explicación de la forma de uso del protocolo de comunicación.

#### **4. Equipos asociados**

En el presente trabajo de grado se debe realizar la conexión del PC a los relés para configurar sus ajustes y la conexión del PC al equipo Omicron para elaborar las pruebas.

##### **4.1 Relé SEL-321**

El relé SEL-321 es un equipo multifuncional que puede proteger contra fallas en la línea, sobrecorriente, bajo y sobrevoltaje, entre otros. Con el fin de centrar este trabajo de grado en la función principal de distancia, solo se habilitará la operación distancia en los relés.

#### 4.1.1 Conexión del PC al relé

Para conocer los ajustes de los relés SEL es necesario establecer la comunicación entre los relés y un PC. Para realizar esta conexión se instaló el programa gratuito HyperTerminal para Windows 10 en el PC.

**-HyperTerminal:** Este programa es un cliente de conexiones telnet con capacidad de establecer comunicación con otros equipos mediante un puerto USB. Por medio del HyperTerminal se puede realizar la comunicación bidireccional con los relés SEL-321 para configurar los ajustes y tener la información operativa de los equipos.

#### Figura 24.

*Representación de la Conexión Entre el Pc y el Relé*



Se utilizó un cable Rs232 Serie Db9 a USB para conectar el Puerto 3 del relé al PC.

**Figura 25.***Cable de Conexión Rs232 Serie a USB*

Cuando el PC se encuentra conectado al equipo es necesario acceder a diferentes niveles de comunicación del relé para obtener información y ajustar parámetros del mismo. A continuación, la Tabla 3 muestra los niveles y su aplicación.

**Tabla 3.***Niveles del Relé SEL-321*

Nivel	Comando	Contraseña	Descripción
0		N/A	Es el nivel inicial por defecto después de la conexión del relé a un equipo
1	ACCESS	OTTER	En este nivel se puede obtener información del relé como los ajustes, el estatus, eventos e historial de fallas del relé
2	2ACCESS	TAIL	En este nivel se puede configurar los ajustes del relé tales como el alcance de las zonas y tiempos de operación

Véase en el apéndice C los diferentes comandos que se pueden utilizar por cada nivel del relé. En la Figura 26 se realizó la conexión del PC al puerto serial frontal del relé SEL-321.

**Figura 26.**

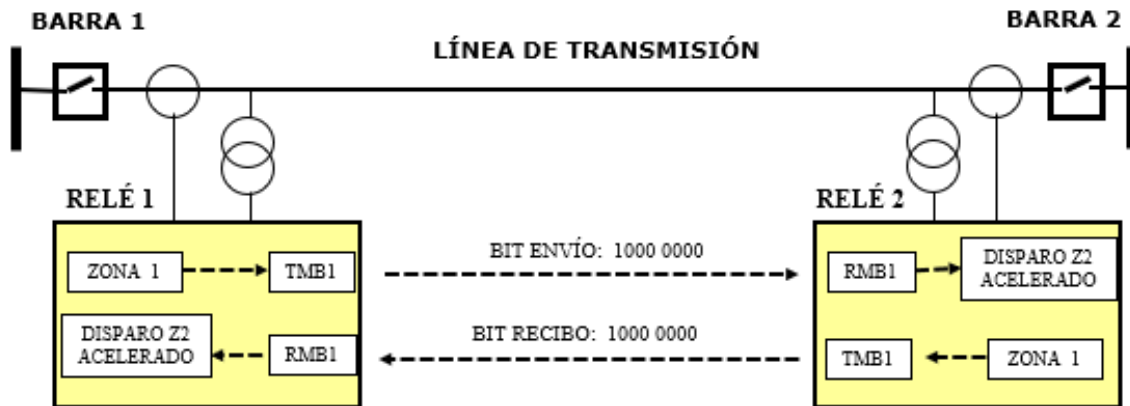
*Conexión entre Relé y PC*

**4.1.2 Ajuste del Mirrored Bits**

Para la función de teleprotección se ajusta el Bit 1 de envío denominado "TMB1" como envío de aceleración por zona 2 y el bit 1 de recibo "RMB1" como recepción de aceleración de la zona 2. En la Figura 27 se observa el esquema de protección con el canal de comunicación. Siendo el bit de envío "1000 0000" la señal de información que lleva la señal de aceleración y el número "1" sería la señal del disparo, igualmente para el bit recibido.

**Figura 27.**

*Esquema de Teleprotección de la Línea*



Se escribe el comando de “Show Logic” en el programa HyperTerminal para obtener la lógica de actuación del relé, se obtiene el listado como lo muestra la siguiente figura.

**Figura 28.**

*Lógica de Actuación del Relé SEL*

```

=>SHOW LOGIC
GROUP 2

IN1   = 52A1   IN2   = NA     IN3   = NA     IN4   = NA
IN5   = NA     IN6   = NA     IN7   = NA     IN8   = NA
IN9   = NA     IN10  = NA    IN11  = NA    IN12  = NA
IN13  = NA     IN14  = NA    IN15  = NA    IN16  = NA
RMB1  = PT     RMB2  = NA     RMB3  = NA     RMB4  = NA
RMB5  = NA     RMB6  = NA     RMB7  = NA     RMB8  = NA
FP_TIMEOUT= 30  TGR   = 5     ERESTART= Y

TMB1  =KEY
TMB2  =NA
TMB3  =NA
TMB4  =NA
TMB5  =NA
TMB6  =NA
TMB7  =NA
TMB8  =NA
    
```

Para ajustar el envío de la señal de aceleración correspondiente al esquema PUTT, se busca y se escribe en el elemento TMB1 = KEY. La palabra digital KEY corresponde al envío de aceleración cuando el relé detecta la falla en la Zona 1.

Para ajustar el recibo de la señal de aceleración del esquema PUTT, se escribe en el elemento RMB1 = PT. La palabra digital PT corresponde al recibo de aceleración. Cuando este elemento PT se hace "1" el relé acelera el disparo por zona 2. Si el elemento PT se mantiene en "0" el disparo por zona 2 esperará hasta que expire su tiempo ajustado, en este caso, 200 milisegundos.

El uso de la comunicación por Mirrored Bits reemplaza lo que, en un escenario real de protección de una línea, se requiere para establecer el esquema de teleprotección, es decir, reemplaza los equipos de teleprotección y el medio de comunicación.

#### ***4.1.3 Parámetros eléctricos del esquema de protección***

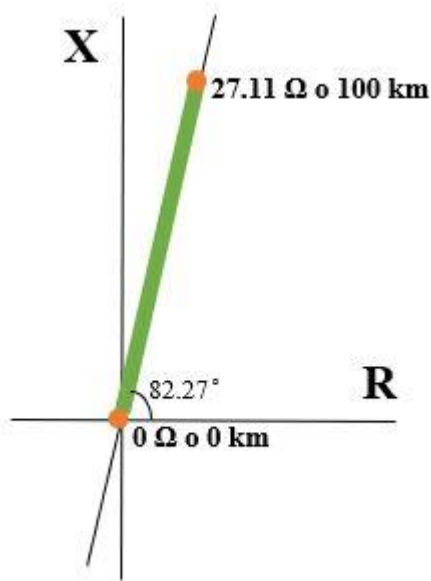
Se eligieron valores típicos de una línea de Norte de Santander (línea Tasajero a Belén) para el esquema de protección y se ajustaron los relés de distancia según la línea a proteger del esquema. La Tabla 4 muestra los valores de la línea a proteger empleados para este trabajo de grado y los valores de los transformadores de medida.

**Tabla 4.***Valores de la Línea del Esquema a Proteger*

<b>Magnitud</b>		<b>Valor</b>
Distancia [km]	L Línea	100
Impedancia de Secuencia Positiva [ $\Omega$ ]	Z1	27.11
Ángulo de Secuencia Positiva [°]	$\angle$ Z1	82.27
Impedancia de Secuencia Cero [ $\Omega$ ]	Z0	71.15
Ángulo de Secuencia Cero [°]	$\angle$ Z0	72.52
Tensión de Línea Nominal Primaria [kV]		230
Corriente Nominal Primaria[A]		50
Tensión de Fase Nominal Secundaria [V]		66.4
Corriente Nominal Secundaria[A]		0.05
CT		1000/1
PT		2000/1

La Figura 29 muestra una representación de la línea a proteger en el diagrama de impedancia.

**Figura 29.***Línea en el Diagrama de Impedancia*



En la Tabla 5 se encuentra el alcance y el tiempo de operación por zonas de los relés SEL-321 elegidos para el esquema de protección.

**Tabla 5.**

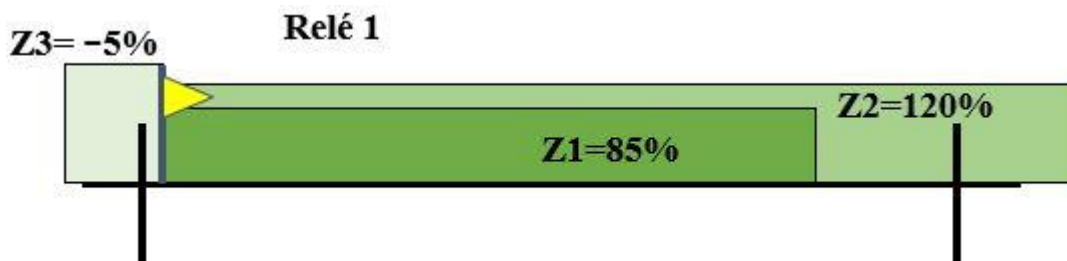
*Alcance y Tiempo de Operación de las Zonas de los Relés*

Zonas	Alcance [%]	Tiempo de Operación [ms]
Zona 1	85	0
Zona 2	120	200
Zona Reversa	5	300

Se puede observar que el relé 1 protege el 80% en zona 1 (instantáneo) a la línea principal, la zona 2 (temporizado) protege el 100% de la línea y un 20% de la línea adyacente y la zona reversa (temporizada) protege el 5% de forma reversa como se observa en la Figura 30.

**Figura 30.**

*Alcance de Protección en la Línea desde el Relé 1*



En la Figura 31 se observa las zonas de protección simultáneas usando los dos relés.

**Figura 31.**

*Alcance de Protección de la Línea Usando los Dos Relés*



Se tiene los ajustes de los relés según información de impedancia del circuito secundario.

**Tabla 6.**

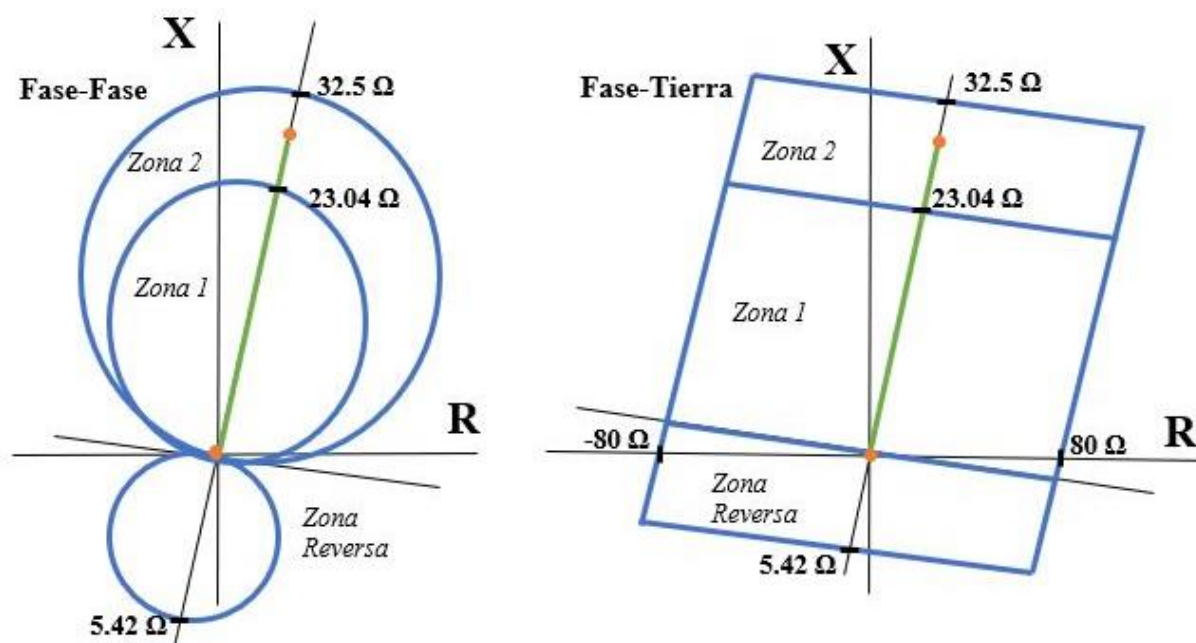
*Ajustes de los Relés SEL-321*

Zonas	Parámetros	Elemento de Protección Fase-Fase Tipo Mho		Elemento de Protección Fase-Tierra Tipo Cuadrilateral	
		Magnitud ( $\Omega$ )	Ángulo [ $^\circ$ ]	Resistencia ( $\Omega$ )	Reactancia ( $\Omega$ )
Zona 1	Alcance	23.04	82.87	80	23.04
	Tiempo operación (ms)	0		0	
	Alcance	32.5	82.87	80	32.5

	Tiempo operación (ms)	200	200
Zona	Alcance	Magnitud ( $\Omega$ )	Resistencia ( $\Omega$ )
Reversa		Ángulo [ $^\circ$ ]	Reactancia ( $\Omega$ )
	Tiempo operación (ms)	300	300

**Figura 32.**

*Zonas de Protección Tipo Mho y Cuadrilateral Respectivamente*



**4.1.4 Esquema de protección para estados de carga**

El esquema de protección en condición de estado estable nunca debe operar, el relé opera cuando la detección de la falla se encuentra dentro de las zonas vistas en la figura anterior. Se presentará un breve análisis para tres condiciones de estado estable al variar la corriente y manteniendo la tensión de barras constantes (de la Tabla 4). Para la corriente de demanda mínima se supone un valor de 20 A, para la condición nominal 50 A (de la Tabla 4) y para condición de

demanda máxima una corriente de 100 A; Se decide agregar un factor de potencia inductivo para cada caso de carga de 0.92, 0.9 y 0.95 respectivamente.

$$|Z_{Min}| = \frac{V}{I_{Min}} = \frac{230 \text{ kV}}{20 \text{ A}} = 11500 [\Omega] \quad , \quad \theta_{Min} = \text{Cos}^{-1}(0.92) \approx 23.1^\circ$$

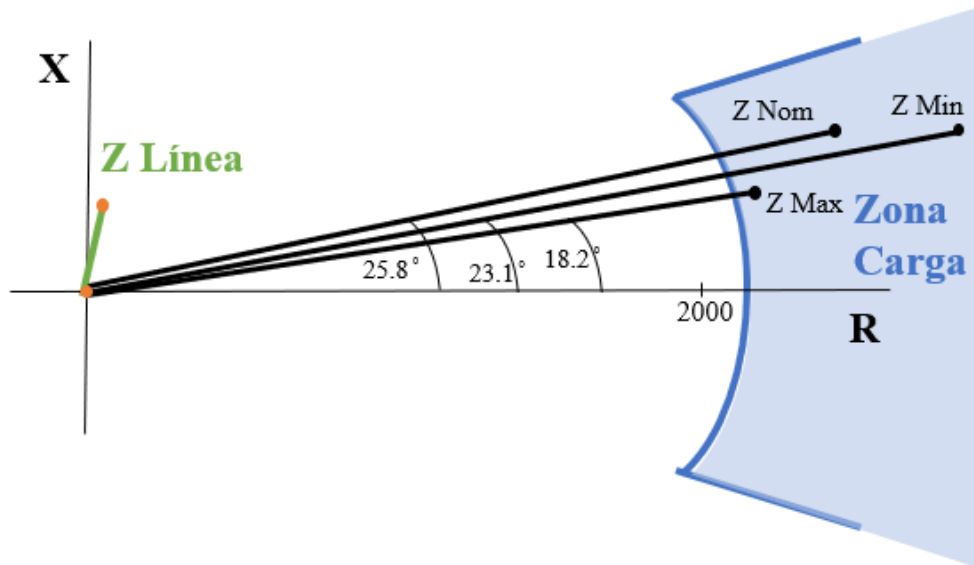
$$|Z_{Nom}| = \frac{V}{I_{Nom}} = \frac{230 \text{ kV}}{50 \text{ A}} = 4600 [\Omega] \quad , \quad \theta_{Nom} = \text{Cos}^{-1}(0.9) \approx 25.8^\circ$$

$$|Z_{Max}| = \frac{V}{I_{Max}} = \frac{230 \text{ kV}}{100 \text{ A}} = 2300 [\Omega] \quad , \quad \theta_{Max} = \text{Cos}^{-1}(0.95) \approx 18.2^\circ$$

A continuación, una representación de la detección de las impedancias de carga por parte del relé.

**Figura 33.**

*Impedancias de Carga Detectadas por el Relé*



Para ninguna de las condiciones de carga el esquema opera, ya que las impedancias que el relé detecta no se encuentran dentro de las zonas de protección. Para este caso la teleprotección no actúa en ningún momento, pues no hay detección de fallas por parte de los relés.

#### 4.2 Omicron CMC 356

Equipo de inyección secundaria útil para pruebas de dispositivos de protección y medida, que tiene seis fuentes monofásicas de corriente, una solución universal para probar todas las generaciones y tipos de relés de protección, los seis canales de salida de corriente y tres de tensión del CMC 356 son ajustables continua e independientemente en amplitud, fase y frecuencia. Los usuarios pueden controlar el equipo de pruebas utilizando una computadora con Windows y conectarse a través de un cable LAN (Omicron CMC 356 Brochure, 2008, p.5).

#### Figura 34.

*Equipo de Pruebas Omicron CMC 356*



Nota: Adaptado de <https://www.omicronenergy.com/es/productos/cmc-356/>

El equipo Omicron CMC 356 tiene cuatro salidas de tensión y seis salidas de corriente.

**Tabla 7.***Valores Máximos de Tensión y Corriente del Equipo Omicron CMC 356*

Parámetros	Salida	Fases	Valor Mínimo	Valor Máximo
Tensión [V]	Trifásica	3	0	300
Corriente [A]	Hexafásica	6	0	32

Nota: Adaptado de Omicron CMC 356 Short Brochure. Pag 2.

Cuando ocurre una falla cercana a la barra, el relé detecta una impedancia muy corta, debido a la ley de ohm, produce que la corriente aumente significativamente en magnitud, motivo por el cual es necesario cambiar los puntos de falla para inyectar corrientes más bajas. Por eso se varía los escenarios de falla del 1% al 5% de la línea y del 99% al 95% de la línea, garantizando que la corriente necesaria a inyectar no supere a los valores máximos de corriente establecidos para el Omicron (32 A, véase la Tabla 7). Este cambio se realiza en el análisis para encontrar las tensiones y corrientes a inyectar para cada escenario de falla, dicho cambio no afecta la manera de operar el esquema de protección ni los resultados del mismo.

#### 4.2.1 *Test Universe 4.00*

El programa Test Universe es una herramienta potente y práctica para pruebas relacionadas con parámetros básicos de dispositivos de protección. Permite varios métodos de prueba que se ejecutan desde una computadora (Omicron Energy/Productos/Test Universe).

**-Módulo de prueba “State Sequencer”:** Es un módulo de prueba muy flexible para determinar los tiempos de funcionamiento y las secuencias lógicas de sincronismo usando varios

estados de operación. Estos estados se activan de forma secuencial por tiempo o por accionamiento de contactos.

En dicho módulo se pueden definir diferentes estados cuyas señales de prueba configuradas (salidas de tensión y corriente) del dispositivo de prueba empleado pueden ajustarse individualmente en cuanto a amplitud, fase y frecuencia (Omicron Energy/Productos/Test Universe/State Sequencer). La Figura 35 muestra la ventana principal del State Sequencer.

**Figura 35.**

*Ventana Principal del Módulo de Pruebas*

Tabla: Ejemplo									
Nombre	1 Prefalla			2 Falla			3 Postfalla		
Van	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vcn	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
I1 A	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I1 B	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I1 C	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 A	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 B	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 C	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
CMC Ref	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)		
Trigger	↻	500,0 ms		↻	500,0 ms		↻	500,0 ms	

**4.2.2 Conexión del PC al Omicron**

Para realizar la planeación de las pruebas es necesario conectar el equipo Omicron CMC 356 a un PC mediante un cable de comunicación LAN con terminales RJ45.

**Figura 36.**

*Representación de la Conexión entre el PC y el Omicron*



Se debe descargar el programa Test Universe 4.00 que se encuentra en la página oficial de los productos Omicron ([www.omicronenergy.com](http://www.omicronenergy.com)). Luego se necesita un cable LAN para enlazar el Omicron con el PC.

**Figura 37.**

*Cable LAN UTP Categoría 6 para Conexión del Equipo Omicron al PC*



Al abrir el programa Test Universe se genera una dirección IP privada que reconocerá al equipo Omicron cada vez que se conecta al PC. Se realiza el enlace del Omicron al PC por medio del cable LAN que se conecta en la única entrada Ethernet del Omicron. En la Figura 38 se muestra el equipo Omicron conectado a la computadora personal del estudiante.

**Figura 38.**

*Equipo Omicron conectado al PC*



#### ***4.2.3 Configuración del Test Universe***

Después de haber realizado exitosamente la conexión del Omicron al PC, se deben configurar los ajustes del programa para luego poder realizar el conexionado del equipo al gabinete.

En la ventana principal del programa Test Universe donde se encuentran los distintos módulos de pruebas a relés, controles del equipo, configuraciones y herramientas generales.

**Figura 39.**

*Ventana Principal del Programa Test Universe 4.00*



Se debe ingresar a los *Ajustes del sistema* y agregar los valores nominales con los que el equipo de inyección va a operar, siendo 66.4 V, 5 A y 60 Hz tal como se observa en la Figura 40.

**Figura 40.***Configuración de los Ajustes del Sistema*

The image shows a software window titled "Ajustes del sistema" (System Settings). It has several tabs: "Ajustes de la ventana de noticias", "Exportación de datos", "Varios Ajustes", "Información del usuario", "Directorios", "Nombres de las fases", and "Valores por defecto". The "Valores por defecto" tab is active. It is divided into several sections:

- Valores nominales** (highlighted with a green border):
  - Tensión (L-L): 66,400 V
  - Corriente: 5,000 A
  - Frecuencia: 60,000 Hz
- Límites de seguridad** (highlighted with a green border):
  - V máx (L-L): 200,000 V
  - I max: 50,000 A
- Ajustes del hardware**:
  - Rango nominal de entradas binarias: 220,000 V  Sin potencial
  - Sensor de corriente Rogowski:  Rango bajo  Rango alto
- Informe**:
  - Formato conciso  Formato detallado
- Habilitar registro**: Info (dropdown menu)
- Ajustes relativos a la red**:
  - Permitir el uso de equipos de prueba conectados a través de la red
- Asociación de unidad de prueba**:
  - Permitir asociación automática

Buttons at the bottom: Aceptar, Cancelar, Ayuda.

En el módulo de *State Sequencer* se debe ingresar a *Configuración de Hardware* para ajustar en *Salidas Analógicas*, las salidas de corriente y tensión del equipo Omicron al esquema de protección. Se deben marcar las salidas de tensión y de corriente del programa con las salidas del equipo. En la Figura 41 se observan las salidas de tensión en las tres primeras casillas para la tensión que se aplica a ambos relés, luego tres casillas que representan las salidas de corriente para el relé 1 y las otras tres casillas para las salidas de corriente para el relé 2.

**Figura 41.**

*Configuración de Salidas de Tensión y Corriente en el Módulo de Pruebas*

Configuración del Hardware																	
General			Salidas analógicas				Entradas binarias / analógicas				Salidas binarias			Referencia horaria			
Señal de salida del módulo de prueba	Etiqueta	Terminal de conexión	CMC356 V A CK641E				CMC356 V B CK641E		CMC356 I A CK641E				CMC356 I B CK641E				
			1	2	3	N	1	N	1	2	3	N	1	2	3	N	
VA-N	Van		X														
VB-N	Vbn			X													
VC-N	Vcn				X												
No usado	V(2)-1						X										
IA	I1 A							X									
IB	I1 B								X								
IC	I1 C									X							
I(1)-1	I2 A											X					
I(2)-2	I2 B												X				
I(3)-3	I2 C													X			

En la barra de herramientas del programa se observan los comandos de comenzar, parar, pausar y borrar la inyección.

### 5. Plan de pruebas, ejecución y resultados

En este capítulo se calculan las variables de tensión y corriente para los escenarios de falla, se agrega la información al módulo de pruebas, se conecta el equipo al gabinete, se ejecutan las pruebas y se analizan los resultados. Los relés de distancia ubicados en las subestaciones son alimentados de las tensiones y corrientes secundarias del sistema de potencia, la impedancia es una razón que se utiliza en los cálculos para determinar las tensiones y corrientes a inyectar al esquema.

### 5.1 Cálculo de magnitudes de tensión y corriente de falla para las pruebas

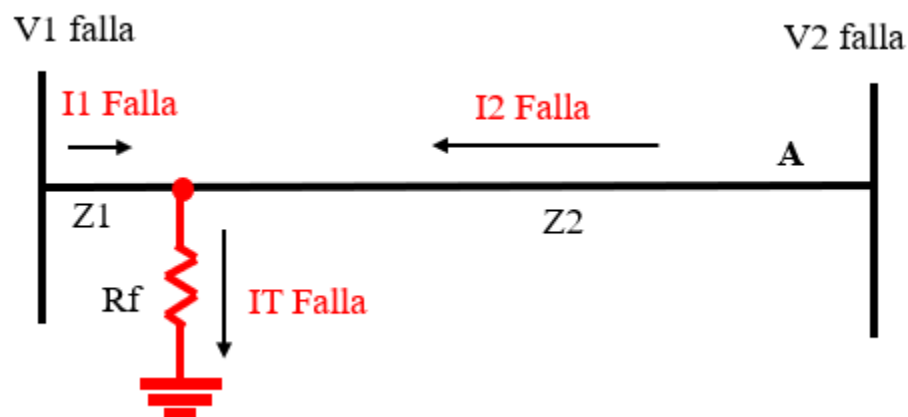
Se tiene una línea de 100 km de distancia cuya impedancia es  $54\angle 82^\circ \Omega$  obtenida de la Tabla 4. Para calcular las magnitudes de tensiones y corrientes a inyectar al esquema de protección se debe tener en cuenta el tipo de falla que se va a inyectar, el punto de falla y valores de impedancia de la línea. Se realizan los cálculos de falla utilizando los valores primarios de la línea para luego pasarlos a valores secundarios y agregarlos al módulo de pruebas.

#### 5.1.1 Fallas monofásicas

En este escenario se decide realizar el cálculo para el caso de falla monofásica al inicio de la línea. Una falla de  $5 \Omega$  en la fase A al 5% de la línea. En la Figura 42 se observa un esquema de la falla monofásica.

#### Figura 42.

*Variables ante Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



Teniendo la tensión de fase nominal (Tabla 4) se hallan las corrientes de falla desde ambos extremos de la línea

$$V_{nom} = V_1 = V_2 = 132.8 [kV]$$

Primero se encuentran las impedancias de falla en la línea, hay una falla al 5% de la línea vista desde el relé 1 y que se halla multiplicando la impedancia total de la línea por el punto de falla.

$$Z_1 = Z_{lin} * 0.05 = 54 \angle 82^\circ * 0.05 = 2.7 \angle 82^\circ [\Omega]$$

Y la falla vista desde el relé 2 al 95% de la línea.

$$Z_2 = Z_{lin} * 0.95 = 54 \angle 82^\circ * 0.95 = 51.3 \angle 82^\circ [\Omega]$$

Es necesario hallar las corrientes de falla vistas por cada relé, teniendo en cuenta la impedancia de falla que es totalmente resistiva de 5  $\Omega$ . Se halla dividiendo la tensión nominal sobre la impedancia desde el relé hasta la falla más la impedancia de falla.

$$I_{falla\ 1} = \frac{V_1 - 0}{Z_1 + Z_f} = \frac{132.8\ kV}{2.7 \angle 82^\circ + 5 \angle 0^\circ} = 22.1 \angle -26.4^\circ [kA]$$

$$I_{falla\ 2} = \frac{V_2 - 0}{Z_2 + Z_f} = \frac{132.8\ kV}{51.3 \angle 82^\circ + 5 \angle 0^\circ} = 2.54 \angle -76.5^\circ [kA]$$

Ahora se encuentra la impedancia que el relé detecta, ya que la adición de la impedancia de falla cambia la detección que el relé tiene de la falla. Se emplea una expresión que proviene de la relación de tensión sobre corriente en el punto de falla.

$$Z_{T1} = Z_1 + \left( Z_f * \left( 1 + \frac{I_2 \angle \theta_2}{I_1 \angle \theta_1} \right) \right)$$

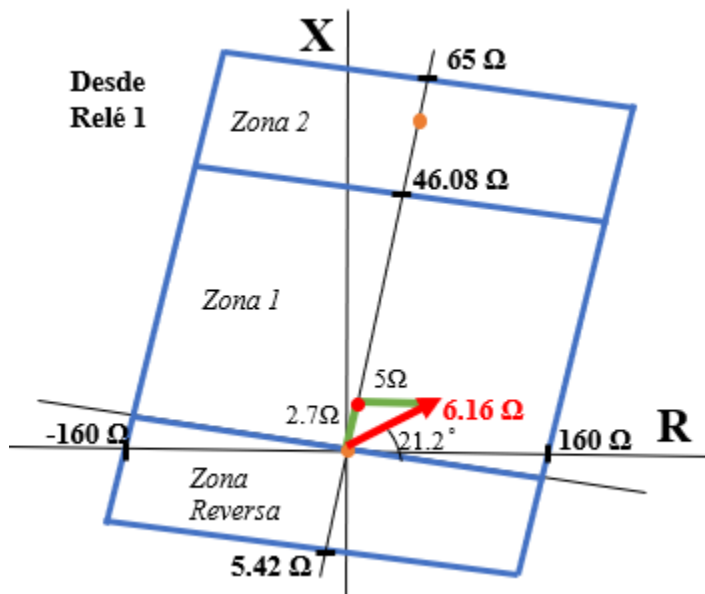
Se utilizan los valores de corrientes de falla, de la impedancia del relé hasta la falla y de la impedancia de falla.

$$Z_{T1} = 2.7 \angle 82^\circ + \left( 5 * \left( 1 + \frac{2.54 \angle -76.5^\circ [kA]}{22.1 \angle -26.4^\circ kA} \right) \right) = 6.16 \angle 21.2^\circ [\Omega]$$

A continuación, la figura muestra el diagrama de impedancia donde se observa el efecto de la doble alimentación. La falla ocurre al inicio de la línea (zona 1), pero el relé 1 no detecta la falla en el mismo punto, pues la resistencia de falla provoca que el relé mida la falla en otro punto del diagrama.

**Figura 43.**

*Detección de Falla desde el Relé 1*



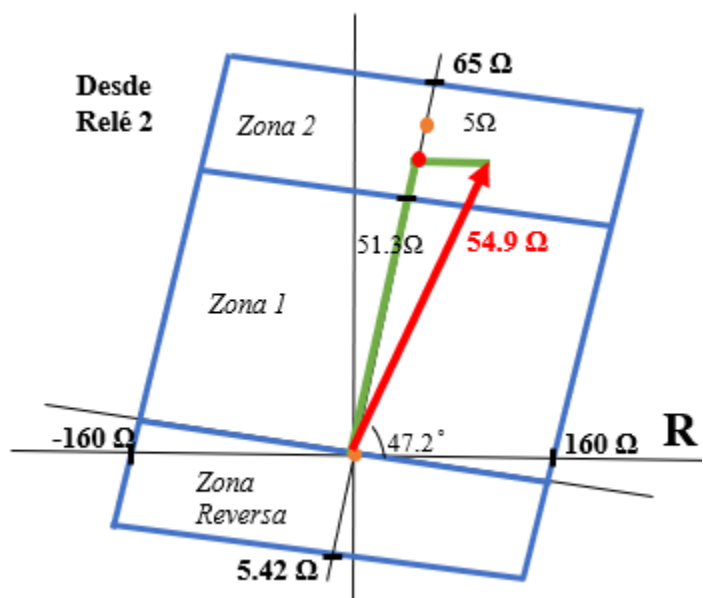
Se realiza el mismo procedimiento para la impedancia vista por el relé 2.

$$Z_{T2} = 51.3 \angle 82^\circ + \left( 5 * \left( 1 + \frac{22.1 \angle -26.4^\circ [kA]}{2.54 \angle -76.5^\circ kA} \right) \right) = 54.9 \angle 47.2^\circ [\Omega]$$

De igual forma el relé 2 detecta la falla cercana al punto real de falla (95% de la línea en zona 2) pero la alimentación de las corrientes de fallas cambia el vector de impedancia que el relé detecta.

**Figura 44.**

*Detección de Falla desde el Relé 2*



Por último, se hallan las tensiones de falla que el relé detecta, producto de las corrientes de falla que alimentan la falla. Se encuentra por medio de la ley de Kirchhoff para tensiones.

$$V_{falla\ 1} = (I_{falla\ 1} * Z_1) + (I_{falla\ 1} + I_{falla\ 2}) * Z_f)$$

Para el relé 1.

$$\begin{aligned} V_{falla\ 1} &= (22.1\angle -26.4^\circ * 2.7\angle 82^\circ) + ((22.1\angle -26.4^\circ + 2.54\angle -76.5^\circ) * 5) \\ &= 78.6\angle -5.1^\circ \text{ [kV]} \end{aligned}$$

Y para el relé 2.

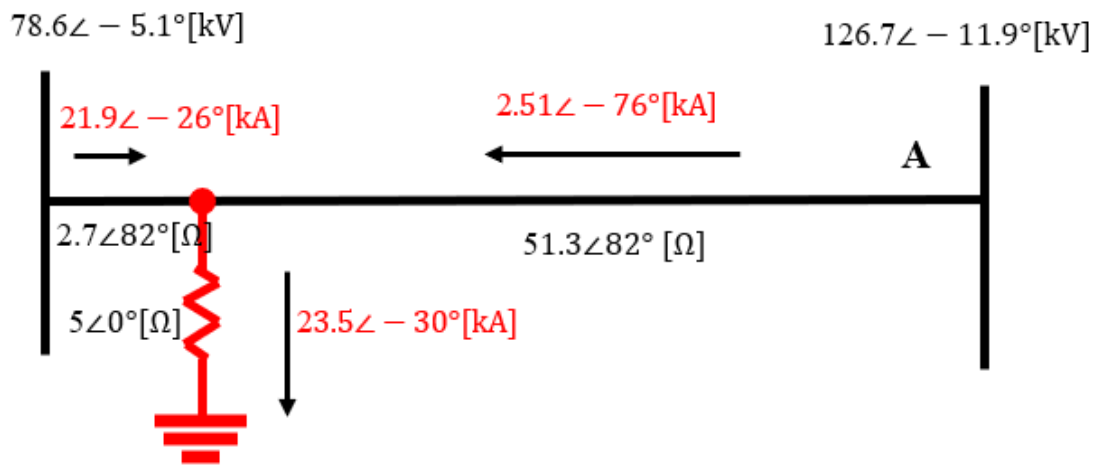
$$V_{falla 2} = (2.54\angle - 76.5^\circ * 51.3\angle 82^\circ) + ((22.1\angle - 26.4^\circ + 2.54\angle - 76.5^\circ) * 5)$$

$$= 126.7\angle - 11.9^\circ \text{ [kV]}$$

Ya se calcularon las tensiones y corrientes de falla que se van a inyectar al esquema de protección, en la siguiente imagen se ilustra la fase de la línea fallada con la información calculada.

**Figura 45.**

*Esquema ante Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



Es necesario pasar la información calculada en valores primarios a valores secundarios para poder emplear el equipo de inyección secundaria, teniendo en cuenta la relación de transformación del CT y PT definidos en la Tabla 4.

**Tabla 8.**

*Datos a Inyectar para una Falla Monofásica al Inicio de la Línea*

Valores a inyectar para la falla monofásica al inicio de la línea		
Variables	Primario	Secundario
Tensión relé 1 [V]	78630	39.8
Tensión relé 2 [V]	126700	63.3

Corriente relé 1 [A]	21900	21.9
Corriente relé 2 [A]	2510	2.51

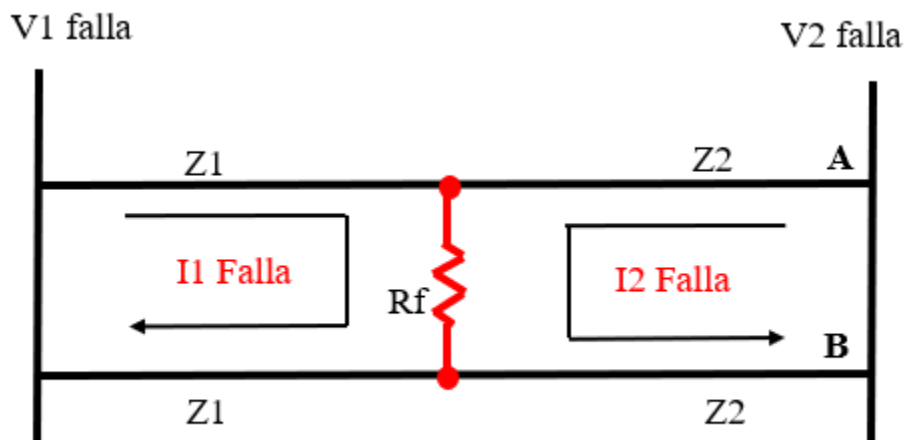
Los valores de la anterior tabla de se utilizarán más adelante en el módulo de pruebas, representando el aporte de corriente y tensión desde cada extremo de la línea al punto de falla.

**5.1.2 Fallas bifásicas**

Ahora se va a encontrar los valores de tensiones y corrientes a inyectar en los dos relés para una falla bifásica a la mita de la línea con una resistencia de 5 Ω. En la Figura 46 se observa un esquema de la falla bifásica del escenario.

**Figura 46.**

*Variables ante Falla Bifásica a la Mitad de la Línea*



Teniendo la tensión nominal de fase se halla las corrientes de falla desde ambos lados de la línea.

$$V_{nom} = V_1 = V_2 = 132.8 \text{ [kV]}$$

Primero se encuentran las impedancias de falla en la línea, hay una falla al 50% de la línea vista desde el relé 1 y que se halla multiplicando la impedancia total de la línea por el punto de falla.

$$Z_1 = Z_{lin} * 0.5 = 54 \angle 82^\circ * 0.5 = 27 \angle 82^\circ \text{ [\Omega]}$$

Y la falla vista desde el relé 2 al 50% de la línea.

$$Z_2 = Z_{lin} * 0.5 = 54 \angle 82^\circ * 0.5 = 27 \angle 82^\circ \text{ [\Omega]}$$

Es necesario hallar las corrientes de falla vistas por cada relé, teniendo en cuenta la impedancia de falla que es totalmente resistiva de 5  $\Omega$ . En este caso es importante aclarar que la corriente de falla va por una línea y se devuelve por la otra línea fallada, por tal motivo el relé observa dos veces la impedancia del relé a la falla más la resistencia de falla (ida por una fase de falla y vuelta por la otra fase fallada).

$$I_{falla\ 1} = \frac{V_1 - 0}{(2 * Z_1) + Z_f} = \frac{132.8 \text{ kV}}{(2 * 27 \angle 82^\circ) + 5 \angle 0^\circ} = 2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]}$$

$$I_{falla\ 2} = \frac{V_2 - 0}{(2 * Z_2) + Z_f} = \frac{132.8 \text{ kV}}{(2 * 27 \angle 82^\circ) + 5 \angle 0^\circ} = 2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]}$$

Ahora se encuentra la impedancia que el relé detecta, ya que la adición de la impedancia de falla cambia la detección que el relé tiene de la falla.

$$Z_{T1} = Z_1 + \left( Z_f * \left( 1 + \frac{I_2 \angle \theta_2}{I_1 \angle \theta_1} \right) \right)$$

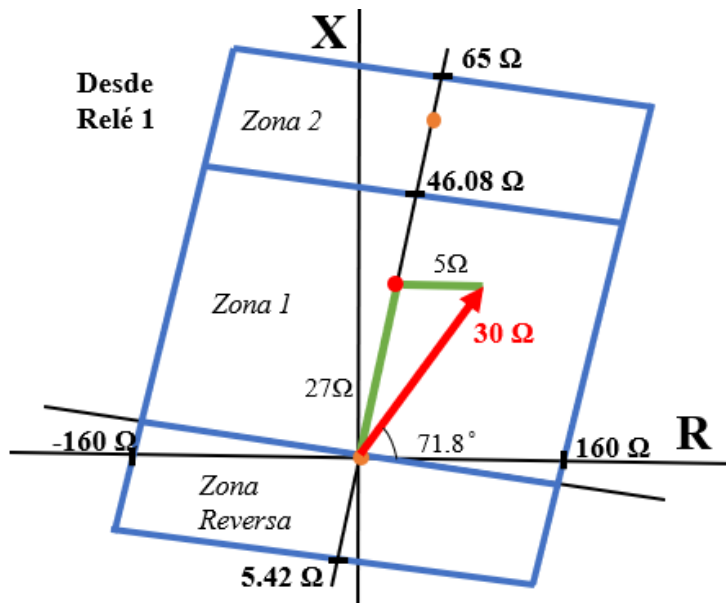
Para el caso de una falla bifásica es necesario dividir las impedancias de ida y retorno en dos, ya que el relé calcularía dos veces la misma impedancia y la detectaría en la otra barra cuando en realidad se encuentra en la mitad de la línea.

$$Z_{T1} = \left( \frac{2 * 27 \angle 82^\circ}{2} \right) + \left( 5 * \left( 1 + \frac{2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]}}{2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]}} \right) \right) = 30 \angle 62.7^\circ \text{ [\Omega]}$$

En la siguiente figura se muestra el diagrama de impedancias donde se observa la detección de impedancia por parte del relé 1.

**Figura 47.**

*Detección de Falla desde el Relé 1*



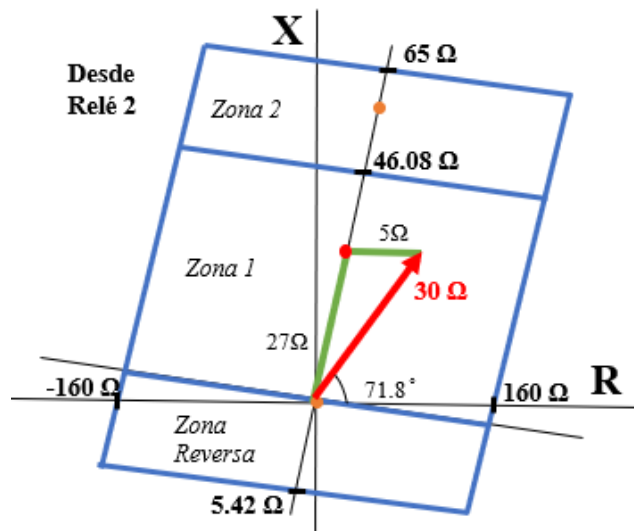
Se realiza el mismo procedimiento para la impedancia vista por el relé 2.

$$Z_{T2} = \left( \frac{2 * 27 \angle 82^\circ}{2} \right) + \left( 5 * \left( 1 + \frac{2.404 \angle 76.8^\circ \text{ [kA]}}{2.404 \angle 76.8^\circ \text{ [kA]}} \right) \right) = 30 \angle 62.7^\circ \text{ [\Omega]}$$

Por ser la falla a la mitad de la línea, entonces el comportamiento es igual en ambos relés y ven la falla de igual forma.

**Figura 48.**

*Detección de Falla desde el Relé 2*



Por último, se hallan las tensiones que el relé detecta hasta la falla.

$$V_{falla\ 1} = (I_{falla\ 1} * Z_1)$$

Para el relé 1.

$$V_{falla\ 1} = (2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]} * 27 \angle 82^\circ) \approx 65 \angle 5.2 \text{ [kV]}$$

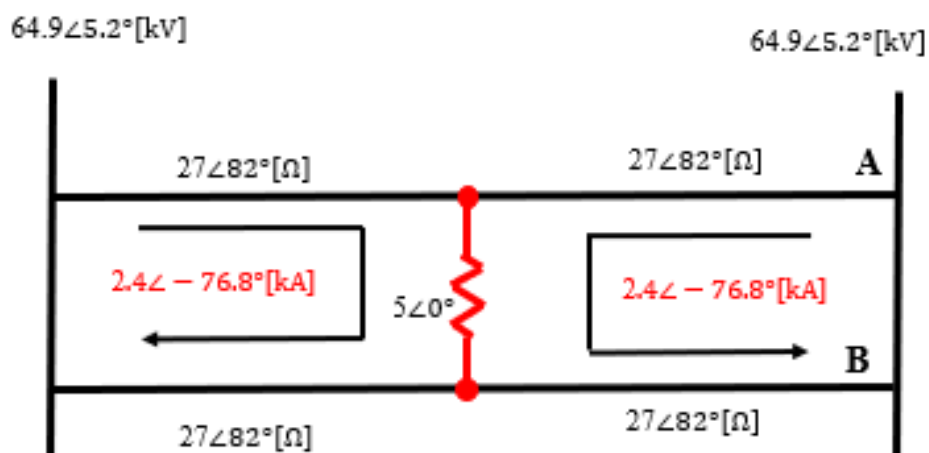
De igual forma para el relé 2.

$$V_{falla\ 2} = (2.41 \angle -76.8^\circ \text{ [kA]} * 27 \angle 82^\circ) \approx 65 \angle 5.2 \text{ [kV]}$$

Ya se calcularon las tensiones y corrientes de falla que se van a inyectar al esquema de protección, en la siguiente figura se ilustra la fase de la línea fallada con la información calculada.

**Figura 49.**

*Esquema ante Falla Bifásica a la Mitad de la Línea*



Es necesario pasar la información calculada en valores primarios a valores secundarios para poder emplear el equipo de inyección secundaria, teniendo en cuenta la relación de transformación del CT y PT definidos en la Tabla 4.

**Tabla 9.**

*Datos a Inyectar para una Falla Bifásica en la Mitad de la Línea*

Valores a inyectar para la falla monofásica al inicio de la línea		
Variables	Primario	Secundario
Tensión relé 1 [V]	65000	32.5
Tensión relé 2 [V]	65000	32.5
Corriente relé 1 [A]	2410	2.4
Corriente relé 2 [A]	2410	2.4

Los valores de la anterior tabla de se utilizarán más adelante en el módulo de pruebas, representando el aporte de corriente y tensión desde cada extremo de la línea al punto de falla.

## 5.2 Tensiones y corrientes a inyectar al esquema de distancia

Para las demás pruebas se realiza el mismo procedimiento de acuerdo al tipo de falla presentada y se encuentran anexados a continuación. La Tabla 10 contiene las tensiones y corrientes primarias y secundarias de aporte a la falla presentada en la línea para cada escenario de falla.

**Tabla 10.**

*Valores Secundarios en los Escenarios de Falla*

Caso	Valores a inyectar para la falla monofásica al inicio de la línea		
	Variables	Primario	Secundario
1	Tensión relé 1 [V]	45400	39.8
	Tensión relé 2 [V]	78900	63.3
	Corriente relé 1 [A]	22100	22.1
	Corriente relé 2 [A]	2540	2.54
2	Tensión relé 1 [V]	47108	23.5
	Tensión relé 2 [V]	47108	23.5
	Corriente relé 1 [A]	4700	4.7
	Corriente relé 2 [A]	4700	4.7
3	Tensión relé 1 [V]	78900	39.45
	Tensión relé 2 [V]	45400	22.7
	Corriente relé 1 [A]	254	2.54
	Corriente relé 2 [A]	22100	22.1
4	Tensión relé 1 [V]	28100	14.05
	Tensión relé 2 [V]	68900	34.4
	Corriente relé 1 [A]	28900	28.9
	Corriente relé 2 [A]	2300	2.3
5	Tensión relé 1 [V]	68900	34.4
	Tensión relé 2 [V]	28100	14.05

	Corriente relé 1 [A]	2300	2.3
	Corriente relé 2 [A]	28900	28.9
6	Tensión relé 1 [V]	65000	32.5
	Tensión relé 2 [V]	65000	32.5
	Corriente relé 1 [A]	2410	2.4
	Corriente relé 2 [A]	2410	2.4
7	Tensión relé 1 [V]	67800	33.9
	Tensión relé 2 [V]	87900	43.9
	Corriente relé 1 [A]	2630	2.63
	Corriente relé 2 [A]	1700	1.7
8	Tensión relé 1 [V]	87900	43.9
	Tensión relé 2 [V]	67800	33.9
	Corriente relé 1 [A]	1700	1.7
	Corriente relé 2 [A]	2630	2.63
9	Tensión relé 1 [V]	45630	22.8
	Tensión relé 2 [V]	65800	32.9
	Corriente relé 1 [A]	16900	16.9
	Corriente relé 2 [A]	1240	1.24
10	Tensión relé 1 [V]	65800	32.9
	Tensión relé 2 [V]	45630	22.8
	Corriente relé 1 [A]	1240	1.24
	Corriente relé 2 [A]	16900	16.9

### 5.3 Elaboración de pruebas en el módulo State Sequencer

Después de obtener las magnitudes de tensión y corriente para cada escenario se utiliza el módulo de pruebas para agregar la información de la prefalla, la falla y la postfalla. En la Figura 50 se observan los tres estados requeridos de inyección al esquema de protección (prefalla, falla y postfalla), la figura a continuación muestra la tabla que el módulo de pruebas proporciona para ingresar los valores de tensión y corriente para inyectar. En la siguiente figura no hay valor en las magnitudes, ya que es necesario ingresar la información de la Tabla 10 al estado de falla y las magnitudes en los estados de prefalla y postfalla se explicarán en el ejemplo a continuación. Las

tres primeras salidas son de tensión para ambos relés, las tres siguientes salidas son de corriente para el relé 1 y las últimas tres salidas para la alimentación del relé 2. Todos los cálculos se realizaron con las tensiones, corrientes e impedancias secundarias del sistema.

**Figura 50.**

*Tabla de Variables en Cero de Tensión y Corrientes para Prefalla, Falla y Postfalla*

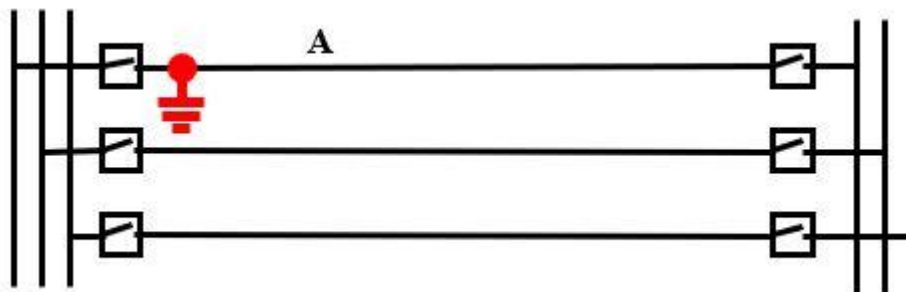
Tabla: Ejemplo									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vcn	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
I1 A	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I1 B	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I1 C	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 A	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 B	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
I2 C	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz	0,00 A	0,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			500,0 ms			500,0 ms	

**5.3.1 Falla monofásica al inicio de la línea**

Para el primer caso se ejecuta una falla en la fase A, al 5% de la línea. Como se representa en la Figura 51, ocurre una falla en la fase A y tierra al inicio de la línea.

**Figura 51.**

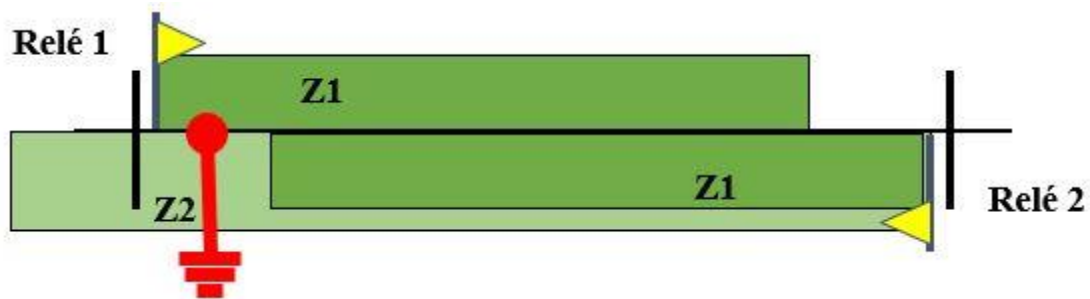
*Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



A continuación, la Figura 52 representa el alcance de los relés a la falla monofásica, siendo la zona 1 del relé 1 y la zona 2 del relé 2 para este escenario.

**Figura 52.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica al Inicio de la Línea*

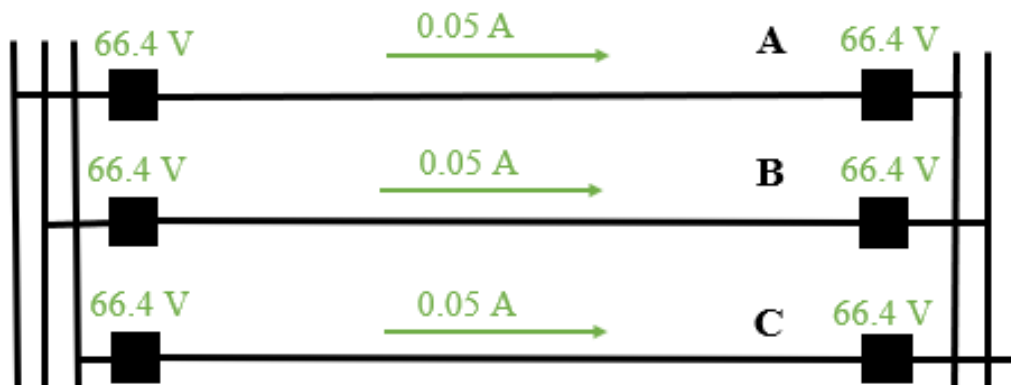


Se debe agregar la información de tensión y corriente al módulo de pruebas, para esto se hace uso de la Tabla 10 y un análisis que se encuentra a continuación. En el módulo de pruebas se definieron tres estados del evento (prefalla, falla y postfalla) el equipo Omicron inyecta cada estado a los relés. Para el escenario de una falla monofásica al inicio de la línea:

**-Prefalla:** Condición anterior a la falla en la cual el sistema de potencia se encuentra en un estado estable. Para la prefalla se utilizaron valores de tensión y corriente de la Tabla 4, siendo 66.4 V y 50 mA respectivamente. Los ángulos de tensión y corrientes se encuentran en perfecto equilibrio, el relé 1 detecta una corriente en un sentido y el relé 2 detecta la misma corriente en sentido contrario, motivo por el cual los ángulos de ambas corrientes están a 180 grados. El tiempo total del estado de prefalla es de 500 ms. En la Figura 53 se representa la línea de transmisión en condición estable, con los interruptores cerrados, donde las corrientes nominales (encontradas en la Tabla 4) fluyen por la línea y las tensiones de cada fase en cada subestación son las mismas. Todos los casos tendrán el mismo estado de prefalla, pues se considera el mismo estado estable en todos los escenarios.

**Figura 53.**

*Estado de Prefalla para el Primer Escenario*



En la tabla a continuación se observa la información extraída de la figura y el análisis anterior para la prefalla. Se muestra la tensión a inyectar a ambos relés, las corrientes para el relé 1 y 2 y los ángulos también de cada variable.

**Tabla 11.**

*Variables para el Estado de Prefalla*

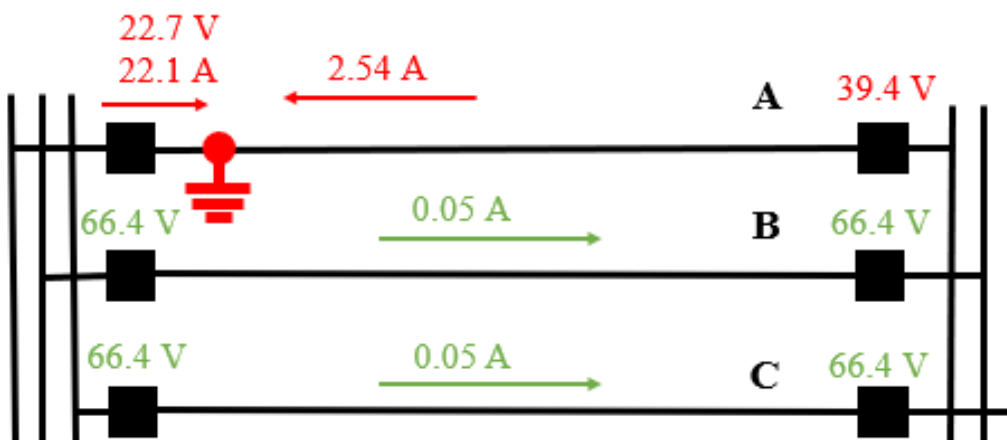
Variables	Fases	Prefalla	
		Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase A al 5% del relé 1			
Tensión [V]	A	66.4	0
	B	66.4	120
	C	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10
	B	0.05	-130
	C	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170
	B	0.05	50
	C	0.05	-70

Los valores de la tabla anterior para el estado de prefalla se ingresan en la tabla que el módulo de prueba proporciona, anexando cada magnitud de variable en la casilla correspondiente, en la Figura 54 se puede observar la tabla con las magnitudes de todas las variables para la prefalla, falla y postfalla.

**-Falla:** Condición en la que ocurre el cortocircuito. La tensión y corriente de la fase afectada varían por la falla. Para este caso, la tensión de la fase A disminuyó a 42 V y las corrientes que detectan los relés 1 y 2 se incrementarían a 20 A y 1.05 A respectivamente, las magnitudes anteriores calculadas se encuentran en la Tabla 10. El ángulo de la tensión se reduce a cero y los ángulos de las corrientes adoptan el ángulo de la línea de transmisión que es -82 grados. En la Figura 52 se observa la representación de la falla al inicio de la línea en la fase A, las magnitudes y las direcciones de las corrientes de falla en la fase fallada.

**Figura 54.**

*Estado de Falla para el Primer Escenario*



A continuación, la tabla con la información a suministrar al módulo de pruebas para el caso de falla del presente escenario. En la tabla se encuentran los datos de las variables para el estado de falla.

**Tabla 12.**

*Variables para el Estado de Falla*

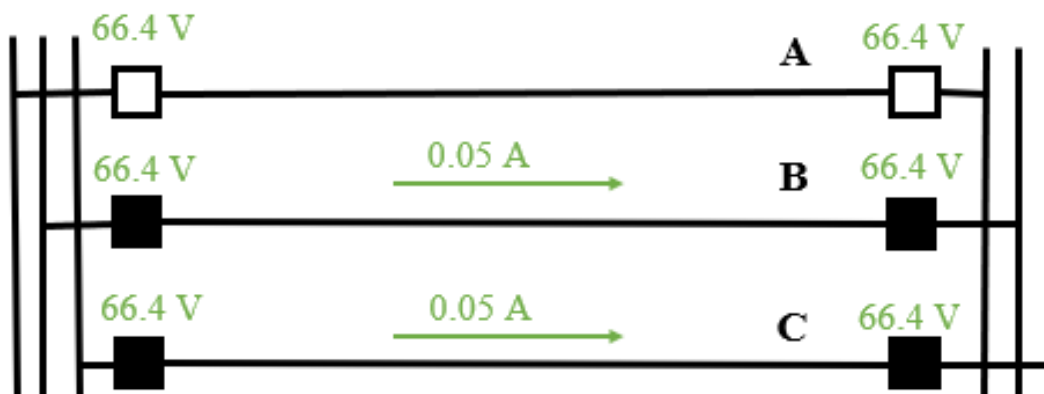
Variables	Fases	Falla	
		Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase A al 5% del relé 1			
Tensión [V]	A	39.8	-5.1
	B	66.4	120
	C	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	22.1	-82
	B	0.05	-130
	C	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	2.54	-82
	B	0.05	50
	C	0.05	-70

En la Figura 56 se observa la tabla con la información del estado de falla junto los otros estados de prefalla y postfalla.

**-Postfalla:** Condición después de que los interruptores se abran. En la postfalla las fases sanas continúan en estado estable y solo los valores de las fases falladas tienen magnitud de cero, debido a que este estado es después que los interruptores abran el circuito primario donde ocurrió la falla. Por lo tanto, la magnitud de la tensión y corrientes de la fase A en cero y se considera que las demás fases se encuentran en estado estable. En la Figura 55 se observa el último estado donde los interruptores de la fase fallada están abiertos debido al despeje efectivo de la falla, por lo tanto, no hay corriente en esa fase.

**Figura 55.**

*Estado de Postfalla para el Primer Escenario*



Las tensiones de la falla en el circuito abierto de la fase A vuelven a su valor nominal de 66.4 V, las tensiones y corrientes de las otras fases siguen en estabilidad. Estos datos se encuentran en la siguiente tabla los cuales luego se ingresan al módulo de pruebas para inyectar al esquema de protección.

**Tabla 13.**




*Variables para el Estado de Postfalla*

Variables	Fases	Postfalla	
		Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase A al 5% del relé 1			
Tensión [V]	A	0	0
	B	66.4	120
	C	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0	0
	B	0.05	-130
	C	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0	0
	B	0.05	50
	C	0.05	-70

La información de las Tablas 11, 12 y 13 se consignan en cada casilla del módulo de pruebas que se muestra en la Figura 56. La siguiente figura del módulo contiene la información de prefalla, falla y postfalla a inyectar al esquema.

**Figura 56.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Primer Escenario*

Tabla: Primer Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	39,80 V	-5,10 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	22,10 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-120,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	120,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	2,540 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			300,0 ms			500,0 ms	

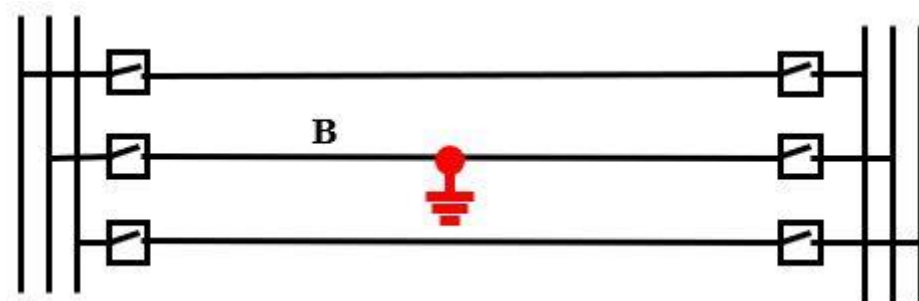
El resultado esperado es que el relé 1 opere en zona 1 (instantáneamente) y el relé 2 opere en zona 2 de forma acelerada debido a la acción de la teleprotección. El resultado se mostrará en el siguiente subcapítulo.

### 5.3.2 *Falla monofásica a la mitad de la línea*

Este escenario es una falla en fase B al 50% de la línea como se observa en la Figura 57.

**Figura 57.**

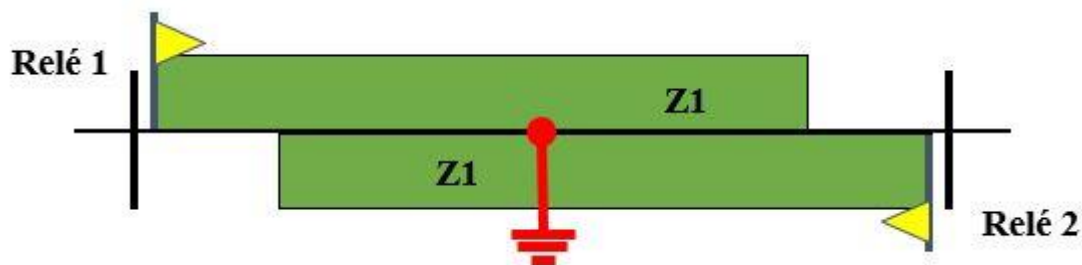
*Falla Monofásica a la Mitad de la Línea*



La Figura 58 muestra el alcance de los relés a la falla.

**Figura 58.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica a la mitad de la Línea*



Valores de tensión y corrientes para inyección del segundo escenario. En la siguiente tabla se encuentran los datos de tensión y corriente a inyectar para el escenario de una falla monofásica a la mitad de la línea.

**Tabla 14.**

*Variables de Ejecución para Falla Monofásica a la Mitad de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase B al 50% del relé 1							

Tensión [V]	A	66.4	0	66.4	0	66.4	0
	B	66.4	120	23.5	-8.2	0	0
	C	66.4	-120	66.4	-120	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10	0.05	-10	0.05	0
	B	0.05	-130	4.7	-82	0	0
	C	0.05	110	0.05	110	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	0.05	170	0.05	0
	B	0.05	50	4.7	-82	0	0
	C	0.05	-70	0.05	-70	0.05	-70

Valores del segundo caso agregados al módulo State Sequencer.

**Figura 59.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Segundo Escenario*

Tabla: Segundo Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	23,50 V	-8,20 °	60,000 Hz	0,00 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	4,700 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-120,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	120,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	4,700 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			150,0 ms			500,0 ms	

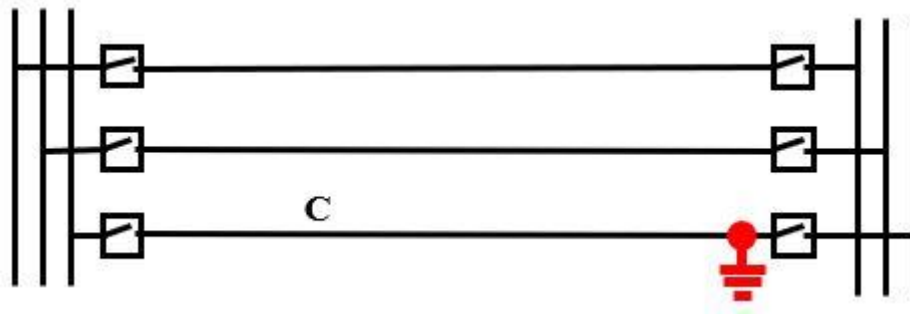
El resultado esperado es que ambos relés operen en zona 1 (instantáneamente).

### 5.3.3 *Falla monofásica al final de la línea*

El presente caso es una falla al 95% de la línea en la fase C.

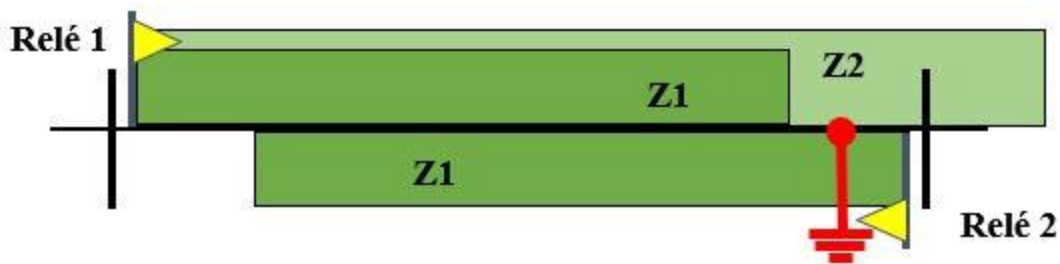
**Figura 60.**

*Falla Monofásica al Final de la Línea*



**Figura 61.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica al final de la Línea*



En la Tabla 15 y en la Figura 62 se observan las variables de tensión y corrientes para poder ejecutarlas desde el módulo State sequencer.

**Tabla 15.**

*Pará Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Final de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase C al 95% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	66.4	0	66.4	0
	B	66.4	120	66.4	120	66.4	120
	C	66.4	-120	22.7	-5.1	0	0
Corriente	A	0.05	-10	0.05	-10	0.05	-10
Relé 1 [A]	B	0.05	-130	0.05	-130	0.05	-130

	C	0.05	110	2.54	-82	0	0
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	0.05	170	0.05	170
	B	0.05	50	0.05	50	0.05	50
	C	0.05	-70	22.1	-82	0	0

**Figura 62.**

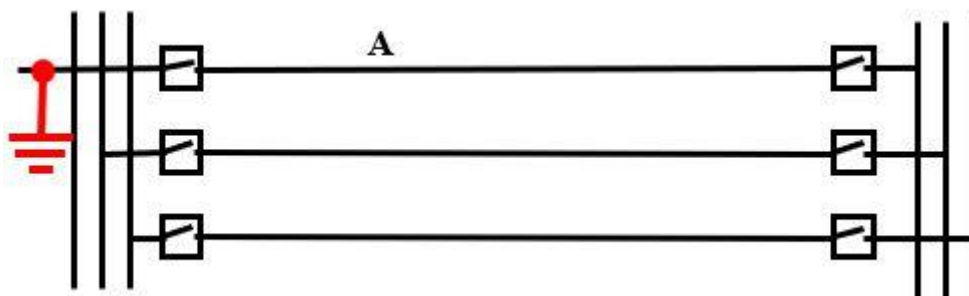
*Valores en el Módulo para la Ejecución del Tercer Escenario*

Tabla: Tercer Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	22,70 V	-5,10 °	60,000 Hz	0,00 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	2,540 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	22,10 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			150,0 ms			500,0 ms	

El resultado esperado es que el relé 1 detecta la falla en zona 2 y el relé 2 opere en zona 1 de forma instantánea, luego envía la señal de disparo al relé 1 y así realizar las señales de disparo desde ambos relés protegiendo la línea.

### 5.3.4 *Falla monofásica en la línea adyacente cerca de la barra*

El presente caso es una falla externa que consiste en ejecutar una falla al -5% de la línea, una falla entre el relé 1 y parte de la línea adyacente. Este caso representa las posibles fallas entre el relé 1 y la barra.

**Figura 63.***Falla Monofásica en la Línea Adyacente*

Las zonas de los relés que deberían actuar en este caso debe ser solamente la zona 2 temporizada del relé 2, ya que la zona reversa es una zona de respaldo para la otra línea y no debería actuar antes que la zona 1 o 2 de la línea anterior.

**Figura 64.***Alcance de los Relés para Falla Monofásica en la Línea Adyacente*

En la Tabla 16 y en la Figura 65 se observa las variables de tensión y corrientes para inyectarlas desde el módulo de pruebas.

**Tabla 16.**

*Variables de Ejecución para Falla Monofásica en la Línea Adyacente*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase A al -5% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	34.4	6.4	0	0
	B	66.4	120	66.4	120	66.4	120
	C	66.4	-120	66.4	-120	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10	28.9	98	0	0
	B	0.05	-130	0.05	-130	0.05	-130
	C	0.05	110	0.05	110	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	2.3	-82	0	0
	B	0.05	50	0.05	50	0.05	50
	C	0.05	-70	0.05	-70	0.05	-70

**Figura 65.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Cuarto Escenario*

Tabla: Cuarto Caso									
	1			2			3		
Nombre	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	34,40 V	6,40 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	28,90 A	98,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	2,300 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			600,0 ms			500,0 ms	

En una línea de transmisión se espera que, bajo fallas externas, los relés de dicha línea sean los que actúen y los relés de respaldo de la línea principal arranquen, pero no operen. Este escenario de falla es una línea aislada donde hay dos relés, por lo tanto, se desea probar las zonas de los relés y se espera que el relé 1 opere por zona reversa (temporizadamente) y el relé 2 opere por zona 2

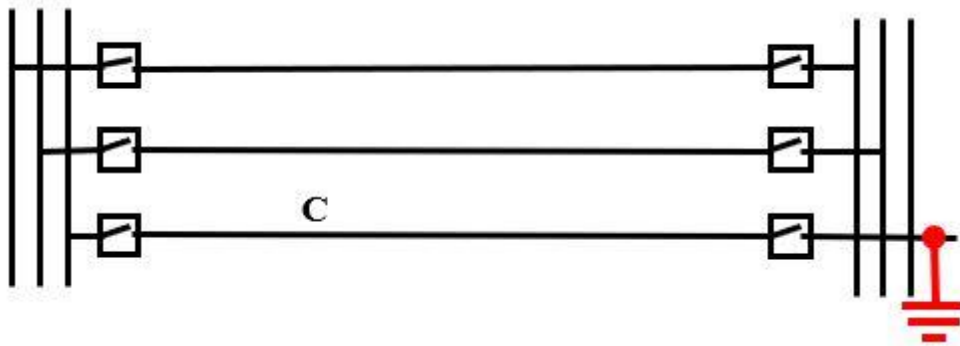
(temporizadamente). De esta forma se verifica que los relés operan por zona 2 y zona reversa temporizadamente.

**5.3.5 Falla monofásica en la siguiente línea cerca de la barra**

Para otra falla externa en la fase C al 105% de la línea como se observa en la Figura 66. Una falla en la línea entre el relé 2 parte de la línea adyacente. Este caso representa las posibles fallas entre el relé 2 y la barra.

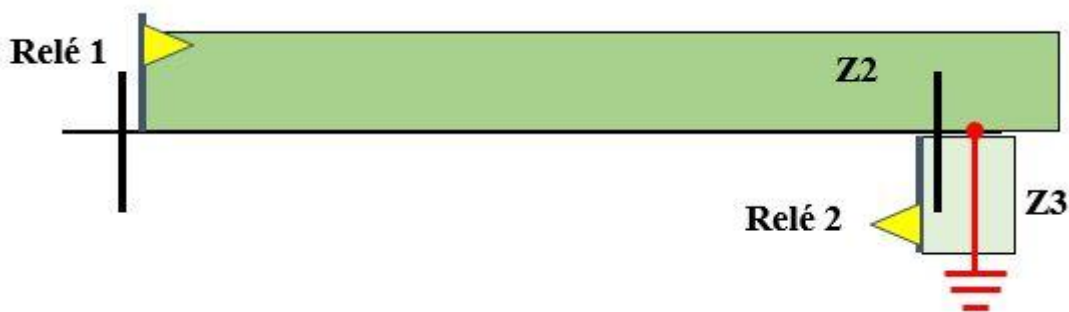
**Figura 66.**

*Falla Monofásica en la Línea Siguiete*



**Figura 67.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica en la Línea Siguiete*



En la Tabla 17 y en la Figura 68 se observa los datos a inyectar desde el módulo de pruebas.

**Tabla 17.**

*Variables de Ejecución para Falla Monofásica en la Siguiete línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase C al 105% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	66.4	0	66.4	0
	B	66.4	120	66.4	120	66.4	120
	C	66.4	-120	34.4	6.4	0	0
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10	0.05	-10	0.05	-10
	B	0.05	-130	0.05	-130	0.05	-130
	C	0.05	110	28.9	-82	0	0
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	0.05	170	0.05	170
	B	0.05	50	0.05	50	0.05	50
	C	0.05	-70	2.3	98	0	0

**Figura 68.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Quinto Escenario*

Tabla: Quinto Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	34,40 V	6,40 °	60,000 Hz	0,00 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	28,90 A	38,00 °	60,000 Hz	0,00 A	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	2,300 A	218,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			600,0 ms			500,0 ms	

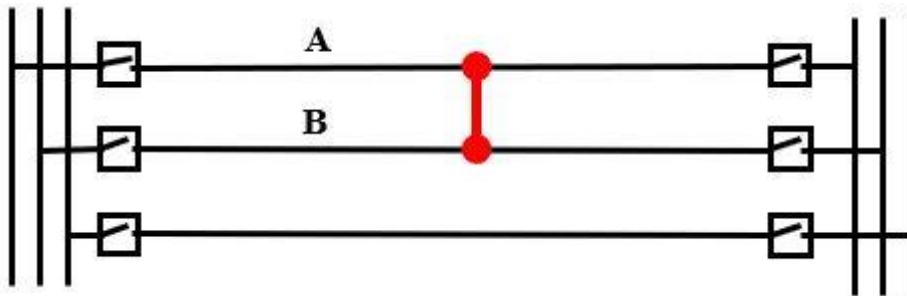
Las zonas de los relés que deberían actuar en este caso debe ser solamente la zona 2 temporizada del relé 1, ya que la zona reversa es una zona de respaldo para la otra línea y no debería actuar antes que la zona 1 o 2 de la siguiente línea.

**5.3.6 Falla bifásica a la mitad de la línea**

Este caso consiste en inyectar una falla bifásica a la mitad de la línea entre las fases A y B. La Figura 69 muestra la representación de la falla y la Figura 70 muestra el alcance de los relés a la falla.

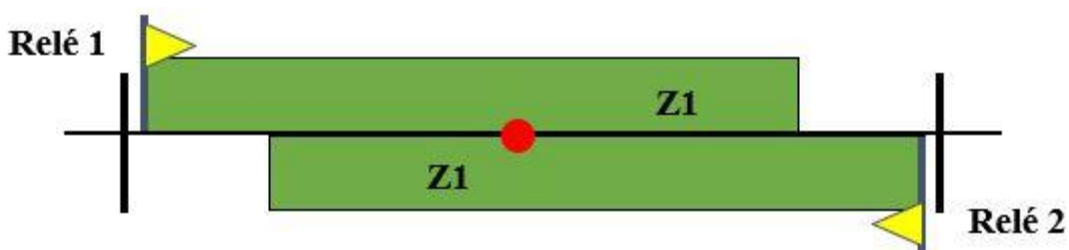
**Figura 69.**

*Falla Bifásica a la Mitad de la Línea*



**Figura 70.**

*Alcance de los Relés para Falla Bifásica en la mitad de la Línea*



En la Tabla 18 y en la Figura 71 se observa las tensiones y corrientes a inyectar en el sexto escenario al esquema de protección.

**Tabla 18.**

*Variables de Ejecución para Falla Bifásica a la Mitad de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla bifásica entre la fase A y B al 50% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	32.4	5.2	0	0
	B	66.4	120	32.4	5.2	0	0
	C	66.4	-120	66.4	-120	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10	2.4	-82	0	0
	B	0.05	-130	2.4	98	0	0
	C	0.05	110	0.05	110	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	2.4	-82	0	0
	B	0.05	50	2.4	98	0	0
	C	0.05	-70	0.05	-70	0.05	-70

**Figura 71.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Sexto Escenario*

Tabla: Sexto Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	32,40 V	5,20 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	32,40 V	5,20 °	60,000 Hz	0,00 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	2,400 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	2,400 A	98,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	2,400 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	2,400 A	98,00 °	60,000 Hz	0,00 A	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			600,0 ms			500,0 ms	

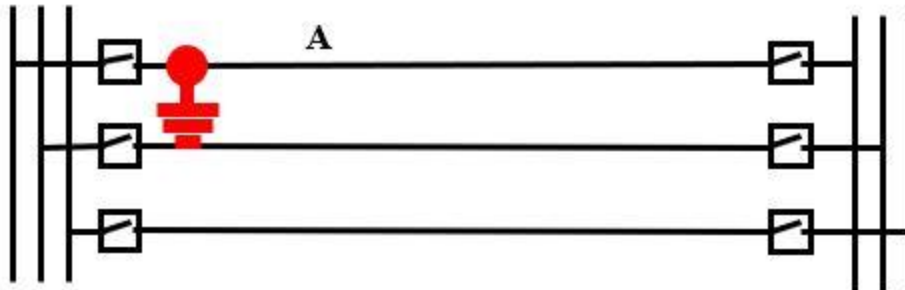
El resultado esperado es que ambos relés operen en zona 1 (instantáneamente).

### 5.3.7 Falla monofásica de alta impedancia al inicio de la línea

El séptimo caso consiste en ejecutar una falla al 5% de la línea con una resistencia de falla de 50 Ω. En la Figura 72 se observa la representación de la falla.

**Figura 72.**

*Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



En la Figura 73 se observa el alcance de los relés a la falla.

**Figura 73.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica al inicio de la Línea*



**Tabla 19.**

*Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Inicio de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase A al 5% del relé 1 a alta impedancia							

Tensión [V]	A	66.4	0	33.9	-16.9	0	0
	B	66.4	120	66.4	120	66.4	120
	C	66.4	-120	66.4	-120	66.4	-120
Corriente Relé 1 [A]	A	0.05	-10	2.63	-82	0	0
	B	0.05	-130	0.05	-130	0.05	-130
	C	0.05	110	0.05	110	0.05	110
Corriente Relé 2 [A]	A	0.05	170	1.7	-82	0	0
	B	0.05	50	0.05	50	0.05	50
	C	0.05	-70	0.05	-70	0.05	-70

**Figura 74.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Séptimo Escenario*

Tabla: Séptimo Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	33,90 V	-16,90 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	2,630 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	1,700 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			300,0 ms			500,0 ms	

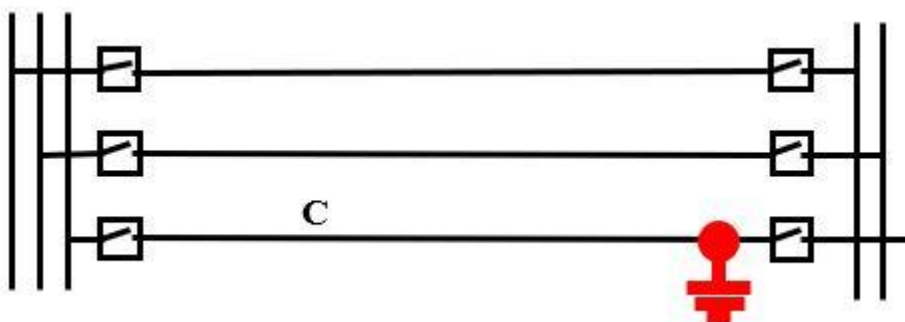
El resultado esperado es que el relé 1 opere en zona 1 (instantáneamente) y el relé 2 opere en zona 2 de forma acelerada.

### 5.3.8 *Falla monofásica de alta impedancia al final de la línea*

El octavo caso consiste en inyectar una falla al 95% de la línea con una resistencia de falla de 50 Ω. En la Figura 75 se observa la representación de la falla.

**Figura 75.**

*Falla Monofásica al Final de la Línea*



**Figura 76.**

*Alcance de los Relés para Falla Monofásica al Final de la Línea*



En la Tabla 20 y en la Figura 77 se observa la información necesaria para poder ejecutar desde el módulo de pruebas el octavo escenario.

**Tabla 20.**




*Variables de Ejecución para Falla Monofásica al Final de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla monofásica en la fase C al 95% del relé 1 a alta impedancia							
Tensión [V]	A	66.4	0	66.4	0	66.4	0
	B	66.4	120	66.4	120	66.4	120
	C	66.4	-120	33.9	-16.9	0	0
	A	0.05	-10	0.05	-10	0.05	-10

Corriente	B	0.05	-130	0.05	-130	0.05	-130
Relé 1 [A]	C	0.05	110	1.7	38	0	0
Corriente	A	0.05	170	0.05	170	0.05	170
Relé 2 [A]	B	0.05	50	0.05	50	0.05	50
	C	0.05	-70	2.63	38	0	0

**Figura 77.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Octavo Escenario*

Tabla: Octavo Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	33,90 V	-16,90 °	60,000 Hz	0,00 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	1,050 A	38,00 °	60,000 Hz	0,00 A	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	20,00 A	38,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			300,0 ms			500,0 ms	

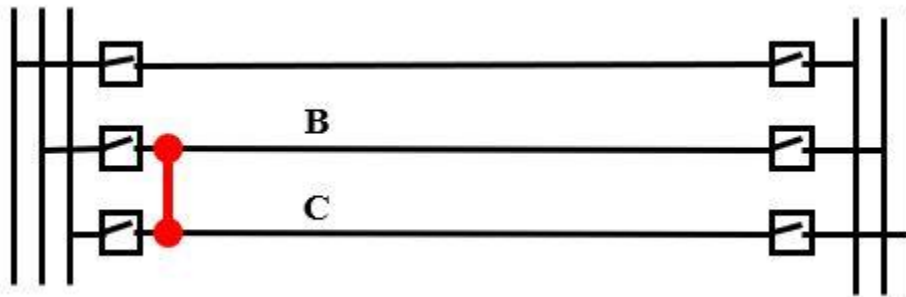
El resultado esperado es que el relé 1 detecta la falla en zona 2 y el relé 2 opere en zona 1 de forma instantánea.

### 5.3.9 *Falla bifásica al inicio de la línea*

El noveno caso consiste en inyectar una falla bifásica al 5% de la línea entre la fase B y C, como se muestra en las siguientes figuras.

**Figura 78.**

*Falla Bifásica al Inicio de la Línea*



**Figura 79.**

*Alcance de los Relés para Falla Bifásica al Inicio de la Línea*



En la Tabla 21 y en la Figura 80 se observa la información necesaria para inyectar desde el módulo el noveno escenario.

**Tabla 21.**

*Variables de Ejecución para Falla Bifásica al Inicio de la Línea*

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla bifásica entre la fase B y C al 5% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	66.4	0	66.4	0
	B	66.4	120	22.8	39.1	0	0
	C	66.4	-120	32.9	3	0	0
	A	0.05	-10	0.05	-10	0.05	-10

Corriente	B	0.05	-130	16.9	-202	0	0
Relé 1 [A]	C	0.05	110	16.9	-22	0	0
Corriente	A	0.05	170	0.05	170	0.05	170
Relé 2 [A]	B	0.05	50	1.24	-202	0	0
	C	0.05	-70	1.24	-22	0	0

**Figura 80.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Noveno Escenario*

Tabla: Noveno Caso									
Nombre	1			2			3		
	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	22,80 V	39,10 °	60,000 Hz	0,00 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	32,90 V	3,00 °	60,000 Hz	0,00 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	16,90 A	-202,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	16,90 A	-22,00 °	60,000 Hz	0,00 A	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	1,240 A	-202,00 °	60,000 Hz	0,00 A	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	1,240 A	-22,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			300,0 ms			500,0 ms	

El resultado esperado es que el relé 1 opere en zona 1 (instantáneamente) y el relé 2 opere en zona 2 de forma acelerada.

**5.3.10 Falla bifásica al final de la línea**

El último caso consiste en inyectar una falla bifásica al 95% de la línea entre la fase A y B.

En la Figura 81 se observa la representación de la falla.

**Figura 81.**

*Falla Bifásica al Final de la Línea*

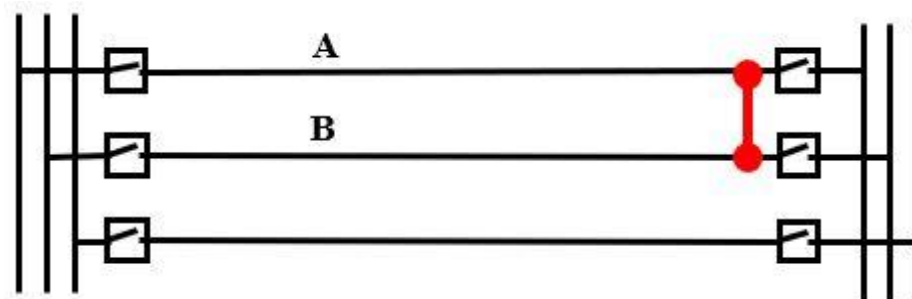


Figura 82.

Alcance de los Relés para Falla Bifásica al Final de la Línea



En la Tabla 22 se observa la información necesaria para poder ejecutar el décimo caso al esquema de protección.

Tabla 22.

Variables de Ejecución para Falla Bifásica al Final de la Línea

Variables	Fases	Prefalla		Falla		Postfalla	
		Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
Falla bifásica entre la fase A y B al 95% del relé 1							
Tensión [V]	A	66.4	0	32.9	3	0	0
	B	66.4	120	22.8	39.1	0	0
	C	66.4	-120	66.4	-120	66.4	-120
	A	0.05	-10	1.24	-82	0	0

Corriente	B	0.05	-130	1.24	98	0	0
Relé 1 [A]	C	0.05	110	0.05	110	0.05	110
Corriente	A	0.05	170	16.9	-82	0	0
Relé 2 [A]	B	0.05	50	16.9	98	0	0
	C	0.05	-70	0.05	-70	0.05	-70

Se anexan los valores calculados para el décimo escenario a la tabla de estados que proporciona el módulo de pruebas.

**Figura 83.**

*Valores en el Módulo para la Ejecución del Décimo Escenario*

Tabla: Décimo Caso									
	1			2			3		
Nombre	Prefalla			Falla			Postfalla		
Van	66,40 V	0,00 °	60,000 Hz	32,90 V	3,00 °	60,000 Hz	0,00 V	0,00 °	60,000 Hz
Vbn	66,40 V	-120,00 °	60,000 Hz	22,80 V	39,10 °	60,000 Hz	0,00 V	-120,00 °	60,000 Hz
Vcn	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz	66,40 V	120,00 °	60,000 Hz
I1 A	50,00 mA	-10,00 °	60,000 Hz	1,240 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-10,00 °	60,000 Hz
I1 B	50,00 mA	-130,00 °	60,000 Hz	1,240 A	98,00 °	60,000 Hz	0,00 A	-130,00 °	60,000 Hz
I1 C	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	110,00 °	60,000 Hz
I2 A	50,00 mA	170,00 °	60,000 Hz	16,90 A	-82,00 °	60,000 Hz	0,00 A	170,00 °	60,000 Hz
I2 B	50,00 mA	50,00 °	60,000 Hz	16,90 A	98,00 °	60,000 Hz	0,00 A	50,00 °	60,000 Hz
I2 C	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz	50,00 mA	-70,00 °	60,000 Hz
CMC Rel	2 salida(s) activa(s)			2 salida(s) activa(s)			0 salida(s) activa(s)		
Trigger		500,0 ms			600,0 ms			500,0 ms	

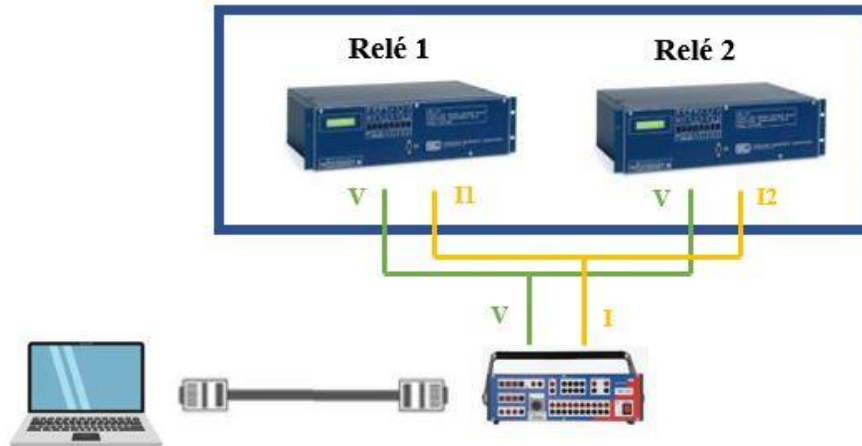
El resultado esperado es que el relé 1 detecta la falla en zona 2 y el relé 2 opere en zona 1 de forma instantánea.

**5.4 Ejecución de las fallas al esquema de protección**

Se utilizó el equipo Omicron CMC 356 para ejecutar las fallas al esquema de protección. Se realiza la conexión desde el PC al equipo Omicron para ejecutar las pruebas al esquema de protección. Se empleó un cable generador-combinador propio del equipo Omicron para el conexionado de las tensiones y corrientes desde el equipo al gabinete.

**Figura 84.**

*Esquema de Conexión del PC al Omicron y al Gabinete*



En la siguiente figura se observa la parte frontal del Omicron CMC 356 con sus salidas y entradas.

**Figura 85.**

*Parte Frontal del Omicron*



Nota: Adaptado de Guía Metodológica para Pruebas de Relés de Protección Multifuncional con el Equipo Omicron CMC, Pag 27. Figura modificada por el autor del presente trabajo de grado.

Se necesitan la salida trifásica de tensión y las dos salidas trifásicas de corriente del equipo Omicron marcadas en verde en la figura anterior. Pero se puede utilizar un conector trifásico de tensión y corriente llamado “zócalo”. En la Figura 86 se observa la conexión de las salidas del Omicron por medio del zócalo y una salida trifásica de corriente.

### Figura 86.

*Estudiante realizando la conexión del Omicron*



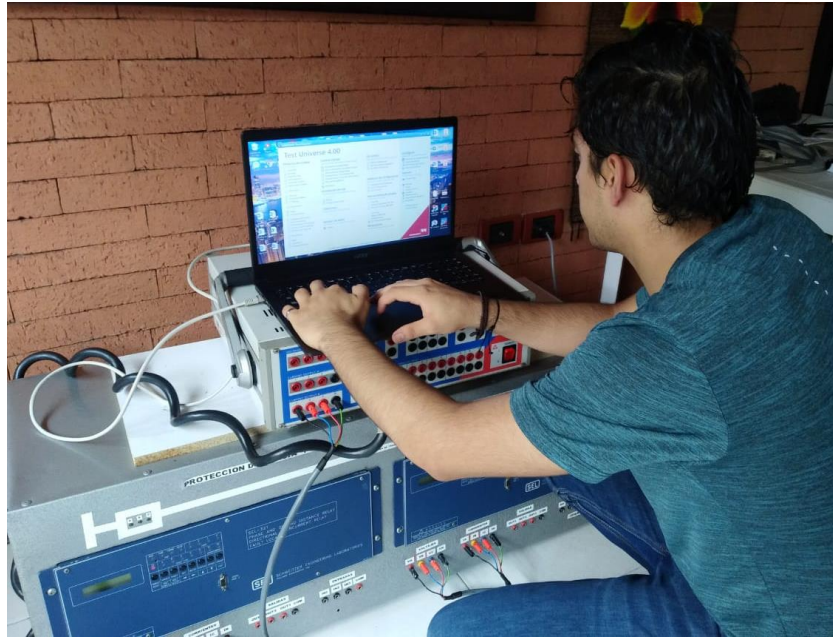
En la Figura 87 se observa el conexionado empleado para este trabajo de grado, donde las salidas analógicas de tensión se conectan a la parte frontal del gabinete en las respectivas entradas de tensión de cualquier relé, luego se realiza un puente con las entradas de tensión del otro relé, representando la misma tensión en los extremos de la línea de transmisión. Se conecta la salida de corriente 1 y 2 del Omicron a las bananas del gabinete del relé 1 y rele 2 respectivamente, inyectando la corriente detectada por ambos relés.

**Figura 87.**

*Conexión del Omicron al Gabinete*

**Figura 88.**

*Estudiante ejecutando pruebas Utilizando el Omicron*



Al tener conectado el PC al Omicron y luego al gabinete, se procede a ejecutar las pruebas al esquema, se utilizan los comando de comenzar, parar, pausar y borrar pruenas en el módulo donde se encuentran cargadas las tablas con la información de los estados de la falla.

**Figura 89.**

*Barra de Herramientas de Pruebas*



## 5.5 Resultado de las pruebas

En este capítulo se anexaron los resultados de la ejecución de las pruebas al esquema de protección. Después de ejecutado algún caso de estudio, los relés SEL-321 del esquema de protección operan y se evidencia en el registro visual del panel frontal del relé. Al final del capítulo se mostrará los tiempos de operación del esquema de protección y la diferencia a un esquema sin teleprotección.

### Figura 90.

*Parte Frontal del Relé 1*

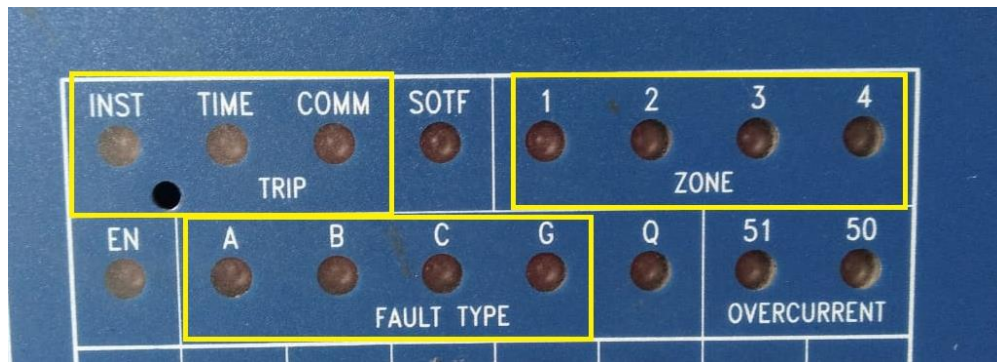


En la Figura 91 se puede observar los posibles resultados de operación del relé SEL-321 encontradas en el panel frontal, los LEDs que se enciendan corresponden al tipo y zona de actuación y las fases involucradas. En el cuadro superior izquierdo se observa el registro para una actuación

instantánea (INST), temporizada (TIME) y acelerada por teleprotección (COMM). En el cuadro superior derecho están las posibles zonas en las cuales el relé detecta la falla (1, 2, 3 y 4) y en el cuadro inferior se observa las posible fases involucradas en la falla (A, B y C).

**Figura 91.**

*Panel Frontal del Relé*



Los resultados de los diferentes escenarios de estudio se presentan a continuación.

### 5.5.1 *Falla monofásica al inicio de la línea*

Al inyectar una falla en la fase A, al 5% del relé 1 y al 95% del relé 2 se tiene el resultado de operación del esquema de protección como se observa en la Figura 92.

**Figura 92.**

*Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



Ambos relés detectaron la falla en la fase A de la línea, el relé 1 detectó la falla en la zona 1 operando instantáneamente y el relé 2 detectó la falla en la zona 2 operando aceleradamente debido a la teleprotección. La actuación del esquema de protección para el primer caso fue correcto como lo muestra el apéndice A.

### 5.5.2 *Falla monofásica a la mitad de la línea*

Para una falla en la fase B y al 50% de la línea, se observa en la Figura 93 la operación instantánea de ambos relés, ya que la detectaron la falla en la zona 1.

**Figura 93.**

*Falla Monofásica a la Mitad de la Línea*



Los dos relés detectaron la falla en la mitad de la línea, por lo tanto, operaron en zona 1. El esquema de protección para el segundo caso operó correctamente. Véase el apéndice A.

### 5.5.3 *Falla monofásica al final de la línea*

Para una falla al 95% del relé 1 y al 5% del relé 2 se observa el registro visual de los relés en la siguiente figura.

**Figura 94.**

*Falla Monofásica al Final de la Línea*



Se observó que el relé 1 operó en zona 2 aceleradamente, debido a la señal de operación del relé 2 que detectó la falla en zona 1. El esquema de protección operó de forma correcta, realizando la orden de disparos rápidamente. Véase el apéndice A.

**5.5.4 Falla monofásica en la línea adyacente cerca de la barra**

Una falla de baja resistencia en fase A al -5% del relé 1 y del 105% del relé 2, esto representa una falla entre el relé 1 y la línea adyacente. Se muestra los resultados de en la Figura 95.

**Figura 95.**

*Falla Monofásica en la Línea Adyacente*



Para este escenario, el relé 2 operó de forma temporizada en zona 2, el relé 1 detectó la falla en la zona reversa pero no operó ya que la falla no está en la línea principal y el relé 2 detectó la falla en la zona 2. El esquema operó de forma deseada y detectó la falla en las zonas esperadas. Para este escenario, algún relé de la otra línea debería operar en zona 1 para abrir el interruptor de la línea y así cortar la alimentación a la falla. Véase el apéndice A.

### 5.5.5 *Falla monofásica en la siguiente línea cerca de la barra*

Este caso es una falla de baja resistencia en la fase C al 105% del relé 1 y al -5% del relé 2, esto hace referencia a una falla entre el relé 2 y la otra línea. En la Figura 96 se observan los resultados.

**Figura 96.**

*Falla Monofásica en la Siguiete Línea*



El resultado del quinto caso es la operación temporizada del relé 1 en zona 2 sin que el relé 2 operara en zona reversa. El esquema operó de forma correcta para el quinto escenario. Véase el apéndice A.

### 5.5.6 *Falla bifásica a la mitad de la línea*

Para el sexto caso se realiza una falla bifásica (fase A y B) a la mitad de la línea, y la operación de los relés se observa en la Figura 97.

**Figura 97.**

*Falla Bifásica a la Mitad de la Línea*



Se puede observar que ambos relés que detectan una falla entre la fase A y B. La orden de disparo de la falla se produce de forma instantánea en zona 1. La actuación del esquema de protección para este caso es correcta. Véase el apéndice A.

**5.5.7 Falla monofásica de alta impedancia al inicio de la línea**

Para una falla monofásica de alta resistencia en la fase A al 5% del relé 1 y al 95% del relé 2. La actuación de los relés se observa en la siguiente figura.

**Figura 98.**

*Falla Monofásica al Inicio de la Línea*



El resultado es muy similar al del primer caso, operación instantánea del relé 1 y operación acelerada del rele 2. El despeje de la falla se produce de forma instantánea. La actuación del esquema de protección del séptimo caso es correcta. Véase el apéndice A.

### 5.5.8 *Falla monofásica de alta impedancia al final de la línea*

Para una falla monofásica al final de la línea en fase C se tiene el resultado en la Figura 99.

**Figura 99.**

*Falla Monofásica al Final de la Línea*



El resultado del octavo caso es muy similar al del tercer caso, operación acelerada del relé 1 y operación instantánea del rele 2. El despeje de la falla se produce de forma instantánea. La actuación del esquema de protección del octavo caso es correcta. Véase el apéndice A.

### 5.5.9 *Falla bifásica al inicio de la línea*

Para una falla bifásica entre las fases B y C, al 5% del relé 1.

**Figura 100.**

*Falla Bifásica al Inicio de la Línea*



Para este caso, se observa que los relés detectan la falla en la fase B y C, el relé 1 opera instantáneamente (falla en zona 1) y el relé 2 opera aceleradamente (falla en zona 2). Los relés operan instantáneamente y el esquema actúa correctamente. Véase el apéndice A.

**5.5.10 Falla bifásica al final de la línea**

Para el último caso se realizó una falla bifásica en las fases A y B al 95% del relé 1. En la Figura 101 se observa la operación de los relés.

**Figura 101.**

*Falla Monofásica al Final de la Línea*



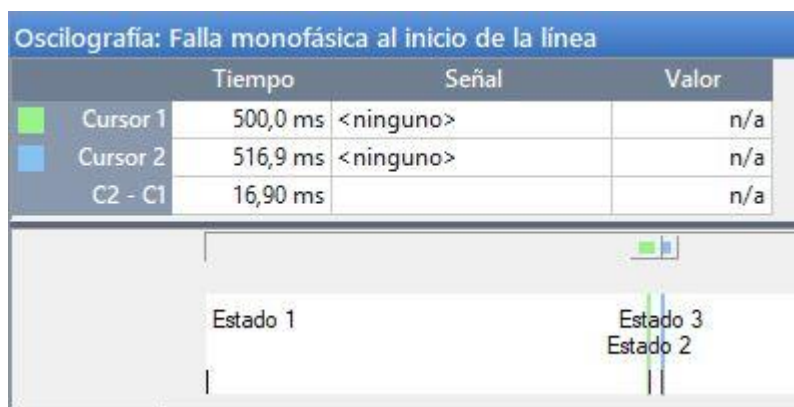
Los relés muestran la actuación acelerada del relé 2 e instantánea del relé 1. Este caso tuvo una actuación correcta del esquema de protección. Véase el apéndice A.

## 5.6 Tiempos de operacion

Para que se proteja una línea de forma correcta en escenario de falla, es necesario que ambos relés de distancia envíen la orden de disparo a los interruptores para abrir el circuito primario y así despejar la falla. Para el caso de una falla monofásica al inicio de la línea, se obtiene el resultado de los tiempos de operación en el módulo de pruebas como se observa a continuación.

### Figura 102.

*Tiempo de Orden de Disparo para un Escenario*



La Figura 102 muestra el tiempo de cada estado, primero se observa el estado de prefalla, luego ocurre el estado de falla que solo se demoró 16.9 ms debido a la actuación de la teleprotección para acelerar el disparo y por último un tiempo de posfalla. En la Tabla 23 se observa el tiempo en el cual los relés operan con teleprotección y sin teleprotección para cada prueba y el tiempo de diferencia entre las actuaciones.

**Tabla 23.***Tiempo de Actuación del Esquema de Protección*

<b>Tiempo de Detección de Falla y Orden de Disparo</b>			
<b>Caso</b>	<b>Con Teleprotección (ms)</b>	<b>Sin Teleprotección (ms)</b>	<b>Diferencia (ms)</b>
1	16.9	220	203.1
2	13.8	20	3.1
3	18.9	220	201.1
4	215.4	320	304.6
5	218.1	320	301.9
6	14.3	20	5.7
7	9.2	220	210.8
8	13.7	220	206.3
9	18.9	220	201.1
10	11.7	220	208.3

Para los escenarios de fallas cercanos a alguna barra (1, 3, 7, 8, 9 y 10) la detección y orden de disparo con teleprotección fue instantánea para el relé que detecta la falla en zona 1, los relés se demoraron menos de 20 ms para detectar la falla y ordenar el disparo por medio de la teleprotección al otro relé que detectó la falla en zona 2 permitiendo que opere aceleradamente. Si no se utiliza la teleprotección, un relé detecta la falla en zona 1 que actúa de forma instantánea y el otro relé la detecta en zona 2 que opera temporizadamente, es decir, la orden de disparo la envía a los 200 ms, dando la posibilidad de que la falla escale y provoque efectos indeseados en el sistema de potencia.

En los casos de falla en la mitad de la línea (2 y 6), ambos relés detectan la falla en zona 1 y actúan instantáneamente, sin interesar si envían la señal de detección de falla por medio de la teleprotección, la orden de disparo se hace efectiva.

Al observar el tiempo de diferencia entre la actuación del esquema, se evidencia las bondades de la teleprotección para acelerar las ordenes de disparos para despejar en el menor tiempo posible una falla en la línea.

### 5.7 Resumen de los casos

En la Tabla 24 se muestra el resumen de resultados de todas las pruebas realizadas.

**Tabla 24.**

*Resumen de resultados de las pruebas ejecutadas al esquema de protección*

Caso	Fases Falladas	Desde el Relé 1		Desde el Relé 2		Resultado
1	A	Distancia a falla	5%	Distancia a falla	95%	Correcto
		Zona	1	Zona	2	
		Actuación	Instantánea	Actuación	Acelerada	
2	B	Distancia a falla	50%	Distancia a falla	50%	Correcto
		Zona	1	Zona	1	
		Actuación	Instantánea	Actuación	Instantánea	
3	C	Distancia a falla	95%	Distancia a falla	5%	Correcto
		Zona	2	Zona	1	
		Actuación	Acelerada	Actuación	Instantánea	
4	A	Distancia a falla	-5%	Distancia a falla	105%	Correcto
		Zona	3	Zona	2	
		Actuación	No opera	Actuación	Temporizada	
5	C	Distancia a falla	105%	Distancia a falla	-5%	Correcto
		Zona	2	Zona	3	
		Actuación	Temporizada	Actuación	No Opera	
6	A y B	Distancia a falla	50%	Distancia a falla	50%	Correcto
		Zona	1	Zona	2	
		Actuación	Instantánea	Actuación	Instantánea	
7	A	Distancia a falla	5%	Distancia a falla	95%	Correcto
		Zona	1	Zona	2	
		Actuación	Instantánea	Actuación	Acelerada	
8	C	Distancia a falla	95%	Distancia a falla	5%	Correcto

<b>Caso</b>	<b>Fases Falladas</b>	<b>Desde el Relé 1</b>		<b>Desde el Relé 2</b>		<b>Resultado</b>
		Zona	2	Zona	1	
		Actuación	Acelerada	Actuación	Instantánea	
		Distancia a falla	5%	Distancia a falla	95%	
9	B y C	Zona	1	Zona	2	Correcto
		Actuación	Instantánea	Actuación	Acelerada	
		Distancia a falla	95%	Distancia a falla	5%	
10	A y B	Zona	2	Zona	1	Correcto
		Actuación	Acelerada	Actuación	Instantánea	

## 6. Conclusiones

- Al tener los dos relés, los cuales representan las protecciones de los extremos de una línea, en un mismo gabinete, comunicarlos y probarlos simultáneamente con un mismo equipo de prueba, brinda un mejor entendimiento y mayor comprensión en la forma de operar del esquema de distancia ante fallas.

- Un esquema de protección de distancia sin el complemento de la teleprotección puede operar de forma aceptable, pero utilizar un canal de comunicación permite ser completamente selectivo y operar de forma más rápida y coordinada brindando mayor seguridad al sistema de potencia.

- En un esquema de protección de distancia usando teleprotección es muy importante que el relé distancia ubique la falla dentro de la zona de protección de manera correcta, aunque no la localice de forma precisa.

-El trabajo de grado fue una oportunidad de profundizar y aplicar los conceptos de protecciones. La aplicación de conceptos de protecciones en el desarrollo del módulo y en la ejecución de las pruebas permitió al estudiante estar en contacto con la realidad de la protección de distancia y la teleprotección como se usan en el sistema de potencia.

### Referencias Bibliográficas

Arévalo, F. W. (2015). *Guía Metodológica para Pruebas de Relés de Protección multifuncional con el Equipo de Inyección Omicron CMC* (Ingeniero Eléctrico). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Carrillo, G. (2019). *Fundamentos de Protecciones Eléctricas*. Editorial académica española.

Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG. Resolución 025. *CÓDIGO DE PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN NACIONAL*. Dada en Santafé de Bogotá, D. C., el día 13 de julio de 1995

DIRECCIÓN INGENIERÍA CORPORATIVA TE – ISA S.A.S. – ISA. (2017). *Informe de Pruebas SAT Sistema de Control y Protecciones, GE-ESPE-GENER-S-02-D0008-VO, 2017*.

Domin, T. & Blackburn, J. (2006). *Protective Relaying, Principles and Applications*. Third Edition. CRC Press.

Mashakbeh, A. S. (2019). *Importance of Electrical Circuits Protection Devices: A Survey Study*. Obtenido de <https://www.ijcaonline.org/archives/volume178/number37/mashakbeh-2019-ijca-919240.pdf>

Omicron Energy, Test Universe. Consultado el 11 de enero de 2021 en <https://www.omicro-nergy.com/es/productos/test-universe/>

Omicron Energy, State Sequencer. Consultado el 14 de enero de 2021 en <https://www.omicro-nergy.com/es/productos/state-sequencer/>

Omicron. *Test Universe: World Leader in Innovative Power System Testing Solutions* (2008)

Short Brochure, OMICRON electronics Corp. USA

Schweitzer Engineering Laboratories - SEL-321. (2001). *Phase and Ground Distance Relay, Directional Overcurrent Relay Fault Locator. Instrucción Manual. Relay Comand Summar.*

Schweitzer Engineering Laboratories Inc – SEL-321. (2001). *Phase and Ground Distance Relay, Directional Overcurrent Relay Fault Locator. Date Sheet.*

SEL-321. Schweitzer Engineering Laboratories. Consultado el 15 de diciembre de 2020 en <https://selinc.com/es/products/321/>

Villarrubia, A. y Romero, A. (2009). *Diseño e implementación de una red de comunicaciones entre subestaciones eléctricas.*

## Apéndice

### Apéndice A. Pruebas estipuladas por ISA para esquemas de distancia

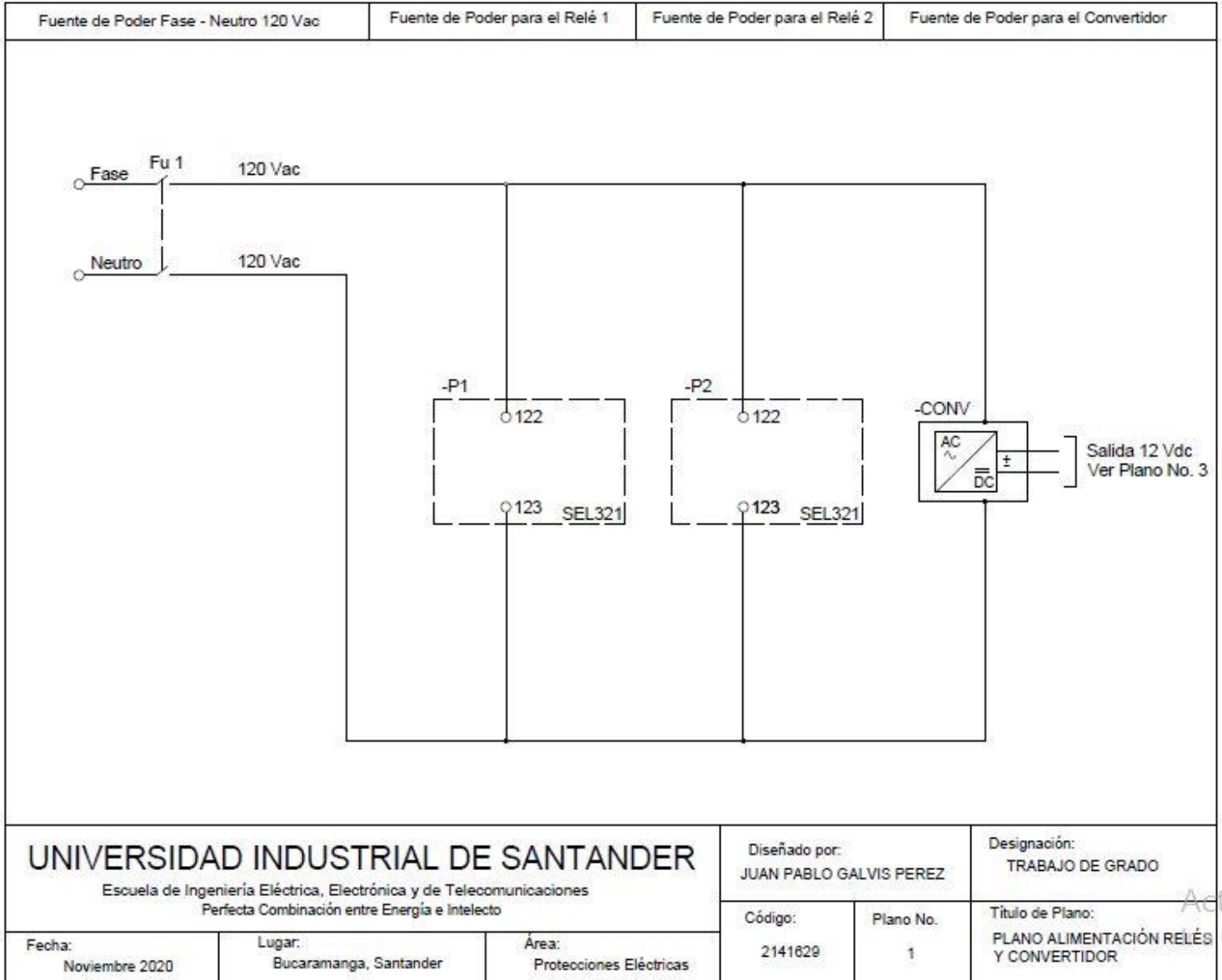
Caso	Sitio de Falla	Fases Falladas	Resistencia Falla ( $\Omega$ )	Operación Esperada de los relés
1	Barra A - Barra B 1% (adelante)	AT	5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
2	Barra A - Barra B 50% (adelante)	BT	5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z1
3	Barra A - Barra B 99% (adelante)	CT	5	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1
4	Barra A - Barra B 1% (atrás)	AT	1	Relé 1: No Opera Relé 2: Z2 Temp
5	Barra A - Barra B 101% (adelante)	CT	1	Relé 1: Z2 Temp Relé 2: No Opera
6	Barra A - Barra B 50% (adelante)	AB	5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z1
7	Barra A - Barra B 50% (adelante)	BCT	5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z1
8	Barra A - Barra B 1% (adelante)	AT	50	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
9	Barra A - Barra B 99% (adelante)	CT	50	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
10	Barra A - Barra B 50% (adelante)	AT BT	5 5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z1

Caso	Sitio de Falla	Fases Falladas	Resistencia Falla ( $\Omega$ )	Operación Esperada de los relés
11	Barra A - Barra C 1% (adelante)	AT	1	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
12	Barra A - Barra D 1% (adelante)	CT	1	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
13	Barra A - Barra B 1% (adelante)	BC	5	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
14	Barra A - Barra B 99% (adelante)	AB	5	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1
15	Barra A - Barra B 1% (adelante)	AT BT	30 30	Relé 1: Z1 Relé 2: Z2 Acel
16	Barra A - Barra B 99% (adelante)	BT CT	30 30	Relé 1: Z2 Acel Relé 2: Z1

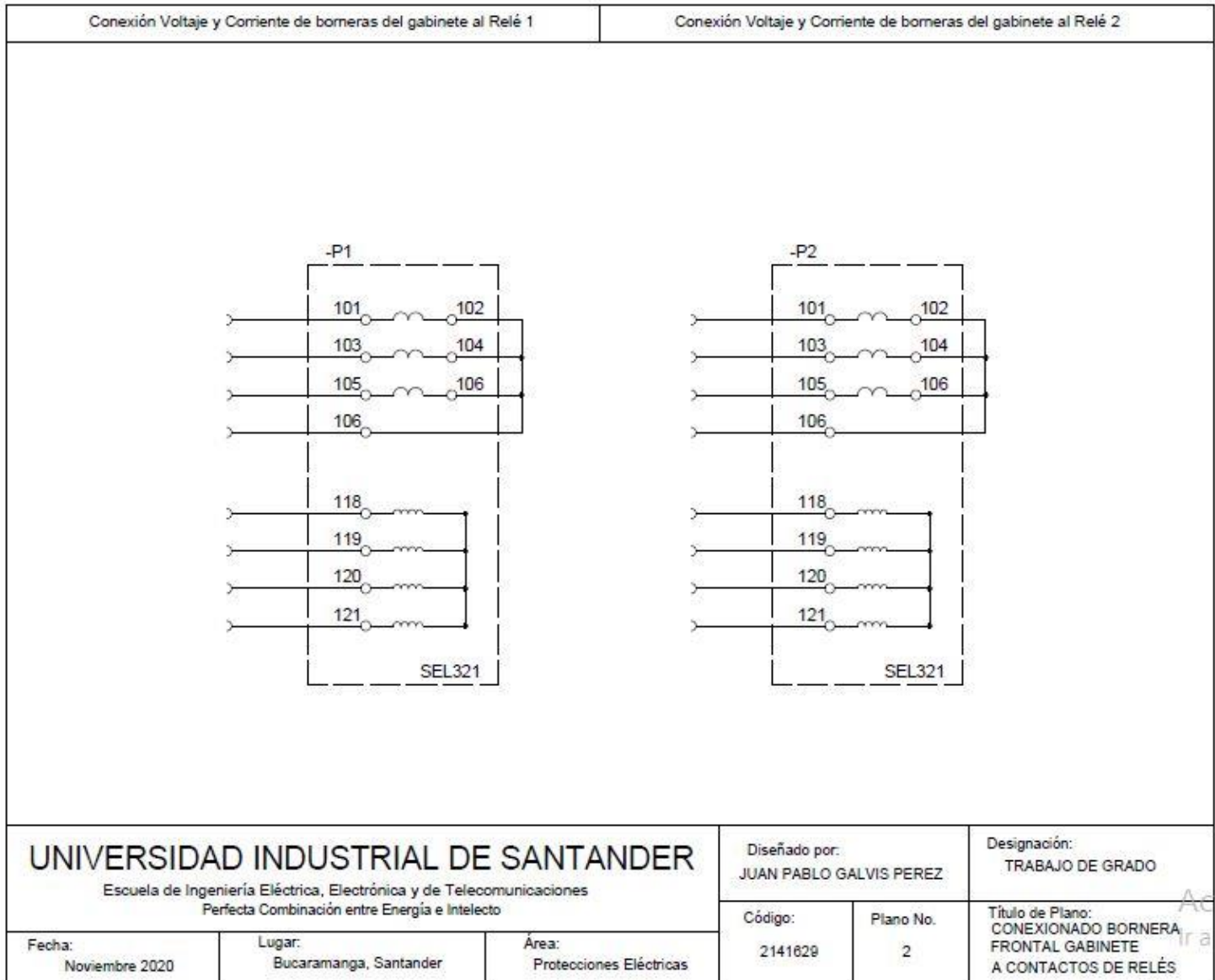
Nota: Adaptado de Pruebas SAT Sistema de Control y Protección, GE-ESPE-GENER-S-00D0016-VO, 2017, Pag. 6

**Apéndice B. Planos eléctricos del esquema de protección**

Plano 1. Plano alimentación a relés y convertidor.

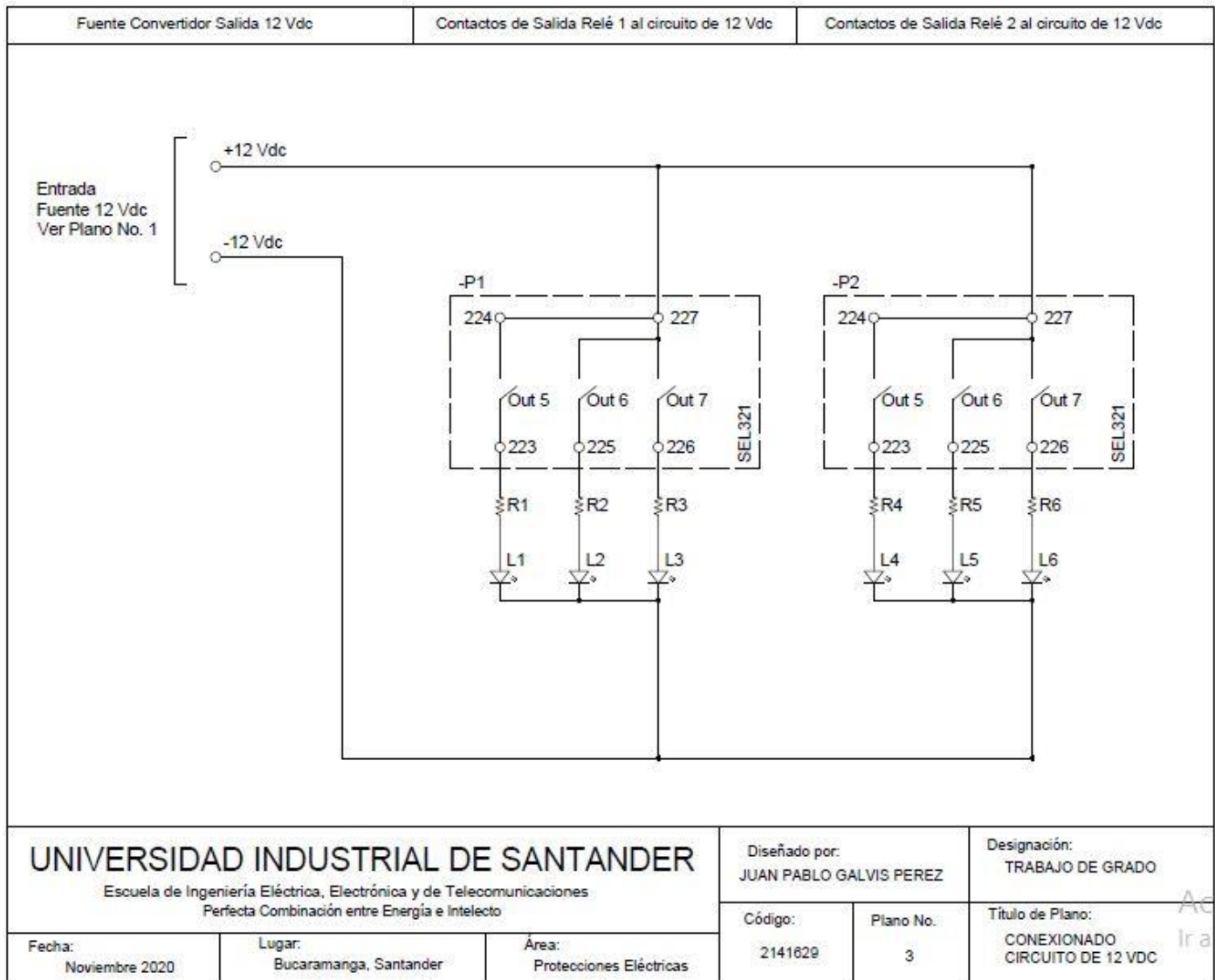


Plano 2. Conexión frontal del gabinete a contactos de relés.



Activa  
Ira Conf

Plano 3. Conexión del circuito de 12 Vdc.



Activa  
Ir a Cor

**Apéndice C. Comandos del relé SEL-321 según nivel de acceso****SEL-321-1 RELAY COMMAND SUMMARY****Access Level 0**

ACCESS Answer password prompt (if password protection is enabled) to enter Access Level 1. Three unsuccessful attempts pulse ALARM contacts closed for one second.

**Access Level 1**

2ACCESS Answer password prompt (if password protection is enabled) to enter Access Level 2. This command always pulses the ALARM contacts closed for one second.

BREAKER Answer password prompt (if password protection is enabled) to enter breaker control Access Level B. Allows execution of OPEN, CLOSE, GROUP N, and Access Level 1 commands.

COMM Displays MIRRORED BITS™ communications summary data.

COMM C Clears MIRRORED BITS communications data.

COMM L Displays MIRRORED BITS communications data.

DATE Shows or sets date. DAT 2/3/92 sets date to Feb. 3, 1992. IRIG-B time code input overrides existing month and day settings. DATE pulses ALARM contacts when year entered differs from year stored.

EVENT Shows event record. EVE 1 shows newest event; EVE 12 shows oldest. Default report is 1/4-cycle standard, EVE n L=1/16-cycle standard, EVE n R=1/16-cycle unfiltered, EVE n C=1/16-cycle SEL-5601 Event Report, EVE n U=1/16-cycle unfiltered.

GROUP Shows setting group to use in lieu of active group.

HISTORY Shows DATE, TIME, ZONE/TYPE, LOCATION (distance), GROUP, and front panel targets for the last 40 events.

IRIG Force immediate attempt to synchronize internal relay clock to time code input. Reports ID, Date, Time, or Error Message.

METER Displays meter data.

QUIT Returns control to Access Level 0; returns target display to Relay Targets TAR O. Displays ID, Date, and Time.

SHOWSET n Shows active group settings for Group n. Shows active relay group settings if n omitted.

SHOWSET C Shows calibration settings.

SHOWSET G Shows global settings.

SHOWSET L Displays active logic settings. Append group number (1-6) to display that group's logic settings.

SHOWSET P Shows active port's settings. Append port number (1-3) to display that port's settings.

STATUS Shows self-test status.

TIME	Shows or sets time. TIM 13/32/00 sets clock to 1:32:00 PM. IRIG-B synchronization overrides this setting.
TRIGGER	Triggers an event report.

**Access Level B**

CLOSE	Asserts the CLOSE condition.
GROUP	Specifies currently selected group. Use GROUP n to change selected group to n.
OPEN	Asserts trip condition.

**Access Level 2**

CONTROL n	Allows you to control Relay Word bits RB1 through RB16. (SEL-321-1 only)
COPY m n	Copies settings and logic from setting Group m to Group n.
LOOP	Enables MIRRORED BITS loop back mode for testing communications
LOOP R	Disables MIRRORED BITS loop back mode.
PASSWORD	Shows or sets passwords. Command pulses ALARM contacts closed momentarily after password entry. PAS 1 OTTER sets Level 1 password to OTTER. PAS 2 TAIL sets Level 2 password to TAIL.
PULSE n t	Closes an output contact for testing and control purposes. (SEL-321-1 only)
RDMEM m	Use to download contents of selected memory areas. m = RAM, EEPROM, or ALL.
SET n	Use to enter group settings. If n argument omitted, edits active group.
SET G	Use to enter new global settings.
SET L	Use SET L n to edit Group n's logic settings. Selects active logic group to edit.
SET P	Use SET P n to edit Port n's settings. Changes active port's settings.
TARGET	Shows target values, and defines target group for display. TAR n displays target row n. TAR R command resets front panel targets to TAR 1.

Nota: Adaptado de Phase and Ground Distance Relay. SEL-321 Instrucción Manual. Relay Comand Summary Pag 395-396